

Надутый В. П.

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

Титов А. А.

*Государственное ВУЗ
«Национальный горный
университет»*

Nadutyu 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 НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОСКОЙ ЗОНЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ДЕЗИНТЕГРАТОРОВ С УЧЕТОМ ВЫБРОСА МАТЕРИАЛА

В работе рассмотрен процесс деформирования слоя сыпучего материала между плоскими поверхностями вибрационных дезинтеграторов при существенных скоростях и ускорениях сближения. Создана математическая модель предельного состояния материала, с учетом его внутреннего и внешнего трения. Получены зависимости распределения нормальных напряжений на поверхности верхней плиты для случаев разгона и торможения материала. Обоснованы условия разрыва сплошности слоя за счет инерционных сил, приводящие к выбросу материала из зоны деформирования в режиме торможения. Показано, что в этом случае периферическая часть зоны деформирования имеет область нулевых напряжений на верхней плите и не оказывает сопротивления деформации слоя. Результаты работы создают базу для обоснования рациональных параметров рабочих органов вибрационных дезинтеграторов.

Ключевые слова: вибрационный дезинтегратор, дробилка, мельница, плоская зона деформирования, мелющее тело, сыпучий материал, напряженно-деформированное состояние.

Постановка проблемы. При проектировании рабочих органов вибрационных дезинтеграторов, которые применяются для разрушения мелкодисперсных материалов практически любой твердости с высокой эффективностью и минимальными затратами энергии, необходимо учитывать такие свойства этих материалов, как внешнее и внутреннее трение. Создание соответствующей аналитической базы, позволяющей выполнять детерминированный расчет поведения материала между рабочими поверхностями и его влияния на динамику рабочих органов, позволит обоснованно выбрать их параметры.

Анализ последних исследований и публикаций. Вибрационные дезинтеграторы, к которым относятся некоторые типы дробилок и мельниц, предназначены для разрушения частиц сыпучих материалов с целью получения продуктов весьма малых размеров [1]. Наличие

вибрационного возбуждения рабочих гарантирует импульсное воздействие на материал с высокой частотой ударов и сравнительно малой энергией единичного воздействия, в отличие, например, от щековых дробилок или барабанных вращающихся мельниц. Последние ориентированы на гарантированное разрушение между двумя шарами или между шаром и барабаном частиц максимальной крупности, т.е. на нанесение нечастых сильных ударов по частицам, контактирующим одновременно с двумя рабочими поверхностями.

При нагружении достаточно мелкого материала, между рабочими поверхностями находится одновременно несколько слоев частиц по толщине, что приводит к появлению боковых усилий распора при нагружении материала и выталкиванию материала из так называемой зоны деформирования (ЗД) – части пространства, где зажаты разрушаемые



частичи [2]. Поэтому для проектирования рабочих органов машин, использующих медленное сжатие материала, в отличие от традиционного подхода [3], где учитывается только геометрия зоны деформирования и коэффициент внешнего трения материала по рабочей поверхности, дополнительно необходимо также принимать во внимание внутреннее трение материала [2].

Нерешенная ранее часть общей проблемы. Опыты по медленному сжатию слоя материала между поверхностями показывают, что зона деформирования в процессе нагружения постепенно уменьшает свою толщину и увеличивает свой радиус [2, 4], сохраняя в целом свою форму и сплошность. При контакте рабочих поверхностей вибрационных дезинтеграторов, которые из-за высокой частоты колебаний имеют немалые скорости сближения [5], в действие вступают инерционные силы материала, когда при резком сближении мелющих тел частицы приобретают ускорение в поперечном направлении и далеко выбрасываются из ЗД. Объяснить это можно тем, что в процессе поперечного движения материала нарушается его сплошность и контакт с верхней рабочей поверхностью, поэтому материал на периферии ЗД движется уже не в результате продолжающегося сближения рабочих поверхностей, а под действием собственной инерции. Исследования в данном аспекте в литературе отсутствуют.

Таким образом, адекватное описание процесса и проектирование рабочих органов вибрационных дезинтеграторов требует дополнительного учета инерционных сил при

выбросе материала из ЗД, что подтверждает актуальность данного исследования.

Целью работы является исследование влияния инерционных сил на напряженно-деформированное состояние слоя материала в ЗД между плоскими рабочими поверхностями, с формулированием условий выброса части материала из ЗД.

Основная часть. На рис. 1 показана расчетная схема деформации слоя материала без нарушений сплошности в произвольный момент времени. Нижняя плита жестко закреплена, а верхнее мелющее тело в данный момент времени движется вниз и имеет соответствующие кинематические параметры $y, v_y = \dot{y}$ и $W_y = \dot{y}$.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние слоя материала в форме цилиндра высотой y и радиусом x_R .

Выделим элементарный кольцевой участок, имеющий в радиальном направлении толщину dx .

Введем следующие допущения:

1) соотношение нормальных напряжений по осям, соответствующее состоянию предельного равновесия слоя, постоянно и определяется соотношением (для середины высоты слоя)

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \xi = const, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент бокового распора сыпучего материала;

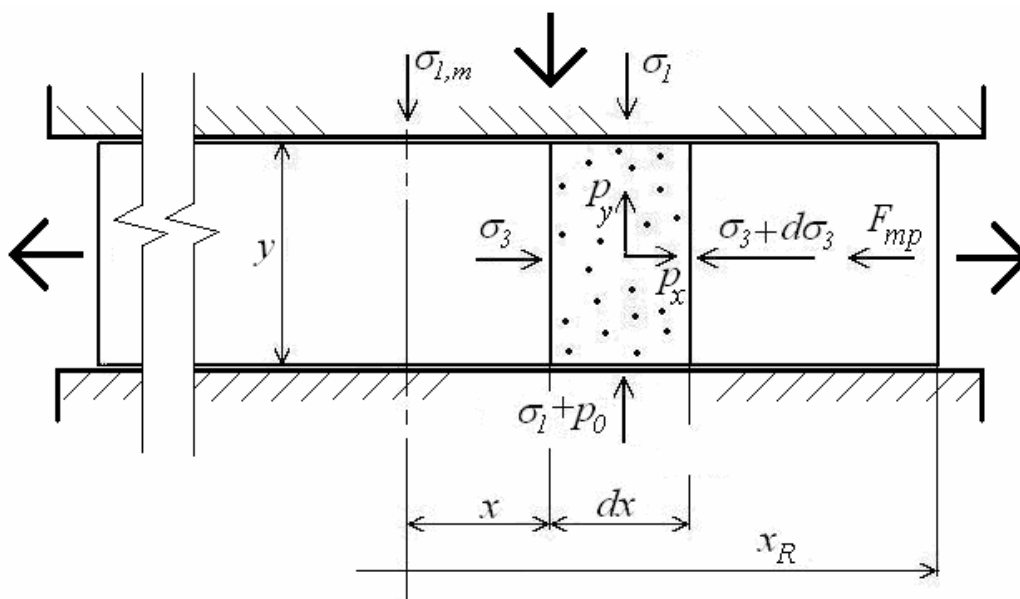


Рис. 1. Расчетная схема



2) напряжения σ_3' приняты усредненными по высоте слоя h ;

3) трение материала по рабочим поверхностям подчиняется закону Кулона с коэффициентом трения равным f ;

4) материал несжимаемый.

Согласно принципу Даламбера, запишем уравнение равновесия элементарного объема материала вдоль горизонтальной оси:

$$F_{mp} + dV \cdot \gamma \cdot W_x = -y \cdot 2\pi x \cdot d\sigma_3, \quad (2)$$

где F_{mp} – сила трения материала о рабочую поверхность;

γ – насыпная плотность материала;

dV – элементарный объем;

$W_x = f(x, y, \dot{y}, \ddot{y})$ – ускорение элементарного объема по оси x , которое определяется из условия неразрывности среды.

На основании уравнения (2) получено следующее дифференциальное уравнение для вертикального давления σ_1 , воспринимаемого верхней рабочей поверхностью:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial x} = \frac{p_{xR}}{\xi \cdot x_R} \left(1 - \frac{x}{y}\right) - \frac{a}{y} \left(\sigma_1 + \frac{p_0 + p_y}{2}\right), \quad (4)$$

где обозначим a – коэффициент сопротивления деформации:

p_0 , p_y и p_{xR} – соответствующие аналоги гидростатического давления от гравитации, а также ускорений по осям y и x на краю ЗД.

Получим решение уравнения (4) при начальных условиях $\sigma_1 = \sigma_{1,m}$ и $x = 0$:

$$\sigma_1(x) = (\sigma_{1,m} + p_1) \cdot e^{-\frac{a}{y}x} - \frac{p_{xR}}{\xi \cdot a} \cdot \frac{x}{x_R} - p_1, \quad (5)$$

где p_1 – величина, определяемая по формуле

$$p_1 = \frac{p_0 + p_y}{2} - \frac{p_{xR} \cdot y}{\xi \cdot a \cdot x_R} \left(1 + \frac{1}{a}\right). \quad (6)$$

Анализ уравнения (4) показывает, что функция $\sigma_1(x)$ на отрезке $x \in [0; x_R]$, в зависимости от входящих параметров, может

быть монотонно возрастающей или убывающей, а также иметь экстремум, удовлетворяющий условию

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

а значение аргумента в точке экстремума обозначим как x_0 .

Чтобы определить характер экстремума, продифференцируем еще раз выражение (4) по x с учетом (7):

$$\frac{\partial^2 \sigma_1}{\partial x^2} = -\frac{p_{xR}}{\xi \cdot x_R \cdot y}. \quad (8)$$

Здесь очевидно, что при разгоне материала по горизонтали экстремум функции $\sigma_1(x)$ будет являться максимумом, а при торможении – минимумом.

Рассмотрим случай разгона материала в сторону периферии ЗД. Так как функция имеет максимум, то, независимо от его расположения, минимальное значение функции будет достигаться на одной из границ диапазона $x \in [0; x_R]$.

Задавая граничное условие $\sigma_1(x) = 0$ для точки $x = x_R$ в уравнении (5), получим соответствующее значение напряжения в центре ЗД:

$$\sigma_{1,mR} = e^{\frac{a}{y}x_R} \left(p_1 + \frac{p_{xR}}{\xi \cdot a}\right) - p_1. \quad (9)$$

Учитывая, что напряжение $\sigma_1(x)$ не может принимать отрицательное значение, а также с учетом инерционной нагрузки, найдем реальное напряжение на верхней плите в центре ЗД при разгоне материала:

$$\sigma_{1,m}' = 0,5 p_y + \max(0; \sigma_{1,mR}), \quad \text{при } W_y < 0; \quad (10)$$

$$\sigma_{1,m} = \max(0; \sigma_{1,mR}), \quad \text{при } W_y > 0. \quad (11)$$

На рис. 2, а показаны характерные зависимости распределения напряжений на верхней границе ЗД при разгоне материала в случае $W_y < 0$.

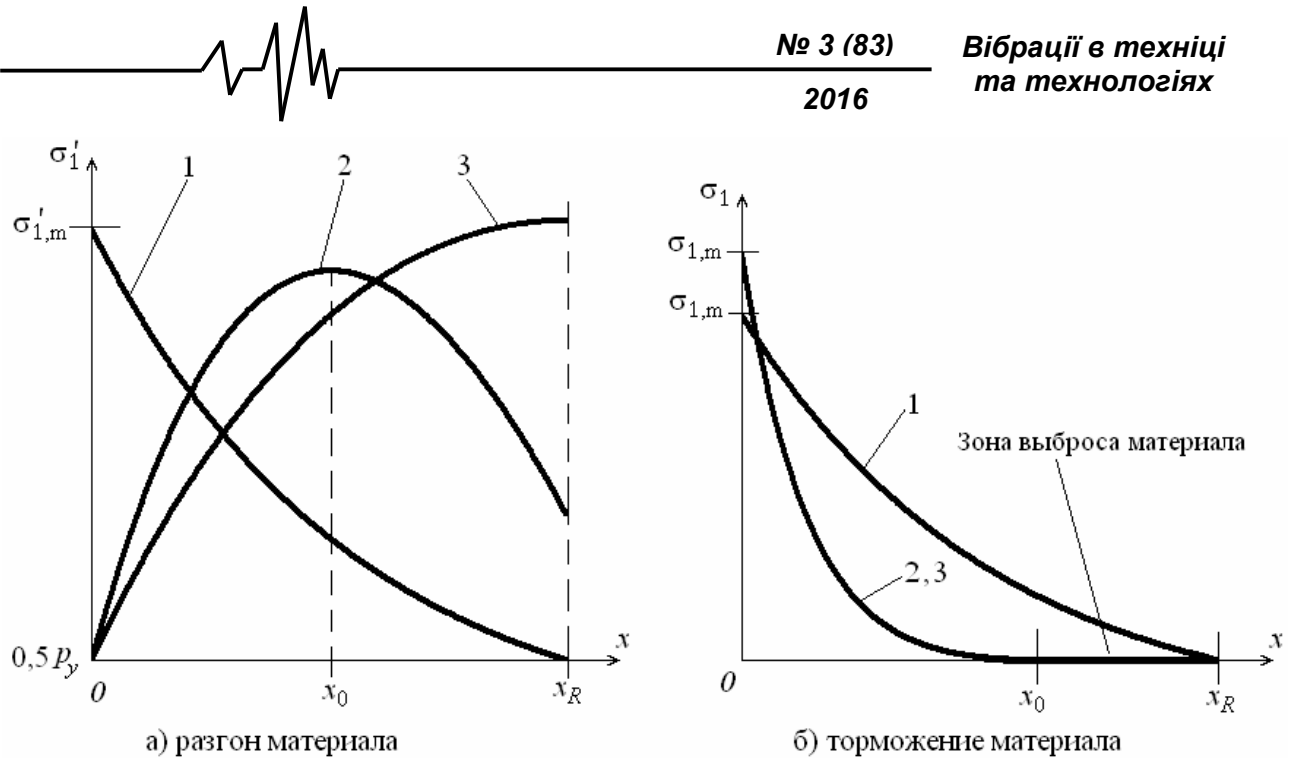


Рис. 2. Распределение напряжений в 3Д:
1 – малые ускорения; 2 – средние; 3 – высокие

Рассмотрим случай торможения материала. Из уравнения (5) при граничных условиях $\sigma_1(x) = 0$ при $x = x_0$ найдем значение вертикальных напряжений в центре верхней плиты:

$$\sigma_{1,m} = e^{\frac{a}{y}x_0} \left(p_1 + \frac{p_{xR} \cdot x_0}{\xi \cdot a \cdot x_R} \right) - p_1. \quad (13)$$

Для случая торможения функция $\sigma_1(x)$ на заданном отрезке может быть монотонно убывающей, в таком случае нулевое значение напряжений достигается в точке $x = x_R$.

Если же на отрезке $x \in [0; x_R]$ имеется минимум, то нулевое значение должно быть в точке $x = x_0$, а на отрезке $x \in [x_0; x_R]$ функция будет возрастать. В условиях увеличения инерционных ускорений в сторону периферии 3Д это противоречит условию сохранения сплошности деформируемого объема материала, поэтому на отрезке $x \in [x_0; x_R]$ будет происходить инерционный выброс материала из 3Д, соответственно напряжения на верхней рабочей поверхности можно принять равным нулю (см. рис. 2, б).

Основные результаты исследований. В результате проведенной работы получены зависимости распределения напряжений на верхней плите плоской 3Д в зависимости от инерционных свойств сыпучего

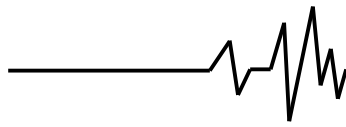
материала для режимов разгона и торможения. Обоснованы условия инерционного выброса части материала из 3Д при торможении плиты.

Выводы. Показано, каким образом в процессе деформации слоя сыпучего материала изменяется характер распределения напряжений в слое, а в режиме торможения материала обоснованы условия инерционного выброса части материала из 3Д, что составляет научную новизну.

Перспективы дальнейших научных исследований. Полученные данные позволяют анализировать динамику процесса вибрационной дезинтеграции с целью обоснования рациональных параметров рабочих органов, имеющих высокие скорости и ускорения при контакте поверхностей. Данная работа создает основу для моделирования поведения сыпучего материала в 3Д произвольной конфигурации.

Список использованных источников

1. Потураев В.Н. Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, В.П. Надутый. Монография. – Днепропетровск: НГА Украины, 2002. – 186 с.
2. Анциферов А.В. Определение угла захвата измельчителей тонкодисперсных материалов / А.В. Анциферов, А.А. Титов // Вибрации в технике и технологиях. – 2004. – № 1(33). – С. 28-30.



3. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 415 с.

4. Титов А.А. Экспериментальные исследования деформирования мелкодисперсного материала между сферической и плоской дробящими поверхностями / А.А. Титов // Збагачення корисних копалин. – 2016. – № 62(103). – С. 84-91.

5. Ревнивцев В.И. Вибрационная дезинтеграция твердых материалов / В.И. Ревнивцев, Г.А. Денисов, Л.П. Зарогатский, В.Я. Туркин. – М.: Недра, 1992. – 430 с.

Список источников в транслитерации

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

2. Antsiferov A.V. Opredelenie uhla zakhvata izmelchitelei tonkodispersnykh materialov / A.V. Antsiferov, A.A. Titov // Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh. – 2004. – Nom. 1(33). – S. 28-30.

3. Andreev S.E. Droblenie, izmelchenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh / S.E. Andreev, V.A. Perov, V.V. Zverevich. 3-e izd., pererab. i dop. – М.: Nedra, 1980. – 415 s.

4. Titov A.A. Eksperimentalnye issledovaniya deformirovaniya melkodispersnogo materiala mezhdru sfericheskoy i ploskoy drobyashimi poverkhnostyami / A.A. Titov // Zbahachennya korysnykh kopalyn. – 2016. – Nom.62(103). – S. 84-91.

5. Revnivitsev V.I. Vibratsionnaya dezintegratsia tverdykh materialov / V.I. Revnivitsev, G.A. Denisov, L.P. Zarogatskiy, V.Ya. Turkin. – М.: Nedra, 1992. – 430 s.

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПЛОСКОЇ ЗОНИ ДЕФОРМУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ДЕЗІНТЕГРАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ ВИКИДУ МАТЕРІАЛУ

Анотація. У роботі розглянуто процес деформування шару сипкого матеріалу між плоскими поверхнями вібраційних

дезінтеграторів за суттєвих швидкостей та прискорень зближення. Створено математичну модель граничного стану матеріалу, з урахуванням його внутрішнього та зовнішнього тертя. Отримані залежності розподілу нормальних напружень на поверхні верхньої плити для випадків розгону та гальмування матеріалу. Обґрунтовані умови розриву суцільності шару за рахунок інерційних сил, що призводить до вибросу матеріалу із зони деформування у режимі гальмування. Показано, що в цьому випадку периферична частина зони деформування має область нульових напружень на верхній плиті та не опирається деформації шару. Результати роботи створюють базу для обґрунтування раціональних параметрів робочих органів вібраційних дезінтеграторів.

Ключові слова: вібраційний дезінтегратор, дробарка, млин, плоска зона деформування, молольне тіло, сипкий матеріал, напружено-деформований стан.

ANALYSIS OF STRESSED CONDITION OF THE FLAT DEFORMED ZONE OF VIBRATIONAL DISINTEGRATORS TAKING INTO CONSIDERATION MATERIAL THROWING-OUT

Annotation. The process of loose material layer deformation between flat surfaces of vibrational disintegrators with essential velocities and accelerations of rapprochement is considered in the work. The mathematical model of material's limiting condition, taking into consideration its internal and external friction, is created. The dependences of normal stresses distribution on surface of the upper plate are obtained for the cases of material acceleration and braking. The terms of layer continuity rupture by inertial forces, leading to material throwing-out from the deformed zone in the mode of braking, are substantiated. It is shown, that in this case the peripheral part of deformed zone has the area of zero stresses on the upper plate and does not resist to the layer deformation. 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, grinding body, loose material, stressed-deformed condition.