



Надутый В. П.

*Институт
геотехнической
механики
им. Н. С. Полякова
НАН Украины*

Титов А. А.

*Государственное ВУЗ
«Национальный горный
университет»*

Nadutyi V. P.

*M. S. Polyakov Institute of
Geotechnical Mechanics
under the NAS of Ukraine*

Titov A. A.

*State Higher Educational
Institution "The National
Mining University"*

УДК 621.926: 622.73

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УПЛОТНЯЕМОСТИ СЫПУЧЕЙ ГОРНОЙ МАССЫ НА ПРОЦЕСС ЕЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕЖДУ ПЛОСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ДЕЗИНТЕГРАТОРОВ

В работе рассмотрены закономерности уплотнения слоя сыпучего материала при сжатии между плоскими поверхностями дезинтеграторов. На прессе с усилием три тонны для гранита фракции менее 0,5 мм проведен эксперимент по исследованию влияния начальной высоты слоя материала и давления прессования на текущую высоту материала. В результате двухфакторного дисперсионного анализа установлено преобладающее влияние начальной высоты слоя материала, давления прессования влияет в меньшей степени, а взаимодействие факторов наименее статистически значимо. Проведен эксперимент по прессованию мелкодисперсного гранита в ступке с пуансоном. Получены уравнения регрессии на основе известных законов уплотнения сыпучего материала. Предложен свой вариант трехпараметрического уравнения регрессии, которое имеет наилучшую сходимость с экспериментальными данными. Результаты работы создают базу для обоснования рациональных параметров рабочих органов вибрационных дезинтеграторов.

***Ключевые слова:** вибрационный дезинтегратор, дробилка, мельница, плоская зона деформирования, уплотнение, сыпучий материал, гранит.*

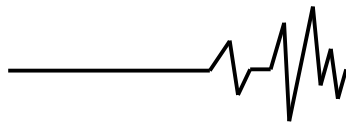
Постановка проблемы. Работы в области вибрационных машин посвящены различным процессам, таким как транспортирование, грохочение, дробление и измельчение, уплотнение материалов и некоторым другим [1]. Традиционно сложилось, что при рассмотрении определенных групп процессов взаимодействия с материалов требуется учет геометрии и закона движения рабочего органа, а также упругих, вязких, пластических и некоторые других свойств обрабатываемой среды, причем набор таких свойств для каждой группы может отличаться.

Например, для обоснованного выбора параметров рабочих органов вибрационных дезинтеграторов, которые работают с мелкодисперсными материалами, необходимо обязательно задать крупность материала, а также коэффициенты внешнего и внутреннего трения. А при описании процесса уплотнения горной массы используют такую характеристику, как коэффициент пористости,

которой при дезинтеграции обычно пренебрегают, за исключением определения насыпной плотности материала.

Однако, именно в результате изменения пористости при силовом воздействии, слой материала в течении элементарного акта взаимодействия существенно меняет свое сопротивление деформации, что влияет на результаты дробления или измельчения.

Анализ известных исследований и публикаций. Для описания вибрационного дробления горной массы широко используются феноменологические модели [2], позволяющие описать поведение рабочего органа машины после выполнения экспериментальных исследований, имеющих отношение к конкретной описываемой машине и не дающих общих выводов. При этом модель деформируемого материала сводится к инерционному упруговязкопластическому реологическому телу, без привязки к общеизвестным свойствам сыпучих



материалов. Идентификация параметров модели осуществляется трудоемким эмпирическим путем, что не позволяет развить применение данной модели.

В работе [3] выделены 3 стадии при прессовании сыпучей горной массы в ступке с пуансоном на прессе:

1) уплотнение слоя частиц с их переупаковкой при незначительных усилиях взаимного прижатия поверхностей до момента формирования объема материала, дальнейшее уплотнение которого невозможно без разрушения частиц;

2) дальнейшее деформирование с интенсивным разрушением частиц материала, характеризующееся при этом прогрессирующим замедлением деформации;

3) еще более сильное уплотнение материала, при котором массового разрушения частиц уже не происходит ввиду резкого сокращения объема пор между частицами, деформации нарастают незначительно.

На диаграмме в координатах «давление – относительная деформация» стадии 1 и 3 характеризуются прямолинейными участками с разным углом наклона к оси абсцисс, а участок 2 – переходной, криволинейный. Делается вывод, что рациональным при дроблении является нагружение материала до конца 2-го участка.

Для участков 1-2 диаграммы получено выражение для среднего напряжения в сжимаемом слое:

$$\sigma = D \frac{1 - n_0}{n_0 - \varepsilon} \varepsilon, \quad (1)$$

где D – модуль деформации, составляющий для горных пород типа кварцитов порядка 20 МПа; n_0 – начальная пористость слоя материала; ε – относительная деформация слоя.

Таким образом, для некоторых прочных горных пород получена взаимосвязь средних напряжений от начальной пористости слоя и относительной деформации при одноосном сжатии, в диапазоне давлений до 60 МПа. Здесь требует проверки постоянство величины модуля деформации при возрастании давления.

В работе [4] получено уравнение усадки рудной шихты в брикетных прессах:

$$\varepsilon = \sqrt{k \cdot p}, \quad (2)$$

где p – давление прессования, МПа; k – коэффициент, зависящий от гранулометрического состава, формы зерен и доли влаги в материале.

Уравнение является однопараметрическим и дает самую общую связь относительной деформации с давлением прессования без учета начальной пористости материала, диапазон давлений до 160 МПа.

Известно также уравнение для коэффициента пористости грунта такого вида [5]:

$$e = e_0 - C_c \cdot \ln \frac{p}{p_0}, \quad (3)$$

где p_0 – давление прессования, при котором начинается первичное сжатие грунта, МПа; e_0 – начальный коэффициент пористости; C_c – коэффициент компрессии.

Уравнение применялось в диапазоне давлений до 0,6 МПа, для больших давлений оно требует дополнительной проверки.

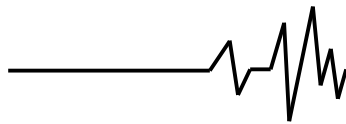
Нерешенная ранее часть общей проблемы. Многообразие уравнений

уплотнения сыпучей среды требует проверки на применимость при деформировании материала между плоскими поверхностями дезинтеграторов, как характерным случаем приложения нагрузки. Особенностью нагружения является возможность бокового расширения материала и неравномерность напряжений по сечению зоны деформирования [6].

Поэтому, получение зависимостей в координатах «давление прессования – деформация» слоя сыпучего материала с учетом его пористости и возможности бокового расширения материала и геометрии зоны деформирования является актуальным при проектировании рабочих органов дезинтеграторов.

Целью работы является оценка влияния изменения пористости сыпучего материала на зависимость деформации от давления прессования при деформировании материала между параллельными плоскими поверхностями дезинтеграторов без боковых ограничений.

Основная часть. Опыты выполнялись на прессе с максимальным усилием сжатия равным 30 кН. На нижнюю плиту насыпался мелкодисперсный гранит крупностью -0,5 мм (не менее 20 слоев по высоте) в виде усеченного конуса с начальной высотой h_0 . Под действием механизма пресса производилось сближение верхней и нижней плит, после чего замерялась текущая высота слоя h , при этом диаметры верхнего и нижнего оснований конуса несколько увеличивались. Усилие фиксировалось с помощью динамометра эталонного ДОСМ 3-3.



Результаты измерений представлены на рис. 1.

Получены четыре кривых деформации материала, каждая для своей начальной высоты слоя. Из графика следует, что одно и то же усилие прессования может соответствовать разной высоте слоя

материала, что объясняется различными значениями текущей пористости слоя и, как следствие, различными его деформационными характеристиками. Таким образом, очевидно влияние пористости слоя на процесс уплотнения.

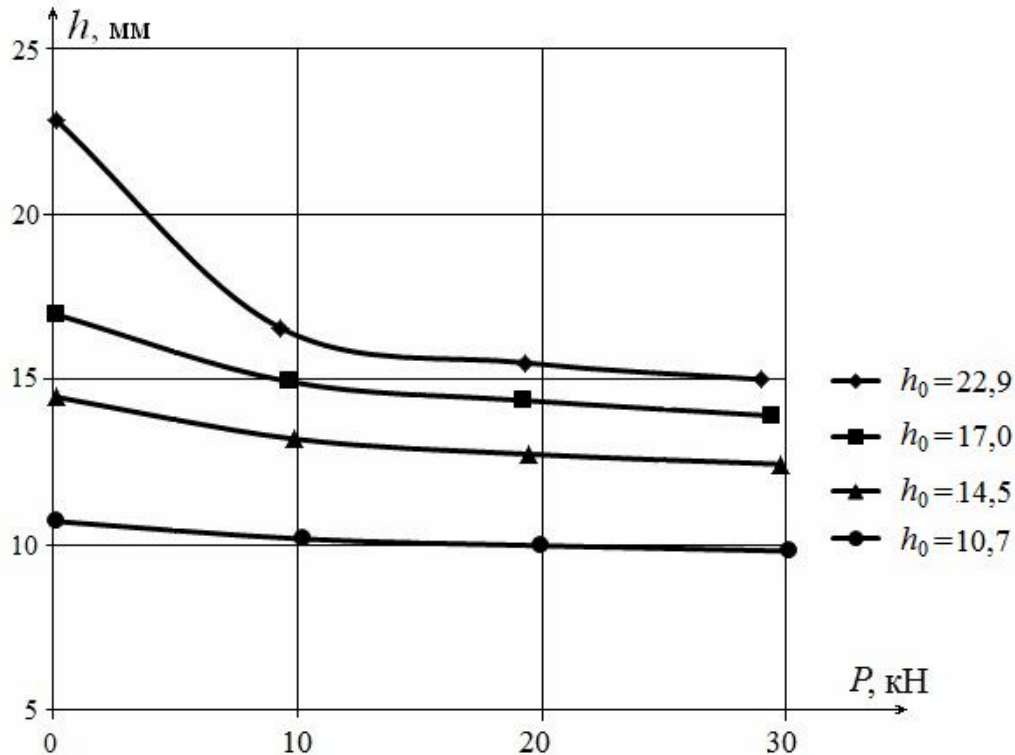


Рис. 1. Зависимости высоты слоя материала от усилия прижатия

Исследуемыми факторами являлись начальная высота слоя материала h_0 и усилие прессования P . Функцией отклика являлась достигнутая высота слоя h .

Статистическая обработка экспериментальных данных производилась по стандартным методикам [7, 8].

Воспроизводимость результатов параллельных измерений проверялась по критерию Кохрена [8], при этом расчетное значение $G = 0,213$ оказалось меньше

критического $G_{кр} = 0,322$, т.е. воспроизводимость удовлетворительная.

Далее был проведен двухфакторный дисперсный анализ для определения значимости исследованных факторов, а также их взаимодействия.

Проверка факторов и их взаимодействия на статистическую значимость осуществлялась с использованием критерия Фишера при уровне значимости 0,05.

Таблица

Результаты дисперсионного анализа при деформировании гранита

Источник изменчивости	Число степеней свободы	$\frac{S^2}{S_{СVM}^2}$, %	Критерий Фишера		Влияние источника изменчивости
			Расчетный	Табличный	
h_0	3	67,2	158,18	2,80	Значимо
P	3	17,1	40,26	2,80	Значимо
$(h_0 \times P)$	9	11,2	8,77	2,09	Значимо
Остаток	32	4,5	--	--	--
Сумма	47	100,0	--	--	--



В итоге, на основании вышеприведенных данных можно сделать следующие выводы:

1) преобладающее влияние на значение функции отклика оказывает начальная толщина слоя, влияние давления прессования имеет меньшую статистическую значимость;

2) взаимодействие факторов ($h_0 \times P$) наименее статистически значимо, но результаты действия факторов нельзя рассматривать отдельно друг от друга.

Действующие вертикальные нормальные напряжения весьма неравномерно распределены по поверхности плит – максимальные в центре и нулевые на краю зоны деформирования для случая статической

нагрузки [6]. Поэтому для моделирования процесса деформации слоя материала необходимо получить распределение напряжений по всему объему зоны деформирования. Предполагаем, что действующее в произвольной точке слоя вертикальное нормальное напряжение связано с пористостью в этой же точке.

Для определения взаимосвязи пористости с вертикальными нормальными напряжениями, был проведен эксперимент по сжатию слоя материала в ступке с пуансоном (распределение напряжений близко к равномерному), результаты представлены на рис. 2.

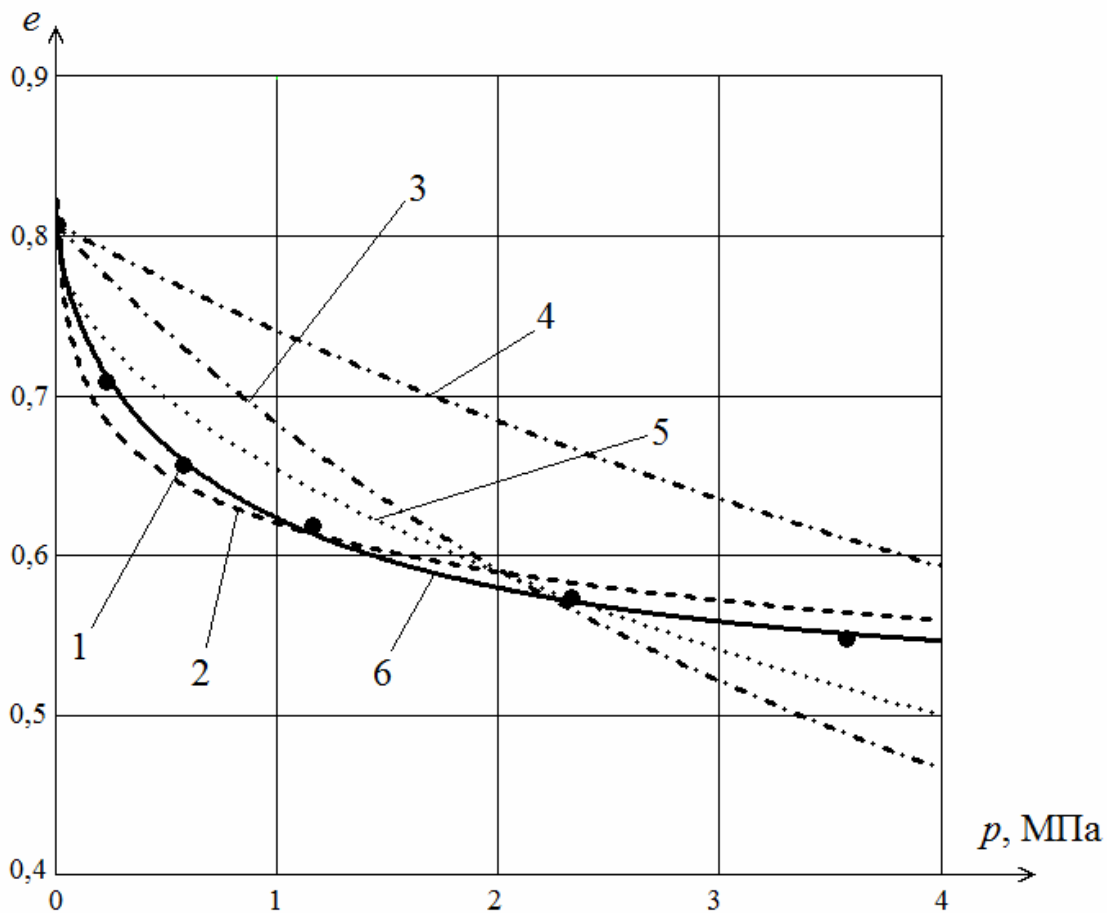
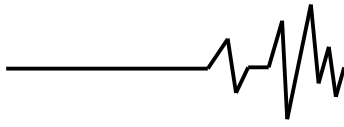


Рис. 2. Результаты деформирования гранита в ступке с пуансоном:
1 – эксперимент; 2 – уравнение (3); 3 – уравнение (4) при $D = 9,9$ МПа;
4 – уравнение (4) при $D = 20$ МПа; 5 – уравнение (5); 6 – уравнение (6)

Определим, какой из законов уплотнения лучше всего соответствует экспериментальным данным. Для сравнения с единых позиций, преобразуем приведенные выше выражения (1) и (2) соответственно к таким:

$$e = \frac{D \cdot e_0 \cdot n_0}{D \cdot e_0 + p \cdot n_0}; \quad (4)$$

$$e = \frac{e_0 \cdot (n_0 - \sqrt{k \cdot p})}{n_0}, \quad (5)$$



где p – давление на верхнюю плиту, численно равно вертикальному нормальному напряжению.

Критерий Фишера для проверки статистической значимости уравнений регрессии для кривых на рисунке 2 соответственно составил: 2 – 135; 3 – 7,5; 4 – 0,09; 5 – 47. Так как табличное значение критерия Фишера составляет 7,71, то в практических расчетах для заданного диапазона давлений можно использовать только кривые 2 и 5. Повышенную точность кривой 2, полученной на основании уравнения (3), можно объяснить тем, что она является трехпараметрической кривой, тогда как остальные являются однопараметрическими и плохо передают достаточно сложный характер процесса уплотнения материала. Однако уравнение (3) имеет такой недостаток, что при высоких значениях давления коэффициент пористости может стать нулевым и даже отрицательным, что противоречит физическому смыслу. Кроме того, при прессовании предварительно не уплотненного материала величина p_0 также теряет физический смысл.

Для устранения данных недостатков предлагаем выражение закона уплотнения в таком виде:

$$e = e_{\min} + (e_0 - e_{\min}) \cdot \exp(-a \cdot p^m), \quad (6)$$

которое также как и уравнение (3) является трехпараметрическим. Здесь e_{\min} – минимально достижимый коэффициент пористости при неограниченном возрастании давления, или так называемый предел уплотнения.

Последнему уравнению соответствует кривая 6 на рисунке 2, критерий Фишера составил 1358, таким образом, данное уравнение наилучшим образом передает характер процесса уплотнения и может быть использовано при расчетах рабочих органов дезинтеграторов.

Выводы. Установлено, что начальная высота слоя материала оказывает существенное влияние на текущую высоту плоской зоны деформирования дезинтеграторов, сопоставимое с влиянием давления прижатия поверхностей. Проанализированы известные законы уплотнения слоя материала, наилучшее совпадение с экспериментальными данными для статического сжатия в ступке с пуансоном гранита фракции -0,5 мм в диапазоне давлений до 4 МПа имеет предложенное в работе уравнение (6), что составляет научную новизну.

Перспективы дальнейших научных исследований.

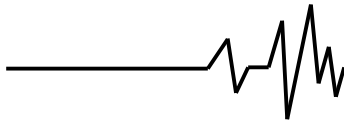
Предполагается распространить достигнутые результаты на более широкий диапазон давлений, материалов и их гранулометрического состава. Полученные данные в дальнейшем позволят моделировать поведения мелкодисперсного сыпучего материала в зоне деформирования произвольной конфигурации.

Список использованных источников

1. Потураев В.Н. Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах. Монография / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, В.П. Надутый. – Днепропетровск: НГА Украины, 2002. – 186 с.
2. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И.Ф. Гончаревич., К.В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с.
3. Ревнивцев В.И. Основные закономерности изменения состояния слоя сыпучего материала при сжатии / В.И. Ревнивцев, О.П. Барзуков, Н.А. Иванов и др. // Обогащение руд. – 1984. - № 4. – С. 3-6.
4. Елишевич А.Т. Брикетирование полезных ископаемых. Учеб. для вузов / А.Т. Елишевич. – М.: Недра, 1989. – 300 с.
5. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии) / Б.И. Далматов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, Ленингр. Отд-ние, 1988. – 415 с.
6. Надутый В.П. Анализ напряженного состояния плоской зоны деформирования вибрационных дезинтеграторов с учетом выброса материала / В.П. Надутый, А.А. Титов // Вибрации в технике и технологиях. – 2016. – № 3. – С. 54-58.
7. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. Пер. с англ. / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1981. – 520 с.
8. Барабашук В.И. Планирование эксперимента в технике / В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко; под ред. Б.П. Креденцера. – К.: Техніка, 1984. – 200 с.

Список источников в транслитерации

1. Poturaev V.N. Vibratsionnaya tekhnika i tekhnologiya v energoemkikh proizvodstvakh / V.N. Potutaev, V.P. Franchuk, V.P. Nadutyi. Monografiya. - Dnepropetrovsk: NHA Ukrainy, 2002. – 186 s.



2. Honcharevich I.F. Teoriya vibratsionnoy tekhniki i technologii / I.F. Honcharevich, K.V. Frolov. – M.: Nauka, 1981. – 320 s.

3. Revnitsev V.I. Osnovnye zakonomernosti izmeneniya sostoyaniya sloya sypuchego materiala pri szhatii / V.I. Revnitsev, O.P. Barzakov, N.A. Ivanov i dr. // Obogaschenie rud. – 1984. – Nom. 4. – S. 3-6.

4. Elishevich A.T. Briketirovanie poleznykh iskopaemikh. Ucheb. Dlya vuzov / A.T. Elishevich. – M.: Nedra, 1989. – 300 s.

5. Dalmatov B.I. Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenti (vkluychaya spetsialniy kurs inzhenernoy geologii) / B.I. Dalmatov. – 2-e izd. pererab. i dop. – L.: Stroyizdat, Leningr. Otdnie, 1988. – 415 s.

6. Nadutiy V.P. Analiz napryazhennogo sostoyaniya ploskoy zony deformirovaniya vibratsionnykh dezintegratorov s uchetom vybrosa materiala / V.P. Nadutiy, A.A. Titov // Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh. – 2016. – Nom. 3. – S. 54-58.

7. Dzhonson N. Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke: Metody planirovaniya eksperimenta. Per. s angl. / N. Dzhonson, F. Lion. – M.: Mir, 1981. – 520 s.

8. Barabaschuk V.I. Planirovanie eksperimenta v tekhnike / V.I. Barabaschuk, B.P. Kredintser, V.I. Miroshnichenko; pod red. B.P. Kredentsera. – K.: Tekhnika, 1984. – 200 s.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ УЩІЛЬНЮВАНOSTІ СИПКОЇ ГІРСЬКОЇ МАСИ НА ПРОЦЕС ЇЇ ДЕФОРМУВАННЯ МІЖ ПЛОСКИМИ ПОВЕРХНЯМИ ДЕЗІНТЕГРАТОРІВ

Анотація. У роботі розглянуто закономірності ущільнення сипкого матеріалу при стисканні між плоскими поверхнями дезінтеграторів. На пресі із зусиллям три тони для граніту фракції менше 0,5 мм проведено експеримент з дослідження впливу початкової висоти шару матеріалу та тиску пресування на поточну висоту матеріалу. За результатами двофакторного дисперсійного аналізу встановлено переважаючий вплив початкової висоти шару матеріалу, тиск пресування впливає меншою мірою, а

взаємодія факторів має найменшу статистичну значущість. Проведено експеримент з пресування дрібнодисперсного граніту у ступці із пуансоном. Отримані рівняння регресії на основі відомих законів ущільнення сипкого матеріалу. Запропоновано свій варіант три параметричного рівняння регресії, що має найкращу збіжність з експериментальними даними. Результати роботи створюють базу для обґрунтування раціональних параметрів робочих органів вібраційних дезінтеграторів.

Ключові слова: вібраційний дезінтегратор, дробарка, млин, плоска зона деформування, ущільнення, сипкий матеріал, граніт.

ANALYSIS OF INFLUENCE OF LOOSE MINING ROCKS COMPACTIBILITY ON THE PROCESS OF THEIR DEFORMATION BETWEEN FLAT SURFACES OF DISINTEGRATORS

Annotation. The dependences of loose material compression between flat surfaces of disintegrators are taking into consideration in the article. The experimental research on influence of the initial height of material layer and the pressure value on the current material height if fulfilled for granite of size less than 0.5 mm by 3-ton press unit. The prevailing influence of the initial material layer height is revealed by two-factor dispersion analysis. Influence of the pressure value is less important, and the factor interaction has the smallest statistical certainty. The experiment on fine-particle granite compacting in punch-mortar unit is carried out. The regression equations are obtained based on the known dependences of loose material compression. One more variant of three-parametrical regression equation, having the best convergence with experimental data, is proposed by authors. The work results create the basement for the substantiation of rational parameters of vibrational disintegrators working bodies.

Key words: vibrational disintegrator, crusher, mill, flat deformed zone, compacting, loose material, granite.