

## УПЛОТНЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ РАБОЧИМ ОРГАНОМ С ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ КОЛЕБАНИЙ

*Алексей Васильевич Морозов*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)205-30-30, доп. 169, e-mail: alex02@ngs.ru

*Владимир Михайлович Усольцев*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник лаборатории вибротехники, тел. (383)205-30-30, доп. 168, e-mail: vovchik\_big@list.ru

Рассмотрены проблемы, связанные с созданием техники для уплотнения дисперсных материалов вибрационным способом. Представлено техническое решение, позволяющее осуществлять формирование уплотненного массива дисперсного материала за один цикл воздействия уплотняющего оборудования. Обоснована конструктивная схема вибрационного рабочего органа, в котором используется источник с полигармоническим режимом колебаний. Приведены некоторые результаты исследования процесса уплотнения сыпучего дисперсного материала предложенным устройством и выполнена оценка его влияния на плотность формируемого компакта в сравнении с рабочим органом, в котором используется источник с гармоническим режимом колебаний. Исследования показывают перспективность этого метода, а использование рабочего органа с источником, реализующим полигармонический режим колебаний, позволит расширить область его применения в технологических процессах во многих отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** дисперсный материал, вибровозбудитель, режим вибровоздействия, уплотнение, полигармонические колебания, рабочий орган, виброскорость.

## DISPERSE MATERIAL COMPRESSION BY ATTACHMENT WITH POLYHARMONIC SOURCE OF OSCILLATIONS

*Aleksey V. Morozov*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Researcher, Vibration Equipment Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 169, e-mail: alex02@ngs.ru

*Vladimir M. Usol'tsev*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Researcher, Vibration Equipment Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 168, e-mail: vovchik\_big@list.ru

Problems connected with constructing of machinery for disperse material compression by vibrational method are considered. Technical solution allowing forming compressed solid of disperse material for one impact cycle of compressed equipment is represented. Constructive scheme of vibrational attachment, in which source of polyharmonic oscillations is used, is justified. Results of investigation of process of running disperse material compression by proposed device are represented. The estimation of its influence on density of formed compact with comparison with attachment, in which source of harmonic oscillations is used, is carried out. The investigations show the per-

spective of this method. Using the attachment with source of polyharmonic oscillation mode will allow to extend application area in many industries.

**Key words:** disperse material, vibration exciter, mode of vibration effect, compression, polyharmonic oscillations, attachment, vibration velocity.

В технологических процессах в машиностроении, металлургии, химической и строительной отраслях промышленности нашли широкое применение мелкодисперсные и порошкообразные материалы. Для обеспечения необходимых характеристик и эксплуатационных показателей они подвергаются уплотнению. Процесс уплотнения материала является одной из ответственных операций, качество выполнения которой оказывает влияние на долговечность и надежность изделия, что является важным на фоне увеличения стоимости энергоресурсов.

Устройства и машины, осуществляющие уплотнение, постоянно совершенствуются, усложняются и режимы воздействия на обрабатываемый материал. Несмотря на существование различных методов и технических средств, предназначенных для уплотнения сыпучих материалов [1–5], получить упаковку с максимально возможной плотностью при сравнительно невысоких энергетических затратах не удастся. Для существенного повышения эффективности процесса уплотнения необходимы новые знания о его закономерностях, а их использование совместно с имеющимся опытом позволит создавать принципиально новые технологии.

Результаты исследований многих авторов показывают, что среди разнообразия существующих методов уплотнения, вибрационный является достаточно эффективным и сравнительно легко осуществимым [1, 4-7]. Вибрация оказывает влияние на поведение уплотняемого материала, а проявляющиеся при этом воздействии реологические эффекты приводят к изменению сил трения и сцепления между частицами материала и снижают сопротивление его деформированию. Это позволяет при правильном выборе режима вибровоздействия не только повысить эффективность процесса уплотнения, но и снизить его энергоемкость.

В Институте горного дела СО РАН разработан и защищен патентом РФ [8, 9] вибрационный способ уплотнения дисперсных и порошковых материалов в замкнутом объеме. Экспериментальные исследования процесса уплотнения мелкодисперсного материала этим способом показали хорошие результаты. Для гармонического режима были определены рациональные параметры вибровоздействия (амплитудно-частотная характеристика, угол вибрации).

Отечественный и зарубежный опыт использования вибрации при уплотнении сыпучих материалов показывает [10-13], что для разного размера частиц уплотняемого материала существует оптимальный диапазон частот. Некоторые исследователи рекомендуют с уменьшением размера частиц воздействовать на уплотняемый материал вибрацией с более высокой частотой. Идея многочастотного вибрирования возникла в связи с уплотнением бетонной смеси, в ко-

торой присутствуют частицы размером от долей микрона до нескольких десятков миллиметров. Авторы указывают, что наличие в результирующем колебании нескольких частот приводит к увеличению скорости перемещения частиц, а в результате повышается эффективность процесса.

Цель работы – создание вибрационного устройства предназначенного для уплотнения дисперсного материала в замкнутом объеме и реализующего полигармонический режим колебаний рабочего органа.

Наиболее просто полигармонические колебания рабочего органа могут быть получены за счет использования двух или нескольких дебалансных вибровозбудителей, механически связанных между собой и вращающихся с разной угловой скоростью. Однако наличие механических передач вносит существенное усложнение в конструкцию виброустройства и снижает ее надежность.

Идея создания супергармонического вибрационного привода (частный случай полигармонического) изложена в работах И.И. Быховского [13]. Она заключается в практическом использовании неравномерности вращения дебалансов центробежного вибровозбудителя. Причины могут быть разными, в частности, непостоянный момент силы тяжести дебаланса относительно оси вращения, если она не вертикальна, изменение сопротивления вращению дебаланса, вызванное конструктивными или эксплуатационными факторами. При этом в колебаниях исполнительного органа присутствуют высшие гармоники, амплитуда одной из которых может быть существенно усилена. В результате получим полигармоническое колебание, содержащее кроме основной частоты соизмеримую по амплитуде высокочастотную гармонику.

Использование низкочастотных серийных центробежных вибровозбудителей (частота 25 Гц или 50 Гц) для генерирования колебаний высокой частоты обладает преимуществами в сравнении с высокооборотным виброприводом, так как при этом уменьшаются потери мощности в подшипниках дебалансных валов, наблюдается снижение шума при работе, повышается надежность виброустройств.

На рис. 1, *а* представлена осциллограмма колебаний рабочего органа, создаваемых центробежным вибровозбудителем, на рис. 1, *б* – соответствующий спектр частот, откуда следует наличие высших гармоник в частотном спектре, однако амплитуда их существенно меньше, чем у колебания основной частоты. Теоретически усилив амплитуду любой из гармоник, можно получить интересный нас режим колебаний, но в реальных условиях технически более просто это возможно осуществить относительно второй или третьей гармоник.

Для реализации идеи такого режима колебаний был создан стенд (рис. 2) в основу, которого заложена схема [9], имеющая одну степень свободы и обеспечивающая только поступательное движение рабочего органа.

Стенд (рис. 2) состоит из емкости 1, заполненной сыпучим материалом, и вибрационного устройства, предназначенного для его уплотнения. Для уменьшения влияния вибрации стенок емкости на процесс формирования плотного компакта их внутренние поверхности выполнены из упругого материала.

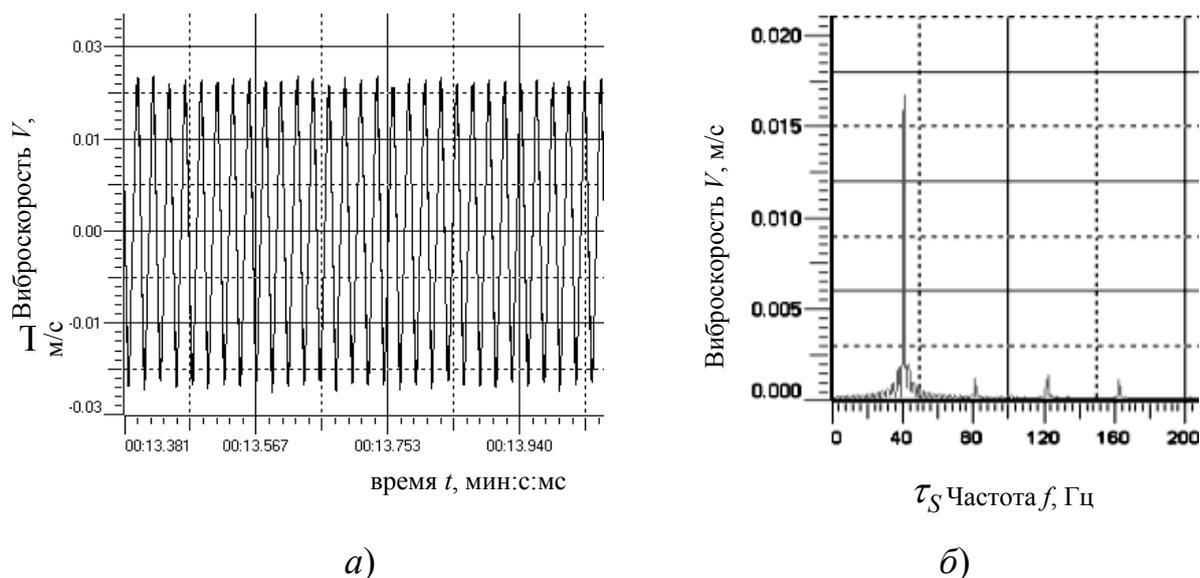


Рис. 1. Фрагмент осциллограммы (а) и соответствующий частотный спектр (б) виброскорости рабочего органа устройства с центробежным вибровозбудителем

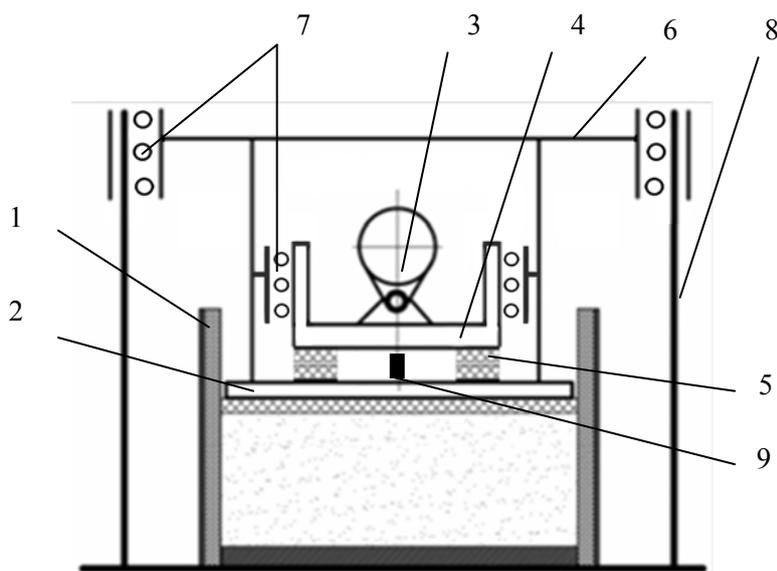


Рис. 2. Стенд для исследования процесса уплотнения дисперсного материала в ограниченном объеме:

1 – емкость, 2 – уплотняющая плита, 3 – вибровозбудитель, 4 – основание, 5 – упругий элемент, 6 – рама, 7 – ролики, 8 – направляющая, 9 – датчик

Вибрационное устройство включает уплотняющую металлическую плиту 2 (рис. 2) и центробежный вибровозбудитель направленного действия 3 (Pendulum Vibrator типа А 200/600 фирмы «KNAUER ENGINEERING»), установленный на основании 4, которое соединено с уплотняющей плитой при помощи системы

упругих элементов 5. Чтобы обеспечить резонанс в окрестности третьей гармоники основной частоты жесткость упругих элементов выбирается в соответствии с расчетом. Для обеспечения перемещения виброустройства в рабочем процессе строго вертикально уплотняющая плита 2 жестко соединена с рамой 6, на которой установлены ролики 7, перемещающиеся по направляющей 8, обеспечивая вибросистеме одну степень свободы.

Основная (низкая) частота выбирается в интервале 30...50 Гц. Такой выбор объясняется тем, что по результатам выполненных ранее работ в этом частотном диапазоне наиболее эффективно осуществляется процесс уплотнения дисперсного материала [14]. Для экспериментальной оценки влияния параметров сложного супергармонического вибровоздействия на уплотняемый материал были заданы три частоты вращения вибровозбудителя: 30, 40 и 50 Гц, соответствующие им усиленные третьи гармоники имеют частоты 90, 120 и 150 Гц.

Так как колеблющаяся масса стенда известна (70 кг), то для частоты 40 Гц была рассчитана жесткость упругих элементов, обеспечивающая резонанс на частоте третьей гармоники. Численное значение жесткости составило 9.97 МН/м.

Упругие элементы были изготовлены из резиновой техпластины толщиной 20 мм и модулем упругости 8.14 МПа.

Поскольку технически сложно обеспечить резонансный режим только изменением параметров упругих элементов, то в конструкции стенда предусмотрена подстройка системы в резонанс за счет изменения в небольших пределах основной частоты вибровозбудителя с помощью преобразователя частоты.

Возможности стенда были проверены при следующих условиях: использовался комплект упругих элементов с суммарной жесткостью 10 МН/м, частота виброисточника – 40 Гц, ожидаемая частота усиленной третьей гармоники – 120 Гц.

Виброскорость исполнительного органа – виброуплотняющей плиты измерялась с помощью пьезоэлектрического акселерометра, сигнал с которого через усилители заряда и аналого-цифровой преобразователь подается на персональный компьютер. Сбор информации и последующая ее обработка осуществлялись с помощью "Программного комплекса автоматизации экспериментальных и технологических установок АСТест©".

Для оценки влияния параметров полигармонического режима вибровоздействия на эффективность процесса уплотнения была выполнена серия экспериментов, в ходе которых изменялись параметры вибрационного воздействия: частота колебаний, статический момент дебалансов и продолжительность процесса вибровоздействия. Плотность компакта материала, полученного при реализации полигармонического режима колебаний, сравнивалась с плотностью компакта, сформированного рабочим органом с гармоническим режимом колебаний при прочих равных условиях.

На рис. 3 приведены экспериментально полученные зависимости плотности дисперсного материала от вынуждающей силы при постоянной частоте и продолжительности вибровоздействия для полигармонического режима колебаний уплотняющей плиты – кривая 1 и гармонического – кривая 2. Увеличе-

ние силы осуществлялось изменением статического момента дебалансов вибро-возбудителя. Из графика следует, что в процессе уплотнения сыпучего материала с использованием разработанного вибропривода достигается увеличение плотности компакта при одинаковом времени вибровоздействия и прочих равных условиях на 10–15 %.

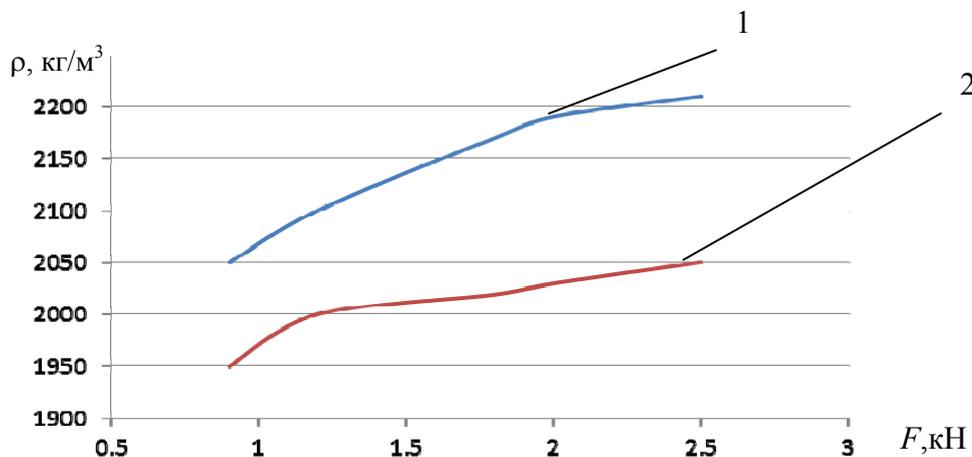


Рис. 3. Зависимость плотности дисперсного материала от вынуждающей силы вибровоздействия

частота вибровоздействия – 42 Гц; 1 – полигармонический режим колебаний; 2 – гармонический режим колебаний

Проведена оценка влияния амплитуды колебаний виброисточников с различным режимом работы на плотность обрабатываемого материала. Был получен одинаковый результат, как при гармоническом воздействии, так и при полигармоническом колебании, амплитуда которых примерно в два раза меньше (рис. 4).

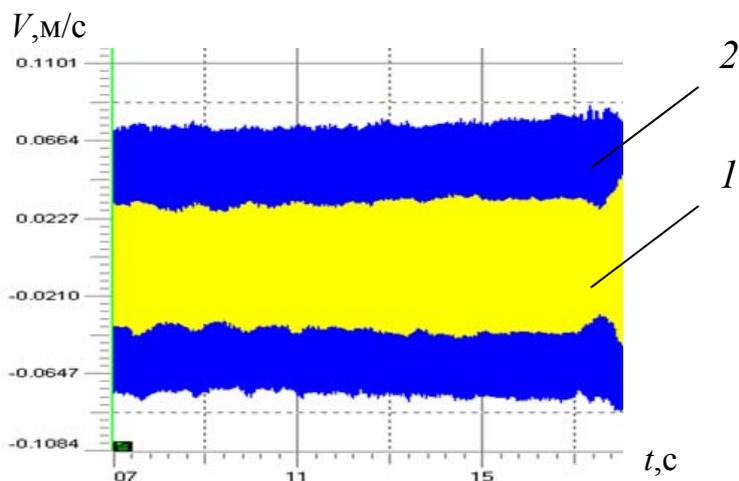


Рис. 4. Оциллограмма виброскорости уплотняющей плиты:

1 – полигармонический; 2 – гармонический режим колебаний

В ранее выполненных исследованиях процесса уплотнения дисперсного материала в замкнутом объеме вибрационным рабочим органом с гармоническим режимом колебаний установлено, что основное формирование компакта происходит в течение порогового времени вибровоздействия, при этом осадка материала по всей поверхности составляет 45–50 мм, дальнейшее увеличение продолжительности вибровоздействия к существенному изменению плотности не приводит. Последующее повторное уплотнение материала источником с полигармоническим режимом колебаний обеспечивает осадку материала по всей поверхности еще на 10 – 15 мм, что способствует повышению плотности.

Реализация полигармонического режима работы уплотняющего рабочего органа позволила обеспечить его колебания, в которых присутствует частота, в три раза превышающая частоту вращения дебалансов при соизмеримой амплитуде. Это дает возможность использовать серийные вибровозбудители с меньшей частотой вращения вала дебалансов, и как следствие, осуществлять уплотнение мелкодисперсных материалов с меньшими энергозатратами и механическими нагрузками на механизм, что существенно повысит надежность работы вибропривода.

*Работа выполнена в рамках научного проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090003-2.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вибрации в технике: Справочник. Т.4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э. Э. Лавендела - М.: Машиностроение, 1981.- 509 с.
2. Блехман И. И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб.: Изд. «Руда и Металлы», 2013. — 640 с.
3. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве.– М.: Высшая школа, 1977.– 255 с.
4. Зубкин В.Е., Коновалов В.М., Королев Н.Е. Способ нагнетающей укатки и классические дорожные катки // Строительные и дорожные машины – 2001 – № 3– С. 12 – 15.
5. Неформованные огнеупоры: Справочное издание: В 2-х томах. Т. 1. Книга 1. Общие вопросы технологии / Ю.Е. Пивинский. – М.: Теплоэнергетик, 2004. – 448 с.
6. Н.В. Сухин, С.Л. Букин, А.Н. Корчевский, А.П. Решевский Вибромашины с антирезонансным режимом работы – новое направление совершенствования техники для переработки полезных ископаемых // Сб. трудов межд. научно-техн. конф. «Прогрессивные технологии машиностроения и современность».- Донецк.-1997. - С. 240-241.
7. Захаренко А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: Дисс. докт. техн. наук: 05.05.04 Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия.– Омск, 2005.–320 с.
8. Патент РФ № 2553145. Способ футеровки катодного устройства электролизера неформованными материалами и устройство для его осуществления / Прошкин А. В., Левенсон С. Я., Пингин В. В., Морозов А. В. – БИ № 16 от 10 июня 2015 г.
9. Патент РФ 2296819. МПК8 С 25 С 3/06, С 25 С 3/08 Способ формирования бесшовных футеровочных слоев в алюминиевых электролизерах и устройство для его осуществления / А.В. Прошкин, В.В. Пингин, В.С. Тимофеев, С.Я. Левенсон., Л.И. Гендлина, Ю.И. Еременко, В.А. Голдобин. № 20051266100/02; заявл. 17.08.2005; – опубл.10.04.2007, Бюл. № 10.

10. Применение вибрационной техники с бигармоническим режимом колебаний при обогащении углей / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, С.Л. Букин и др. // Уголь Украины, май 2011. - С. 41-44.
11. С.Л. Букин, В.П. Кондрахин, В.Н. Беловодский, В.Н. Хоменко Возбуждение полигармонических колебаний в одномассовой вибромашине с инерционным приводом и упругой муфтой // ФТПРПИ. – 2014. – №4. – С. 103–110.
12. И.Г. Шаталова, Н.С. Горбунов, В.И. Лихтман Физико-химические основы вибрационного уплотнения порошковых материалов. – М. Наука, 1965. – 162с.
13. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники – М.: Машиностроение, 1968. – 362 С.
14. Л.И. Гендлина, С.Я. Левенсон С.Я., Ю.И. Еременко, В.В. Виданов Результаты исследования процесса уплотнения дисперсных материалов вибрационным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М. - 2011 - № 8 – С. 255-259.

© А. В. Морозов, В. М. Усольцев, 2019