К. т. н. **А. Ю. Худяков**[1] (✉), к. т. н. **С. В. Ващенко**[1], к. т. н. **К. В. Баюл**[1], к. т. н. **Ю. С. Семенов**[2]

[1] *Институт черной металлургии имени З. И. Некрасова НАНУ, г. Днепр, Украина*

[2] *ООО «Научно-техническое предприятие ДЧМ», г. Днепр, Украина*

УДК 621.762.4:669-492].004.052.42

ОПЫТНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ НОВЫХ УРАВНЕНИЙ ПРЕССОВАНИЯ МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА. Часть 2. Стадийное уравнение*

Оценена эффективность нового стадийного уравнения при идентификации и анализе отдельных этапов прессования. Установлено, что разработанное уравнение корректно и с высокой точностью описывает экспериментальные кривые прессования, учитывая периодическую природу процесса и позволяя выделить характерные точки перехода между стадиями; при этом коэффициент детерминации близок к единице. На основе использования основного и стадийного уравнений прессования разработаны способы определения стабилизирующего давления, брикетируемости и жесткости шихты. Предложен новый признак для энергетической классификации брикетируемых материалов.

Ключевые слова: *материалы, моделирование, стадии процесса прессования, стадийное уравнение прессования, стабилизирующее давление, брикетируемость, жесткость шихты, энергетическая классификация.*

ВЕРИФИКАЦИЯ СТАДИЙНОГО УРАВНЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ

Стадийное уравнение прессования является обобщенной формой зависимости между давлением и степенью уплотнения прессовки, к частным случаям которой относятся степенные уравнения типа Джонса, Бальшина и других [1]:

$$P = P_{bc}\left(\frac{\rho}{\rho_{bc}}\right)^{a_2}, \quad (1)$$

где P — давление прессования, МПа; ρ — текущая плотность прессовки, г/см^3; P_{bc} и ρ_{bc} — давление и плотность, определяющие граничное условие (*bc* — boundary condition) для отдельной стадии прессования; a_2 — показатель отдельной стадии прессования, отражающий темп прироста давления по мере уплотнения шихты, $a_2 = d\ln P/d\ln\rho$.

После приведения к линейному виду и конкретизации граничных условий (см. координаты точек *1–2* и *2–3* на рис. 1) данное уравнение может быть использовано для раздельного модели-

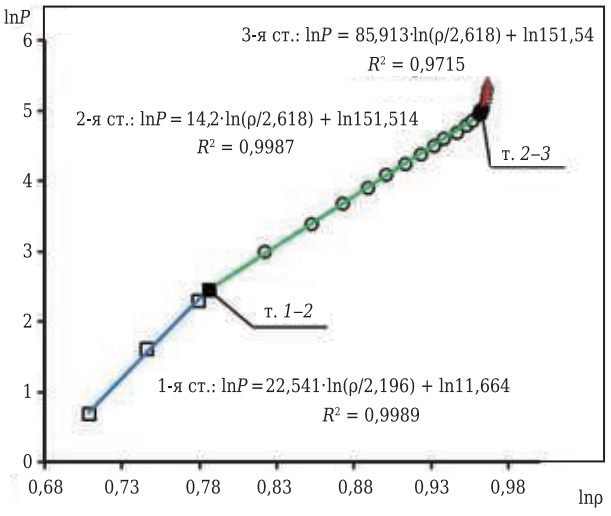

Рис. 1. Идентификация стадий процесса прессования на логарифмической кривой прессования марганцевого концентрата МК29

* Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 1 за 2021 г.

✉
А. Ю. Худяков
E-mail: khudyakovsachko@gmail.com

рования стадий прессования материалов ГМК. Следует отметить, что обоснованность локализации на кривой прессования (в полулогарифмических или логарифмических координатах) нескольких линейных участков, соответствующих разным стадиям прессования, подтверждается положительными результатами применения такого подхода для анализа процесса уплотнения фармацевтических порошков с помощью уравнения Хеккеля [2, 3] и металлических порошков с помощью степенного уравнения Бальшина [4, 5].

Для идентификации стадий прессования использовали следующую процедуру. Откладывали экспериментальные точки в координатах $\ln P - \ln\rho$, выделяли пару точек, находящихся в центральной зоне (т. е. примерно в середине участка, отождествляемого со стадией упругопластических деформаций частиц), и строили по ним уравнение линейной регрессии; очевидно, что при этом $R^2 = 1$. Далее распространяли график полученного уравнения на соседние экспериментальные точки (с шагом 10 МПа) в обе стороны по оси $\ln\rho$ до тех пор, пока не обнаруживалось явное увеличение относительного отклонения расчетных данных от опытных по сравнению с их средним значением, которое, как правило, составляет 3–5 %. Построенная таким образом зависимость соответствовала уравнению линейной регрессии 2-й стадии прессования (стадии упругопластических деформаций частиц) со среднеарифметическим коэффициентом детерминации $R^2_{ср}$ = 99,67 % и диапазоном его вариации 1,77 %. Оставшиеся слева и справа (по оси $\ln\rho$) экспериментальные точки аппроксимировали отдельными линейными функциями по такому же алгоритму, что позволило получить регрессионные уравнения 1-й и 3-й стадий прессования со следующими характеристиками: уравнение 1-й стадии $R^2_{ср}$ = 99,43 %, диапазон 2,9 %; уравнение 3-й стадии $R^2_{ср}$ = 99,17 %, диапазон 6,13 %. Точки перегиба кривой прессования определяли аналитическим способом как точки пересечения на плоскости линейных зависимостей, соответствующих отдельным стадиям прессования. На рис. 1 показан пример идентификации трех стадий уплотнения при помощи уравнения (1) на кривой прессования концентрата марганцевой руды Темиртауского ЭМК.

В таблице приведены координаты точек перегиба кривых прессования исследуемых материалов, преобразованные к следующему виду: пористость брикета ε, % — давление прессования P, МПа; в скобках указана пористость прессовок из материалов, для которых при достижении верхней границы технологического диапазона давлений (P = 220 МПа) не был обнаружен переход к 3-й стадии прессования (т. е. вторая точка перегиба отсутствует).

Первая точка перегиба *1–2* (см. рис. 1) соответствует окончанию стадии с преимущественным развитием структурных деформаций сыпучего тела (разрушением арок и мостиков из зерен, взаимным перемещением частиц с первичной хрупкой деформацией, т. е. истиранием, сколом выступающих участков) и началу стадии упругопластических деформаций частиц с доминирующими механизмами фрагментации (хрупкие материалы), пластического течения (пластичные материалы) и вторичного перераспределения частиц. Среднеарифметическое давление прессования в данной точке для исследуемых материалов, за исключением топливно-восстановительных: $P_{1-2\ ср}$ = 28,3 МПа, медианное $P_{1-2\ мед}$ = 20 МПа. Для группы топливно-восстановительных материалов эти показатели имели более низкие значения ($P_{1-2\ ср}$ = 12,2 МПа, $P_{1-2\ мед}$ = 10,9 МПа), что можно объяснить свойствами поверхности частиц углеродсодержащих материалов: меньшими шероховатостью и твердостью выступов, неровностей и, следовательно, меньшим трением на контактах при перемещении частиц.

Координаты точек перегиба логарифмических кривых прессования

У. о. м.*	ε_{1-2}, %	ε_{2-3}, %	P_{1-2}, МПа	P_{2-3}, МПа	У. о. м.*	ε_{1-2}, %	ε_{2-3}, %	P_{1-2}, МПа	P_{2-3}, МПа
СС	58,6	(33,7)	29,7	–	А	27,9	5,9	10,9	164,7
ЧС	45,4	(22,7)	29,1	–	УД	53,5	(8,5)	9,3	–
ПОВ	43,8	(17,6)	8,2	–	КМ	48,3	(16,2)	15,4	–
ЖРК	38,2	(32,3)	52,9	–	УК	36,1	(10,7)	10,4	–
ООП	49,1	28,1	14,9	207,5	УБ	22,8	3,2	10,1	167,2
ПОП	26,8	(8,6)	12,4	–	Т	48,3	(14,2)	17,8	–
МР	31,6	25,4	39,3	155	ТГЛ	49,5	(15,5)	11,8	–
ГР	31,9	25,2	55,1	191,4	ИГ	31,6	(18,2)	68,2	–
ОА	47,2	28,5	13,3	185,8	ПЦ	48,1	(38,4)	22,8	–
АДШ	40,4	21,6	10,6	204,6	И	31,6	13,3	13,9	182,7
КП	41,6	(31,6)	53	–	М	35,8	(26,7)	54,4	–
МК44	46,9	32,5	17,9	176,8	ПГО	56,6	(38,2)	9,3	–
МК32	39,4	(24,4)	20,0	–	ФК	17,5	8,8	40,0	200
МК29	40,6	29,2	11,6	151,5	БГ	35,9	12	12,6	193,4
ИК	46,1	(39,8)	52,4	–	КГ	29,3	23	8,6	200,1
					ПЛГ	38,0	17,9	17,1	191,1

* У. о. м. (условное обозначение материала) приведено в части 1 настоящей статьи [6].

Среднее и медианное значения пористости прессовок к моменту окончания 1-й стадии прессования: $\varepsilon_{1-2\ ср}$ = 39,9 % и $\varepsilon_{1-2\ мед}$ = 40,4 % соответственно. Приняв в первом приближении, что зерна исследуемых материалов имеют сферическую форму и примерно одинаковый размер, можно сделать вывод, что в результате структурных деформаций сыпучего материала достигается состояние так называемой «случайной свободной упаковки» (random loose packing — RLP) шаров, пористость которой ε_{RLP} ~ 40 % [7]. Известно, что близкие значения пористости ε достигаются при утряске шаров под воздействием вертикальных вибраций или встряхивания: 37–41 % [8] или 38–42 % [9]. Следовательно, между структурными деформациями сыпучего тела при прессовании под невысоким давлением (в среднем до 10–30 МПа) и утряске при встряхивании или вибрации можно провести аналогию, основанную на двух соображениях: 1) доминирующим механизмом в обоих процессах является взаимное перемещение частиц; 2) результат обоих процессов (степень уплотнения) практически одинаков. Следует отметить, что минимально возможная пористость укладки при встряхивании контейнера с одинаковыми шарами соответствует случайной плотной упаковке (random close packing — RCP) ε_{RCP} ~ 36,4 % [10], а предельная пористость ε, достигнутая при вертикальных вибрациях, еще меньше: 33–36 % [11] или 33,7–36,4 % [8]. В целом пористость слоя из одинаковых сфер менее 36 % свидетельствует о формировании регулярной упаковки, для чего, как правило, необходимо создание специальных условий, например ручной укладки или приложения 3D-вибраций [12].

Очевидно, что в реальных условиях формирование случайных упаковок наиболее вероятно. Следовательно, с использованием проведенной аналогии можно предположить, что при прессовании монофракционного порошка с зернами изометрической формы к концу стадии структурных деформаций должна достигаться пористость ε_{1-2} = 36÷40 %, соответствующая диапазону от случайной свободной упаковки до случайной плотной упаковки шаров. Увеличение пористости (ε_{1-2} > 40 %) можно объяснить шероховатостью поверхности и в большей степени отклонением формы частиц от сферической. Так, частицы стальной стружки (СС: ε_{1-2} = 58,6 %) имеют форму тонких лент, свернутых в продольном направлении, а частицы древесного угля (УД: ε_{1-2} = 53,5 %) — форму неправильных продолговатых многогранников со слоистой поверхностью (рис. 2). Уменьшение пористости (ε_{1-2} < 36 %) дает основание предположить полифракционность исходного сыпучего материала.

Как показано авторами статьи [13], теоретически уже при прессовании двухфракционной смеси при отношении содержания в ней мелкой и крупной фракций, равном 0,36, и среднем диаметре крупной фракции большем, чем у мелкой, более чем в 10,2 раза можно достичь пористости около 13 %. Действительно, в первой точке перегиба кривой прессования флюоритового концентрата (ФК) пористость ε_{1-2} достигает 17,5 %. Можно показать, что ФК удовлетворяет условию полифракционности. Фракционный состав ФК, %: 0,67–0,208 мм 10,8, 0,208–0,147 мм 9,4, 0,147–0,104 мм 16, 0,104–0,074 мм 8,9, 0,074–0,044 мм 25,4, 0,044–0,024 мм 29,5. Средний диаметр частиц самой мелкой фракции (0,024–0,044 мм) $d_{ср.мелк}$ = 0,034 мм, а оставшихся более крупных фракций (0,074–0,67 мм) $d_{ср.крупн}$ = = 0,357 мм, т. е. в 10,5 раза больше. При этом отношение содержания указанных фракций составляет 0,42 (29,5 % против 70,5 %).

Рис. 2. Образцы частиц неизометрической формы: *а* — стальная стружка; *б* — древесный уголь

Вторая точка перегиба *2–3* (см. рис. 1) соответствует окончанию стадии упругопластических деформаций частиц и началу стадии упругой деформации компактного тела, характерной особенностью которой является резкий рост давления при незначительном сокращении объема прессовки. Пористость брикетов во второй точке перегиба: $\varepsilon_{2-3\ ср}$ = 19,6 %, $\varepsilon_{2-3\ мед}$ = 22,3 %. Вместе с тем минимальное значение пористости, наблюдаемое при прессовании бурого угля, отличается от средних значений в 7 раз (УБ: ε_{2-3} = 3,2 %).

Полученные результаты указывают на необходимость уточнения обобщенной схемы прессования материалов ГМК [1], поскольку обнаруживают возможность двойственной трактовки 3-й стадии прессования. При $\varepsilon_{2-3} \sim 20$ % 3-я стадия прессования должна быть отождествлена с упругой деформацией уплотненного пористого тела. При приближении относительной плотности к единице ($\varepsilon_{2-3} = 1 \div 3$ %) эта стадия соответствует упругой деформации практически беспористого твердого тела, причем в обеих вариациях началу упругих деформаций сыпучего тела не предшествует пластическое течение частиц.

Вероятная причина фактического прекращения уплотнения прессовки и начала ее упругой деформации при сохранении достаточно высокой пористости заключается в следующем. Как упоминалось выше, при прессовании материалов ГМК, как правило, отсутствует пластическое течение твердой фазы, т. е. доминирующим механизмом 2-й стадии прессования является хрупкое разрушение частиц, приводящее к уменьшению их крупности. Последнее сопровождается повышением относительной плотности упаковки порошковой системы и увеличением контактной поверхности единичного слоя частиц, а также ростом прочности измельчаемых частиц. Эти процессы становятся особенно характерными при достижении частицами крупности менее 0,5 мм [14], а как свидетельствует обзор литературных данных публикации [9], прессование минеральных порошков при давлении 50–180 МПа как раз и увеличивает содержание фракций преимущественно мельче 0,5 мм. Суммарное действие этих факторов приводит к тому, что при определенной дисперсности материала энергии, передаваемой порошковой системе при прессовании, становится недостаточно для продолжения ее уплотнения, так как напряжения, возникающие в зонах контакта частиц, уже не вызывают их разрушения. Следует отметить, что похожие сведения сообщаются авторами статьи [15], наблюдавшими сохранение пористости в пределах 20–30 % при прессовании SiO_2, MgO и Al_2O_3 под давлением 600 МПа.

Давление во второй точке перегиба: $P_{2-3\ ср} = 183{,}7$ МПа, $P_{2-3\ мед} = 188{,}4$ МПа. Очевидно существование определенной аналогии между давлением во второй точке перегиба *2–3* и предложенным С. С. Казакевичем [16] понятием стабилизирующего давления, при котором уплотнение прессовки по мере увеличения давления замедляется настолько, что выполняется условие: $d\varepsilon/dP = \zeta$, где ζ — фиксированное малое число. Автор [16] рекомендует задавать наперед значение $\zeta = 0{,}01$, что соответствует снижению пористости на 1 % при росте давления на 100 кг/см^2 (~10 МПа). Достоинством такого подхода является технологическая обоснованность общего требования: считать особенным давление, при достижении которого дальнейшее уплотнение прессовки становится несущественным в сравнении с ростом давления. Недостатками этого подхода являются субъективность выбора величины ζ (которая не может быть произвольной и одинаковой для разных материалов и технологических условий) и методика определения стабилизирующего давления, предусматривающая использование степенного уравнения Казакевича [16] (так как оно непригодно для моделирования процесса прессования в области критической плотности [9]).

Давление в точке перегиба *2–3* соответствует верхней границе технологического диапазона давлений прессования материалов, для которых наблюдается стабилизация плотности, и, следовательно, является стабилизирующим давлением. В рамках настоящей работы стабилизирующее давление P_{2-3} имеет следующую технологическую интерпретацию: это давление, при достижении которого дальнейший ход процесса уплотнения сопровождается резким ростом давления прессования без существенного сокращения объема материала, что приводит к неоправданному увеличению энергозатрат и высокому риску повреждения прессового оборудования. Физический смысл стабилизирующего давления — это давление, при котором происходит смена доминирующих механизмов уплотнения (переход от хрупкого разрушения частиц на 2-й стадии процесса к упругой деформации компактного тела на 3-й стадии). Методика определения стабилизирующего давления P_{2-3}, рассмотренная выше, имеет графоаналитический характер и предусматривает использование только экспериментальных данных.

Интенсивность дальнейшего роста давления после достижения его стабилизирующего значения в точке *2–3* характеризуется первой производной давления по пористости $dP/d\varepsilon$, определяемой как тангенс угла наклона линейной функции, аппроксимирующей в координатах *P–D* экспериментальные точки участка кривой прессования, соответствующего $P \geq P_{2-3}$ ($R^2_{ср} = 0{,}98$ %, диапазон вариации 7,8 %). Величина $dP/d\varepsilon$ составила: для ООП 187,1, МР 73,2, ГР 287,7, ОА 65,9, АДШ 58,4, МК44 153,5, МК29 243,7, А 36,44, УБ 448,1, И 69,6, ФК 48,1, БГ 42,9, КГ 260,2 и ПГЛ 38,3. Минимальное значение, наблюдавшееся для антрацита, соответствовало росту давления на 36,44 МПа при снижении пористости на 1 %, максимальное значение наблюдалось для бурого угля при увеличении давления на 448,1 МПа на 1 % пористости; среднее значение $dP/d\varepsilon_{ср}$ составило 143,8 МПа/% ε. Как и следовало ожидать, значения $dP/d\varepsilon$ существенно различаются в зависимости от достигнутой пористости брикета, а также от физических свойств, характеризующих частицы прессуемых материалов (в частности, от энергии сцепления между атомами и молекулами вещества).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА С ПОМОЩЬЮ НОВЫХ УРАВНЕНИЙ ПРЕССОВАНИЯ

Разработанные авторами основное и стадийное уравнения могут быть использованы для уточненного определения таких технологических показателей, как брикетируемость и жесткость шихты.

В публикации [17] приводится определение брикетируемости как способности материала под воздействием сжатия образовывать брикет заданного качества и рекомендуется для количественной оценки брикетируемости использовать такие показатели, как плотность, пористость и прочность брикета. Сравнение этих показателей с требованиями конкретного технологического передела позволяет оценить возможность получения брикета необходимого качества. Не менее важным является определение затрат энергии на получение качественного брикета, поскольку такая оценка брикетируемости материала может быть непосредственно использована при разработке технологических режимов, при расчетах прессового оборудования и проектировании линии брикетирования. Как правило, качество брикетов растет с повышением степени их уплотнения, поэтому целесообразно оценивать энергоемкость по удельной работе прессования в технологическом диапазоне давлений, рассчитывая ее как отношение интеграла от давления по плотности к объему прессовки при достижении верхней границы диапазона. В качестве интегрируемой функции используется правая часть основного уравнения прессования [6], пределами интегрирования являются границы технологического диапазона давлений:

$$W_{\text{sp.tech}} = \rho_{2-3} b_1 \int_{\rho_0}^{\rho_{2-3}} \frac{\left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}\right)^{a_1}}{\rho^2} d\rho, \qquad (2)$$

где $W_{\text{sp.tech}}$ — удельная работа в технологическом диапазоне давлений прессования, Дж/м^3; ρ_0 — насыпная плотность шихты, г/см^3; ρ_{2-3} — плотность прессовки в момент достижения стабилизирующего давления P_{2-3}, г/см^3.

Для вычисления интеграла в выражении (2) удобно использовать методы численного интегрирования, например формулу Симпсона. Следует отметить, что поскольку верхний предел интегрирования ρ_{2-3} соответствует плотности прессовки при давлении, достигающем верхней границы диапазона давлений прессования, то для шихт, при брикетировании которых наблюдается стабилизация плотности, таким пределом является плотность в точке перегиба *2–3* (т. е. при достижении стабилизирующего давления), а для остальных шихт — плотность прессовки при давлении 220 МПа.

Показатель $W_{\text{sp.tech}}$ также может быть использован для энергетической классификации брикетируемых материалов. Как указывает акад. А. Е. Ферсман, выдающийся отечественный ученый, заложивший основы энергетического фундамента геохимии, наиболее удобным универсальным признаком в вопросах классификации и оценки минерального сырья является показатель энергоемкости, т. е. «то количество энергии, которое необходимо затратить на ископаемое, чтобы сделать его готовым для промышленного использования» [18]. Несмотря на бесспорную классификационную ценность этого показателя, подобная формулировка является слишком общей, поскольку требует учета затрат энергии на каждую отдельную операцию для отдельного ископаемого, которые в зависимости от комплекса исходных свойств и особенностей функционального назначения подвергаются ряду индивидуальных воздействий на этапах добычи, обогащения и окускования. Целесообразно конкретизировать область применения показателя энергоемкости. В частности, для процесса брикетирования имеет смысл говорить о затратах энергии на получение качественного брикета из предварительно подготовленной шихты. Таким образом, показатель энергоемкости $W_{\text{sp.tech}}$ материала ГМК является важным дополнением к классическому определению брикетируемости как способности материала под воздействием сжатия образовывать брикет с заданными характеристиками. Значения $W_{\text{sp.tech}}$ исследуемых материалов показаны на рис. 3.

Для оценки способности брикетируемых шихт сопротивляться сжатию может быть использован параметр $a_{2(2\text{-я ст.})}$ стадийного уравнения (2), сформулированного в линейном виде для 2-й стадии прессования:

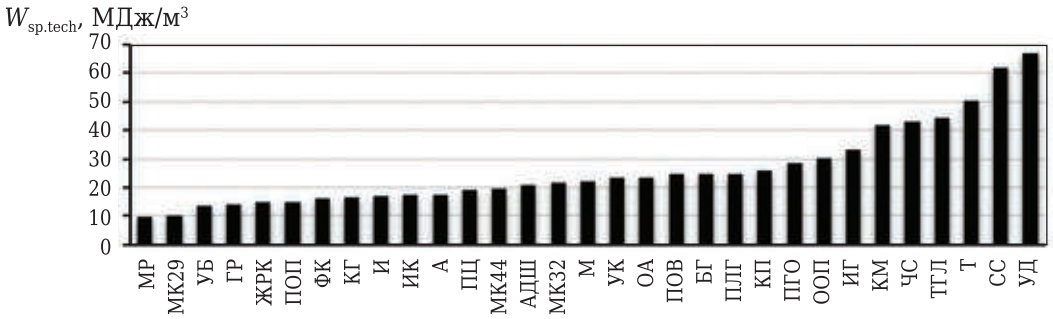

Рис. 3. Энергоемкость материалов ГМК в технологическом диапазоне давлений

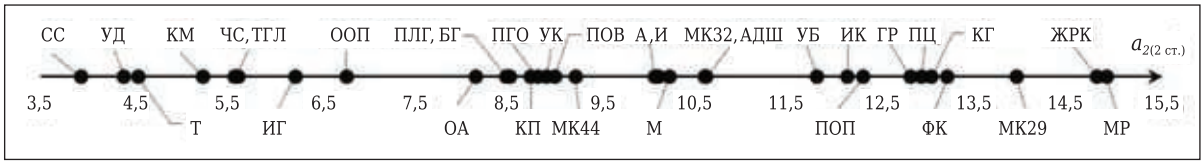

Рис. 4. Ряд ранжирования исследуемых материалов в направлении возрастания их жесткости на основании анализа параметра $a_{2(2\text{-я ст.})}$ стадийного уравнения

$$\ln P = a_2 \ln \frac{\rho}{\rho_{2-3}} + \ln P_{2-3}. \quad (3)$$

Выбор параметра $a_{2(2\text{-я ст.})}$ обусловлен тем, что около 85 % технологического диапазона давлений, включая его верхнюю границу (стабилизирующее давление P_{2-3}), а также наибольшая доля общих затрат энергии на получение брикетов относятся ко 2-й стадии прессования. Следовательно, жесткость шихты на 2-й стадии во многом определяет характеристики технологических режимов брикетирования, энергосиловые параметры прессового оборудования и может быть использована для оценки сопротивляемости шихты сжатию в процессе прессования.

Предпочтительность применения параметра $a_{2(2\text{-я ст.})}$ (рис. 4) для оценки жесткости материала взамен рассмотренных в части 1 статьи [6] параметров a_3 логарифмического и a_4 степенного уравнений Бальшина (см. рис. 5 [6]) подтверждается наиболее тесной статистической взаимосвязью (отрицательная нелинейная корреляция) этого параметра с расходом энергии на получение брикета (рис. 5, 6). Анализ данных, показанных на рис. 6 предыдущих [6] и на рис. 3, 5 и 6 настоящих исследований, указывает на тенденцию к росту удельной работы прессования $W_{\text{sp. tech}}$ по мере повышения уплотняемости K_{y100} материалов и снижения их жесткости. Последнее объясняется сокращением технологического диапазона давлений для материалов, при прессовании которых наблюдается стабилизация плотности в точке P_{2-3}.

Перспективное направление дальнейших исследований — установление зависимостей, связывающих постоянные коэффициенты разработанных авторами основного и стадийного уравнений прессования со свойствами мелкодисперсных материалов. В этой связи следует отметить наличие положительной корреляции (рис. 7) между параметром $a_{2(2\text{-я ст.})}$ и твердостью по минералогической шкале Мооса [17, 19] основного компонента материала ГМК. Несмотря на условность данной шкалы [17] твердость по Моосу является механическим свойством, отражающим природу и строение материала, поскольку она определяется сопротивлением элементарных частиц отрыву. Следовательно, установленная корреляционная связь может служить указанием на существование зависимости

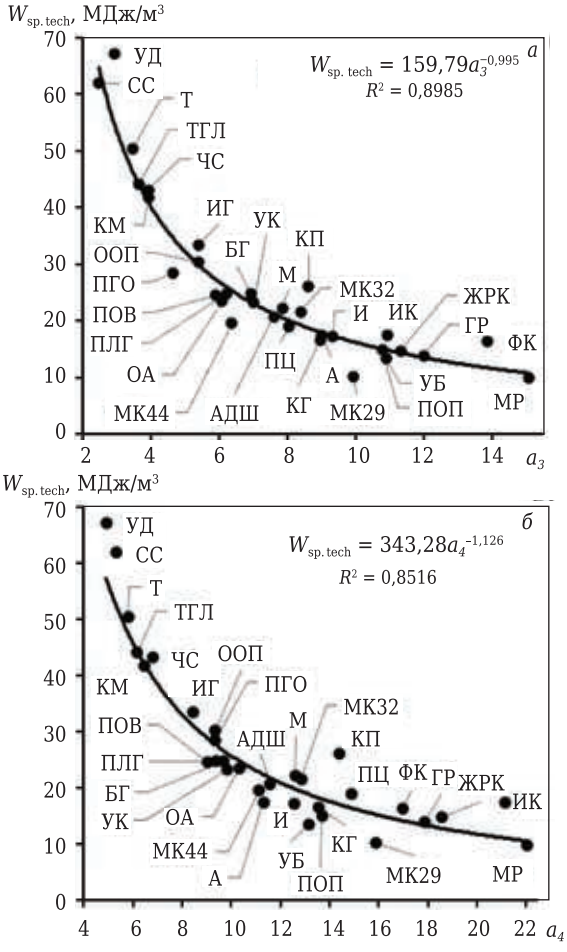

Рис. 5. Корреляционная связь удельной работы прессования $W_{\text{sp. tech}}$ с параметром a_3 логарифмического уравнения Бальшина (*а*) и параметром a_4 степенного уравнения Бальшина (*б*)

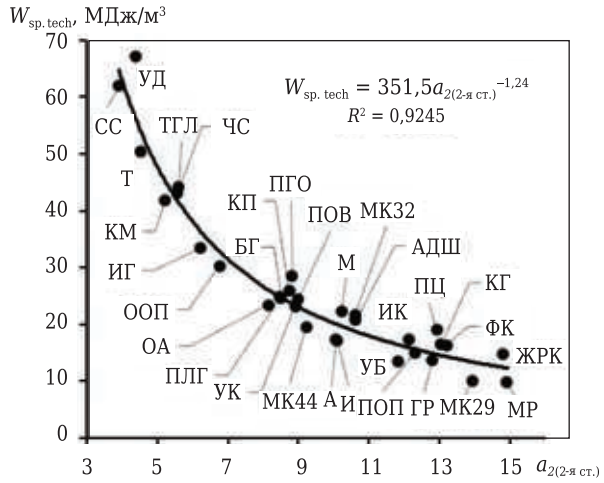

Рис. 6. Корреляционная связь $W_{\text{sp. tech}}$ с параметром $a_{2(2\text{-я ст.})}$ стадийного уравнения

жесткости материала от фундаментальных свойств его компонентов: вида химической связи, энергии взаимодействия между атомами вещества и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены идентификация и анализ этапов процесса прессования на основе разработанного авторами стадийного уравнения. Высокая достоверность аппроксимации экспериментальных данных и соответствие интерпретации обнаруженных при анализе характерных точек кривой прессования имеющимся в настоящее время представлениям об особенностях механизмов уплотнения порошковых систем позволяют считать стадийное уравнение пригодным для моделирования и изучения отдельных стадий прессования мелкофракционных материалов ГМК.

Разработаны новые способы определения технологических показателей: стабилизирующего давления, брикетируемости шихты по затратам энергии на получение качественного брикета, жесткости шихты.

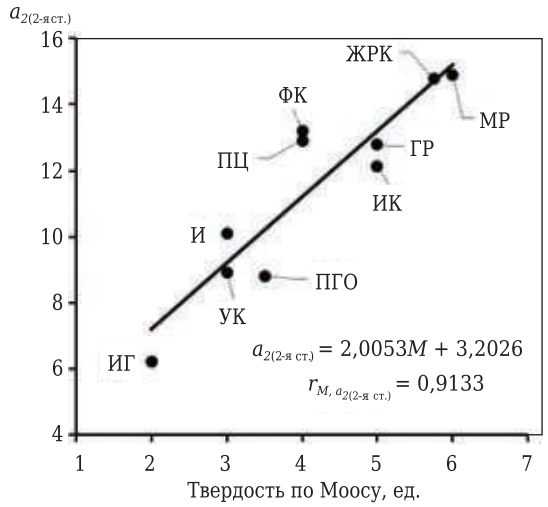

Рис. 7. Корреляционная связь между параметром $a_{2(2\text{-я ст.})}$ и твердостью по Моосу

Библиографический список

1. ***Khudyakov, A. Yu***. Analysis of known dependences and the construction of new compaction equations for the fine-fraction materials of the mining and metallurgical complex / *A. Yu. Khudyakov, S. V. Vashchenko* // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 60, № 6. — P. 618–626.

Худяков, А. Ю. Анализ известных зависимостей и разработка новых уравнений прессования мелкофракционных материалов горно-металлургического комплекса / *А. Ю. Худяков, С. В. Ващенко* // Новые огнеупоры. — 2019. — № 12. — С. 37–46

2. ***Klevan, I.*** Compression analysis of pharmaceutical powders: assessment of mechanical properties and tablet manufacturability prediction : Ph. D. thesis / *I. Klevan*. — Tromso, Norway: University of Tromso, 2011. — 71 p.

3. ***Mallick, S.*** Rearrangement of particle and compactibility, tabletability and compressibility of pharmaceutical powder: a rational approach / *S. Mallick* // J. Sci. Ind. Res. — 2014. — Vol. 73. — P. 51–56.

4. ***Бальшин, М. Ю.*** Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / *М. Ю. Бальшин*. — М. : Металлургия, 1972. — 336 с.

5. ***Бальшин, М. Ю.*** Порошковое металловедение / *М. Ю. Бальшин*. — М. : Металлургиздат, 1948. — 332 с.

6. ***Худяков, А. Ю.*** Опытная верификация новых уравнений прессования материалов горно-металлургического комплекса. Часть 1. Основное уравнение / *А. Ю. Худяков, С. В. Ващенко, К. В. Баюл* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2021. — № 1. — С. 20–29.

7. ***Burtseva, L.*** Packing of monosized spheres in a cylindrical container: models and approaches / *L. Burtseva, B. V. Salas, F. Werner* [et al.] // Revista Mexicana de Fisica. — 2015. — № 61. — P. 20–27.

8. ***An, X. Z.*** Experimental study of the packing of monosized spheres subjected to one-dimensional vibration / *X. Z. An, C. X. Li, R. Y. Yang* [et al.] // Powder Technology. — 2009. — № 196. — P. 50–55.

9. ***Попильский, Р. Я.*** Прессование порошковых керамических масс / *Р. Я. Попильский, Ю. Е. Пивинский*. — М. : Металлургия, 1983. — 176 с.

10. ***Scott, G. D.*** The density of random close packing of spheres / *G. D. Scott, D. M. Kilgour* // British Journal of Applied Physics (Journal of Physics D). — 1969. — Vol. 2. — P. 863–866.

11. ***Аэров, М. Е.*** Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы / *М. Е. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский*. — Л. : Химия, 1979. — 176 с.

12. ***Li, C. X.*** Experimental study of the packing of uniform spheres under three-dimensional vibration / *C. X. Li, X. Z. An, R. Y. Yang* [et al.] // Powder Technology. — 2011. — № 208. — P. 617–622.

13. ***Худяков, А. Ю.*** Теоретические основы методики расчета и составления шихт с минимальной порозностью / *А. Ю. Худяков, С. В. Ващенко, М. Н. Бойко* [и др.] // Черная металлургия. Бюл. научно-технической и экономической информации. — 2018. — № 7. — С. 23–32.

14. ***Серго, Е. Е.*** Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / *Е. Е. Серго*. — М. : Недра, 1985. — 285 с.

15. ***Cooper, A. R.*** Compaction behavior of several ceramic powders / *A. R. Cooper, I. E. Eaton* // J. Am. Ceram. Soc. — 1962. — Vol. 45, № 3. — P. 97–101.

16. ***Казакевич, С. С.*** О зависимости уплотнения шамотных масс от давления при полусухом прессовании / *С. С. Казакевич* // Огнеупоры. — 1957. — № 7. — С. 312–318.

17. ***Ожогин, В. В.*** Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья / *В. В. Ожогин*. — Мариуполь : ПГТУ, 2010. — 442 с.

18. ***Ферсман, А. Е.*** Избранные труды. Т. III / *А. Е. Ферсман*. — М. : Изд-во АН СССР, 1955. — 798 с.

19. ***Klein, C.*** Manual of mineral science. — 22nd ed. / *C. Klein*. — New Jork : John Wiley and Sons, 2002. — 642 p.■

Получено 20.03.20
© А. Ю. Худяков, С. В. Ващенко, К. В. Баюл, Ю. С. Семенов, 2021 г.