

УДК 69.002.5

**ГОМОГЕНИЗАЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИЕЙ***А.Г. Михайлов¹, И.И. Демченко², О.С. Игнатова²*¹ *Институт химии и химической технологии СО РАН (г. Красноярск)*² *ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск)*© Михайлов А.Г., Демченко И.И.,
Игнатова О.С., 2025

Аннотация. Предложен комплексный вибрационно-акустический метод гомогенизации дисперсных материалов на основе процесса дезинтеграции. Разработано теоретическое обоснование дезинтеграции акустической обработкой. Проведены лабораторные испытания дисперсного глинистого материала методом акустической дезинтеграции с определением основных параметров. Отмечено, что в основе метода заложен и реализован принцип обработки дисперсных материалов вибрационными и акустическими колебаниями. Установлено достижение полной гомогенности тонкодисперсного глинистого материала в период двухминутной обработки. Зафиксировано достижение как минимум 90 % гомогенности смеси разных классов крупности (класса бетонов) за тот же двухминутный период.

Ключевые слова: гомогенизация, смесь, лабораторный стенд, амплитуда, вибрационные, акустические колебания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-1-25-33**ВВЕДЕНИЕ**

Полная гомогенизация смесей, особенно сложных по минеральному составу, крупности, удельному весу, поверхностным свойствам, является главной гарантией качества результата. Гомогенизация твердеющих смесей важна не только для равномерного распределения компонентов, но и для скорости приготовления. Широко применяют такие устройства приготовления строительных смесей, как механические смесители (типа одновальных бетоносмесителей) [1, 2]. Более эффективны, но реже используются вибросмесители (типа СмВ) [3] и двусосные смесители [4] (их применяют для гомогенизации сухих тонкодисперсных порошков). Тенденция развития производства сухих строительных смесей связана с недостатками растворных смесей, создающихся непосредственно на строительной площадке: последние имеют низкое качество из-за ошибок дозирования добавок, невысокого срока годности и т.д. Производство сухих строительных смесей практически полностью вытеснило приготовление смесей на строительных площадках. Главная особенность сухих строительных смесей состоит в том, что их создание возможно только на специальных заводах. В таком подходе есть преимущество только при развитой транспортной инфраструктуре. Если таковой нет, то отсутствие мобильных смесительных комплексов значительно снижает эффективность строительных работ в целом. Существенная проблема применения широко распространенных бетоносмесителей заключается в том, что не достигается полной гомогенностиготавливаемых смесей. Механическая подготовка смесей имеет поверхностное

воздействие на распределение частиц компонентов, что может не обеспечивать равномерное распределение тонкодисперсных частиц в объеме. Особенно сложно получить гомогенную массу при смешивании тонкодисперсных компонентов, имеющих тенденцию к слеживаемости. Разрушение агрегатов при механической обработке практически невозможно. Необходим метод, позволяющий осуществлять разрушение, дезинтеграцию агрегатов слежавшихся компонентов в процессе гомогенизации. К числу известных методов, способных обеспечить данную процедуру, а также подготовку материала к стадии гомогенизации, относится акустический [5]. Акустическая обработка входит в число способов дезинтеграции тонкодисперсных материалов в инфразвуковом и звуковом диапазонах. Данный способ является более предпочтительным, так как воздействие оказывается за счет акустических волн, распространяющихся по всему объему с низким коэффициентом затухания [6]. Это позволяет разрушать межмолекулярные связи одновременно, в том числе и в области внутри самих агрегатов. Каждая волна при прохождении по обводненной структуре ведет к разрушению всех межчастичных связей. Внутри глинистых агрегатов на глубину полного затухания волн волновые колебания «раскачивают» частицы в структуре агрегата, разрывая их связи. Следует учитывать, что поверхность частиц смеси является гидрофильной. В силу потенциально высокой тиксотропности таких частиц при высокой дисперсности после снятия волновой нагрузки связи восстанавливаются с той же скоростью, с которой были разрушены [7]. Только при наличии доступа дополнительной свободной воды к области освобожденных частиц разорванные межчастичные связи будут замыкаться на данную воду. В этом случае происходит полная дезинтеграция агрегатов материала [8], что обуславливает высокодинамичное достижение гомогенности смеси. Акустический метод дезинтеграции материала наиболее перспективен для процесса гомогенизации по причине высокой скорости, необходимой для обеспечения требуемой технологичности процесса в автоматизированных системах строительного процесса. Основным недостатком способа можно считать лишь отсутствие практического использования в промышленных масштабах при подготовке гомогенных смесей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

Был разработан и изготовлен лабораторный стенд, работающий по принципу возбуждения вибрационно-акустических колебаний низкочастотного диапазона [9]. По конструкции эта установка (рис. 1) предназначена для акустической обработки тонкодисперсного материала как в циклическом, так и в поточном режимах. Общие характеристики установки представлены в табл. 1. Лабораторный ударно-акустический стенд оборудован измерительными приборами (амперметром, электронным вольтметром, тонометром и тахометром) для снятия показаний во время процесса дезинтеграции. Над источником вибрационно-акустических колебаний установлена рабочая камера с эластичным дном для герметичной изоляции области обработки от механического источника и для передачи вибрационных и акустических импульсов в область рабочей камеры. Рабочая камера оборудована местом для загрузки материала, в противоположном конце – разгрузочным люком. Для работы в поточном режиме область выгрузки материала оборудована сифонной подачей пульпы с направляющим лотком, выводящим материал за пределы установки.

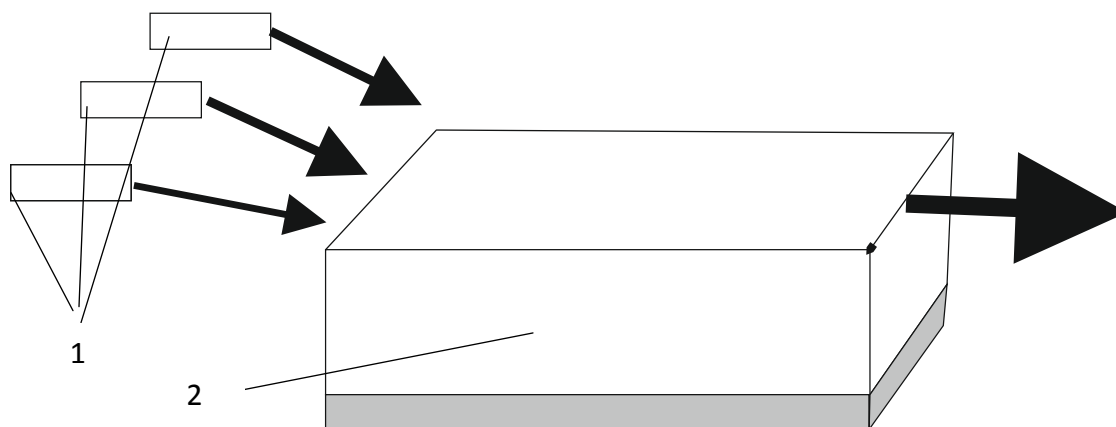


Рис. 1. Схема лабораторного ударно-акустического гомогенизатора:
1 – дозаторы компонентов; 2 – рабочая камера вибрационно-акустического стенда

Таблица 1

Параметры лабораторной ударно-акустической установки

Параметры	Единицы измерения	Значение
Производительность	м ³ /ч	0,025–0,1
Частота колебаний	Гц	10–100
Амплитуда колебаний	мм	5–40
Расход воды	м ³ /м ³	4,0–0,5
Крупность исходного материала	мм	≤ 5
Потребляемая мощность	кВт	0,3–1,5
Масса	кг	60

Основой установки является источник акустических колебаний. Он представляет собой набор пластин из пружинной стали, установленных в одной плоскости и закрепленных торцами на поворотных валах. Поворотные валы соединены через эксцентриситет с центральным валом посредством кривошипно-шатунного механизма, а центральный вал – с электродвигателем постоянного тока через ременную передачу. Весь источник установлен на жесткой раме, выполненной из швеллеров. На раме также закреплен и двигатель.

Механизм работы источника колебаний заключается в следующем. Крутящий момент от электродвигателя через ременную передачу передается на центральный вал. Центральный вал через кривошипно-шатунный механизм поворачивает боковые поворотные валы, расположенные на противоположных сторонах под рабочей камерой гомогенизатора, одновременно и синхронно в разные стороны на определенный угол, задаваемый эксцентриситетом.

За счет высокой скорости колебаний пластин, превышающей скорость распространения звука в водной среде, формируются акустические волны. В связи с этим источник гомогенизатора позволяет проводить обработку материала как ударными волнами, так и «медленными» колебаниями. Для реализации формирования разных видов волновых колебаний предусмотрено два вида торцевого крепления упругих пластин в поворотных валах. При формировании «медленных» колебаний торцевые концы пластин устанавливаются на боковых поворотных валах выше их центральных осей. При работе встречный синхронный поворот боковых валов позволяет сжать упругие пластины, формируя их изгиб с образованием заданной амплитуды. Размер задаваемой амплитуды определяется геометрической зависимостью между хордой и длиной дуги:

$$a = \sqrt{3 \frac{l^2 - m^2}{16}},$$

где a – амплитуда; l – длина дуги; m – длина хорды.

Для формирования ударных волн торцы упругих пластин закреплены в плоскости осей боковых поворотных валов. Упругие пластины при этом крепятся таким образом, что в исходном положении они находятся в выведенном из равновесия состоянии за счет предварительного осевого сжатия. При повороте боковых валов они одновременно поворачивают пластины через их жесткое торцевое крепление на угол, превышающий среднее положение их неустойчивого равновесия. После прохождения пластинами средней линии они резко прогибаются. Если в исходном состоянии пластины занимают выпуклое положение, то после прогиба они займут выгнутое. При этом сам момент прогиба (прищелкивание) осуществляется с высоким ускорением, достигающим на пластинах толщиной 4 мм значения 250 м²/с. Прогиб с прищелкиванием сопровождается генерированием волнового импульса высокого давления в окружающую водную среду. Низкая инерционность механической системы ударно-акустического источника позволяет генерировать низкочастотные колебания пластин в диапазоне 18–23 Гц со скоростями в моменты прищелкивания, достаточными для формирования в водной среде ударных волн. За счет высоких амплитудных колебаний источника формируется «виброкипящий» режим перемешивания в рабочей камере. Скорость гомогенизации материала возможна при наличии между частицами дополнительной воды, что обеспечивается интенсивным «виброкипящим» режимом. Для доступа свободной воды к поверхностям дисперсных частиц необходимым условием является взвешенное состояние даже слежавшихся агрегатов. Лабораторный стенд гомогенизации позволяет менять амплитудно-частотные параметры. Подбор необходимой амплитуды проводится на основании зависимости величины изгиба пластины от ее осевого сжатия (рис. 2). Амплитуда колебаний более 10 мм при низких частотах обеспечивает такие условия. Поскольку каждое колебательное движение пластин завершается ускорением (прищелкиванием), обеспечивающим достаточный импульс для формирования волнового колебания вплоть до ударной волны в пульпе, это достаточно значимо поддерживает и даже усиливает взвешенное состояние твердых частиц и их агрегатов в водной среде.

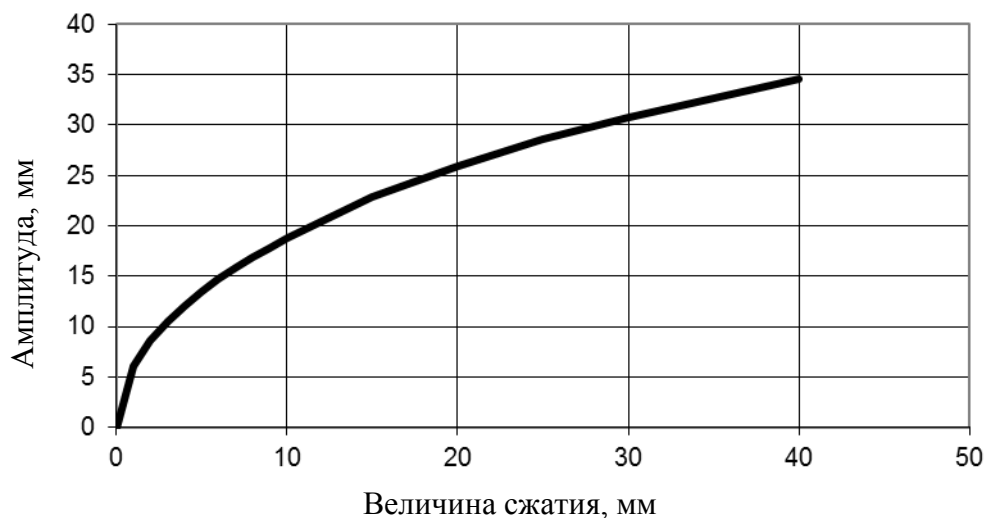


Рис. 2. Влияние величины осевого сжатия на амплитуду

Акустическое поле в тонкодисперсном материале с естественной влажностью (например, влажностью $\sim 35\%$) в начальный период приводит его в состояние тиксотропного разжижения, сопровождающегося псевдотекучестью массы с частичным выделением связанной воды на поверхность. Визуально наблюдают следующее: в начальный период обработки идет стадия разрыва связей, частицы приобретают относительную подвижность. Слежавшиеся агрегаты материала естественной влажности приобретают свойство натуральной текучести и теряют свою первоначальную форму. Смежные разрозненные куски агрегатов объединяются в массу и равномерно растекаются по объему рабочей камеры. В момент снятия акустического поля без добавления дополнительной воды смешиваемый тонкодисперсный материал (в силу своих тиксотропных свойств) сразу же (мгновенно) восстанавливает нарушенные связи и получает прежние свойства [8], т.е. приобретает агрегатную структуру. Достичь полной гомогенизации можно и без добавления «лишней» свободной воды, если в начальный момент процесса добавлено расчетное количество воды, однако только при условии наличия акустического поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные в широком диапазоне управляемых параметров эксперименты свидетельствуют о том, что гомогенное состояние может быть надежно обеспечено при добавлении воды до достижения значения естественной влажности при конкретной размерности дисперсного материала. Стадия «виброкипящего» состояния предваряет состояние максимального разрыхления смеси, в том числе слежавшихся агрегатов. В процессе обработки мелкораздробленные газовые пузырьки преимущественно локализуются в нижних слоях после первых 30 с акустической обработки. Вслед за этим состоянием происходит взрывообразное «разлетание» частиц по всему обрабатываемому объему пульпы, устанавливается «виброкипящий» режим перемешивания в рабочей камере. В этот период обработки у частиц полностью отсутствуют структурные связи, поэтому частицы хаотично перемещаются внутри обрабатываемого объема рабочей камеры. Достичь этого можно только при добавлении свободной воды в процесс в размере не менее величины естественной влажности. Для процесса безвозвратной дезинтеграции

до состояния свободного текучего состояния немаловажным условием является добавление свободной воды, превышающее как минимум 0,5 объема твердого состояния (с учетом естественной влажности). Такое состояние может быть обеспечено при условии замыкания у частиц всех поверхностных связей на свободную воду. Теоретический расчет необходимого количества дополнительной воды приведен на рис. 3.

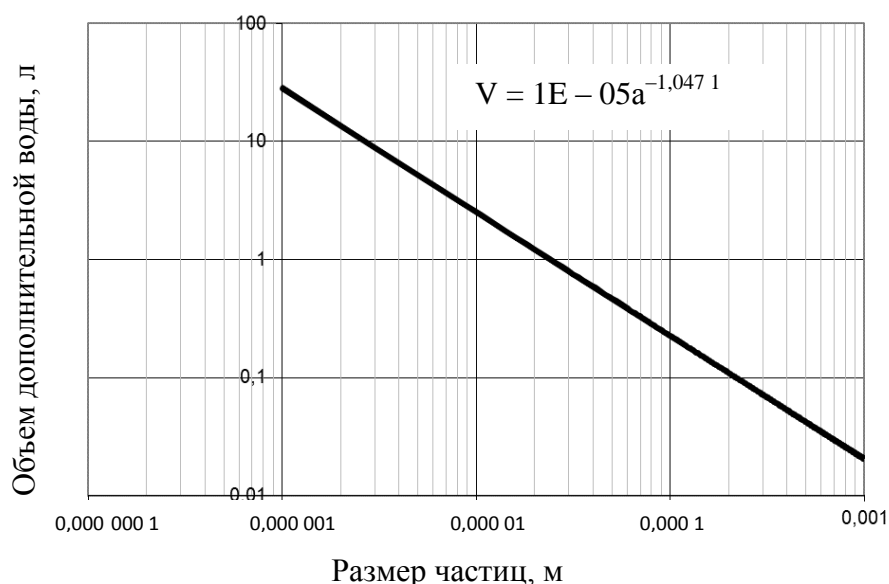


Рис. 3. Зависимость объема добавленной воды от размера частиц

Экспериментально на лабораторной установке проводили исследования гомогенизации в водной среде двухкомпонентного и трехкомпонентного материала в условиях разных управляемых амплитудно-частотных параметров. Расчетное теоретическое значение необходимого объема дополнительной воды не может обусловить надежное достижение абсолютной гомогенизации в силу высокой неоднородности и хаотичного перемещения частиц при «виброкипящем» состоянии, но обуславливает возможность сохранности дезинтегрированного состояния после снятия акустической нагрузки. При снятии акустического воздействия часть смежных поверхностей частиц может находиться в пределах рыхлосвязанного или даже прочносвязанного слоя водной оболочки. Важно, что значение необходимой дополнительной воды следует получать в ходе экспериментальных исследований для определенного обрабатываемого материала. Для конкретных составов смесей следует подбирать соотношение с водой на основе средней крупности частиц смеси по зависимости, представленной на рис. 3. В качестве компонентов для двухкомпонентной смеси были использованы материалы по соотношению 1 : 1 агрегатированной каолиновой глины естественной влажности (37 %) с размером частиц 5–10 мкм и объемным весом $2,23 \text{ г/см}^3$, а также сухого кварцевого песка с размером частиц 0,8–1,2 мм и объемным весом $1,54 \text{ г/см}^3$. В ходе экспериментов по гомогенизации трехкомпонентной смеси смешивали в равных объемах материал агрегатированной каолиновой глины, кварцевый песок и дробленый магнетит (железная руда) узкого класса крупности (0,5–1,0 мм) с объемным весом $4,12 \text{ г/см}^3$. К двухкомпонентной и трехкомпонентной смеси добавляли воду в объеме 1 : 1.

Оценка полного процесса гомогенизации была получена в результате экспериментальных исследований. Эксперименты проводили на лабораторной ударно-акустической установке. При обработке использовали образцы только однородного минералогического состава естественной влажности. Поскольку скорость процесса дезинтеграции высокая и зависит от уровня интенсивности излучения, оценку степени дезинтеграции проводили через каждые 30 с.

Результат полноты гомогенизации определяли взвешиванием 1 см³ образца полученной смеси, взятого сразу после прекращения обработки. Отклонение веса полученного образца от расчетного значения как в сторону превышения, так и в сторону снижения фиксировалось в процентах. Данные экспериментального изучения параметров дезинтеграции наиболее распространенных природных типов глин приведены в табл. 2. Результаты весьма убедительно показывают преимущества предлагаемого метода гомогенизации. Так, абсолютная гомогенизация смеси проходит ряд стадий: от прочно-связанного состояния связей между частицами в агрегатах до полного смачивания всех поверхностей частиц свободной водой. Акустическая обработка кратно интенсифицирует кинетику процесса смешивания.

Таблица 2

Эффективность гомогенизации

№ п/п	Показатели			
	Частота, Гц	Амплитуда, мм	Время обработки, с	Степень гомогенизации, %
Двухкомпонентная смесь				
1	15	5	30	19,36
2	30	5	60	61,06
3	15	5	120	77,86
4	30	10	30	48,56
5	15	10	60	55,36
6	20	10	120	98,84
7	15	15	30	32,86
8	40	15	60	99,67
9	15	15	90	91,36
10	30	15	120	99,81
Трехкомпонентная смесь				
11	15	5	30	22,26
12	30	5	75	73,70
13	15	5	90	91,26
14	30	10	30	43,66
15	40	10	75	95,36
16	20	10	120	100,0
17	15	15	30	37,95
18	40	15	75	98,60
19	15	15	120	100,0
20	30	15	120	100,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате лабораторных исследований в области гомогенизации разных компонентных смесей было установлено, что при ударно-волновом воздействии происходит интенсивное смешивание, кратно превосходящее механическое. Было отмечено, что первоначальной фазой является тиксотропное разжижение в водной среде, а затем следует виброкипящее состояние, где происходит разрушение связей между частицами в агрегатах. Эффективность процесса гомогенизации в ударно-волновой установке зависит от отношения твердого к жидкому, от интенсивности волновой и вибрационной нагрузки, времени обработки. Минимальное отношение твердого к жидкому в материале (добавление воды) следует оценивать на основе крупности смешиваемого материала. Было экспериментально обосновано влияние амплитудно-частотной характеристики и времени воздействия на эффективность дезинтеграции, а также установлено, что в течение первой минуты обработки может быть достигнута практически полная гомогенизация смеси (даже с применением в качестве компонента слежавшихся агрегатов). Экспериментальные исследования подтвердили возможность применения ударно-волнового принципа приготовления гомогенных смесей, что может способствовать развитию направления использования мобильных гомогенизаторов.

Исследование выполнено при поддержке проекта № FWES-2021-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапова Е.Н. Технология сухих строительных смесей. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 376 с.
2. Ревич Я.Л., Рудомин Е.Н., Мажайский Ю.А., Стаценко А.С., Основина Л.Г., Мальцев Н.В., Основин С.В. Технология строительного производства. М.: Ассоциация строительных вузов, 2011. 376 с.
3. Корнеев В.И., Зозуля П.В., Медведева И.Н., Богоявленская Г.А., Нуждина Н.И., Брыков А.С. Технология сухих строительных смесей. М.: Лань, 2024. 372 с.
4. Баженов Ю.М., Коровяков В.Ф., Денисов Г.А. Технология сухих строительных смесей. М.: АСВ, 2015. 112 с.
5. Горная энциклопедия: в 5 т. М.: Советская энциклопедия, 1986. Т. 2. 575 с.
6. Хрунина Н.П. Создание систем дезинтеграции глинистых песков и их гидросмесей на основе дополнительного звукового воздействия // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № 4. С. 197–202.
7. Урьев Н.Б., Иванов Я.П. Структурообразование и реология неорганических дисперсных систем и материалов. М.: Химия, 1991. 210 с.
8. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 423 с.
9. Патент РФ 20151544437. *Дезинтеграционное устройство* / Михайлов А.Г., Грищенко А.Н., Мачнев Ю.И., Соколов С.Н., Довбаш В.В. Заявл. 17.12.2015. Оpubл. 02.07.2018, Бюл. № 19.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МИХАЙЛОВ Александр Геннадьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт химии и химической технологии СО РАН, 660036, Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50, стр. 24. E-mail: mag@icct.ru

ДЕМЧЕНКО Игорь Иванович – доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: ademchenko@sfu-kras.ru

ИГНАТОВА Ольга Сергеевна – кандидат технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: OIgnatova@sfu-kras.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Михайлов А.Г., Демченко И.И., Игнатова О.С. Гомогенизация дисперсных материалов виброакустической дезинтеграцией // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 1 (25). С. 25–33.

HOMOGENIZATION OF DISPERSED MATERIALS BY VIBRO-ACOUSTIC DISINTEGRATION

A.G. Mikhailov¹, I.I. Demchenko², O.S. Ignatova²,

¹ *Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS (Krasnoyarsk)*

² *FGAOU VO «Siberian Federal University» (Krasnoyarsk)*

Abstract. A complex vibration-acoustic method of homogenization of dispersed materials based on the disintegration process is proposed. Theoretical substantiation of disintegration by acoustic treatment is developed. Laboratory tests of dispersed clay material by the method of acoustic disintegration with determination of the main parameters have been carried out. It is noted that the method is based on the principle of processing of dispersed materials by vibration and acoustic vibrations. The achievement of complete homogeneity of fine dispersed clay material during the period of two-minute treatment was established. Achievement of at least 90% homogeneity of the mixture of different size classes (class of concrete) during the same two-minute period is fixed.

Keywords: disintegration, clay, laboratory installation, vibration, acoustic, oscillation.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MIKHAILOV Alexander Gennadievich – Doctor of Technical Sciences, Chief Scientific Associate, Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS, 50, building 24, Akademgorodok St., Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: mag@icct.ru

DEMCHENKO Igor Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: ademchenko@sfu-kras.ru

IGNATOVA Olga Sergeevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: OIgnatova@sfu-kras.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Mikhailov A.G., Demchenko I.I., Ignatova O.S. Homogenization of dispersed materials by vibro-acoustic disintegration // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 1 (25), pp. 25–33.