

*Шарапов Р.Р., д-р техн. наук, проф.,
Беседин П.В., д-р техн. наук, проф.,
Бойчук И.П., канд. техн. наук, доц.,
Козлов В.К., аспирант,
Андрущак С.В., аспирант*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ ШЛАМОВ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

kozlov-vk@bk.ru

В настоящее время важным направлением исследований является разработка методов энерго-сбережения для цементной промышленности. Методы интенсификации транспортировки шлама на основе механического и механохимического воздействий эффективно влияют на увеличение подвижности и улучшение реологических свойств цементных шламов. Данная работа посвящена разработке математической модели истечения шлама из цилиндрической емкости под действием нестационарного силового воздействия. Полученная модель позволяет определить условие, при котором начнется течение, распределение скорости шлама при вибрационном воздействии на него, а также зависимость скорости от частоты колебаний и механических характеристик.

***Ключевые слова:** коагуляционные структуры, цементный шлам, дисперсионная среда, деформация.*

Введение. Цементные сырьевые шламы являются полидисперсными и полиминеральными суспензиями. В данных суспензиях твердая фаза представлена частичками известняка, кварца, глины и др. минералов, а жидкая – водой. Состав шламов определяет реологические свойства шлама. С этими свойствами тесно связана агрегативная устойчивость материала. Изучение реологических параметров шлама показало, что он является типичной вязкопластичной суспензией с достаточно высокими значениями предельного напряжения сдвига и зависимостью эффективной вязкости от градиента скорости сдвига, присущей для сильно структурированных дисперсий. В данных суспензиях вследствие высокой концентрации дисперсных фаз в жидкой дисперсионной среде возникают термодинамические устойчивые пространственные коагуляционные структуры [1]. Эти коагуляционные структуры имеют некоторые особенности: фиксацию частиц твердой фазы в жидкой дисперсионной среде, на расстоянии ближней и дальней коагуляции, проявление быстрой и замедленной упругости, ползучести и малой вязкости, тиксотропную обратимость (способность после разрыва под действием приложенного напряжения восстанавливаться). Способность коагуляционных структур восстанавливаться после механического разрушения вызвана тем, что частицы, образующие такие структуры, связаны между собой ван-дер-ваальсовыми силами через тонкие прослойки жидкой среды [2]. Эти прослойки обеспечивают возможность восстановления контактов в результате благоприятных соударений при броуновском движении. Для

тиксотропного восстановления коагуляционных структур нужна относительно невысокая прочность структуры, ее способность к значительным остаточным деформациям, а также наличие коллоидно-дисперсной фракции частиц, интенсивно участвующих в тепловом движении. Данная фракция является как бы склейкой, которая связывает пространственную сетку грубодисперсных частиц, образующих узлы такой сетки. Также тиксотропному упрочнению способствуют вытянутая форма частиц и достаточно высокая степень лиофильности их поверхности.

Способность дисперсных систем при воздействии внешних сил к деформированию и течению имеет большое значение при транспортировке цементного шлама. Чтобы заставить суспензию течь, нужно к ней приложить определенное усилие. Основные исследования структурированных дисперсных систем рассматривают реологические свойства этих систем при сдвиговой деформации под действием приложенных сил. При этом отмечается [3], что на свойствах дисперсных структур с высоким содержанием твердой фазы при малом содержании жидкой наиболее эффективно сказывается вибрационное смешение. Разработке модели течения шлама при вибрационном воздействии на него и посвящена данная работа.

Деформация и механическое разрушение цементных сырьевых шламов.

Цементные сырьевые шламы относятся к классу неньютоновских вязкопластических сред. В [4] указывается, что измерения методом тангенциального смещения рифленной пластинки на приборе Вейлера – Ребиндера показало суммар-

ную деформацию, развивающуюся за время t как сумму: 1) быстрой эластической деформации, характеризующей упругие свойства коагуляционной структуры, 2) медленной вязко – упругой деформации – результата скольжения частиц дисперсной среды относительно друг друга без разрыва молекулярной связи, 3) пластической деформации, характеризующей необратимостью. Развитие пластической деформации

определяется переходом через условный предел текучести.

Для изучения свойств сложных многофазных систем с неизвестной структурой вводятся механические модели, причем предполагается, что эта модель ведет себя как реальная система [5–8]. Реологическая схема шлама может быть представлена суммой моделей Гука, Кельвина – Фойгта и Шведова – Бингама (рис. 1).

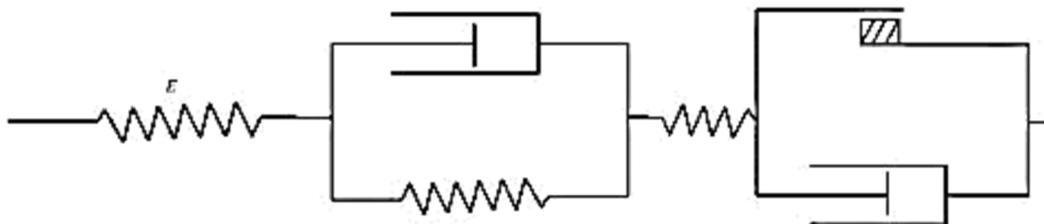


Рис. 1. Механическая модель цементного сырьевого шлама

Суммарная деформация, развивающаяся за время t , включает все виды деформации и равна.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right) + \frac{\sigma - \sigma_k}{\eta_1} t \quad (1)$$

где σ – тензор напряжений, E – модуль упругости, ε – тензор деформации, η – вязкость, σ_k – предел текучести.

Изменение состояния шлама возможно при разрушении его структуры. Разрушение может происходить при сдвиговом и вибрационном смещении. Для дисперсных структур с высоким содержанием твердой фазы при малом содержании жидкой вибрационное перемешивание наиболее эффективно сказывается на их свойствах [3].

Для изучения ответа шлама на частотное возмущение используем метод частотных характеристик [9], разработанный для рассмотрения поведения вязко – упругих материалов. Известно, что если к нелинейному вязко – упругому телу приложить синусоидальные напряжения, то деформация во времени тоже будет изменяться синусоидально.

Пусть деформация изменяется по синусоидальному закону

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t). \quad (2)$$

Для шлама связь между напряжением и деформацией может быть найдена из уравнения (1)

$$\sigma = \left(\varepsilon + \frac{\sigma_k}{\eta_1} t \right) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right)}{E_2} + \frac{t}{\eta_2} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Если деформация изменяется по синусоидальному закону (2), то

$$\sigma(t) = \frac{\left(\varepsilon_0 \sin(\omega t) + \frac{\sigma_k}{\eta_1} t \right)}{E_1^{-1} + \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right) E_2^{-1} + t \cdot \eta_2^{-1}}. \quad (4)$$

При продолжительном возмущении напряжение стремится к предельному напряжению сдвига

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma(t) = \sigma_k. \quad (5)$$

Тогда среднее значение отношения деформации к напряжению (затухание)

$$\left\langle \frac{\varepsilon}{\sigma} \right\rangle_{t \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (6)$$

Это означает разрушение коагуляционных структур и разрыв связей между частями. Отсюда следует, что шлам под действием вибрации приобретает свойства ньютоновской жидкости.

Для стационарных жидкостей реологическое уравнение, связывающее касательное напряжение со скоростью сдвига, записывается в виде

$$\dot{\varepsilon} = f(\sigma). \quad (7)$$

Рассмотрим движение шлама в установке при воздействии вибрации [10] (рис. 2). Введем систему координат $Oxuz$ так, как показано на рисунке. Считаем, что течение происходит в плоскости Oxz .

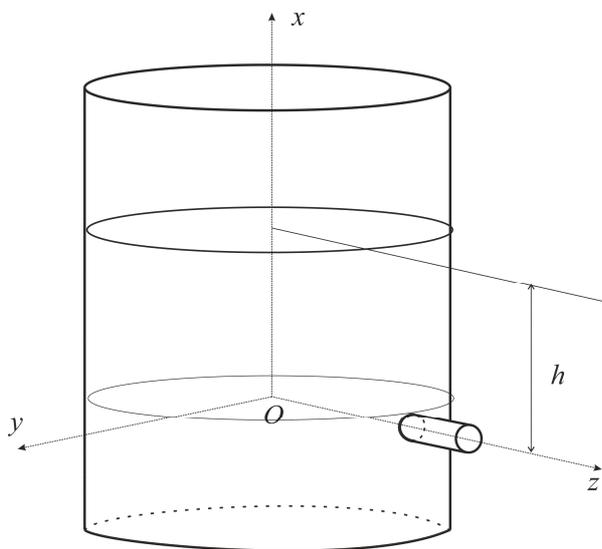


Рис. 2. Схема установки для изучения свойств суспензий

Для течения в цилиндрической емкости

$$-\frac{dv}{dx} = f(\sigma), \tag{8}$$

где v – скорость течения. Для шлама, используя (3), имеем

$$-\frac{dv}{dx} = \frac{1}{\eta_2} \frac{\left(\varepsilon_0 \sin(\omega t) + \frac{\sigma_k}{\eta_1} t \right)}{E_1^{-1} + \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t \right) \right) E_2^{-1} + t \cdot \eta_2^{-1}} \tag{9}$$

Проинтегрировав уравнение (9), получим

$$v = v_0 + \frac{1}{\eta_2} \frac{\left(\varepsilon_0 \sin(\omega t) + \frac{\sigma_k}{\eta_1} t \right)}{E_1^{-1} + \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t \right) \right) E_2^{-1} + t \cdot \eta_2^{-1}} (h-x) \tag{10}$$

В формуле (10) v_0 является, в общем случае, скоростью на свободной поверхности шлама. Скорость течения v показана на рис. 3. На рис. 4 представлены кривые одинаковой по величине скорости (изотахи).

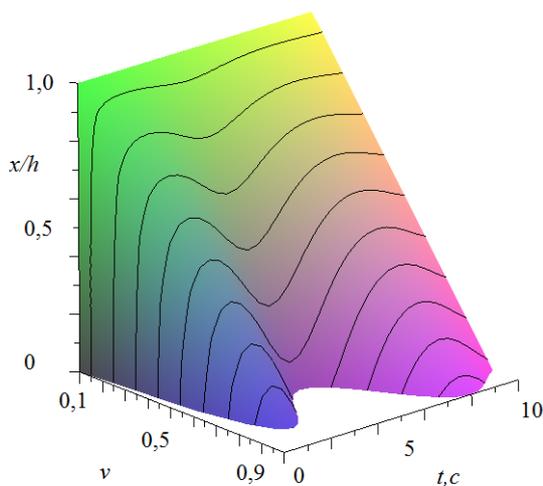


Рис. 3. Поверхность скорости течения v

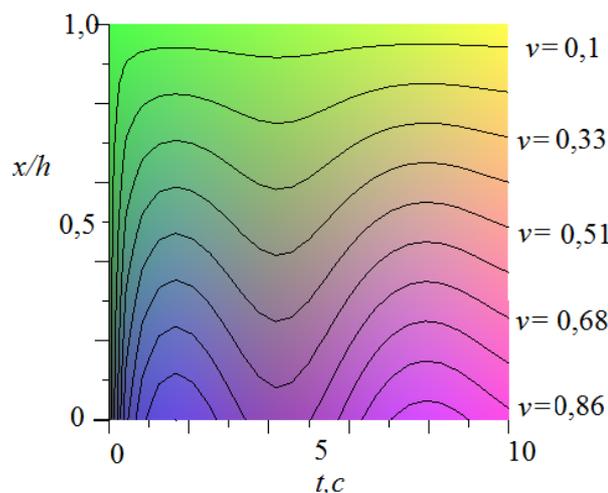


Рис. 4. Кривые одинаковой по величине скорости

Рисунки 3, 4 показывают изменение во времени скорости течения шлама от оси трубы до свободной поверхности. Из рисунков видно, что основное колебание скорости происходит на оси трубы или около нее, т.е. в зоне действия рабочего органа. Влияние рабочего органа на вертикальные слои шлама следующее: падение скорости в 2 раза происходит в пределах около 40 % расстояния от оси трубы до свободной поверхности. К свободной поверхности горизонтальная скорость убывает до нуля.

Выражение (10) показывает, что со временем скорость v выходит на стационарное значение и стремится к некоторому значению (рис. 5). Зависимость скорости от частоты колебаний

при различных значениях амплитуды колебаний представлена на рис. 6. На рис. 7–8 представлены зависимости скорости от частоты колебаний при изменении механических параметров шлама.

Из рис. 6–8 видно, что при вибрационном воздействии на вязко - пластическое тело скорость течения увеличивается до некоторого критического значения частоты (или интенсивности) вибрации. Это объясняется тем, что, в отличие от сдвиговой деформации, вибрация переводит систему в режим «виброкипения». Этот режим характеризуется наиболее эффективным разрушением коагуляционных структур и разрывом связей между частями. Дальнейшее по-

вышение частоты вибрации приводит к повышению коэффициента диффузии. Последнее ведет к увеличению скорости структурообразова-

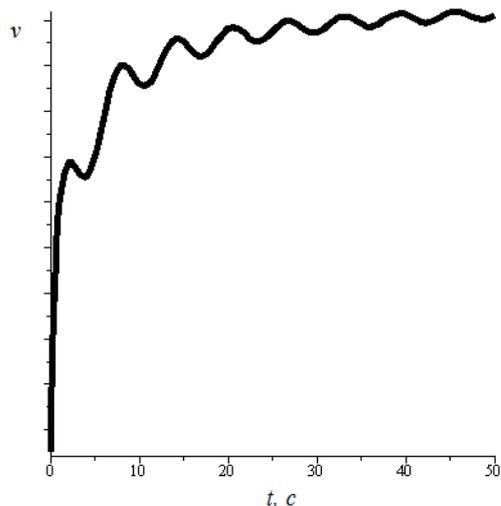


Рис. 5. Изменения безразмерной скорости со временем

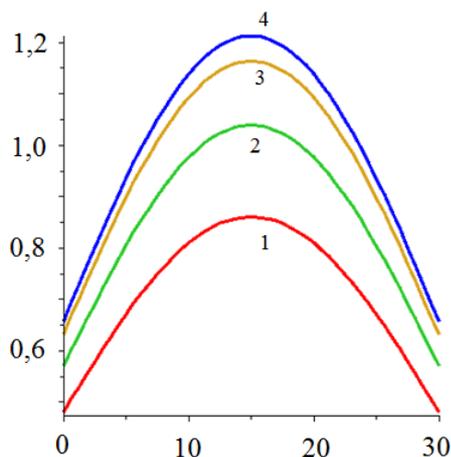


Рис. 7. Изменение безразмерной скорости v в зависимости от частоты вибрации n , Гц при изменении E_1 (H/m^2):
1 – 0,07, 2 – 0,14, 3 – 0,27, 4 – 0,4

Выводы. В работе разработана математическая модель истечения шлама из цилиндрического сосуда. Она построена на основании реологической модели шлама и позволяет исследовать расход шлама при истечении из сосуда в зависимости от механических характеристик материала. Полученные зависимости позволяют получить распределение скорости шлама при вибрационном воздействии на него, условие, при котором начнется течение, зависимость скорости от частоты колебаний и механических характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беседин П.В., Трубаев П.А. Энерготехнологический анализ процессов в технологии це-

ментного клинкера : Под общ. ред. П.В. Беседи-на. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова: БИЭИ, 2005. 460 с.

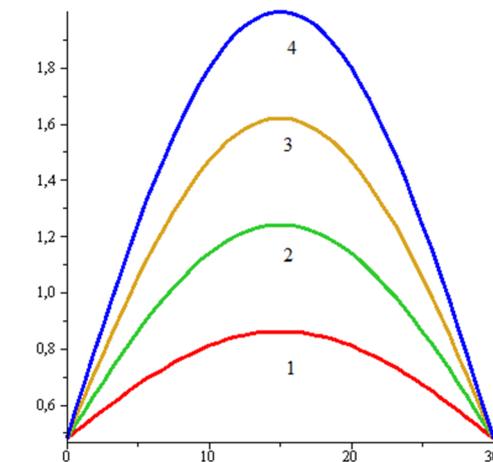


Рис. 6. Изменение безразмерной скорости V в зависимости от частоты вибрации (Гц)

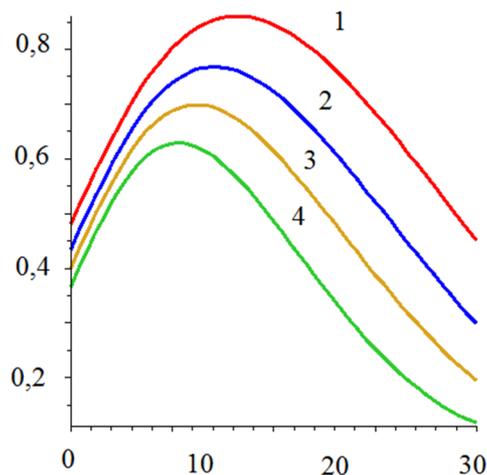


Рис. 8. Изменение безразмерной скорости v в зависимости от частоты вибрации n , Гц при изменении η_2 ($H \cdot c/m^2$):
1 – 100, 2 – 130, 3 – 160, 4 – 200

ментного клинкера : Под общ. ред. П.В. Беседи-на. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова: БИЭИ, 2005. 460 с.

2. Кузнецова Т.В., Кудряшов И.В., Тимашев В.В. Физическая химия вяжущих материалов : Учебник для хим.-технол. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1989. 384 с.

3. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 320 с.

4. Беседин П.В., Трубаев П.А. Исследования и оптимизация процессов в технологии цементного клинкера. Белгород: Изд-во БелГТАСМ: БИЭИ, 2004. 420 с.

5. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: Учеб. пособие для строительных вузов. М.: Высш. школа, 1978. 447 с.

6. Пакшвер А.Б. Физико-химические основы технологии химических волокон. М.: Химия, 1972. 432с.
7. Бернхардт Э. Переработка термопластичных полимерных материалов / Пер. с англ. Под ред. Г. Виноградова. М.: Госхимиздат, 1962.
8. Уорд И. Механические свойства твердых полимеров. М.: Химия, 1975. 350с.

9. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964. 216 с.
10. Беседин П.В., Андрущак С.В., Козлов В.К. Исследование и моделирование процесса движения цементного шлама в лабораторных условиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №4. С. 113–119

Sharapov R.R., Besedin P.V., Boychuk I.P., Kozlov V.K., Andruschak S.V.

MATHEMATICAL MODELING OF THE MOTION CEMENT SLURRY UNDER UNSTEADY ACTION

Currently, an important area of research is the development of energy-saving techniques for the cement industry. Intensification methods of transportation of sludge on the basis of mechanical and mechanochemical action effectively influence the increase in mobility and improve the rheological properties of cement slurries. This work is dedicated to the development of a mathematical model of the expiry of the sludge from the cylindrical vessel under the influence of non-stationary force action. The resulting model allows us to determine the conditions under which start during the distribution of sludge speed vibrating effect on him, as well as the dependence of the rate of vibration frequencies and the mechanical characteristics.

Key words: *intensification of clinker, cement slurry, sludge humidity, vibration, approximation of data.*

Шарапов Рашид Ризаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой подъемно-транспортных и дорожных машин.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Беседин Павел Васильевич, доктор технических наук, профессор, сотрудник кафедры технологий стекла и керамики.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бойчук Игорь Петрович, кандидат технических наук, доцент, сотрудник кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: Igor_boichuk@mail.ru

Козлов Владимир Константинович, аспирант кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: kozlov-vk@bk.ru

Андрущак Сергей Викторович, аспирант кафедры технологий стекла и керамики.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: sg-bel@mail.ru