

УДК 621.762

## УПЛОТНЕНИЕ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРОКАТКОЙ В ВАЛКАХ

Ложечников Е.Б. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Гавриленя А.К. (Барановичский государственный университет, г. Барановичи, Беларусь)

*Базируясь на основных положениях механики грунтов и теории пластичности, а также результатах экспериментов, обобщены условия обработки сыпучих материалов в валках с целью их компактирования или измельчения. Получены аналитические зависимости, на основе которых разработана методика расчета кинематических и энергосиловых параметров измельчения материалов их прокаткой в валках.*

### Введение

Измельчение кусковых и сыпучих порошковых материалов представляет широко распространенную, энергоемкую операцию обогащения и обработки сырьевых материалов и отходов. Процесс дробления и измельчения происходит в результате энергосилового воздействия на обрабатываемый материал, эффективность которого определяется способом и конструкцией измельчителей, а также режимом процесса и дисперсностью конечного продукта [1-3]. Вследствие самоорганизации дисперсной среды, представляющей связносыпучее тело, размер частиц которого соизмерим с шероховатостью поверхности размольных тел и локальной упругой деформацией их приповерхностного слоя, силовое воздействие со стороны размольных тел воспринимается не отдельными частицами, а связанными между собой в результате контактного взаимодействия частицами деформируемой и уплотняемой среды.

### Результаты исследования

Контактное взаимодействие частиц этой среды базируется на критерии прочности Мора-Кулона – математическим описанием криволинейной огибающей кругов предельного напряженного состояния [3-5], изображенных на рисунке 1.

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c = (\sigma_n + \sigma_c) \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $\sigma_n$  и  $\tau_n$  – нормальное и касательное напряжения к поверхностям сдвига;  
 $\varphi$  и  $c$  – соответственно угол межчастичного трения и сцепление частиц;  
 $\sigma_c$  – напряжение разрыва контактов между частицами.

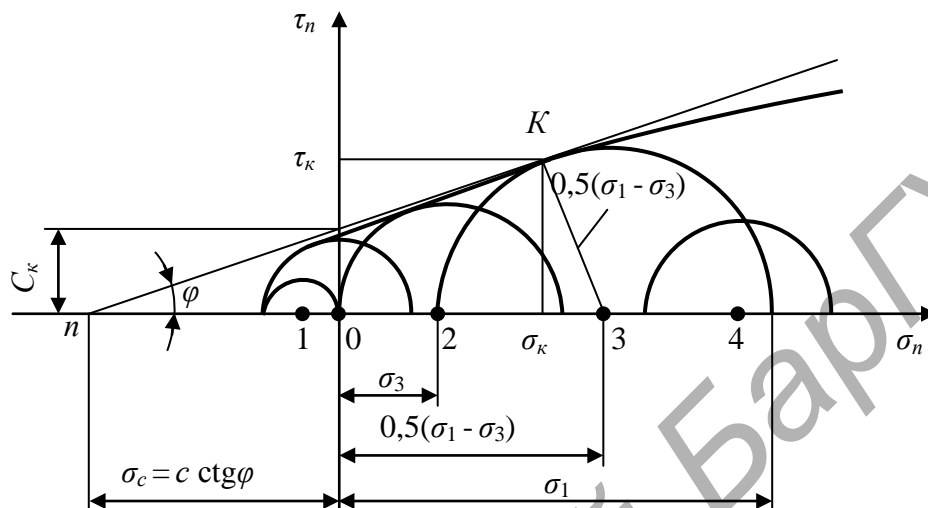
Восприятие связносыпучим материалом внешней нагрузки сопровождается ростом контактных между частицами напряжений, деформацией и увеличением поверхностей контактов. Это приводит к уменьшению его объема и увеличению плотности. Последнее можно описать выражением [3]

$$\rho_\sigma = \rho_i + \hat{\epsilon} p^m, \quad (2)$$

где  $\rho_n$  – насыпная плотность порошка;

$m$  и  $k$  – устанавливаемые экспериментально параметры, зависящие от свойств материала частиц порошка, способа нагружения (обработки) порошка и др.;

$p$  – давление.



0 – чистый сдвиг,  $\tau_n = c$ ; 1 – одноосное растяжение,  $\sigma_n = -\sigma_1$ ; 2 – одноосное сжатие,  $\sigma_n = \sigma_1$ ;  
3 – двухосное сжатие; 4 – двухосное сжатие без сдвига

**Рисунок 1 – Диаграмма кругов предельного состояния Мора**

С увеличением давления  $p$  и плотности порошка  $\rho_\sigma$  параметры его прочности ( $c$  и  $\varphi$ ) изменяются (рисунок 1): угол межчастичного трения уменьшается, а сцепление увеличивается. Это предопределяет отличие условий деформации связносыпучей среды от поликристаллического твердого тела, условие пластичности которого в главных напряжениях описывается формулой Сен-Венана-Трески [6, 7]

$$\sigma_1^I - \sigma_3^I = \beta \sigma_s, \quad (3)$$

где  $\sigma_1^I$  и  $\sigma_3^I$  – большее и меньшее главные напряжения;

$\sigma_s$  – предел текучести материала;

$\beta = 1 \dots 1,15$  – коэффициент, учитывающий условия деформации.

Вытекающее из критерия прочности (1) соотношение компонент напряжений деформируемой связносыпучей среды описывается выражениями [4, 5]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right\} &= \sigma (1 \pm \sin \varphi \cos 2\delta) - \sigma_c \\ \tau_{xy} &= \sigma \sin \varphi \sin 2\delta \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где  $\sigma = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$  – среднее напряжение;

$\delta$  – направление большего главного напряжения относительно базовой оси координат в двухмерном пространстве.

Из образованного между осью абсцисс ( $\sigma_n$ ) и касательной к огибающей кругов Мора прямоугольного треугольника  $n3K$  с меньшим, противолежащим углу  $\varphi$  катетом  $0,5(\sigma_1 - \sigma_3)$ , вытекает условие пластичности (предельное состояние) связносыпучей среды, выраженное в главных напряжениях

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2c \cos \varphi. \quad (5)$$

Следовательно, в отличие от компактных тел условие пластичности связносыпучих определяется не только свойствами обрабатываемого материала ( $\sigma_s$ ,  $\varphi$  и  $c$ ), но и величиной возникающего в нем меньшего главного напряжения. Поскольку с увеличением давления и плотности обрабатываемого связносыпучего материала до компактного состояния угол его межчастичного трения уменьшается до нуля  $\varphi \rightarrow 0$ , а  $2c \rightarrow \sigma_s$ , выражение (5) приобретает физический смысл и значение (3), т. е. (5) можно рассматривать как обобщенное условие пластичности для компактных твердых и порошковых материалов, состоящих из твердых частиц.

Вследствие того, что прочность сцепления обрабатываемых в холодную частиц порошка обычно меньше прочности материала частиц, механизм деформации и уплотнения порошка условно разделяют на три следующих по мере уплотнения стадии. В начале нагружения преобладает структурная деформация – деформация за счет взаимного перемещения частиц порошка с уменьшением объема в результате их более плотной упаковки. Вторая стадия характеризуется сочетанием структурной деформации и возрастающей пластической деформацией частиц. При дальнейшем росте внешней нагрузки деформация и незначительное уплотнение порошкового тела происходят в основном за счет пластической деформации и разрушения составляющих его частиц.

Поскольку сцепление частиц уплотненного в холодную порошка меньше прочности его частиц ( $2c \leq \sigma_s$ ), условие (5) свидетельствует о возможности деформации ранее уплотненного порошка внешним нагружением, меньшим предшествующей обработки при условии снижения меньшего главного напряжения  $\sigma_3$ , а следовательно, и среднего  $\sigma$ . В этом случае структурная деформация вызывает разрыв ранее образовавшихся и образование новых контактов между частицами, площадь и прочность сцепления которых определяются действующими между ними напряжениями. При малых величинах  $\sigma_3$ , например, при одноосном действии сосредоточенной нагрузки, ранее уплотненное из порошка тело разуплотняется с возможностью его разрушения в порошок, размер частиц которого меньше исходного. Последнее является следствием его предшествующей обработки давлением в условиях интенсивных сдвигов по пересекающимся поверхностям скольжения.

Поскольку частицы порошка представляют твердые тела, пластическая деформация с разрушением которых наступает при разности главных напряжений, описываемых условием (3), такая же разность главных напряжений должна быть в массе этих частиц, представляющих обрабатываемый давлением порошок, условия деформации которых зависят от величины среднего напряжения, что вытекает из условия (5). Подстановкой значений разности главных напряжений из (3) в (5) определена величина среднего напряжения, вызывающего деформацию и разрушение частиц ( $\beta = 1$ )

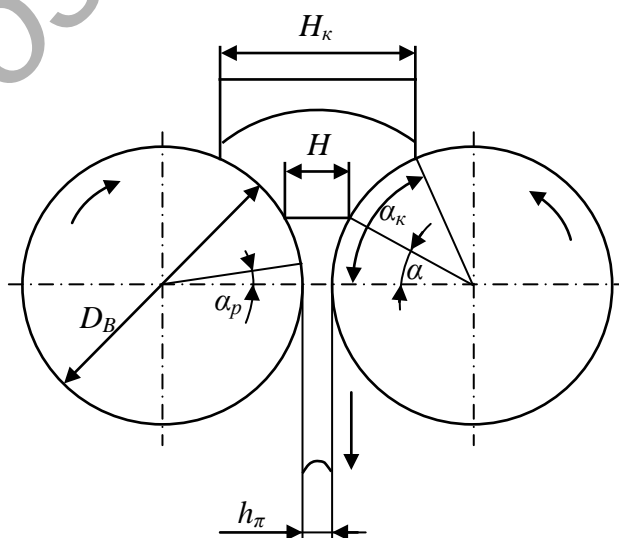
$$\sigma = (k_\sigma \sigma_s - 2c \cos \varphi) \nu_\sigma / 2 \sin \varphi, \quad (6)$$

где  $k_\sigma$  – коэффициент, величина которого устанавливается целью процесса: уплотнения в жесткое тело  $k_\sigma \approx 1$  или измельчения  $k_\sigma = \sigma_A / \sigma_S$  ( $\sigma_A$  – предел прочности подвергаемого обработке материала).

Введенная в числитель (6) величина относительной плотности порошка  $v_\sigma = \rho_\sigma / \rho$ , где  $\rho$  – плотность (удельный вес) материала частиц, учитывает реальную площадь сечения порошка. При этом большее главное напряжение, вызывающее согласно (2) уплотнение порошка до  $\rho_\sigma$  (внешнее давление  $p$  принято равным большему главному напряжению)

$$\sigma_1 = \sigma(1 + \sin \varphi) - \sigma_c. \quad (7)$$

Из изложенного следуют особенности условий и процессов обработки давлением порошков в валках. Сыпучесть исходного материала предопределяет отсутствие на входе в валки «жесткого конца», что обуславливает необходимость постоянного заднего подпора порошка на валки, который, как правило, реализуется гравитационными силами при вертикальном или под углом к горизонту направлении прокатки (рисунок 2). Для повышения плотности и интенсивности захвата порошка валками применяют принудительный подпор, например, шнековыми питателями. Межвалковое пространство должно быть ограничено бункером с плотно прилегающими к бочке валков щеками. Ограничиваемый бункером угол контакта порошка с валками  $\alpha_k$  может достигать величины  $0,5\pi$ . Многочисленные эксперименты показали, что уменьшение угла контакта до некоторой величины  $\alpha$ , принятой за угол захвата, при всех прочих равных условиях не оказывает влияния ни на толщину  $h$ , ни на плотность  $\rho_l$  прокатанной ленты [3, 8]. Из этого следует, что в межвалковом пространстве за пределами определяемого углом  $\alpha$  сечения захвата  $H$  структурная деформация порошка происходит без увеличения его плотности, а силовое взаимодействие его с валками ограничено реакцией на задний подпор. При углах контакта, меньших угла захвата, величина которого находится в пределах  $28-32^\circ$ , уменьшение или увеличение угла контакта приводит к уменьшению или увеличению плотности и толщины порошкового проката. Изменение толщины при этом является следствием изменения плотности проката, давлений на валки и распирающих валки сил  $P_B$ , упруго деформирующих рабочую клеть прокатного стана.



$\alpha_k$  – угол контакта;  $\alpha$  – угол захвата;  $\alpha_p$  – угол прокатки

Рисунок 2 – Угловые параметры прокатываемого порошка

При постоянных условиях процесса изменение межвалкового зазора (толщины проката) практически не влияет на интенсивность захвата порошка валками, о чем свидетельствует согласуемая с условием постоянства массы прокатываемого порошка гиперболическая зависимость между плотностью и толщиной проката

$$h_{\bar{e}} \rho_{\bar{e}} \approx C_{\bar{e}} \approx \text{const.} \quad (8)$$

Эксперименты прокатки с фиксированием рентгеновскими лучами состояния порошка в межвалковом пространстве показали (рисунок 3), что, начиная с сечения захвата, деформация порошка сопровождается интенсивными сдвигами по пересекающимся поверхностям скольжения, периодически вырождающимися в поверхности (слое) разрывов скоростей и напряжений [3, 8]. Углы наклона этих линий к направлению прокатки свидетельствуют о том, что в сечении захвата направление большего главного напряжения перпендикулярно направлению прокатки. Подстановкой в выраженную в полярной координате  $\varphi_i$  известную зависимость главного направления  $\delta$  от параметров трения [4, 5]  $\delta = 2\varphi_i + \varphi_T + \arcsin(\sin \varphi_T / \sin \varphi)$  значения  $\delta = 0,5\pi$  и  $\varphi_i = 0,5\pi - \alpha_m$  (рисунок 2) получена формула наибольшего возможного угла захвата порошка валками [3]

$$\alpha_m = 0,5(\varphi_T + \arcsin(\sin \varphi_T / \sin \varphi)). \quad (9)$$



Рисунок 3 – Рентгенограмма очага деформации при прокатке

Установленное с помощью встроенной в валки прокатного стана точечной мезодозы распределение давлений по дуге захвата показало [3], что в области интенсивных сдвигов давления на валки незначительны. И только начиная с сечения, после которого поверхности пересекающихся разрывов на рисунке 3 не проявляются, происходит резкий рост давлений, эпюра которых имеет близкую к треугольной форму с куполообразной вершиной – максимумом (рисунок 4), определяющим плотность в соответствии с (2) проката  $\rho_{\sigma}$ . Длина дуги, соответствующая основанию эпюры давлений на валки, названа дугой прокатки  $l_p = 0,5\alpha_p D_A$ , а угол  $\alpha_p$  – углом прокатки. Извлечение из валков недоката показывает, что вблизи соответствующего углу  $\alpha_p$  сечения порошок

обычно уплотняется до состояния, способного сохранить форму, а его дальнейшее обжатие происходит в основном за счет деформации составляющих его частиц.

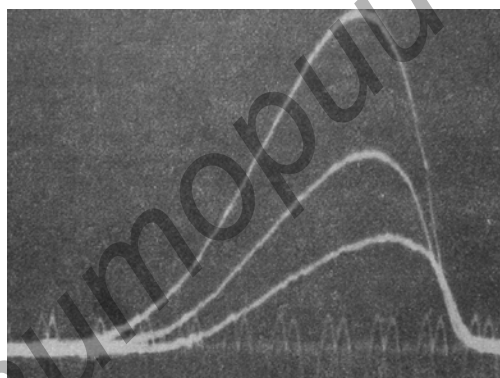
Многочисленные эксперименты прокатки разных порошков в валках диаметром 180 и 600 мм со встроенными в них точечными месдозами показали, что величина угла проката обычно составляет около 0,3 угла захвата ( $\alpha_\delta \approx 0,3\alpha$ ). Близкая к треугольной конфигурация эпюр нормального давления на валки позволяет принимать площадь образованных ими фигур, представляющих погонное давление на валки, как площадь треугольника с основанием  $ld$  и высотой  $\sigma_1$ . Тогда величина усилия, действующего на валки с длиной бочки  $B$  [3, 8]

$$P_A = 0,25\sigma_1 \hat{A} D_A \alpha_\delta, \quad (10)$$

а крутящий момент привода одного валка

$$M_1 = \psi ld P_A = 0,25\sigma_1 \hat{A} D_A^2 \alpha_\delta^2, \quad (11)$$

где  $\psi ld$  – плечо приложения силы  $P_A$  относительно оси валка ( $\psi \approx 0,33$ ).



**Рисунок 4 – Осциллограммы нормальных контактных напряжений при прокатке железного порошка в полосы разной плотности**

Экспериментально установлено, что наибольшая толщина прокатываемых из порошков лент и полос при оптимальных условиях (направлении прокатки, угле захвата, скорости прокатки) определяется диаметром бочки валков  $h \approx 0,01D_A$ . При этом в соответствии с (8) прокат имеет наименьшую обеспечивающую сохранение формы плотность.

Из этого следует второе условие уплотнения порошка в валках – зазор между валками не должен превышать  $0,01D_A$ .

Третьим условием прокатки порошков, обеспечивающим его уплотнение с деформацией и дроблением частиц, является скорость прокатки, которая не должна превышать разную для разных порошков верхнюю критическую скорость. Это обусловлено тем, что объем порошка на 2/3 и более состоит из пор, заполненных воздухом. При уплотнении объем пор уменьшается, а воздух выдавливается – фильтруется через поступающий в сечение захвата порошок, задерживая его движение. С увеличением скорости встречный движению порошка поток воздуха задерживает это движение, увели-

чивая объем пор. В результате масса захватываемого валками порошка уменьшается, что приводит к уменьшению параметра  $C_L$  в (8). При превышении разной для разных порошков верхней критической скорости равномерность фильтрации воздуха через порошок нарушается. В межвалковом пространстве над и в сечении захвата образуются объемы псевдосжиженного порошка. Стабильность захвата и уплотнения порошка нарушается, из валков выходят отдельные куски уплотненного порошка (куски полос). При этом значительная его часть просыпается между валками, а рабочая клетка вибрирует вследствие колебаний, действующих между валками.

Высокая газонасыщенность порошков обуславливает сравнительно низкие скорости их прокатки, обычно не превышающие 0,1-0,2 м/с.

Оставшийся в порах прокатанных полос воздух находится под высоким давлением, что при прокатке толстых с высокой плотностью полос (5-7 мм) приводит за счет порового давления к их разрушению с характерными выстрелоподобными звуками. Это наблюдалось, например, при размол в валках диаметром 600 мм отработанных формовочных смесей литейных производств [9].

Исходя из изложенного следует, что прокатываемый в валках порошок деформируется и уплотняется. При этом составляющие его частицы находятся в условиях всестороннего сжатия под давлениями, соотношение и величины которых определяются выражениями (4)-(6). При низких деформационных возможностях материала частиц порошка и вследствие дефектов обычно развитой их поверхности, являющихся концентраторами напряжений, частицы прокатываемого порошка разрушаются и уплотняются в полосы (ленты), которые согласно (2) и (5) деформируются, разуплотняются (дилатация) и разрушаются в порошок при их последующем нагружении в условиях, обеспечивающих более низкие значения контактных напряжений между частицами.

Непрерывность процесса и стабильность энергосилового воздействия на обрабатываемый в валках материал обуславливает сравнительно низкую удельную энергоемкость размол при высокой производительности, определяемой параметром  $C_L$ , диаметром и длиной бочки валков  $B$  и скоростью прокатки  $v_L$   $Q = \rho_{\text{в}} h_{\text{в}} B v_{\text{в}}$ . Обрабатываемый в толстом слое материал имеет ограниченный с поверхностью бочки валков контакт, что уменьшает их износ и загрязнение продуктов размол даже при обработке таких сверхтвердых материалов, как диборид титана и нитрид алюминия [3]. Стабильность энергосилового воздействия за проход прокатки материалов с гомогенной структурой предопределяет узкое поле рассеяния размеров частиц продуктов размол. При обработке давлением материалов с гетерогенной структурой, состоящих из разных по прочности и условиям деформации и разрушения компонентов, происходит избирательное измельчение менее прочных составляющих при сохранении размеров более прочных и пластичных. Более прочные, например, металлические частицы в деформируемой массе шлака (дисперсной матрице) находятся в условиях и напряженном состоянии, соответствующим (4) и (5), но не условию их пластичности (3).

Установление технологических и энергосиловых параметров измельчения обрабатываемых в толстом слое сыпучих материалов базируется на обобщенных выше условиях обработки в валках твердых материалов, результатах теоретических и экспериментальных исследований, выраженных в аналитических зависимостях параметров технологического процесса измельчения от свойств обрабатываемого давлением материала и конечного продукта.

В соответствии с поставленной целью обработки – изменение свойств материала за счет уменьшения размеров составляющих его частиц – на основе анализа информации об известных способах и устройствах принимается решение о способе измельчения. При этом учитываются объемы производства, удельная энергоемкость процесса,

специфика производства и другие условия. К таким условиям относится избирательность измельчения отдельных компонентов гетерогенных композиций, обеспечивающая в дальнейшем их разделение, что используется при переработке полезных ископаемых (обогащение руд) и производственных отходов [10].

По стабильности и управляемости силового воздействия на измельчаемый в толстом слое материал при низкой энергоемкости и возможностях весьма высокой производительности непрерывного процесса измельчения выделяются валковые мельницы (роллер-прессы).

Проектирование валковой мельницы базируется на основе данных о свойствах исходного материала и конечного продукта, обеспечивающего поставленную цель, а также объемах производства (производительности). Свойства исходного материала и продукта его переработки (измельчения) определяются лабораторными исследованиями и при возможности – по справочной литературе. Расчеты и принятие технических решений базируются на установленных экспериментально результатах и аналитических решениях в последовательности, представленной на рисунке 5.



Рисунок 5 – Схема расчета энергосиловых параметров



### Заключение

Обоснована допустимость совместного решения условий деформации связносыпучей среды и составляющих ее частиц твердого тела. На основании известных и полученных аналитических решений и результатов экспериментов по уплотнению (компактированию) сыпучих, дисперсных материалов сформулированы условия их обработки прокаткой в валках, обеспечивающей достижение поставленной цели: уплотнения порошка в жесткое тело или измельчение составляющих его частиц.

Разработана методика выбора кинематических и расчета энергосиловых параметров обработки сыпучих материалов их прокаткой в валках, необходимых для проектирования технологии процесса и оборудования.

### Список использованных источников

1. **Сиденко, П.Л.** Измельчение в химической промышленности / П.Л. Сиденко. – М.: Химия, 1968. – 382 с.
2. **Акунов, В.И.** Валковые мельницы высокого давления / В.И. Акунов // Строительные и дорожные машины. – 1994. – № 7. – С. 10-11.
3. **Ложечников, Е.Б.** Прокатка в порошковой металлургии / Е.Б. Ложечников. – М.: Металлургия, 1987. – 185 с.
4. **Соколовский, В.В.** Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Физматгиз, 1966. – 243 с.
5. **Харр, М.Е.** Основы теоретической механики грунтов / М.Е. Харр. – М.: Стройиздат, 1971. – 320 с.
6. **Губкин, С.И.** Теория обработки металлов давлением / С.И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1947. – 532 с.
7. **Ложечников, Е.Б.** Механика измельчения прокатываемых в толстом слое материалов / Е.Б. Ложечников, А.К. Гавриленя // Вестник БНТУ. – 2006. – № 6. – С. 16-21.
8. **Виноградов, Г.А.** Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул / Г.А. Виноградов, В.П. Каташинский. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.
9. **Ложечников, Е.Б.** Переработка промышленных отходов в валковых мельницах / Е.Б. Ложечников, А.В. Бусел // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: тр. науч.-технич. конф.; под ред. А.И. Свириденко. – Гродно, 1995. – Ч. 1. – С. 165-170.
10. **Ложечников, Е.Б.** Выбор способов энергосберегающего измельчения порошков / Е.Б. Ложечников, А.К. Гавриленя // Горная механика. – 2008. – № 2. – С. 64-68.

---

**Lozhechnikov E.B., Gavrilena A.K.**

#### **Concentration and milling of granular materials in rolls**

*Being based on the main rules of soil mechanics and the plasticity theory and also on the results of experiments, conditions of machining of granular materials in rolls for the purpose of their compacting or milling are generalized. Analytical dependences are stated on which basis the design procedure of kinematic and powerful parameters of milling the materials by their rolling is developed.*

Поступила в редакцию 21.11.2008 г.