

Романович А.А., д-р техн. наук, проф.,  
Воробьев Н.Д., кан. техн. наук, проф.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Апухтина И.В., ассистент  
Белгородский государственный университет

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ УПЛОТНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ВАЛКОВОМ УСТРОЙСТВЕ

AlexejRom@yandex.ru

В статье рассмотрены актуальные вопросы повышения надежности в работе пресс-валковых измельчителей, которые широко используются на обогатительных фабриках в горнорудной и цементной промышленности. Повышение долговечности рабочего профиля валков достигается за счет равномерной подачи измельчаемых материалов по их ширине, что приводит к равномерному износу. Аналитически исследован механизм распределения и предуплотнения материалов в валковом устройстве, получено уравнение для расчета требуемого усилия.

**Ключевые слова:** Надежность, пресс-валковый измельчитель, валковое устройство, усилие предуплотнения.

**Введение.** В мире на процессы измельчения и тонкого помола материалов, которые являются одними из основных операций, осуществляемых в различных технологиях производства, расходуется около 10% всей производимой энергии [1–3]. Поэтому снижение энергозатрат на измельчение материалов является актуальной задачей. Известно [4–6], что реализация процесса измельчения с использованием пресс-валкового измельчителя (ПВИ) обеспечивает снижение удельного расхода электроэнергии на 25–40 % и повышение производительности шаровой мельницы (ШМ) на 30–40 %. Это достигается за счет более эффективного способа разрушения материалов (раздавливания со сдвигом), реализуемого в ПВИ, чем ударного на первой стадии в ШМ. Например: удельный расход электроэнергии, затрачиваемый на предварительное измельчение материалов в ПВИ составляет 3–4 кВт·ч/т, что соответствует затратам в ШМ равным 7–10 кВт·ч/т. Эти агрегаты широко используются на обогатительных фабриках в горнорудной и цементной промышленности. Однако в последние десятилетия из-за неравномерности износа рабочих поверхностей валков по их ширине темпы внедрения пресс-валковых агрегатов снизились. Одной из причин снижения является неравномерная подача материала по ширине валков, что приводит к более интенсивному износу их рабочей поверхности в центре. Поэтому на протяжении всего периода эксплуатации пресс-валковых измельчителей предпринимались попытки разработать технические решения, позволяющие повысить долговечность валков [7–8].

**Основная часть.** Согласно [9] повышение долговечности рабочих органов ПВИ позволяет

получить разработанная учеными БГТУ им. В.Г. Шухова конструкция ПВИ с валковым устройством (рис.1), которая включает в себя пресс-валковый агрегат 1 и валковое устройство 2, состоящее из двух валиков, установленных в бункере по всей его ширине. Применение валкового устройства перед подачей материала к валкам ПВИ позволяет равномерно распределить его по ширине валков и предуплотнить, что позволяет осуществить более равномерный износ их рабочей поверхности и тем самым повысить долговечность валков. Однако величина усилия предуплотнения материалов, зависящая во многом, как от свойств материала и габаритных размеров валика, так и от его положения в бункере, оказывает существенное влияние не только на энергетические показатели процесса измельчения, но и на конструктивное исполнение агрегата в целом. С целью определения рационального усилия валиков, требуемого на равномерное распределение по ширине и уплотнение материала в валковом устройстве, рассмотрим расчетную схему, представленную на рис. 2. Положение валика валкового устройства 1 радиуса  $r$  по отношению к бункеру 2 зададим через смещение его центра по горизонтали –  $L$  и вертикали –  $l$  относительно угловой точки  $A$  бункера. Угол наклона стенки бункера обозначим через  $\alpha$ , угол, с которого начинается уплотнение материала – через  $\beta$ .

Толщина слоя материала  $h$  на выходе из валкового устройства (вдоль линии  $OD$ ) может быть рассчитана по формуле:

$$h = \sqrt{L^2 + l^2} \sin(\alpha - \beta) - r, \quad (1)$$

где угол  $\gamma$  (угол наклона прямой  $AO$  к горизон-



Рис. 1. ПВИ с валковым устройством:  
1 – валковое устройство, 2 – ПВИ

Процесс уплотнения материала начинается с момента захвата его частиц валиком (по линии  $OE$ ), при этом сила воздействия валика прямо пропорциональна величине уплотнения слоя шихты. Изменение величины уплотнения в зависимости от угла  $\varphi$  определяется по уравнению:

$$\Delta\rho(\varphi) = \rho(\beta) - \rho(\varphi), \quad (2)$$

где  $\varphi \geq \beta$

Определим величину уплотнения материала по мере его перемещения.

Уравнение прямой  $OE$  в полярных координатах  $\rho, \varphi$  (угол  $\varphi$  отсчитывается от прямой  $OA$ ), имеет вид:

$$\rho \cos(\varphi - \theta) = p, \quad (3)$$

где параметры  $\theta, p$ , соответственно, равны:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha + \gamma, \quad p = h + r. \quad (4)$$

После ряда преобразований получим уравнение для расчета величины уплотнения материала в зависимости от его радиуса и расположения в бункере:

$$\Delta\rho(\varphi) = \frac{4(h+r)\cos\left(\alpha - \gamma + \frac{\varphi + \beta}{2}\right)\sin\left(\frac{\varphi - \beta}{2}\right)}{(\cos(\varphi - \beta) - \cos(2(\alpha - \gamma) + \varphi + \beta))}. \quad (5)$$

Зависимость  $\Delta\rho(\varphi)$  от смещения по вертикали  $l$  при  $\alpha = 50^\circ, \beta = 17^\circ, L = 55$  см,  $r = 200$  мм, при этом расчетный коэффициент уплотнения равен, соответственно, 1,19; 1,24; 1,29 и 1,35 (рис.3).

тали) находим из соотношения  $\operatorname{tg} \gamma = \frac{l}{L}$ .

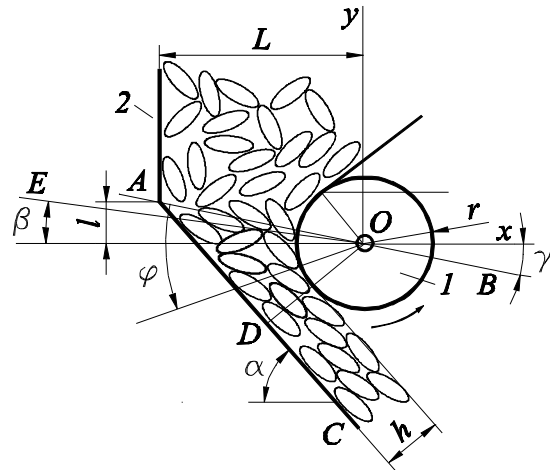


Рис. 2. Расчетная схема механизма уплотнения:  
1 – валик, 2 – бункер

На поверхность валика в зоне уплотнения действует удельная нагрузка со стороны уплотняемого материала  $q, \text{Н/м}^2$ .

Тогда суммарная сила, с которой валок воздействует на материал, определяется по формуле:

$$F = \iint_{(S)} q ds, \quad (6)$$

где  $S$  – площадь, к которой приложена распределенная нагрузка.

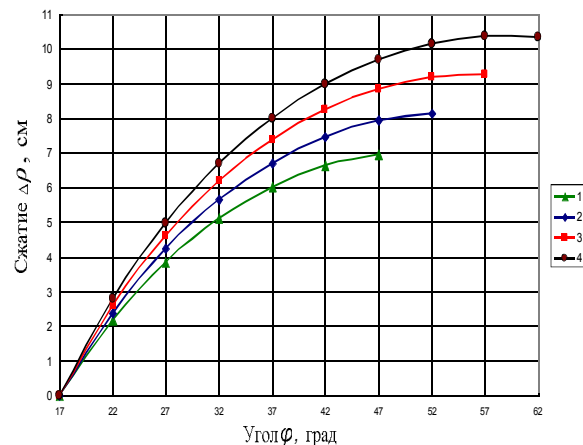


Рис. 3. Величина сжатия материала в зависимости от величины угла  $\varphi$ :

$1 - l=10$  см;  $2 - l=13$  см;  $3 - l=16$  см;  $4 - l=19$  см

На стадии уплотнения, когда отсутствует разрушение частиц материала, интенсивность распределенной силы прямо пропорциональна величине уменьшения радиальной составляющей  $\Delta\rho$  (рис. 4).

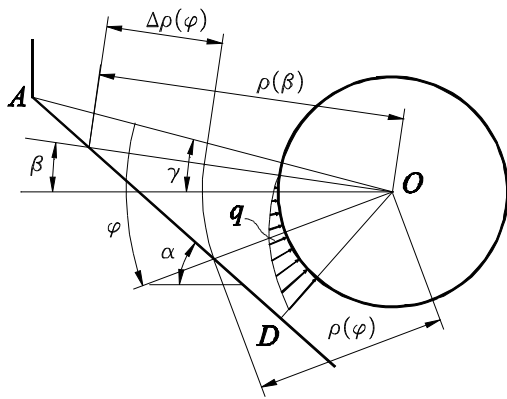


Рис. 4. К расчету интенсивности распределенной нагрузки  $q$

Таким образом, интенсивность  $q$  можно записать в виде формулы:

$$q = \mu \Delta \rho, \quad (7)$$

$$F = \iint_{(s)} \mu \Delta \rho r d\varphi db = \mu r b (h+r) \int_{\beta}^{\varphi_{\max}} \left( \frac{h+r}{\sin(\alpha-\gamma+\beta)} - \frac{h+r}{\sin(\alpha-\gamma+\varphi)} \right) d\varphi, \quad (9)$$

где  $b$  – ширина валика,  $\varphi_{\max}$  – максимальное значение угла  $\varphi$ .

Как следует из рисунка 2,  $\varphi_{\max} = \angle AOD = \frac{\pi}{2} - \alpha + \gamma$ . Для вычисления интеграла (9) сделаем замену  $\xi = \alpha - \gamma + \varphi$ , тогда получим:

$$F = \mu r b (h+r) \left( \frac{\pi/2 - \psi}{\sin(\psi)} + \ln \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right), \quad (10)$$

где  $\mu$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от характеристик уплотняемого материала (гранулометрического состава, формы и др). Физическая интерпретация коэффициента  $\mu$  состоит в следующем: это величина силы, которую надо приложить для уплотнения материала на единицу объема.

Считая распределенную нагрузку равномерной вдоль оси валика, получим:

$$dF = \mu \Delta \rho ds, \quad (8)$$

где  $ds$  – элемент поверхности валика, определяется формулой  $ds = r d\varphi db$ ,  $db$  – линейный элемент длины вдоль образующей поверхности валика.

Таким образом, силу воздействия валика на материал можно определить по формуле:

где  $\psi = \alpha - \gamma + \beta$ .

Поскольку, как уже отмечалось выше, величина параметра  $\mu$  зависит от свойств уплотняемого материала, его значение определялось экспериментально.

На рис. 5 представлена экспериментально полученная зависимость величины удельной нагрузки  $q$  на коэффициент уплотнения  $k$ , для двух материалов – известняка и клинкера.

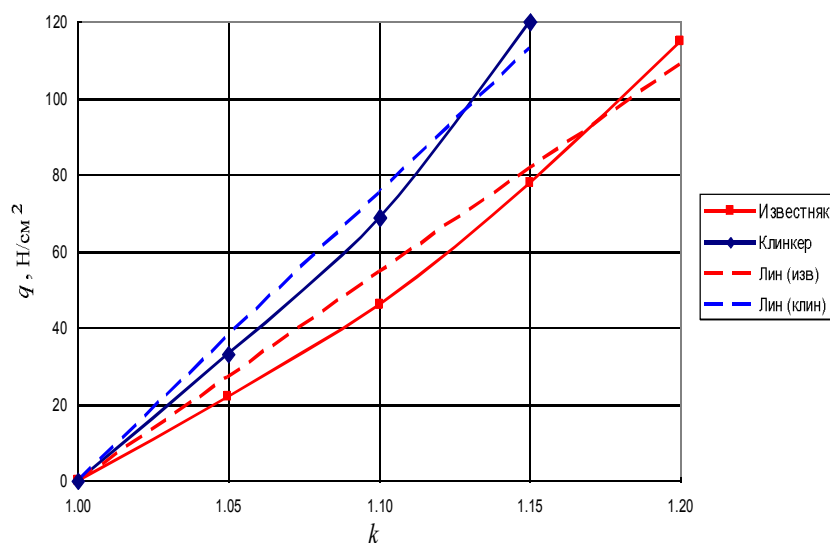


Рис. 5. Зависимость удельной нагрузки  $q$  от коэффициента уплотнения  $k$

Для использования результатов экспериментальных исследований в целях определения

параметра  $\mu$ , формулу определения коэффициента уплотнения  $k$  запишем в виде:

$$k = \frac{\rho(\beta) - r}{\rho(\varphi) - r} \quad (11)$$

или

$$k - 1 = \frac{\Delta\rho}{\rho(\varphi) - r} \quad (12)$$

Аппроксимировав полученные кривые зависимостей  $q$  от  $k$  линейными (на рис. 5 показаны пунктиром), получим зависимости вида:

$$q = a(k - 1), \quad (13) \quad \text{где}$$

где

$$a_{\text{ИЗВ}} = 545 \text{ Н/см}^2, \quad a_{\text{КЛИН}} = 754 \text{ Н/см}^2.$$

Окончательно для определения  $q$  и  $\mu$  находим:

$$q = \frac{a}{\rho(\varphi) - r} \Delta\rho, \quad (14)$$

$$\mu = \frac{a}{\rho(\varphi) - r} \quad (15)$$

При выводе формулы (10) параметр  $\mu$  считался величиной постоянной. Учитывая, что уплотнение  $\rho$ , для хрупких материалов без их разрушения, при изменении угла  $\varphi$  в пределах от  $\varphi = \beta$  до  $\varphi = \varphi_{\text{MAX}}$  не велико, то  $\mu$  можно вычислить по формуле:

$$\mu = \frac{a}{\rho_{\text{CP}} - r}, \quad (16)$$

$$\rho_{\text{CP}} = \frac{\rho(\beta) - (h + r)}{2} \quad (17)$$

Анализ графических зависимостей рис.6,7, рассчитанных по формуле (10), позволил установить, что величина усилия предуплотнения материала зависит, как от его свойств и габаритных размеров валика, так и от его положения в бункере.

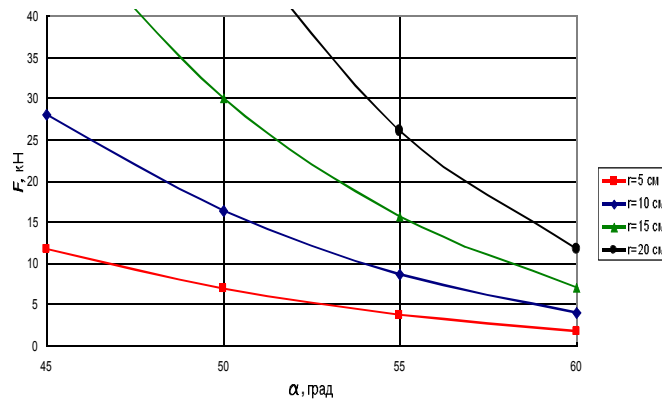


Рис. 6. Зависимость силы  $F$  от угла  $\alpha$  для различных значений  $r$

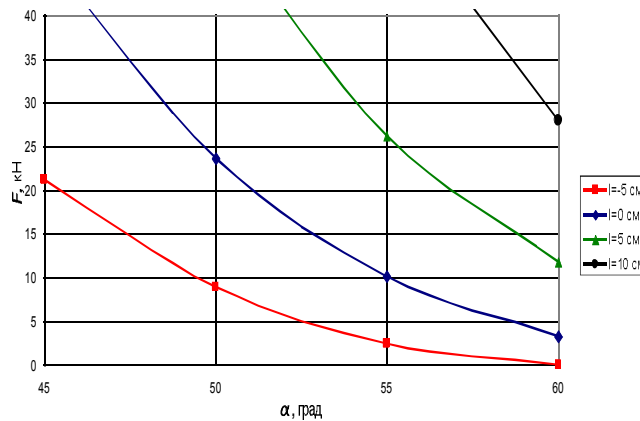


Рис. 7. Зависимость силы  $F$  от угла  $\alpha$  для различных значений  $l$

Установлено, что увеличение угла наклона стенки бункера и радиуса валика  $r$ , влечет за

собой рост значений усилия уплотнения материала. Изменение положения валика в бункере по

вертикали позволяет изменять усилия предуплотнения подаваемого к валкам ПВИ материала.

**Заключение.** Проведенные теоретические исследования позволили получить выражение для расчета максимального усилия предуплотнения шихты со стороны уплотняющих валиков, в зависимости от конструкции бункера, радиуса валиков и их расположения в приемном бункере. По уравнению (10) в зависимости от требуемого коэффициента уплотнения материалов можно определить величину усилия предуплотнения  $F$ , по которому рассчитывается мощность, необходимая на осуществление предуплотнения с учетом конструкции валкового устройства.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биннер Й. Ассмус Р., Щеголяев Е.В. Технология измельчения и классификация шлака // Цемент и его применение. 2006. № 5. С.31–36.
2. Romanovich L.G., Romanovich M.A., Vybornova V.V., Riapukhina V.N. Small businesses is a sphere of innovation in the age of globalization // Journal of Applied Engineering Science. 2014. Т. 12. № 4. С. 297–301
3. Rudychev A.A., Romanovich L.G., Romanovich M.A. Incentives for innovative activity of young scientists on the basis of higher educational institutions in Russia / Experience of belgorod state technological university named after V.G. Shukhov // World applied sciences journal. 2013. т. 25. № 12. С. 1754–1757.
4. Романович А.А. Особенности процесса постадийного измельчения материалов с использованием пресс-валкового агрегата // Известие высших учебных заведений. Строительство. 2007. №9. С. 88–91.
5. Wustner H. Energy – saving with the roller press comminution process. // World Cement. 1986. №3. Рр. 94–96.
6. Романович А.А., Алехин П.В., Мещеряков С.А. Определение усилия измельчения анизотропных материалов в пресс-валковом измельчителе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 3. С. 79–82.
7. Романович А.А., Глаголев Е.С., Бабаевский А.Н. Технология получения вяжущих с использованием техногенных отходов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С. 102–105.
8. Romanovich L., Sevostyanov V., Romanovich M., Sevostyanov M., Arkatov A.Y. Innovation activity and technology transfer of higher education // Journal of Applied Engineering Science. 2014. Т. 12. № 4. С. 273–276.
9. Миссия, стратегические приоритеты, цели и задачи развития системы образования: монография / Е.А. Афанасьева, А.Р. Вышкина, В.В. Глебов, О.В. Исаакян, О.М. Перминова, Н.Н. Харитоновна, Л.Г. Романович, П.И. Оспищев, М.А. Романович. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2012. 184 с.

---

**Romanovich A.A., Vorobiev N.D., Apukhtina I.V.**

### CALCULATION OF EFFORT PACKING MATERIALS ROLLER UNIT

*The article considers topical issues of improving the reliability in operation of the press roller grinders, which are widely used in beneficiation plants in the mining and cement industries. Increase of durability of the working profile of the rolls is achieved by a uniform flow of crushed materials according to their width, which leads to uniform wear. Analytically investigated the mechanism of distribution and predoplatnoy materials, the roller device, the derived equation to calculate the required effort.*

**Key words:** reliability, press roller crusher, roller unit preconsolidation stress.

---

**Романович Алексей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46  
E-mail: AlexejRom@yandex.ru

**Воробьев Николай Дмитриевич**, кандидат технических наук, профессор.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

**Апукhtина Инна Васильевна**, ассистент.  
Белгородский государственный университет  
Адрес: Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85