

К. т. н. А. П. Пузанов, А. И. Полянский, В. Н. Машенко, к. т. н. В. А. Кобелев  
 ОАО «Уральский институт металлов», НИЦ по переработке  
 природно-легированных материалов ОАО «Уральский институт металлов»

УДК 605.362.3.017.629.173.251

## ПРОЧНОСТЬ БРИКЕТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРАХ ЧАСТИЦ И ВЛАЖНОСТИ<sup>1</sup>

По данным экспериментальных данных по брикетированию окисленной никелевой руды с типичной составленной для обработки математической моделью, учитывающей все виды деформаций, структуры брикетов могут быть рассмотрены при прогнозировании прочности искусственных структур брикетов, полученных из мелких материалов. Разработаны математическая модель, способная описать процесс брикетирования материала с параметрами процесса уплотнения, а также модель, способная описать процесс управления технологическими параметрами материалов перед началом распределенным способом окисления — брикетированием. Формирование прочности искусственных структур — брикетов, полученным методом прессования мелких материалов, является сложным процессом, управление которым может осуществляться на различных стадиях производства.

В настоящее время брикетирование, как способ окислования мелких материалов различного химического и минерального составов и производства изделий из них, взяты на вооружение многими отраслями промышленности, и прежде всего огнеупорной, металлургической, химической и др. При этом, кроме химического состава, основным свойством окислованного продукта и изделия является прочность. Особая роль при создании необходимой прочности связи влажных частиц в структурах принадлежит внешнему уплотняющему воздействию, реализуемому в различных технологиях за счет разового уплотнения в ходе формирования брикетов или в результате динамической обработки уже сформованных или формирующихся гранул и окатышей.

В механике грунтов [1] компрессионная кривая, определяющая характер их уплотнения, приближенно описывается уравнением прямой

$$\epsilon = \epsilon_0 - m\sigma_{\text{пл}}, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  и  $\epsilon_0$  — пористость текущая и начальная;  $\sigma_{\text{пл}}$  — внешнее уплотняющее воздействие;  $m$  — коэффициент сжимаемости материала.

В дифференциальной форме уравнение (1) является точным и называется законом уплотнения грунтов:

$$d\epsilon = -m d\sigma_{\text{пл}}. \quad (2)$$

<sup>1</sup> Данное сообщение является развитием предыдущего. Полянский А. И., Пузанов В. П., Кобелев В. А. Математическая модель прочности брикетов в зависимости от крупности и влажности материала // Новые огнеупоры. — 2007. — № 4. — С. 48–50.

При уплотнении влажных структур из мелких материалов интерес представляют относительные деформации  $\delta$  при уплотняющих нагрузках, превышающих структурную прочность сжатия. В этом случае связь между величинами  $\delta \cdot \tau_{\text{пл}}$  может быть представлена по экспериментальным данным в виде степенной функции

$$\delta = \alpha \sigma_{\text{пл}}^n, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности, в простейшем случае  $\alpha = \beta/E_0$ , здесь  $\beta$  — коэффициент бокового расширения;  $E_0$  — модуль линейной деформации;  $n$  — параметр нелинейности функции.

Однако при небольших измененных напряжениях, приложенных к влажным структурам, можно применять теорию линейно деформируемых тел, по которой величина  $n$  принимается равной единице, тогда

$$\delta = \alpha \sigma_{\text{пл}}. \quad (4)$$

Принцип линейной деформируемости, выраженный уравнением (4), является одним из основных в современной механике грунтов [1].

По экспериментальным данным связь между внешней уплотняющей нагрузкой и расстоянием между поверхностями частиц в структурах может быть представлена линейной зависимостью [2]:

$$[h_0 - h_1 - \alpha \sigma_{\text{пл}}] = \frac{d_s \epsilon_0}{1 - \epsilon_0} - \alpha \sigma_{\text{пл}} = \epsilon_0 d_s - \alpha \sigma_{\text{пл}}, \quad (5)$$

где  $h_0$  и  $h_1$  — расстояние между поверхностями частиц до и после уплотнения;  $d_s$  — средний

диаметр частиц уплотняемого материала;  $k_\varepsilon$  – коэффициент пропорциональности уплотняемого материала, связанный с исходной пористостью  $\varepsilon_0$ ,  $k_\varepsilon = \varepsilon_0 / (1 - \varepsilon_0)$ .

Уравнение (5) приводится к выражению, соответствующему принципу линейной деформируемости, после преобразований и деления правой и левой его частей (квадратные скобки) на величину  $h_0$ :

$$\frac{h_0 - h_\varepsilon}{h_0} = \frac{\alpha}{h_0} \sigma_{\text{гма}} = \alpha_0 \sigma_{\text{гма}}, \quad (6)$$

отсюда

$$h_\varepsilon = h_0(1 - \alpha_0 \sigma_{\text{гма}}), \quad (7)$$

где  $\alpha_0$  – удельный коэффициент пропорциональности,  $\alpha_0 = \alpha / h_0$ .

Полагая, что взаимодействие частиц в структурах подчиняется «потенциалу 1–3» [2],

$$\sigma_{\text{гма}} = A_0 \frac{1}{h_\varepsilon} - B_0 \frac{1}{h_\varepsilon^2} + C_0 \frac{1}{h_\varepsilon^3}, \quad (8)$$

после подстановки (5) или (7) в (8) имеем

$$\sigma_{\text{гма}} = A_0 \left( \frac{1}{k_\varepsilon d_\varepsilon - \alpha \sigma_{\text{гма}}} \right) - B_0 \left( \frac{1}{k_\varepsilon d_\varepsilon - \alpha \sigma_{\text{гма}}} \right)^2 + C_0 \left( \frac{1}{k_\varepsilon d_\varepsilon - \alpha \sigma_{\text{гма}}} \right)^3, \quad (9)$$

или

$$\sigma_{\text{гма}} = A_0^* \left( \frac{1}{1 - \alpha_0 \sigma_{\text{гма}}} \right) - B_0^* \left( \frac{1}{1 - \alpha_0 \sigma_{\text{гма}}} \right)^2 + C_0^* \left( \frac{1}{1 - \alpha_0 \sigma_{\text{гма}}} \right)^3, \quad (10)$$

где  $\sigma_{\text{гма}}$  – прочность структур (брикетов, окатышей), отнесенная к максимальной площади сечения;  $A_0, B_0, C_0$  – коэффициенты пропорциональности;  $A_0^* = A_0 / h_0, B_0^* = B_0 / h_0, C_0^* = C_0 / h_0$  – постоянные эмпирические коэффициенты.

Экспериментальная проверка уравнения (10) произведена с использованием мелких железистых кварцитов при постоянной влажности материала и изменении давления прессования от 0 до 4000 Н/брикет (через каждую 1000 Н/брикет). Расчетные точки (коэффициенты  $A_0^*, B_0^*, C_0^*$  и  $\alpha_0$  равны соответственно 7,164, 13,965, 8,227 и 0,00104) достаточно точно укладываются на опытную кривую, описываемую уравнением [2]:

$$\sigma_{\text{гма}} = \alpha \sigma_{\text{гма}} - \beta \sigma_{\text{гма}}^2 + \gamma \sigma_{\text{гма}}^3 = 0,0311 \sigma_{\text{гма}} - 0,0001 \sigma_{\text{гма}}^2 + 4 \cdot 10^{-7} \sigma_{\text{гма}}^3 \quad (R = 1), \quad (11)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  – коэффициенты пропорциональности;  $R$  – коэффициент корреляции.

В соответствии с этим уравнением с ростом уплотняющего воздействия происходит перераспределение механизмов взаимодействия в пользу молекулярного: при повышении давления прессования от 2000 до 4000 Н/брикет доля капиллярного и расклинивающего эффектов уменьшаются на 5,9 (от 18,9 до 13,0) и 3,2 (от 46,5 до 43,3) абс. % при увеличении доли молекулярного механизма сцепления частиц на 9,1 (от 34,6 до 43,7) %. Из сравнения полученных данных с результатами расчета следует, что при давлении прессования более 4000 Н/брикет молекулярный механизм сцепления частиц становится доминирующим.

Изложенные закономерности деформирования связанных структурированных материалов характерны для условий разовых (статических) воздействий и требуют конкретного наполнения в случае их приложения к процессу уплотнения структур, совершаемому на определенном оборудовании.

Анализ показывает, что изменение прочности структур (брикетов) в зависимости от давления прессования неадекватно изменению расстояния между поверхностями частиц, из которых сформованы брикеты. Вероятно, это свидетельствует о том, что фактор давления прессования имеет множественные последствия, связанные не только с изменением структуры – с ее двухпараметрической величиной  $h_\varepsilon$  (а это пористость  $\varepsilon$  и диаметр  $d_\varepsilon$ ), но и с изменением числа контактов в единице объема в результате разрушения частиц преимущественно в контактных зонах<sup>2</sup>, а также с изменением соотношения вода/воздух в объеме порового пространства, т. е. по своим последствиям функция  $\sigma_{\text{гма}} = \psi_1(\sigma_{\text{гма}})$  сравнима с функцией  $\sigma_{\text{гма}} = \psi_2[(1 - \varepsilon) / \varepsilon d_\varepsilon]$ , что и получило отражение в уравнении (11). Очевидно, при изменении давления прессования преимущество принадлежит более крупным частицам, поскольку удельное давление на единичный контакт больше там, где меньше частиц в единице объема.

Используя аксиоматический метод [4], можно записать

$$\sigma_{\text{гма}} = A_0^* \left( \frac{\sigma_{\text{гма}}}{h_\varepsilon^*} \right) - B_0^* \left( \frac{\sigma_{\text{гма}}}{h_\varepsilon^*} \right)^2 - C_0^* \left( \frac{\sigma_{\text{гма}}}{h_\varepsilon^*} \right)^3, \quad (12)$$

где  $h_\varepsilon^*$  – расстояние между поверхностями частиц при  $d_\varepsilon^* = d_\varepsilon$  до прессования.

<sup>2</sup> По мнению В. А. Трофимова, «процесс прессования материалов связан со значительными энергетическими затратами, идущими на измельчение зерен уплотняемого материала (выход вновь образованного класса после прессования у концентрата составил 8%, у ташанского песка 24,2%)» [3].

Уравнение (12) определяет прочность полученных методом прессования структур при постоянной влажности.

Как уже отмечалось, прессованию с получением брикетов, изменяя внешнее уплотняющее воздействие, энергетически выгоднее подвергать более крупные частицы с развитым капиллярным механизмом их сцепления. В связи с этим интерес представляет изучение закономерностей упрочнения структур (брикетов) из частиц крупностью 0–3 мм при изменении влажности материала, давления прессования и линейных размеров брикетов. Полная матрица необходимых экспериментальных данных представлена в работе [5] (три серии экспериментов, различающиеся отношением диаметра брикетов к их высоте: 1,17, 1,5 и 1,83). При обработке экспериментальных данных следует учитывать два обстоятельства. Во-первых, как известно, при определении механической прочности брикетов их разрушение происходит преимущественно по сечению, имеющему минимальную площадь поверхности. В данном случае таким сечением является вертикальное  $(d_{бр} \times h_{бр})$ . Следовательно, при постоянной высоте брикетов их удельная прочность определяется отношением  $\sigma_{бр}/d_{бр}$ . Во-вторых, используемая в опытах обогащенная никелевая руда содержит глинистые составляющие, что приводит к увеличению удельной поверхности материала и, соответственно, к росту величины максимальной гигроскопичности ( $W_{МГ}$ ). Поэтому при оценке прочности брикетов в зависимости от влажности в качестве аргумента должна выступать величина разности влажностей ( $W_{бр} - W_{МГ}$ ), поскольку капиллярные эффекты получают развитие лишь в присутствии свободной (адсорбционно-несвязанной) воды, способной к перемещению.

Для численного определения величины  $W_{МГ}$  составлена (в соответствии с последовательностью  $\sigma_{бр}/d_{бр} = f_1(W_{бр}) \rightarrow k_1 - f_2(P_{прес})$ ) наиболее простая модель – линейная, связывающая удельную прочность брикетов с давлением прессования  $P_{прес}$  и влажностью, действительная в рамках капиллярного механизма сцепления частиц:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{бр}}{d_{бр}} &= k_1 W_{бр} - k_2 = \alpha_1 P_{прес} W_{бр} - \beta_2 P_{прес} = \\ &= P_{прес} (\alpha_1 W_{бр} - \beta_2) = P_{прес} \left( \alpha_1 W_{бр} - \alpha_1 \frac{\beta_2}{\alpha_1} \right) = \\ &= \alpha_1 P_{прес} (W_{бр} - W_{МГ}), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $W_{МГ}$  – максимальная гигроскопичность мелкого материала брикетов,  $W_{МГ} = \beta_2/\alpha_1 = 2,67\%$ ;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты пропорциональности;  $\alpha_1$  и  $\beta_2$  – постоянные коэффициенты, зависящие

**Удельная прочность\* брикетов диаметром 55 и толщиной 30 мм из обогащенной никелевой руды крупностью 0–3 мм**

Влажность, %	Удельная прочность, Н/мм, брикетов, сформованных под давлением прессования, МПа		
	25	60	100
3,5	0,3636	0,982	1,818
5,5	1,455	4,545	7,273
7,5	3,382	7,564	18,018
10,7	7,509	4,545	24,200
12,4	6,018	5,691	27,618

\* При определении механической прочности брикетов их разрушение происходит преимущественно по сечению, имеющему минимальную площадь поверхности, в данном случае таким сечением является вертикальное размером  $d_{бр} \times h_{бр}$ . Следовательно, при постоянной высоте брикетов ( $h_{бр} = const$ ) их удельная прочность определяется соотношением  $\sigma_{бр}/d_{бр}$  с размерностью Н/мм.

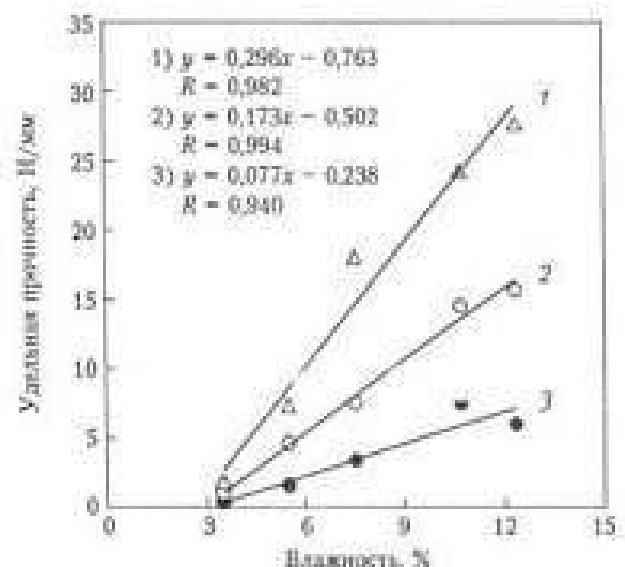


Рис. 1. Зависимость удельной прочности брикетов ( $\sigma_{бр}/d_{бр}$ ) диаметром  $d_{бр}$  от влажности  $W_{бр}$  при различных давлениях прессования  $P_{прес}$  [5]: 1–3 – давление прессования 100, 60 и 25 МПа соответственно (диаметр брикетов 55 мм)

от крупности частиц материала ( $\alpha_1 = 0,0003$ ,  $\beta_2 = 0,0008$ )<sup>49</sup>. Исходные данные для этой модели представлены в таблице и на рис. 1, по данным которого определены зависимости коэффициентов регрессии от давления прессования (рис. 2).

В соответствии с уравнением (13) в равной мере эффективными для упрочнения брикетов являются давление прессования и влажность.

Далее, используя матрицу данных [5], состоящую из параметров  $\sigma_{бр}/d_{бр}$ ,  $P_{прес}$  и разности влажностей  $W_{бр} - W_{МГ}$ , уже по иной схеме построения модели (в соответствии с последова-

<sup>49</sup> Для цилиндрических брикетов, очевидно, если  $h_{бр} > d_{бр}$ , удельная прочность оценивается отношением  $\sigma_{бр}/d_{бр}$ .

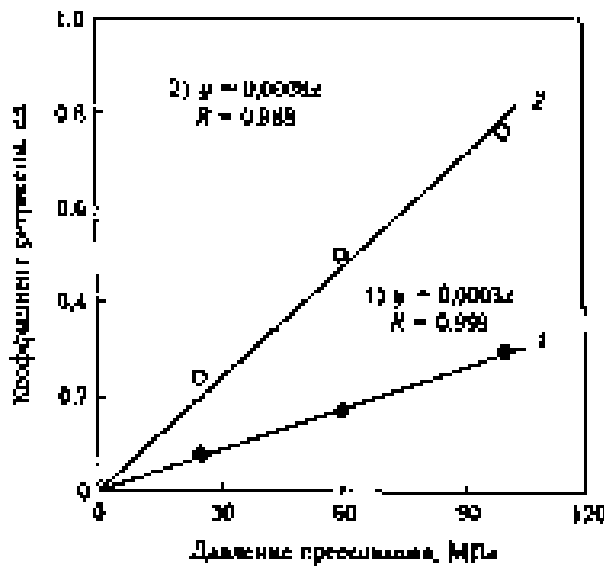


Рис. 2 Зависимость коэффициентов регрессии в уравнении (13) от давления прессования брикетов

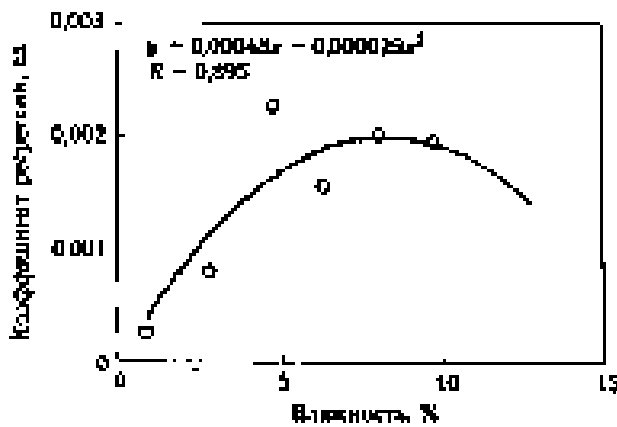


Рис. 3 Зависимость коэффициентов регрессии  $k_{ij}$  от величины капиллярной влажности брикетов  $(W_{кр} - W_{нгр})$  в уравнении (14). Математическая модель (2) получена в приближении, что при изменении давления прессования максимальная межмолекулярная дистанция  $W_{нгр} = \text{const}$ .

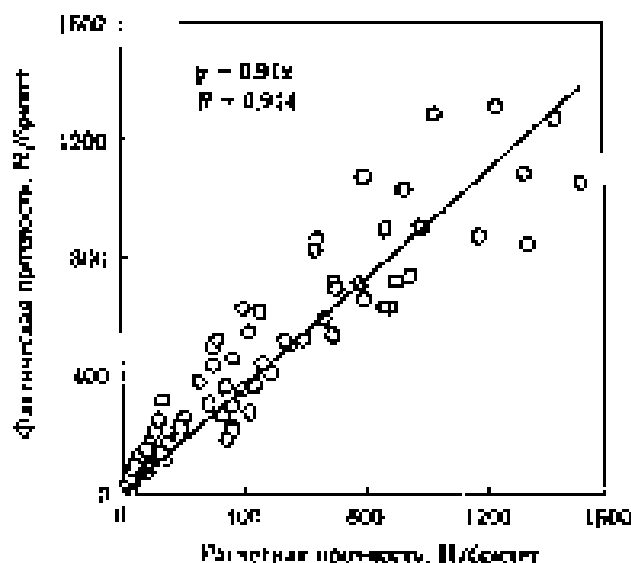


Рис. 4 Проверка уравнения (14) при  $d_{кр} = 45$  и  $d_{нгр} = 55$  мкм [5]

тельности:  $\sigma_{кр}/d_{кр} = \varphi_1(P_{прс}) \rightarrow k_{ij} = \varphi_2(W_{кр} - W_{нгр})$  найдены численные значения коэффициентов регрессии  $k_{ij}$  функцией  $\sigma_{кр}/d_{кр} = \varphi_1(P_{прс})$  при различных значениях величины капиллярной влажности  $W_{кр} - W_{нгр}$ , по которым построена зависимость  $k_{ij} = \varphi_2(W_{кр} - W_{нгр})$ , представленная на рис. 3. В результате получена более полная и точная математическая модель прогноза:

$$\frac{\sigma_{кр}}{d_{кр}} = k_{ij} P_{прс} = P_{прс} [\alpha_1 (W_{кр} - W_{нгр}) + \beta_2 (W_{кр} - W_{нгр})^2] \quad (13)$$

Проверка возможности использования уравнения (14) для прогноза удельной прочности в зависимости от давления прессования и влажности материала по данным [5] представлена на рис. 4

При постоянной величине давления прессования уравнение (14) можно представить виде

$$\frac{\sigma_{кр}}{d_{кр}} = A_1 (W_{кр} - W_{нгр}) + B_1 (W_{кр} - W_{нгр})^2 = \frac{A}{h_c} + \frac{B}{h_c^2} = \sigma_{кап} + \sigma_{релл} \quad (15)$$

( $\sigma_{кап}$  и  $\sigma_{релл}$  — капиллярная и релаксационная составляющие прочности брикетов), тогда

$$\sigma_{кап} = A_2 (W_{кр} - W_{нгр}) = \frac{A}{h_c} \quad (16)$$

$$\sigma_{релл} = B_2 (W_{кр} - W_{нгр})^2 = \frac{B}{h_c^2} \quad (17)$$

Решая (16) и (17) относительно величины  $h_c$ , имеем

$$h_c = \frac{A}{A_2} \frac{1}{(W_{кр} - W_{нгр})} \quad (18)$$

$$h_c = \sqrt{\frac{B}{B_2}} \frac{1}{(W_{кр} - W_{нгр})} \quad (19)$$

где  $A, A_1$  и  $B, B_1$  — коэффициенты пропорциональности, соответствующие капиллярному ( $A, A_1$ ) и релаксационному ( $B, B_1$ ) механизмам взаимодействия частиц.

Таким образом, при преимущественном действии капиллярной силы между частиц, как и ожидалось, при  $P_{прс} = \text{const}$  результатом расстояния между поверхностями частиц является взаимная капиллярная (в том числе релаксационная) сила (величина  $W_{кр} - W_{нгр}$ ), обеспечиваемая релаксационной силой на парном контакте частиц друг с другом, в результате расстояние между внутренними частями сокращается, а прочность структуры увеличивается.

Так как максимальная прочность нулевых структур при изменении давления прессования достигается при влажности  $W_{кр} = W_{нгр}$

(максимальная молекулярная влагоемкость), то упрочнение брикетов при увеличении давления прессования может быть произведено только при увеличении влагоемкости с ростом величины  $P_{пр}$ , уменьшается пористость брикетов, уменьшается и величина  $W_{ММВ}$ . Подтверждением этому являются данные рис. 5.

В соответствии с уравнениями (12) и (13) и по аналогии с ними математическая модель, учитывающая все виды взаимодействия частиц (в том числе молекулярный), должна быть представлена в виде

$$\frac{\sigma_{ср}}{d_{ср}} = k P_{пр} [a(W_{МВ} - W_{МГ}) - b(W_{ср} - W_{МГ})^2 + c(W_{ср} - W_{МГ})^3], \quad (20)$$

где  $k$  — эмпирический коэффициент пропорциональности.

Это уравнение может быть использовано при прогнозировании прочности искусственных структур (брикетов), полученных из тонкодисперсных материалов.

В уравнении (20) коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  зависят от расстояния между поверхностями частиц формируемых структур (от крупности частиц и пористости структур). Для раскрытия коэффициентов воспользуемся данными [2] о прочности брикетов, полученных при постоянном давлении прессования и переменной крупности частиц материала (в диапазоне от менее 0,063 до 1–3 мм), используемых при брикетировании. Расстояние между поверхностями частиц с одинаковыми линейными размерами изменяли за счет изменения влагоемкости материала в диапазоне от  $W_{МГ}$  до  $W_{ММВ}$  (максимальная капиллярная влагоемкость). Определение пористости брикетов выполняло первично не зависимо-

стей  $\sigma_{ср} = f_1(W)$  к зависимости  $\sigma_{ср} = f_2(1/h_p)$ , на математическому описанию и численному определению некоторых коэффициентов регрессии. На рис. 6 представлены зависимости коэффициентов регрессии  $a$ ,  $-b$  от крупности частиц материала при постоянной пористости (при  $(1 - \epsilon_{ср})/\epsilon_{ср} = \text{const}$ ).

Таким образом, с учетом данных рис. 6 закономерности статистики упрочнения брикетов могут быть выражены выражением

$$\frac{\sigma_{ср}}{d_{ср}} = \frac{1}{k} \varphi(P_{пр}, d_p, \Delta W) = \frac{P_{пр}}{k} \left[ e_1 d_p^2 - \sigma_1 d_p^2 + \sigma_2 d_p + \sigma_3 (W_{ср} - W_{МГ}) - e^{-\lambda_1 d_p^2} \cdot \sigma_2 d_p^2 + \sigma_3 d_p + \sigma_4 (W_{МВ} - W_{МГ})^2 + e^{-\lambda_2 d_p^2} \cdot \sigma_4 d_p^2 + \sigma_5 d_p + \sigma_6 (W_{ср} - W_{МГ})^2 \right], \quad (21)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности (зависит от влажности и влажности брикетов);  $e$ ,  $-f$  — постоянные коэффициенты (см. рис. 6), определяющие механизм сцепления частиц в брикетах.

Для нахождения коэффициентов пропорциональности при фиксированных значениях влагоемкости и проверки модели вновь была использована масса данных ( $d_{ср} = 45$  и  $55$  мм) [5] по схеме  $(\sigma_{ср})_{расч} = \varphi_1(P_{пр}, d_p, \Delta W)$  при  $k = 1 \rightarrow k = \varphi_2(W_{ср} - W_{МГ}) \rightarrow (\sigma_{ср})_{расч} = \varphi_3(\sigma_{ср})_{эмп}$  при переменном значении величины  $k$ , определяемой с помощью уравнения (рис. 7 и 8):

$$k = A(W_{ср} - W_{МГ})^2 - B(W_{ср} - W_{МГ}) + C[(W_{ср} - W_{МГ}) + D] \quad (22)$$

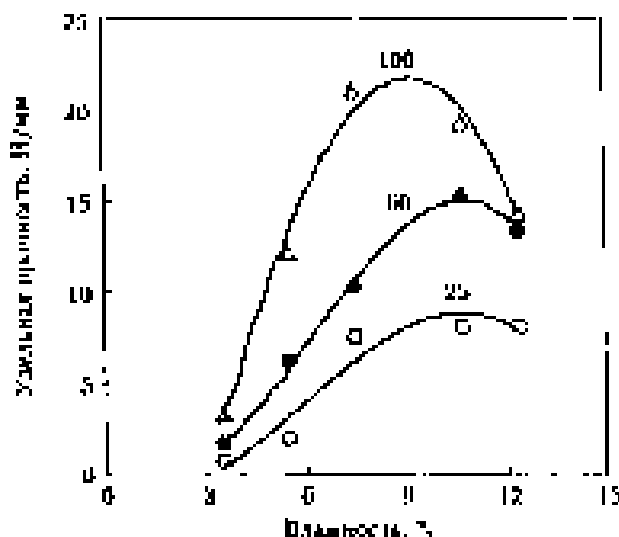


Рис. 5. Зависимость удельной прочности брикетов от влажности и давления прессования [3]. Числа на кривых — давление прессования, МПа ( $d_p = 45$  мм)

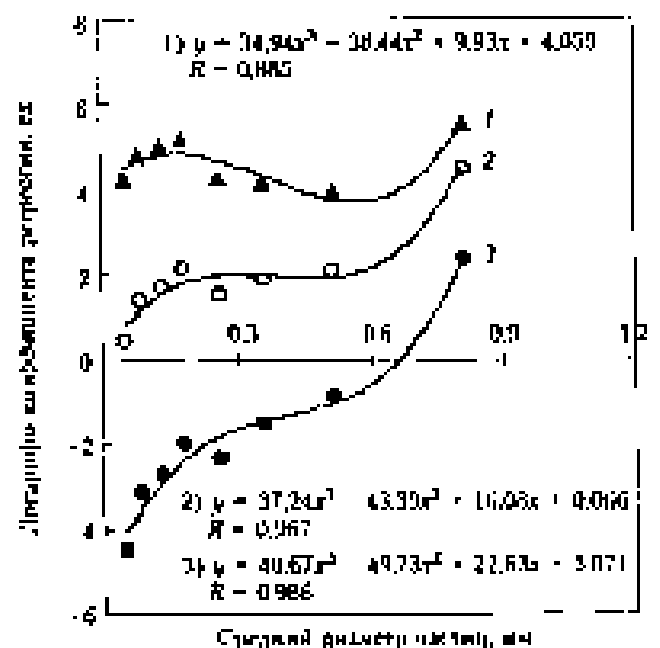


Рис. 6. Зависимость коэффициентов регрессии в уравнении  $\sigma_{ср} = f[(1 - \epsilon_{ср})/\epsilon_{ср} d_p^2]$  при фиксированной пористости брикетов является функцией влажности

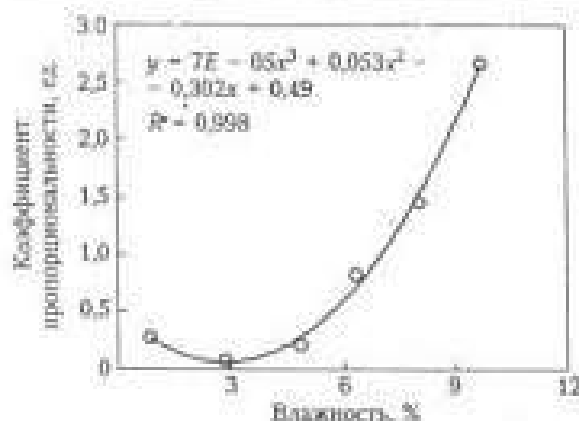


Рис. 7. Определение вида зависимости  $k = \varphi_1(W_{\text{вп}} - W_{\text{МГ}})$

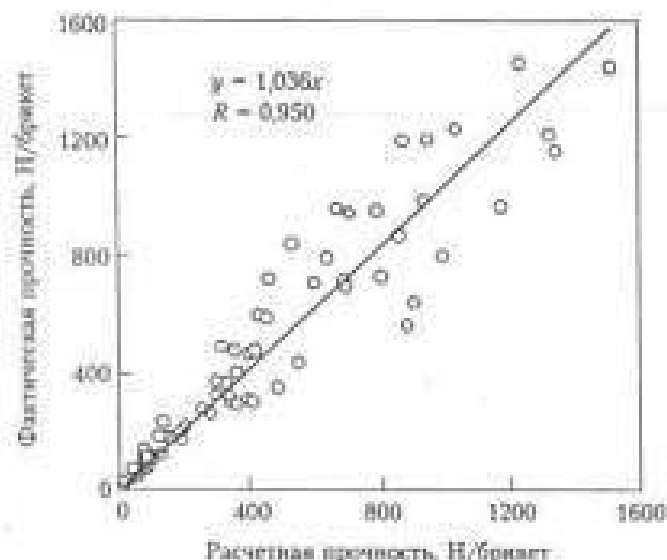


Рис. 8. Проверка модели в соответствии с уравнением (23) – зависимость  $k(\sigma_{\text{вп}})_{\text{расч}} = \varphi_2(\sigma_{\text{вп}})_{\text{эксп}}$

Подставив (21) в (20), окончательно получим

$$\frac{\sigma_{\text{вп}}}{d_{\text{вп}}} = P_{\text{тисн}} / \{ A(W_{\text{вп}} - W_{\text{МГ}})^2 - (W_{\text{вп}} - W_{\text{МГ}}) \{ B(W_{\text{вп}} - W_{\text{МГ}}) + C \} + D \} \times \left[ \begin{aligned} & e^{-\beta_1 d_{\text{вп}}^2 - \beta_2 d_{\text{вп}} + \beta_3 d_{\text{вп}} + \beta_4} (W_{\text{вп}} - W_{\text{МГ}}) - \\ & - e^{-\beta_1 d_{\text{вп}}^2 - \beta_2 d_{\text{вп}} + \beta_3 d_{\text{вп}} + \beta_4} (W_{\text{вп}} - W_{\text{МГ}})^2 + \\ & + e^{-\beta_1 d_{\text{вп}}^2 - \beta_2 d_{\text{вп}} + \beta_3 d_{\text{вп}} + \beta_4} (W_{\text{вп}} - W_{\text{МГ}})^3 \end{aligned} \right] \quad (23)$$

Выражение (23) для прогноза прочности брикетов является наиболее общим, поскольку

**Библиографический список**

1. *Цытович, Н. А.* Механика грунтов (краткий курс) / Н. А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.
2. *Пузанов, В. П.* Структурообразование из мелких материалов с участием жидкой фазы / В. П. Пузанов, В. А. Кобелев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 634 с.
3. *Трофимов, В. А.* Исследование и применение эффекта вибрационной обработки дисперсных материалов в процессах мокрой агрегации: автореф. дис. – канд. техн. наук. – Томск, 1968. – 21 с.

включает в себя все основные параметры, управляющие процессом упрочнения брикетов.

Как видно из выражения (23), в его основу положено трехчленное кубическое уравнение, отражающее аддитивный характер свойства прочности искусственных структур – брикетов, окатышей и гранул. Численный анализ полученной модели показал, что результаты расчета по ней очень чувствительны к предельным параметрам модели (прежде всего это касается функции  $\sigma_{\text{вп}} = f[(1 - \epsilon_{\text{вп}})/\epsilon_{\text{вп}} d_{\text{вп}}]$ ). Поэтому данную модель следует рассматривать как определенное приближение к полному описанию закономерностей упрочнения структур.

Из сравнения формул, описывающих различные массивы экспериментальных данных, полученных в условиях различных механизмов взаимодействия частиц в структурах, следует, что, вероятно, в наиболее общем виде зависимость  $\sigma_{\text{max}} = \varphi(d_{\text{вп}}, W, \text{ потенциал } \leftarrow 1-3^*)$  должна быть записана следующим образом:

$$\sigma_{\text{max}} = \alpha_1 e^{\beta_1 d_{\text{вп}}} P_{\text{тисн}} \varphi(W - W_{\text{МГ}}, d_{\text{вп}}) - \alpha_2 e^{\beta_2 d_{\text{вп}}} [P_{\text{тисн}} \varphi(W - W_{\text{МГ}}, d_{\text{вп}})]^2 + \alpha_3 e^{\beta_3 d_{\text{вп}}} [P_{\text{тисн}} \varphi(W - W_{\text{МГ}}, d_{\text{вп}})]^3 \quad (24)$$

где  $\varphi(W - W_{\text{МГ}}, d_{\text{вп}}) = \frac{1}{d_{\text{вп}}} \left[ \frac{-a_1 d_{\text{вп}}^3 - b_1 d_{\text{вп}}^2 - c_1 d_{\text{вп}} + f_1}{(W - W_{\text{МГ}}) a_2 d_{\text{вп}}^3 - b_2 d_{\text{вп}}^2 + c_2 d_{\text{вп}} - f_2} - 1 \right] + (-a_3 d_{\text{вп}}^2 + b_3 d_{\text{вп}}^2 - c_3 d_{\text{вп}} + f_3) \quad (25)$

Разработанные математические модели, связывающие факторы свойства обрабатываемого материала с параметрами процесса уплотнения, в значительной мере способствуют решению вопросов управления процессами подготовки мелких материалов перед широко распространенным способом окатывания – брикетированием.

Таким образом, формирование прочности искусственных структур – брикетов, полученных методом прессования мелких материалов, является сложным процессом, управление которым может осуществляться на различных стадиях производства.

4. *Математическая энциклопедия, Т. 1 /* Ред. коллегия: И. М. Виноградов (гл. ред.) [и др.]. – М.: Советская энциклопедия, 1977. – 1151 с.
5. *Мащенко, В. Н.* Подготовка окисленных никелевых руд к плавке / В. Н. Мащенко, В. А. Кюсс, В. А. Кобелев [и др.]. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 321 с. ■

Получено 28.08.06

© А. П. Пузанов, Л. И. Полянский, В. Н. Мащенко, В. А. Кобелев, 2007 г.