

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

УДК 666.762.3.017.620.173.251

ПРОЧНОСТЬ БРИКЕТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРАХ ЧАСТИЦ И ВЛАЖНОСТИ*¹

На основе экспериментальных данных по брикетированию окисленной никелевой руды с глинистой составляющей разработаны математические модели, учитывающие все виды взаимодействия частиц. Эти уравнения могут быть использованы при прогнозировании прочности искусственных структур (брикетов), полученных из мелких материалов. Разработанные математические модели, связывающие факторы свойств обрабатываемого материала с параметрами процесса уплотнения, в значительной мере способствуют решению вопросов управления процессами подготовки мелких материалов перед широко распространенным способом окускования — брикетированием. Формирование прочности искусственных структур — брикетов, полученных методом прессования мелких материалов, является сложным процессом, управление которым может осуществляться на различных стадиях производства.

В настоящее время брикетирование, как способ окускования мелких материалов различных химического и минерального составов и производства изделий из них, взято на вооружение многими отраслями промышленности, и прежде всего огнеупорной, металлургической, химической и др. При этом, кроме химического состава, основным свойством окускованного 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 сформированных или формирующихся гранул и окатышей.

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

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

где ϵ и ϵ_0 — пористость текущая и начальная; $\sigma_{\text{упл}}$ — внешнее уплотняющее воздействие; m — коэффициент сжимаемости материала.

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

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

*¹ Данное сообщение является развитием предыдущего: Полянский Л. И., Пузанов В. П., Кобелев В. А. Математическая модель прочности брикетов в зависимости от крупности и влажности материала // Новые огнеупоры. — 2007. — № 4. — С. 44–50.

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

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

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

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

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

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]:

$$[h_{\text{ч}} = h_0 - \alpha \sigma_{\text{упл}}] = \frac{d_{\text{ч}} \epsilon_0}{1 - \epsilon_0} - \alpha \sigma_{\text{упл}} = k_{\text{ч}} d_{\text{ч}} - \alpha \sigma_{\text{упл}}, \quad (5)$$

где h_0 и $h_{\text{ч}}$ — расстояние между поверхностями частиц до и после уплотнения; $d_{\text{ч}}$ — средний

диаметр частиц уплотняемого материала; k_e — коэффициент пропорциональности уплотняемого материала, связанный с исходной пористостью ε_0 , $k_e = \varepsilon_0 / (1 - \varepsilon_0)$.

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

$$\frac{h_0 - h_q}{h_0} = \frac{\alpha}{h_0} \sigma_{упл} = \alpha_0 \sigma_{упл}, \quad (6)$$

отсюда

$$h_q = h_0(1 - \alpha_0 \sigma_{упл}), \quad (7)$$

где α_0 — удельный коэффициент пропорциональности, $\alpha_0 = \alpha / h_0$.

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

$$\sigma_{max} = A_0 \frac{1}{h_q} - B_0 \frac{1}{h_q^2} + C_0 \frac{1}{h_q^3}, \quad (8)$$

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

$$\sigma_{max} = A_0 \left(\frac{1}{k_e d_q - \alpha \sigma_{упл}} \right) - B_0 \left(\frac{1}{k_e d_q - \alpha \sigma_{упл}} \right)^2 + C_0 \left(\frac{1}{k_e d_q - \alpha \sigma_{упл}} \right)^3 \quad (9)$$

или

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

где σ_{max} — 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 α_0 равны соответственно 7,164, 13,965, 8,227 и 0,00104) достаточно точно укладываются на опытную кривую, описываемую уравнением [2]:

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

где α, β, γ — 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 доли 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_q (а это пористость ε и диаметр d_q), но и с изменением числа контактов в единице объема в результате разрушения частиц преимущественно в контактных зонах*2, а также с изменением соотношения вода:воздух в объеме порового пространства, т. е. по своим последствиям функция $\sigma_{max} = \psi_1(\sigma_{упл})$ сравнима с функцией $\sigma_{max} = \psi_2[(1 - \varepsilon) / \varepsilon d_q]$, что и получило отражение в уравнении (11). Очевидно, при изменении давления прессования преимущество принадлежит более крупным частицам, поскольку удельное давление на единственный контакт больше там, где меньше частиц в единице объема.

Используя аксиоматический метод [4], можно записать

$$\sigma_{max} = A_0^* \left(\frac{\sigma_{упл}}{h_q^*} \right) - B_0^* \left(\frac{\sigma_{упл}}{h_q^*} \right)^2 - C_0^* \left(\frac{\sigma_{упл}}{h_q^*} \right)^3, \quad (12)$$

где h_q^* — расстояние между поверхностями частиц при $d_q^* = d_q$ до прессования.

*2 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 ташлинского 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; α_1 и β_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, сформированных 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 ($h_{бр} = \text{const}$) их удельная прочность определяется соотношением $\sigma_{бр}/d_{бр}$ с размерностью Н/мм.

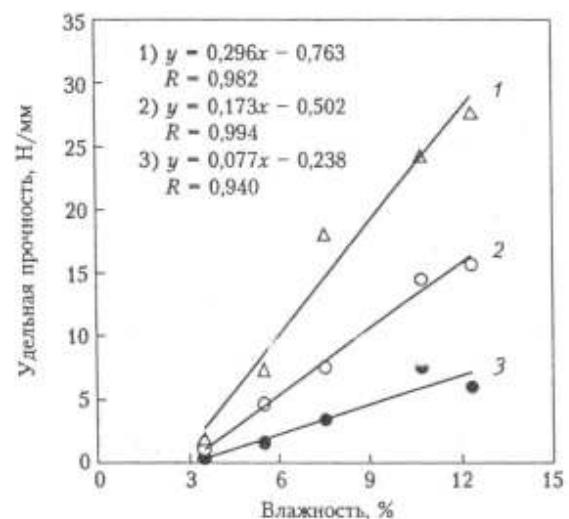


Рис. 1. Зависимость удельной прочности брикетов ($\sigma_{бр}/d_{бр}$) диаметром $d_{бр}$ от влажности $W_{бр}$ при различных давлениях прессования $P_{прес}$ [5]: 1–3 — давление прессования 100, 60 и 25 МПа соответственно (диаметр брикетов 55 мм)

от крупности частиц материала ($\alpha_1 = 0,0003$, $\beta_2 = 0,0008$)*³. 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-

*³ Для цилиндрических брикетов, очевидно, если $h_{бр} > d_{бр}$, удельная прочность оценивается отношением $\sigma_{бр}/d_{бр}^2$.

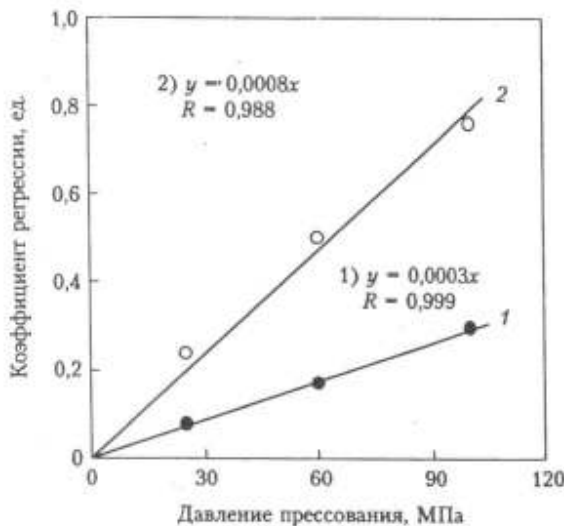


Рис. 2. Зависимость коэффициентов регрессии в уравнении (13) от давления прессования брикетов

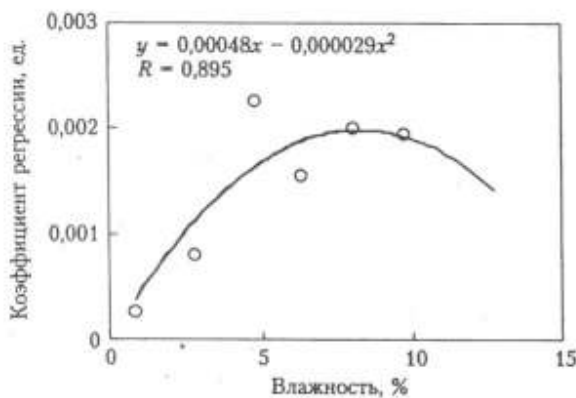


Рис. 3. Зависимость коэффициентов регрессии k_w от величины капиллярной влажности брикетов ($W_{бр} - W_{МГ}$) в уравнении (14). Математическая модель (2) получена в предположении, что при изменении давления прессования максимальная молекулярная влагоемкость $W_{ММВ} = \text{const}$

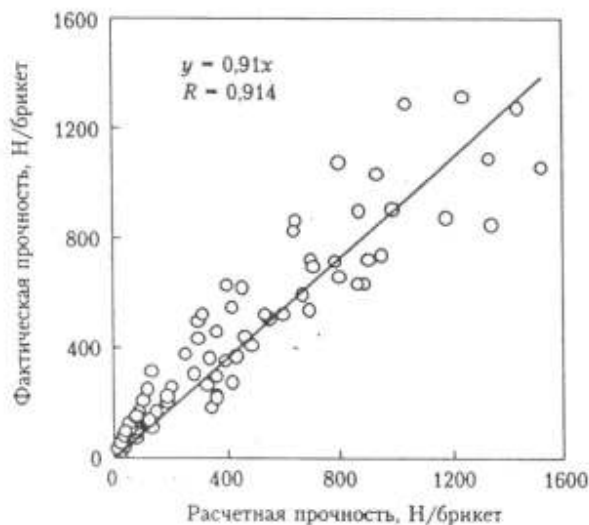


Рис. 4. Проверка уравнения (14) при $d_{бр} = 45$ и $d_{бр} = 55$ мм [5]

тельностью $\sigma_{бр}/d_{бр} = \varphi_1(P_{прес}) \rightarrow k_w = \varphi_2(W_{бр} - W_{МГ})$ найдены численные значения коэффициентов регрессии k_w функций $\sigma_{бр}/d_{бр} = \varphi_1(P_{прес})$ при различных значениях величины капиллярной влажности $W_{бр} - W_{МГ}$, по которым построена зависимость $k_w = \varphi_2(W_{бр} - W_{МГ})$, представленная на рис. 3. В результате получена более полная и точная нелинейная модель прогноза:

$$\frac{\sigma_{бр}}{d_{бр}} = k_w P_{прес} = P_{прес} [\alpha_2 (W_{бр} - W_{МГ}) - \beta_2 (W_{бр} - W_{МГ})^2]. \quad (14)$$

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

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

$$\frac{\sigma_{бр}}{d_{бр}} = A_1 (W_{бр} - W_{МГ}) - B_1 (W_{бр} - W_{МГ})^2 = \frac{A}{h_{ч}} - \frac{B}{h_{ч}^2} = \sigma_{кап} - \sigma_{раскл} \quad (15)$$

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

$$\sigma_{кап} = A_1 (W_{бр} - W_{МГ}) = \frac{A}{h_{ч}}; \quad (16)$$

$$\sigma_{раскл} = B_1 (W_{бр} - W_{МГ})^2 = \frac{B}{h_{ч}^2}. \quad (17)$$

Решая (16) и (17) относительно величины $h_{ч}$, имеем

$$h_{ч} = \frac{A}{A_1 (W_{бр} - W_{МГ})}; \quad (18)$$

$$h_{ч} = \sqrt{\frac{B}{B_1 (W_{бр} - W_{МГ})}}; \quad (19)$$

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

Таким образом, при преимущественном действии капиллярного силового поля, как и ожидалось, при $P_{прес} = \text{const}$ регулятором расстояния между поверхностями частиц выступает подвижная капиллярная (в том числе рыхло связанная) вода (величина $W_{бр} - W_{МГ}$), обеспечивающая рост капиллярной силы на парном контакте частиц друг с другом, в результате расстояние между поверхностями частиц сокращается, а прочность структуры увеличивается.

Так как максимальная прочность искусственных структур при изменении давления прессования достигается при влажности $W_{бр} = W_{ММВ}$

(максимальная молекулярная влагоемкость), то упрочнение брикетов при увеличении давления прессования может быть произведено только при уменьшении влажности: с ростом величины $P_{\text{прес}}$ уменьшается пористость брикетов, уменьшается и величина $W_{\text{ММВ}}$. 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

$$\frac{\sigma_{6p}}{d_{6p}} = kP_{\text{прес}} [a(W_{6p} - W_{\text{МГ}}) - b(W_{6p} - W_{\text{МГ}})^2 + c(W_{6p} - W_{\text{МГ}})^3], \quad (20)$$

где k — эмпирический коэффициент пропорциональности.

Это уравнение может быть использовано при прогнозировании прочности искусственных структур (брикетов), полученных из тонкоизмельченных 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), используемого при брикетировании. Расстояние между поверхностями частиц с одинаковыми линейными размерами изменяли за счет изменения влажности материала в диапазоне от $W_{\text{МГ}}$ до $W_{\text{МКВ}}$ (максимальная капиллярная влагоемкость). Определение пористости брикетов позволило перейти от зависимо-

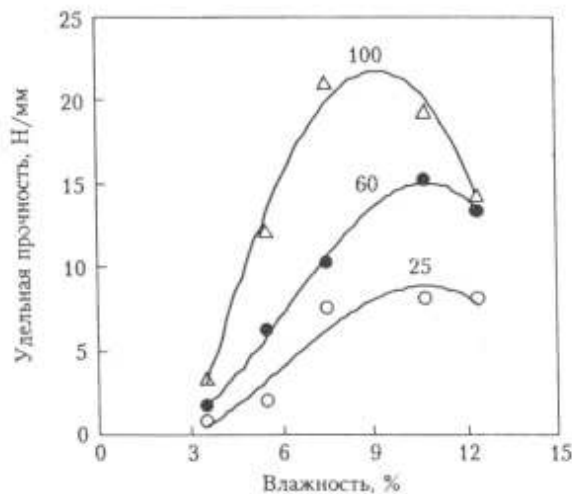


Рис. 5. Зависимость удельной прочности брикетов от влажности и давления прессования [5]. Числа на кривых — давление прессования, МПа ($d_{6p} = 45$ мм)

стей $\sigma_{6p} = f_1(W)$ к зависимостям $\sigma_{6p} = f_2(1/h_v)$, их математическому описанию и численному определению искомых коэффициентов регрессии. На рис. 6 представлена зависимость коэффициентов регрессии $a_i - f_i$ от крупности частиц материала при постоянной пористости (при $(1 - \epsilon_{6p})/\epsilon_{6p} = \text{const}$).

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

$$\frac{\sigma_{6p}}{d_{6p}} = \frac{1}{k} \varphi(P_{\text{прес}}, d_v, \Delta W) = \frac{P_{\text{прес}}}{k} \left\{ \begin{aligned} &e^{a_1 d_v^3 - a_2 d_v^2 + a_3 d_v + a_4} (W_{6p} - W_{\text{МГ}}) - \\ &- e^{b_1 d_v^3 - b_2 d_v^2 + b_3 d_v + b_4} (W_{6p} - W_{\text{МГ}})^2 + \\ &+ e^{c_1 d_v^3 - c_2 d_v^2 + c_3 d_v + c_4} (W_{6p} - W_{\text{МГ}})^3 \end{aligned} \right\}, \quad (21)$$

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

Для нахождения коэффициентов пропорциональности при фиксированных значениях влажности и проверки модели вновь был использован массив данных ($d_{6p} = 45$ и 55 мм) [5] по схеме: $(\sigma_{6p})_{\text{расч}} = \varphi_1(P_{\text{прес}}, d_v, \Delta W)$ при $k = 1 \rightarrow k = \varphi_2(W_{6p} - W_{\text{МГ}}) \rightarrow k(\sigma_{6p})_{\text{расч}} = \varphi_3(\sigma_{6p})_{\text{факт}}$ при переменной значении величины k , определяемой с помощью уравнения (рис. 7 и 8):

$$k = A(W_{6p} - W_{\text{МГ}})^3 - B(W_{6p} - W_{\text{МГ}}) \times [(W_{6p} - W_{\text{МГ}}) + C] + D. \quad (22)$$

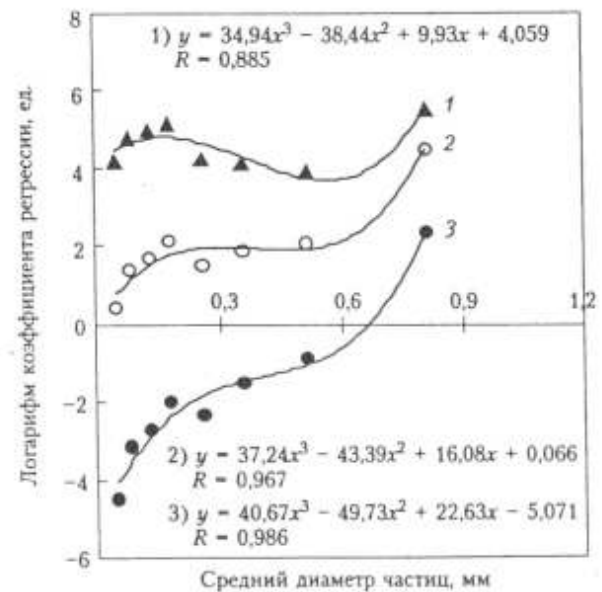


Рис. 6. Изменение коэффициентов регрессии в уравнениях $\sigma_{6p} = f[(1 - \epsilon_{6p})/\epsilon_{6p} d_v]$, в которых пористость брикетов является функцией влажности

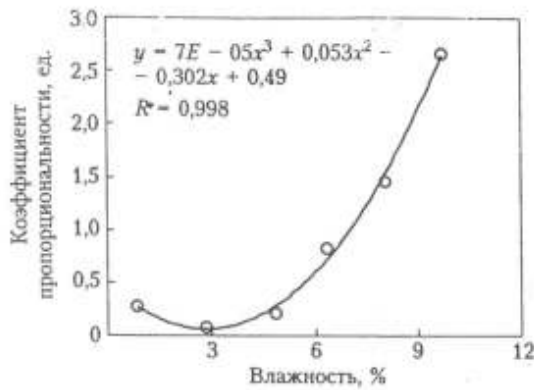


Рис. 7. Определение вида зависимости $k = \varphi_2(W_{бр} - W_{МГ})$

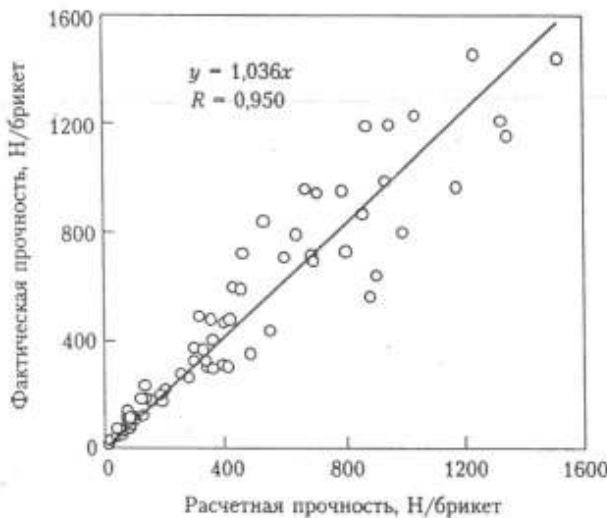


Рис. 8. Проверка модели в соответствии с уравнением (23) – зависимость $k(\sigma_{бр})_{расч} = \varphi_3(\sigma_{бр})_{факт}$

Подставив (21) в (20), окончательно получим

$$\frac{\sigma_{бр}}{d_{бр}} = P_{прес} / (A(W_{бр} - W_{МГ})^3 - (W_{бр} - W_{МГ})[B(W_{бр} - W_{МГ}) + C] + D) \times \left\{ \begin{aligned} & e^{-a_1 d_{бр}^3 - a_2 d_{бр}^2 + a_3 d_{бр} + a_4} (W_{бр} - W_{МГ}) - \\ & - e^{-b_1 d_{бр}^3 - b_2 d_{бр}^2 + b_3 d_{бр} + b_4} (W_{бр} - W_{МГ})^2 + \\ & + e^{-c_1 d_{бр}^3 - c_2 d_{бр}^2 + c_3 d_{бр} + c_4} (W_{бр} - W_{МГ})^3 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

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 жидких фаз / 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 $\sigma_{бр} = f[(1 - \epsilon_{бр})/\epsilon_{бр} d_{бр}]$). 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 $\sigma_{max} = \varphi(d_{бр}, W, \text{потенциал «1-3»})$ должна быть записана следующим образом:

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

где $\varphi(W - W_{МГ}, d_{бр}) =$

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

Разработанные математические модели, связывающие факторы свойств обрабатываемого материала с параметрами процесса уплотнения, в значительной мере способствуют решению вопросов управления процессами подготовки мелких материалов перед широко распространенным способом окучивания – 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. Машенко, В. Н. Подготовка окисленных никелевых руд к плавке / В. Н. Машенко, В. А. Кхисс, В. А. Кобелев [и др.]. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 321 с. ■

Получено 28.08.06

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