

К. т. н. А. Ю. Худяков¹ (✉), к. т. н. С. В. Ващенко¹, к. т. н. К. В. Баюл¹,
к. т. н. Ю. С. Семенов²

¹ Институт черной металлургии им. 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 1. Основное уравнение

С использованием линейного регрессионного анализа выполнена сравнительная оценка математического описания экспериментальных кривых прессования новым основным уравнением и эмпирическими уравнениями прессования, предложенными Бальшиным, Хеккелем, Кавакито, Панелли-Фило и Ге. Исследования проведены на специально составленной представительной выборке материалов горно-металлургического комплекса, разбитых на группы в соответствии с технологическим назначением в металлургических переделах. Результаты показали, что разработанное авторами основное уравнение прессования характеризуется наилучшими показателями достоверности и точности и поэтому является предпочтительным для определения энергосиловых характеристик прессования под давлением до 220 МПа. Оценена справедливость интерпретации постоянных коэффициентов уравнений прессования.

Ключевые слова: мелкофракционные материалы, брикетирование, моделирование, регрессионный анализ, основное уравнение прессования.

ВВЕДЕНИЕ

Прессование мелкофракционных материалов является одним из наиболее универсальных способов подготовки минерального сырья горно-металлургического комплекса (ГМК). При производстве огнеупоров и технической керамики применяется полусухое прессование порошков для изготовления полуфабриката. В металлургическом производстве традиционные методы окускования сырья агломерацией и обжигом окатышей в ряде случаев успешно заменяются брикетированием мелкофракционных материалов [1–4]. Поскольку прессование является сложным и многофакторным процессом, его дальнейшее совершенствование требует как тщательного экспериментального изучения, так и соответствующего модельного представления. Вместе с тем широта охвата шихтовой номенклатуры материалов ГМК накладывает ограничения на перечень целесообразных форм такого представления и делает разработку уравнений прессования одним из наиболее актуальных в настоящее время направлений моделирования процесса.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В ряде работ [5–9] отмечается затруднительность полноценного описания процесса уплотнения сыпучего тела единственной зависимостью с одной переменной, поскольку функциональная задача, стоящая перед уравнениями прессования, имеет двойственный характер. С одной стороны, так как плотность брикета является важнейшим показателем, определяющим его качество, а давление прессования — ведущей энергосиловой характеристикой процесса, для разработки технологических режимов брикетирования требуется простая и достаточно точная аналитическая зависимость между этими величинами в диапазоне давлений прессования. С другой стороны, для анализа происходящих процессов, формулировки присутствующих им закономерностей и выделения основных технологических факторов необходимо уравнение, которое позволит идентифицировать и изучать отдельные стадии прессования, различающиеся деформационными механизмами. В этой связи авторы настоящей работы предложили два уравнения прессования — основное и стадийное [10], выполняющие первую и вторую функции соответственно. Уравнение

$$P = \frac{K_0}{a_1} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^{a_1} = b_1 \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^{a_1}, \quad (1)$$

где P — давление прессования, МПа; ρ — текущая плотность прессовки, г/см³; ρ_0 — насыпная плотность шихты, г/см³; a_1 — показатель прессования основного уравнения, характеризующий



А. Ю. Худяков

E-mail: khudyakovsashko@gmail.com

температура прироста давления по мере уплотнения шихты, $a_1 = \frac{d \ln P}{d \ln(\Delta \rho / \rho_0)}$; K_0 — начальное значение модуля объемной упругости, соответствующее состоянию свободной засыпки шихты, МПа; b_1 — постоянный коэффициент, характеризующий способность шихты сопротивляться сжатию и численно равный давлению, необходимому для двукратного уплотнения порошковой системы, МПа, $b_1 = P(\rho / \rho_0 = 2)$, и уравнение

$$P = P_{bc} \left(\frac{\rho}{\rho_{bc}} \right)^{a_2}, \quad (2)$$

где 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, $a_2 = \frac{d \ln P}{d \ln \rho}$.

Цель настоящей работы — экспериментальная проверка пригодности новых уравнений для анализа процесса прессования материалов горно-металлургического комплекса и определения энергосиловых характеристик. *Задачи работы* — оценить точность математического описания зависимости между уплотнением материалов ГМК и давлением, а также справедливость интерпретации постоянных коэффициентов основного уравнения прессования (1) в сравнении с уравнениями Бальшина, Хеккеля, Кавакито, Панелли-Фило и Ге; определить эффективность стадийного уравнения (2) при идентификации и анализе отдельных стадий прессования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор, подготовка и определение свойств материалов

Для проведения исследования отобраны материалы, применяемые в черной металлургии. В соответствии с технологическим назначением в металлургических переделах материалы разбиты на четыре группы: 1 — металлосодержащие; 2 — топливно-восстановительные; 3 — флюсующие; 4 — огнеупорные. Для унификации исходных данных и возможности сопоставительного анализа результатов проведенных экспериментов исключено влияние следующих технологических факторов: влажности материалов, фракционного состава, вида и количества связующих добавок.

Исследуемые материалы нагревали в электрическом сушильном шкафу при 105–110 °С до постоянной массы, добиваясь таким образом отсутствия влаги ($W = 0$). Необходимость удаления влаги вызвана разной природой материалов (по типу и прочности химических связей, строению кристаллической решетки и т. д.), которая проявляется в неодинаковой степени их лиофильности и обуславливает различные последствия контакта с водой: от

набухания, пластификации или диспергирования до практически полного отсутствия межфазного взаимодействия. Путем отсева фракций крупнее 3 мм обеспечивали одинаковый фракционный состав (содержание фракции мельче 3 мм 100 %). Такой фракционный состав, как показывает практический опыт, предпочтителен для проведения экспериментов на лабораторной прессовой установке, поскольку позволяет добиться удовлетворительной степени однородности распределения сыпучего материала в объеме прессующего элемента. Связующих к материалам не добавляли.

Гранулометрический состав, насыпную и истинную плотность материалов определяли с использованием известных методик [11]. Гранулометрический состав материалов оценивали ситовым методом — просеиванием через набор стандартных сит. Для определения насыпной плотности лабораторную пробу засыпали через воронку с высоты 100 мм в стандартный мерный сосуд цилиндрической формы объемом 1000 см³ до образования над верхом сосуда конуса. Излишек материала удаляли металлической линейкой вровень с краями сосуда без уплотнения. Насыпную плотность рассчитывали как разность между массой сосуда с материалом и пустого сосуда, отнесенную к объему мерного сосуда. Для определения истинной плотности использовали пикнометрический метод с применением пикнометра вместимостью 100 см³. Предварительная подготовка сыпучего материала включала дробление до крупности менее 0,08 мм. Значение истинной плотности рассчитывали по объему дистиллированной воды, вытесняемой материалом из пикнометра при кипячении. При расчетах насыпной и истинной плотности брали среднеарифметическое результатов двух параллельных испытаний.

Эквивалентный диаметр d_{eq} частиц и пористость ε_0 материала вычисляли по формулам $d_{eq} = \sum_{i=1}^N q_i \cdot d_i$ и $\varepsilon_0 = (1 - \rho_0 / \rho_s) \cdot 100$ %, где q_i — содержание частиц i -й фракции, доли ед.; d_i — размер частиц i -й фракции, мм; N — число фракций; ρ_s — истинная плотность материала, г/см³.

Данные о химическом составе получены от предприятий, предоставивших материалы. Основные характеристики материалов, подготовленных к исследованию, приведены в табл. 1.

Лабораторная установка и процедура эксперимента

Лабораторная установка, собранная на базе универсальной испытательной машины ЦД10, включает гидравлический привод, силоизмерительное устройство и диаграммный самописец (рис. 1). Максимальное усилие, создаваемое машиной, достигает 100 кН, скорость деформации варьируется в пределах 0,05–6 мм/с. Установка обеспечивает плавное увеличение нагрузки и автоматическую запись диаграммы прессования шихты. Для проведения экспериментов использовали прессовый инструмент, изготовленный из нержавеющей стали: цилиндри-

ческая матрица с внутренним диаметром 20,9 мм, пуансоны с плоскими торцами и диаметром головок 20,8 мм; глубина канала пресс-формы 57,05 мм.

Подготовленный материал, предварительно взвешенный на электронных лабораторных весах с точностью до 0,05 г, засыпали через воронку в собранную пресс-форму (см. рис. 1), излишек мате-

риала удаляли металлической линейкой вровень с краями матрицы без уплотнения. Шихту прессовали без выдержки под давлением при постоянной скорости деформации 22,5 мм/мин до достижения усилия 75 кН, что соответствует давлению 220 МПа. Это давление учитывает ближайшую перспективу роста силовых характеристик валковых

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых материалов*

Т.н.м.	У.о.м.	Материал	Происхождение	П.к.	Содержание п.к., %	d_{eq} , мм	ρ_0 , г/см ³	ρ_s , г/см ³	ϵ_0 , %
М	СС	Стальная стружка Ст40	Днепропетровский завод тяжелого машиностроения (Украина)	Fe _{общ}	98,22	1,79	2,08	7,73	72,94
	ЧС	Чугунная стружка СЧ10	Запорожский литейно-механический завод (Украина)		94,98	1,42	2,2	7,21	69,54
	ПОВ	Прокатная окалина в.п.	Константиновский металлургический завод (Украина)		71,86	0,64	1,35	4,95	72,30
	ЖРК	Железорудный концентрат	Центральный ГОК (Украина)		66,49	0,06	2,1	5,06	58,48
	ООП	Отсев железорудных окатышей	Полтавский ГОК (Украина)	65,3	1,4	1,89	4,37	55,83	
	ПОП	Прокатная окалина первичная	Донецкий металлургический завод (Украина)	59,95	1,09	2,75	4,91	43,71	
	МР	Маргитовая руда	Криворожский железорудный бассейн (Украина)	59,12	0,68	2,59	4,89	46,94	
	ГР	Гематитовая руда		57,29	0,85	2,02	4,46	54,80	
	ОА	Отсев агломерата		Днепропетровский металлургический комбинат (г. Каменское, Украина)	54,41	1,62	2,12	4,76	55,32
	АДШ	КП	Аглодоменный шлак	Днепропетровский металлургический завод (г. Днепр, Украина)	Mn _{общ}	38,49	0,91	1,46	3,50
Колошниковая пыль			35,05			0,25	2,14	4,6	53,32
МК44		Марганцевый концентрат	Чиатурский ГОК (Грузия)	44,25		1,87	1,69	4,00	57,57
МК32				32,68		1,28	1,61	3,41	52,72
МК29			Темиртауский электрометаллургический комбинат (Казахстан)	29,33		1,27	1,75	3,72	52,68
ИК		Ильменитовый концентрат	Вольногорский горно-металлургический комбинат (Украина)	TiO ₂		63,37	0,07	2,15	4,42
ТВ	А	Антрацит	Донецкий угольный бассейн (Украина)	С	94,29	1,26	0,99	1,84	44,76
	УД	Уголь древесный	Перечинский лесохимический комбинат (Украина)		89,97	0,92	0,33	1,57	78,67
	КМ	Коксовая мелочь	Баглейский коксохимический завод (Украина)		87,83	0,93	0,67	1,87	64,19
	УК	Уголь каменный жирный	Львовско-Вольнский угольный бассейн (Украина)		86,21	0,26	0,65	1,48	55,44
	УБ	Уголь бурый	Месторождение Ровинари (Румыния)		67,51	0,94	0,84	1,49	43,93
	Т	Торф низинный сушенка	Ляховичский торфобрикетный завод (Белоруссия)		58,56	0,99	0,54	1,72	68,12
	ТГЛ	Лигнин гидролизный технич.	Запорожский гидролизно-дрожжевой завод (Украина)		52,4	1,32	0,51	1,80	71,15
Ф	ИГ	Известь гашенная пушонка	Бериславский завод строительных материалов (Украина)	CaO	74,3	0,06	0,42	2,12	80,40
	ПЦ	Портландцемент ПЦ-П-В-Ш-400	Криворожский цементный завод (Украина)		66,58	0,01	0,95	3,2	70,24
	И	Известняк	Архангельское месторождение (Украина)		53,22	0,95	1,31	2,45	46,41
	М	Мел	Здолбуновское месторождение (Украина)		51,26	2,17	0,65	2,68	75,75
	ПГО	Пыль газоочисток ц.о.и.	Карагандинский металлургический комбинат (Казахстан)		CaO, MgO	45,38; 29,41	0,002	0,83	3,1
О	ФК	Флюоритовый концентрат ФФ-95	Бор-Ундурский ГОК (Монголия)	CaF ₂	96,15	0,12	1,61	2,65	39,30
	БГ	Бентонитовая глина формовочная	Григорьевское месторождение (Украина)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	53,14; 15,37	0,48	1,17	2,61	54,87
	КГ	Каолиновая глина	Мурзинское месторождение (Украина)		50,56; 44,02	0,91	1,01	2,49	59,41
	ПЛГ	Огнеупорная глина ПЛГ-1	Положское месторождение (Украина)		46,29; 36,08	0,01	0,82	2,56	67,95

* Т.н.м. и у.о.м. — технологическое назначение и условное обозначение материалов; М — металлосодержащие; ТВ — топливно-восстановительные; Ф — флюсоующие; О — огнеупорные материалы; п.к. — полезный компонент; в.п. — волоочильное производство; ц.о.и. — цех обжига известняка.

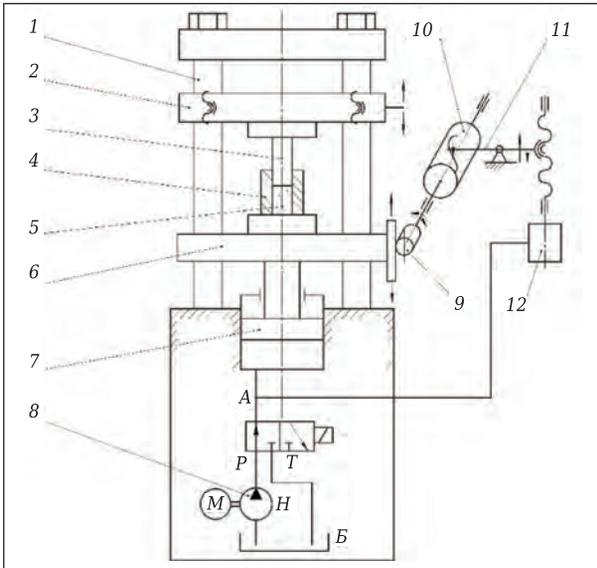


Рис. 1. Схема лабораторной установки для изучения процесса уплотнения мелкофракционных материалов: 1 — колонна; 2 — траверса подвижная; 3 — пуансон; 4 — матрица; 5 — прессуемый материал; 6 — траверса гидроцилиндра; 7 — гидроцилиндр; 8 — насос; 9 — передающий механизм; 10 — барабан самописца; 11 — перо самописца; 12 — преобразователь давления

прессов, разработанных Институтом черной металлургии (в настоящее время $P_{пр.уд} \leq 120$ МПа) [12].

Экспериментальные данные автоматически фиксировались в виде диаграмм прессования в координатах давление – усадка (рис. 2). В конечной точке диаграммы характеризуются конечной усадкой $h_{ус.к}$ и высотой брикета $h_{бр}$, сумма которых (с точностью до 0,05 мм) равна начальной высоте засыпки материала h_0 . Плотность прессовки вычисляли по ее окончательным параметрам. Исходя из конечной плотности, рассчитывали

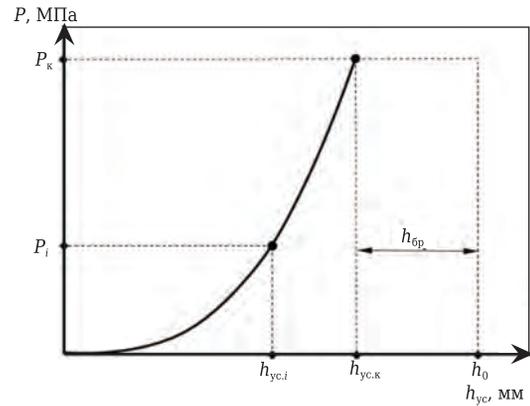


Рис. 2. Качественная диаграмма прессования мелкофракционного материала

промежуточные значения плотности прессовки, соответствующие текущей усадке $h_{ус.и}$. Таким образом, результаты эксперимента представляли в виде зависимостей $P = f(\rho)$. Каждую принятую для последующего анализа кривую рассчитывали по усредненным результатам пяти опытов.

Методика аппроксимации регрессионного анализа

Экспериментально установленные зависимости плотности брикетов от давления прессования аппроксимировали с использованием: а) основного уравнения прессования (1), б) стадийного уравнения прессования (2), в) логарифмического уравнения Бальшина [13], г) степенного уравнения Бальшина [14], д) уравнений Хеккеля [15], е) Кавакито [16], ж) Панелли-Фило [17], з) Ге [18]. Для удобства проведения сравнительного анализа уравнения прессования были приведены к общему виду линейной функции $f(P) = A_n g(D) + B_n$ (табл. 2).

Таблица 2. Уравнения, использованные для анализа экспериментальных данных

Исходная форма уравнения	Преобразованная форма уравнения	Номер уравнения	$f(P)$	$g(D)$	A_n	B_n
а) $P = b_1 \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^{a_1}$	$\ln P = A_1 \left(\frac{D}{D - D_0} \right) + B_1$	(1)	$\ln P$	$\ln \left(\frac{D}{D - D_0} \right)$	a_n	$\ln b_1$
б) $P = b_{bc} \left(\frac{\rho}{\rho_{bc}} \right)^{a_2}$	$\ln P = A_2 \ln \left(\frac{\rho}{\rho_{bc}} \right) + P_{bc}$	(2)		$\ln \left(\frac{\rho}{\rho_{bc}} \right)$		$\ln P_{bc}$
в) $\ln P = -a_3 \left(\frac{1}{D} - 1 \right) + b_3$	$\ln P = A_3 \frac{1}{D} + B_3$	(3)		$\frac{1}{D}$	$-a_3$	$a_3 + b_3$
г) $\lg P = a_4 \lg D + b_4$	$\lg P = A_4 \lg D + B_4$	(4)	$\lg P$	$\lg D$	a_4	b_4
д) $\ln \left(\frac{1}{1 - D} \right) = a_5 P + b_5$	$P = A_5 \ln \left(\frac{1}{1 - D} \right) + B_5$	(5)	P	$\ln \left(\frac{1}{1 - D} \right)$	$\frac{1}{a_n}$	$-\frac{b_n}{a_n}$
е) $\left(\frac{D}{D - D_0} \right) = \frac{a_6}{P} + b_6$	$\frac{1}{P} = A_6 \left(\frac{D}{D - D_0} \right) + B_6$	(6)	$\frac{1}{P}$	$\left(\frac{D}{D - D_0} \right)$		
ж) $\ln \left(\frac{1}{1 - D} \right) = a_7 \sqrt{P} + b_7$	$\sqrt{P} = A_7 \ln \left(\frac{1}{1 - D} \right) + B_7$	(7)	\sqrt{P}	$\ln \left(\frac{1}{1 - D} \right)$		
з) $\lg \left(\ln \left(\frac{1}{1 - D} \right) \right) = a_8 \lg P + b_8$	$\lg P = A_8 \lg \left(\ln \left(\frac{1}{1 - D} \right) \right) + B_8$	(8)	$\lg P$	$\lg \left(\ln \left(\frac{1}{1 - D} \right) \right)$		

* $f(P)$ и $g(D)$ — функции давления прессования и относительной плотности прессовки, соответственно; $a_1...a_8; b_1...b_8; A_1...A_8; B_1...B_8$ — константы уравнений, характеризующие свойства материалов и отражающие их поведение в процессе прессования; D — относительная плотность прессовки; D_0 — относительная плотность порошкового материала в состоянии свободной засыпки.

Аппроксимацию экспериментальных данных линейными уравнениями (1)–(8) проводили методом наименьших квадратов. Для оценки достоверности уравнений линейной регрессии использовали коэффициент детерминации R^2 [19]:

$$R^2 = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (f(P)_i - \widehat{f(P)})^2}{\sum_{i=1}^n (f(P)_i - \bar{f(P)})^2} \right) \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где $f(P)_i$ и $\widehat{f(P)}_i$ — фактическое и расчетное значения $f(P)$; $\bar{f(P)}$ — среднеарифметическое множества фактических значений $f(P)$; n — число опытов.

Среднюю ошибку аппроксимации \bar{A} [19] определяли с использованием данных, не подвергнутых математическим преобразованиям, т. е. сравнивали опытные и расчетные значения давлений P (а не их функций $f(P)$), входящих в линейные уравнения (1), (3)–(8):

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - \widehat{P}_i}{P_i} \right| \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где P_i и \widehat{P}_i — фактическое и расчетное значения давления прессования P .

Моделирование процесса уплотнения материалов ГМК уравнениями (1), (3)–(8) осуществляли во всем диапазоне давлений прессования, считая

его верхней границей значение, соответствующее стабилизации плотности прессовки; при недостижении этого предела границей диапазона принимали P , равное 220 МПа. Стадийное уравнение (2) применяли для моделирования каждой стадии прессования в отдельности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Аппроксимация и регрессионный анализ экспериментальных данных уравнениями прессования (1), (3)–(8)

В табл. 3 приведены результаты регрессионного анализа зависимостей давления прессования от достигнутой степени уплотнения прессовок. Сведения об анализе опытных данных с помощью уравнений Хеккеля (5) и Кавакито (6) в табл. 3 не представлены, поскольку обе модели не удовлетворяют требованию адекватности. Установлено, что для уравнений Хеккеля (5) и Кавакито (6) наименьшие из вычисленных значений \bar{A} составили 40,56 (УБ) и 100,57 % (М), а среднеарифметические значения \bar{A} достигли 93,48 и 162,46 % соответственно. Согласно статистическим критериям, принятым для моделирования реальных процессов [20], значения средней ошибки аппроксимации $\bar{A} > 50$ % свидетельству-

Таблица 3. Регрессионный анализ экспериментальных зависимостей процесса уплотнения исследуемых материалов

У.о.м.	Основное уравнение прессования (1)				Логарифмическое уравнение Бальшина (3)				Степенное уравнение Бальшина (4)				Уравнение Панелли – Фило (7)				Уравнение Ге (8)			
	A_1	B_1	R^2	\bar{A}	A_3	B_3	R^2	\bar{A}	A_4	B_4	R^2	\bar{A}	A_7	B_7	R^2	\bar{A}	A_8	B_8	R^2	\bar{A}
СС	2,00	4,61	99,88	3,57	-2,48	9,18	98,58	10,84	5,32	3,37	95,52	21,17	17,82	-4,26	99,05	16,33	3,68	5,35	93,34	26,63
ЧС	3,07	4,07	99,95	2,13	-3,92	10,46	99,76	4,08	6,80	3,16	98,33	12,69	13,99	-5,67	99,83	5,49	4,06	4,06	96,03	20,40
ПОВ	5,15	1,75	99,79	5,00	-5,88	12,35	99,65	6,46	9,06	3,08	99,82	3,33	12,75	-8,11	99,3	9,98	4,86	2,84	98,97	9,10
ЖРК	5,75	8,11	99,87	3,56	-11,31	22,17	99,43	7,51	18,56	5,54	98,83	11,05	37,87	-28,64	98,7	13,08	11,09	4,21	98,11	14,28
ООП	1,77	5,97	99,9	3,20	-5,39	12,96	96,84	17,64	9,35	3,77	94,86	23,63	18,95	-9,80	99,5	11,06	5,77	4,35	92,97	28,58
ПОП	3,72	6,91	99,89	3,37	-10,78	17,06	99,56	5,27	13,68	2,86	98,96	9,37	9,28	-8,75	99,96	2,05	5,30	0,85	96,1	20,49
МР	4,78	9,50	99,39	8,36	-15,07	25,50	97,78	15,79	22,03	5,13	96,94	18,59	28,00	-25,87	99,87	5,05	11,61	1,75	95,7	22,21
ГР	5,69	7,78	99,63	6,30	-11,98	21,43	99	10,33	17,86	4,63	98,17	14,04	26,12	-22,34	99,59	7,94	9,59	2,46	96,86	18,58
ОА	2,17	6,19	99,79	4,93	-6,08	13,81	98	11,86	10,31	3,85	96,64	17,27	19,63	-11,31	99,91	4,03	6,26	4,08	95,19	22,10
АДШ	4,03	5,82	99,85	3,93	-7,60	15,00	99,77	3,65	11,58	3,57	99,28	7,03	17,04	-12,30	99,4	9,13	6,28	2,84	98,12	13,24
КП	2,87	7,79	99,31	8,51	-8,62	18,41	95,09	23,23	14,39	4,93	93,11	28,24	31,87	-20,90	99,06	10,89	8,69	4,71	91,22	32,63
МК44	2,58	6,41	99,79	4,56	-6,36	14,61	98,79	9,68	11,13	4,19	97,71	14,47	23,51	-13,69	99,75	5,12	6,97	4,51	96,62	18,43
МК32	3,31	7,07	99,81	3,76	-8,38	16,57	98,52	10,69	12,84	3,97	97,4	15,05	21,48	-15,66	99,87	3,76	7,07	3,20	95,79	20,17
МК29	3,68	7,42	99,92	2,91	-9,94	19,02	99,49	6,13	15,91	4,58	99	9,20	23,32	-17,60	99,22	9,96	9,27	3,19	98,34	12,37
ИК	1,97	8,33	99,7	5,53	-10,91	24,00	92,72	38,35	21,16	7,21	90,23	34,02	58,29	-38,27	99,19	11,72	13,71	7,00	89,18	36,18
А	3,26	6,17	99,87	3,49	-8,99	14,67	99,4	6,49	11,31	2,55	98,61	10,89	6,46	-4,85	99,16	13,74	4,07	1,24	94,1	25,93
УД	3,11	1,69	99,96	1,69	-2,92	8,49	99,77	4,97	4,92	2,58	99,18	8,12	6,75	-0,34	96,78	28,59	2,56	3,50	94,52	25,34
КМ	2,46	4,62	99,91	2,33	-3,92	10,09	99,18	7,35	6,46	2,92	97,21	16,21	10,74	-3,87	98,99	16,00	3,25	3,90	95,71	33,74
УК	3,55	5,21	99,83	4,45	-7,01	13,14	99,62	4,95	9,82	2,84	98,96	8,72	9,59	-6,63	99,95	2,58	4,61	2,07	96,72	17,84
УБ	4,12	6,25	99,89	2,70	-10,88	16,27	99,48	6,18	13,14	2,41	98,86	9,70	5,34	-4,60	98,63	15,83	4,20	0,51	94,04	26,50
Т	2,56	4,03	99,93	2,76	-3,46	9,44	99,57	6,11	5,81	2,81	97,38	16,45	9,50	-2,54	97,96	22,12	3,27	3,69	93,5	27,33
ТЛ	3,07	3,31	99,96	1,91	-3,66	9,63	99,93	2,60	6,17	2,84	99,12	9,07	10,21	-3,61	99,55	8,48	3,51	3,57	96,56	19,12
ИГ	5,84	-1,17	99,22	9,49	-5,40	12,08	99,69	5,91	8,46	3,17	98,54	13,13	13,20	-7,05	98,88	9,91	4,55	3,34	95,48	23,42
ПЦ	6,59	5,03	99,79	4,21	-8,05	18,49	99,66	5,37	14,91	5,52	99,05	9,35	40,12	-24,38	98,47	12,92	9,77	5,95	98,47	11,95
И	3,31	6,70	99,53	6,56	-9,32	15,98	98,14	12,58	12,56	3,08	97,05	16,15	11,14	-9,28	99,71	7,53	5,65	1,53	94,47	23,73
М	7,65	0,14	99,66	6,17	-7,84	16,16	99,83	4,35	12,59	4,11	99,16	9,56	23,37	-16,26	99,36	9,38	7,26	3,61	97,99	14,72
ПГО	4,19	4,20	99,79	4,72	-4,65	12,83	99,82	4,31	9,36	4,30	99,6	4,51	28,64	-13,59	98,34	14,51	6,39	5,71	99,13	8,38
ФК	4,09	8,25	99,78	5,02	-13,85	20,70	98,72	12,33	16,97	3,09	97,71	16,47	10,93	-11,60	98,48	12,57	5,97	0,41	92,8	30,29
БГ	3,42	5,38	99,86	3,72	-6,92	13,14	99,67	4,01	9,67	2,87	98,9	9,48	9,83	-6,60	99,91	3,72	4,46	2,21	96,16	20,29
КГ	5,12	5,77	99,8	4,79	-8,96	16,89	99,93	2,69	13,57	3,86	99,81	3,79	19,71	-15,56	98,45	14,38	7,35	2,61	99,16	8,91
ПЛГ	4,79	3,12	99,98	1,49	-6,23	12,83	99,98	1,39	9,41	3,13	99,43	7,61	12,73	-8,09	99,91	3,63	4,93	2,81	97,53	16,37

ют о неудовлетворительной точности уравнения и не позволяют признать модель адекватной. Полученные результаты не противоречат описанным ранее [10] ограничениям областей применения данных моделей.

Уравнение Хеккеля (5) справедливо в пределах стадии пластических деформаций для металлических порошков, уравнение Кавакито (6) адекватно описывает процесс уплотнения хрупких материалов с высокой насыпной плотностью, которые брикетируются при низком давлении прессования. Не случайно первое уравнение наиболее широко распространено в порошковой металлургии [21], второе — в фармацевтическом производстве [22].

Коэффициенты детерминации R^2 , вычисленные для уравнений (1), (3), (4), (7) и (8), характеризуются следующими среднеарифметическими значениями и диапазонами вариации R^2 : 99,78 и 0,76 % для уравнения (1), 98,88 и 7,26 % для уравнения (3), 97,85 и 9,59 % для уравнения (4), 99,18 и 3,18 % для уравнения (7), 95,77 и 9,98 % для уравнения (8). Приведенные данные показывают, что наибольшее среднеарифметическое R^2 , а также наиболее узкий диапазон его вариации наблюдается в основном уравнении прессования (1). Кроме того, это уравнение отличается самыми высокими максимальными и минимальными значениями R^2 : 99,22 (ИГ) и 99,98 % (ПЛГ) соответственно (см. табл. 3). Вместе с тем аппроксимация экспериментальных данных уравнениями линейной регрессии должна быть признана достоверной для всех пяти линейных уравнений прессования (1), (3), (4), (7) и (8), поскольку коэффициент детерминации (>90,25 %) соответствует коэффициенту корреляции (>95 %). Это свидетельствует, согласно шкале Чеддока [20], о функциональной взаимосвязи между параметрами $f(P)$ и $g(D)$ этих уравнений.

Сравнительный анализ точности аппроксимации кривых прессования уравнениями (1), (3), (4), (7) и (8) выполнен сопоставлением усредненных значений средних ошибок аппроксимации \bar{A} для материалов, разбитых на группы в соответствии с их технологическим назначением в металлургических переделах. Результаты анализа показаны в виде гистограммы на рис. 3.

Модель обладает высокой точностью при $\bar{A} < 10\%$ и хорошей при $10\% \leq \bar{A} \leq 20\%$ [20]. Следовательно, основное уравнение прессования (1) обеспечивает высокую точность аппроксимации опытных данных для всех групп исследуемых материалов, логарифмическое уравнение Бальшина (3) — высокую точность для топливно-восстановительных, флюсующих и огнеупорных материалов и хорошую для металлосодержащих материалов, степенное уравнение Бальшина (4) — высокую точность для огнеупорных материалов и хорошую для остальных групп; уравнение Панелли-Фило (7) — высокую точность для металлосодержащих и огнеупорных материалов и хорошую для топливно-восстановительных и флюсующих материалов. Уравнение Ге (8) обеспечивает менее чем хорошую точность аппроксимации для половины исследуемых материалов и поэтому не может быть рекомендовано для анализа процесса уплотнения материалов ГМК.

На рис. 4 показаны образцы аппроксимации кривых прессования уравнениями (1), (3), (4) и (7) в координатах давление – относительная плотность для одного демонстрационного материала из каждой технологической группы.

Интерпретация постоянных коэффициентов основного уравнения прессования, логарифмического и степенного уравнений Бальшина и уравнения Панелли-Фило

Для определения справедливости интерпретации параметров рассматриваемых моделей коэффициенты A_n и B_n уравнений (1), (3), (4) и (7) были преобразованы к виду коэффициентов a_n и b_n исходных форм этих уравнений в соответствии с приведенными в табл. 2 соотношениями между ними. Параметры a_n и b_n в каждом уравнении прессования характеризуют различные комплексы свойств мелкофракционного материала или показатели процесса его уплотнения.

Параметры a_1 , a_3 и a_4 основного уравнения (1) прессования, логарифмического (3) и степенного (4) уравнений Бальшина, предположительно, отражают темп прироста давления по мере сокращения объема шихты при уплотнении, что следует из их формальных математических

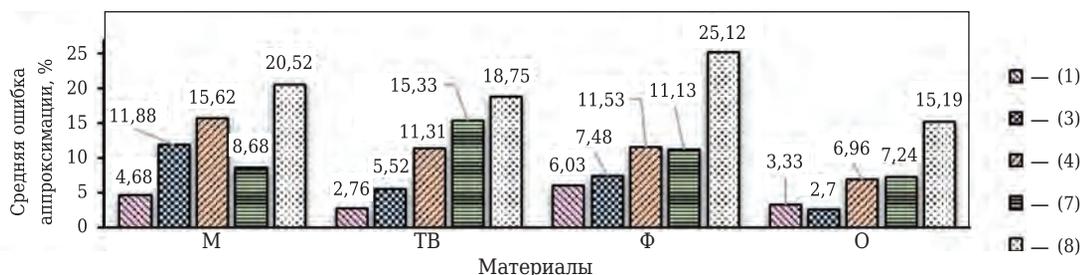


Рис. 3. Точность аппроксимации экспериментальных зависимостей уравнениями (1), (3), (4), (7) и (8)

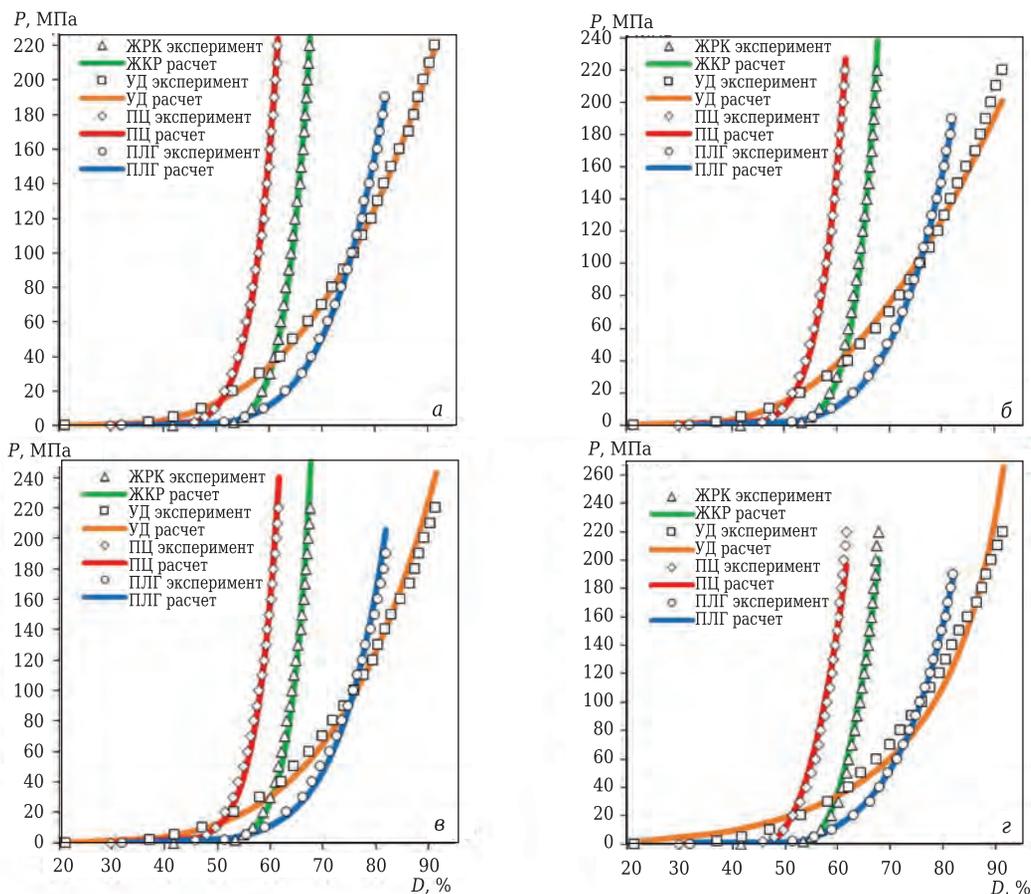


Рис. 4. Аппроксимация экспериментальных зависимостей плотности брикетов от давления прессования: *а* — основное уравнение (1); *б* — логарифмическое уравнение Бальшина (3); *в* — степенное уравнение Бальшина (4); *г* — уравнение Панелли-Фило (7)

определений: $a_1 = \frac{d \ln P}{d \ln(\Delta \rho / \rho_0)}$, $a_3 = \frac{d \ln P}{d \rho_s / \rho}$, $a_4 = \frac{d \ln P}{d \lg(\rho_s / \rho)}$.

Более того, в публикации [23] проводится аналогия между параметрами a_3 , a_4 и модулем Юнга. Таким образом, интерпретация параметров a_1 , a_3 и a_4 заключается в возможности характеризовать мелкодисперсный материал способностью сопротивляться сжатию, или жесткостью. Очевидно, что параметры a_1 , a_3 и a_4 должны позволить ранжировать прессуемые материалы в ряд по возрастанию (убыванию) их жесткости. Параметр a_7 уравнения Панелли-Фило, по определению авторов публикации [17], представляет собой способность мелкодисперсного материала уплотняться под воздействием пластических деформаций и позволяет ранжировать прессуемые материалы в ряд по возрастанию (убыванию) их пластичности, разделяя на хрупкие и пластичные.

Результаты анализа показали, что коэффициенты a_3 в логарифмическом и a_4 в степенном уравнениях Бальшина позволяют ранжировать исследуемые материалы в ряду по возрастанию их жесткости, размещая УД, СС, Т и ТГЛ в начале ряда, а МР, ФК, ИК — в конце (рис. 5). Поэтому можно предположить, что эти параметры адек-

ватно отражают способность шихт сопротивляться сжатию.

Вместе с тем, подобная оценка носит качественный характер, поскольку в определении безразмерных параметров a_3 и a_4 фигурируют не давление прессования и степень уплотнения, а их логарифмы. Следует отметить, что, несмотря на кажущуюся ясность физической сущности, показатель жесткости шихты не получил приемлемого формального определения в практике брикетирования. Так, жесткость шихты предложено [24] характеризовать углом наклона линейного участка графика функции $P = f(D)$ в диапазоне $50 \text{ МПа} \leq P \leq 100 \text{ МПа}$, однако такой показатель не обладает свойством универсальности, поскольку кривая прессования в координатах $P-D$ для многих материалов ГМК отличается в основном нелинейным характером и линейный участок в данном диапазоне отсутствует.

Коэффициент a_1 основного уравнения прессования (1) не позволяет ранжировать исследуемые материалы в порядке возрастания (убывания) их жесткости и поэтому не может быть использован для оценки способности шихт сопротивляться сжатию. Причина заключается в

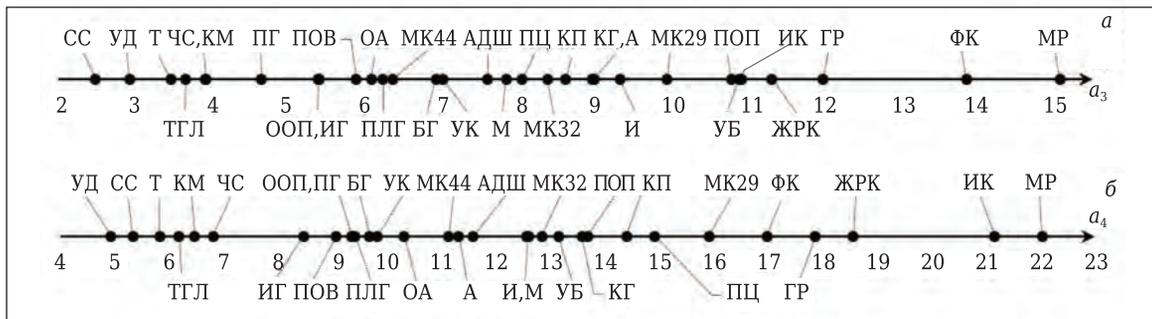


Рис. 5. Ряды ранжирования исследуемых материалов по возрастанию их жесткости на основании анализа параметров a_3 логарифмического (а) и a_4 степенного (б) уравнений Бальшина

том, что зависимость $\ln(\Delta\rho/\rho_0) = f(\rho/\rho_0)$ имеет выраженный криволинейный характер при уплотнении в пределах $1 < (\rho/\rho_0) < 2$ и близкий к линейному при $(\rho/\rho_0) > 2$, поэтому показатель a_1 не позволяет сравнивать темпы прироста давления по мере уплотнения шихт в широком диапазоне изменения ρ/ρ_0 . В то же время пригодность параметров a_3 и a_4 для оценки жесткости материалов объясняется тем, что зависимости $1/D = f(\rho/\rho_0)$ и $\lg(D) = f(\rho/\rho_0)$ имеют характер, близкий к линейному, во всем диапазоне достигнутых в настоящей работе степеней уплотнения. Следует отметить также, что наибольшая точность аппроксимации экспериментальных данных основным уравнением прессования (1) может быть обусловлена криволинейностью функции $\ln(\Delta\rho/\rho_0) = f(\rho/\rho_0)$.

Оценить справедливость интерпретации коэффициента a_7 уравнения Панелли-Фило как параметра, позволяющего разделять материалы по преобладающему механизму деформации на уплотняющиеся преимущественно посредством пластических деформаций или путем фрагментации частиц, в рамках настоящей работы не представилось возможным. Для проведения такого сравнительного анализа требуется достаточное количество материалов, проявляющих оба свойства, в то время как большинство материалов ГМК в сухом состоянии пластичностью не обладают. Такая тенденция остается справедливой и для объектов настоящего исследования, из которых только один (стальная стружка) может демонстрировать пластичные свойства под давлением.

Параметр b_1 основного прессования уравнения (1) характеризует давление $P_{(\rho/\rho_0 = 2)}$, необходимое для двукратного уплотнения материала [10]; параметры b_3 в логарифмическом и b_4 в степенном уравнении Бальшина [14] должны соответствовать логарифму давления прессования P_{max} , обеспечивающему получение беспористой прессовки; параметр b_7 в уравнении Панелли-Фило, как указано в статье [17], отражает относительную плотность материала в состоянии свободной насыпки и численно равен логарифму обратной насыпной пористости шихты $\ln 1/(1 - D_0)$.

По данным проведенного анализа установлено, что в технологическом диапазоне давлений прессования величина $P_{(\rho/\rho_0 = 2)}$, определенная расчетным путем как коэффициент b_1 , отличается от экспериментальной величины менее чем на 9 %. Для СС расчетное/экспериментальное значение $P_{(\rho/\rho_0 = 2)}$ /относительное отклонение — 100,48/99,13/1,37 %, для ЧС — 58,56/58,88/0,55 %, для ПОВ — 5,75/6,32/8,95 %, для УД — 5,79/5,42/6,4 %, для КМ — 101,49/99,03/2,49 %, для Т — 56,26/57,65/2,41 %, для ТГЛ — 27,39/26,33/4,01 %, для ПЦ — 152,93/147,76/3,5 %, для ПГО — 66,69/61,87/7,7 %, для ПЛГ — 22,65/23,14/2,13 %. У материалов, объем которых сокращается вдвое вблизи границ диапазона давлений прессования, закономерно наблюдаются несколько большие отклонения: у ИГ — 1,26/1,42/11,27 %, у М — 1,53/1,82/15,93 %, у УК — 183,09/214,18/14,51 %. Ряд исследуемых материалов ГМК (УБ, И, ФК, БГ, КГ и большинство железосодержащих) испытывают двукратное уплотнение при давлениях, значительно превышающих 220 МПа. Поскольку такое давление не может быть достигнуто на имеющемся лабораторном оборудовании, оценить точность расчетных значений $P_{(\rho/\rho_0 = 2)}$ не представилось возможным.

Следует отметить также сильную отрицательную корреляцию между логарифмом параметра b_1 и предложенным в публикации [25] показателем уплотняемости шихты при брикетировании K_{y100} , равным отношению ρ/ρ_0 при $P = 100$ МПа (рис. 6). Установленная зависимость подтверждает правильность интерпретации параметра b_1 в качестве характеристики, отражающей способность шихты сопротивляться сжатию, т. е. величины, обратной показателю сжимаемости шихты (K_{y100}).

Давление P_{max} , обеспечивающее получение беспористой прессовки, ассоциируется [14, 24] с давлением истечения металла, численное значение которого близко к твердости по Бринеллю (HB) деформированного компактного металла (HB_{max}) и в 1,5–3 раза превышает HB неупрочненного металла или сплава [24]; для неметаллических материалов значение данного термина не опреде-

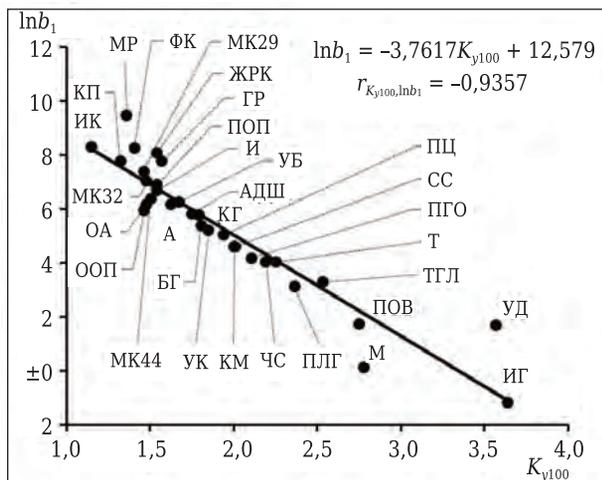


Рис. 6. Корреляционная связь между параметром $\ln b_1$ и показателем уплотняемости K_{y100}

Таблица 4. Расчет относительной насыпной плотности материалов по коэффициенту b_7 уравнения Панелли-Фило

У.о.м.	D_0 расч.	D_0 эксп.	Δ , %	У.о.м.	D_0 расч.	D_0 эксп.	Δ , %
СС	21,3	27,0	21,3	УД	4,9	19,8	75,1
ЧС	33,3	30,6	9,0	КМ	30,3	35,8	15,5
ПОВ	47,1	27,6	70,8	УК	49,9	43,6	14,4
ЖРК	53,1	41,5	27,6	УБ	57,7	56,0	3,1
ООП	40,4	43,9	8,1	Т	23,5	31,8	26,1
ПОП	61,0	56,1	8,8	ТГЛ	29,8	28,5	4,5
МР	60,3	53,0	13,9	ИГ	41,4	19,8	108,9
ГР	57,5	45,3	26,9	ПЦ	45,5	29,7	53,4
ОА	43,8	44,5	1,7	И	56,5	53,5	5,7
АДСШ	51,4	41,7	23,2	М	50,1	24,3	106,7
КП	48,1	46,5	3,4	ПГО	37,8	26,8	41,1
МК44	44,1	42,2	4,5	ФК	65,4	60,7	7,6
МК32	51,8	47,3	9,3	БГ	48,9	45,0	8,7
МК29	53,0	47,3	12,0	КГ	54,6	40,4	35,1
ИК	48,1	48,6	1,1	ПЛГ	47,0	32,0	46,8
А	52,8	55,0	4,0				

лено. Поскольку из всех объектов исследования настоящей работы только стальная и чугунная стружка образованы металлическими сплавами, справедливость интерпретации параметров b_3 логарифмического и b_4 степенного уравнений Бальшина определяли путем сравнения значений P_{max} , рассчитанных по этим коэффициентам, и имеющихся в специальной литературе сведений о HV указанных сплавов. Величины P_{max} , вычисленные как логарифмы параметров b_3 и b_4 , составили для стальной стружки 812 и 2344 МПа, для чугунной 629 и 1445 МПа, в то время как HV стали марки Ст40 составляет 2122–2128 МПа, а чугуна марки СЧ10 не менее 1402 МПа [26, 27]. Очевидно, что параметр b_4 степенного уравнения

Библиографический список

1. **Маймур, Б. Н.** Брикетирование металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода / Б. Н. Маймур, А. Ю. Худяков, В. И. Петренко [и др.] // Черная металлургия. Бюл. научно-технической и экономической информации. — 2016. — № 1. — С. 74–81.
 2. **Khudyakov, A. Yu.** Kaolin raw material briquetting for lump chamotte production / A. Yu.

Бальшина обеспечивает лучшее приближение к справочным данным и, следовательно, представляет большую ценность с точки зрения моделирования свойств прессуемого материала.

Результаты расчетов относительной насыпной плотности материалов D_0 расч., выполненных с использованием параметра b_7 уравнения Панелли-Фило, экспериментальные значения D_0 эксп и относительное отклонение Δ расчетных данных от опытных приведены в табл. 4.

Погрешность расчета D_0 для большинства исследуемых мелкофракционных материалов (17 из 31) превышает 10 %, а для материалов с наибольшей уплотняемостью (ПОВ, УД, М, ИГ, см. рис. 6) превышает 70 %. Среднеарифметическое значение Δ , вычисленное в отдельных группах, составило 16,11 % для металлосодержащих материалов, для остальных групп более 20 %. Таким образом, использование параметра b_7 оправданно только для предварительной или приближенной оценки относительной насыпной плотности металлосодержащих материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены математическое описание экспериментальных кривых прессования материалов ГМК с помощью наиболее распространенных в мировой практике эмпирических уравнений, а также регрессионный анализ полученных зависимостей. Установлено, что разработанное авторами основное уравнение прессования обеспечивает высокую точность аппроксимации опытных данных для всех групп исследуемых материалов и является наиболее предпочтительным для определения энергосиловых характеристик прессования мелкофракционных материалов ГМК в технологическом диапазоне давлений. Уравнение Панелли-Фило, логарифмическое и степенное уравнения Бальшина описывают опытные данные с достаточной точностью и могут быть рекомендованы для практического использования. Уравнения Хеккеля, Кавакито и Ге непригодны для анализа процесса уплотнения материалов ГМК из-за недостаточной точности аппроксимации экспериментальных зависимостей между давлением прессования и степенью уплотнения. Дана оценка справедливости интерпретации постоянных коэффициентов уравнений, пригодных для математического описания экспериментальных данных.

(Продолжение следует)

Khudyakov, S. V. Vashchenko, K. V. Baiul, Yu. S. Semenov // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 59, № 4. — P. 333–337.

Худяков, А. Ю. Брикетирование каолинового сырья для производства кускового шамота / А. Ю. Худяков, С. В. Ващенко, К. В. Баюл, Ю. С. Семенов // Новые огнеупоры. — 2018. — № 8. — С. 14–19.

3. **Vashchenko, S. V.** Selecting the batch composition in briquetting / S. V. Vashchenko, A. Yu. Khudyakov, K. V. Baiul, Yu. S. Semenov // Steel in Translation. — 2018. — Vol. 48, № 8. — P. 509–512.
4. **Баюл, К. В.** Технологии и оборудование для брикетирования мелкофракционных материалов в ферросплавном производстве / К. В. Баюл, А. Ю. Худяков, С. В. Ващенко // Новости науки Казахстана. — 2018. — № 4 (138). — С. 108–119.
5. **Klevan, I.** Compression analysis of pharmaceutical powders: assessment of mechanical properties and tablet manufacturability prediction : PhD. Thesis. — Tromso, Norway : University of Tromso, 2011. — 71 p.
6. **Sonnergaard, J. M.** Investigation of a new mathematical model for compression of pharmaceutical powder / J. M. Sonnergaard // European Journal of Pharmaceutical Sciences. — 2001. — Vol. 14. — P. 149–157.
7. **Adapa, P.** Compression characteristics of selected ground agricultural biomass / P. Adapa, L. Tabil, G. Schoenau // Agricultural Engineering International: the CIGR E-journal. — Manuscript 1347. — Vol. XI. — June, 2009.
8. **Bernarders, M. A.** Biofuel's engineering process technology / M. A. Bernarders (Ed.). — L. : InTechOpen, 2011. — 742 p.
9. **Mallick, S.** Rearrangement of particle and compactibility, tabletability and compressibility of pharmaceutical powder: a rational approach / S. Mallick // Journal of Scientific & Industrial Research. — 2014. — Vol. 73. — P. 51–56.
10. **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. — 2019. — Vol. 60, № 6. — P. 618–626.
11. **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.
12. **ГОСТ 9758–2012.** Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний. — М. : Стандартинформ, 2014. — 64 с.
13. **Баюл, К. В.** Формирование рекомендаций по разработке высокопроизводительного валкового пресса усовершенствованной конструкции / К. В. Баюл, С. В. Ващенко, А. Ю. Худяков [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. — Днепропетровск : ИЧМ НАН Украины. — 2018. — Вып. 32. — С. 402–414.
14. **Сотоглу, Т.** An overview of compaction equations / T. Cotoglu // J. Fac. Pharm., Ankara. — 2007. — Vol. 36, № 2. — P. 123–133.
15. **Бальшин, М. Ю.** Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М. Ю. Бальшин. — М. : Металлургия, 1972. — 336 с.
16. **Denny, P. J.** Compaction equations: a comparison of the Heckel and Kawakita equations / P. J. Denny // Powder Technology. — 2002. — Vol. 127, № 2. — P. 162–172.
17. **Sivasankaran, S.** Evaluation of compaction equations and prediction using adaptive neuro-fuzzy inference system on compressibility behavior of AA 6061(100 – x) – x wt. % TiO₂ nanocomposites prepared by mechanical alloying / S. Sivasankaran, K. Sivaprasad, R. Narayanasamy, V. K. Iyer // Powder Technology. — 2011. — Vol. 209, № 1/3. — P. 124–137.
18. **Panelli, R.** A study of a new phenomenological compacting equation / R. Panelli, F. A. Filho // Powder Technology. — 2001. — Vol. 114. — P. 255–261.
19. **Ge, R. D.** Constitutive model for hot pressing of powders / R. D. Ge // J. Mater. Sci. Technol. — 1995. — № 10. — P. 374–380.
20. **Елисеева, И. И.** Эконометрика / И. И. Елисеева, С. В. Курьшева, Т. В. Костеева [и др.]. — М. : Финансы и статистика, 2003. — 344 с.
21. **Ишханян, М. В.** Эконометрика. Ч. 1. Парная регрессия : уч. пособие / М. В. Ишханян, Н. В. Карпенко. — М. : изд-во МГУПС (МИИТ), 2016. — 117 с.
22. **German, R. M.** Powder metallurgy and particulate materials processing / R. M. German. — NJ, Princeton: Metal Powder Industries Federation, 2005. — 528 p.
23. **Che, S.** A new mathematical equation for the evaluation of the compression behavior of pharmaceutical materials / S. Chen, J. Zhu, X. Qi // Acta Pharmaceutica Sinica. — 2012. — Vol. 47, № 10. — P. 1384–1388.
24. **Бальшин, М. Ю.** Порошковое металловедение / М. Ю. Бальшин. — М. : Металлургиздат, 1948. — 332 с.
25. **Носков, В. А.** Создание и внедрение прессового оборудования для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов : дис. ... докт. техн. наук : 05.05.08. — Днепропетровск, 2001. — 318 с.
26. **Маймур, Б. Н.** Исследование влияния свойств мелкофракционных шихтовых материалов на их уплотнение в валковых брикетных прессах / Б. Н. Маймур, И. Г. Муравьева, С. В. Ващенко [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. науч. тр. — Днепропетровск : ИЧМ НАН Украины, 2014. — Вып. 28. — С. 310–325.
27. **Гэжиров, Р. И.** Краткий справочник конструктора / Р. И. Гэжиров. — Л. : Машиностроение, Ленингр. отделение, 1983. — 646 с.
28. **Сорокин, В. Г.** Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин [и др.]. — М. : Машиностроение, 1989. — 640 с. ■

Получено 20.03.20

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

