

С.В.Ващенко, В.И.Петренко, Б.Н.Маймур, И.Г.Муравьева

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ УПЛОТНЕНИЯ
МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МНОГОКРАТНОМ
НАГРУЖЕНИИ**

Разработана методика экспериментальных исследований уплотнения мелкофракционных материалов, характеризующихся высокой степенью дисперсности и низкой насыпной плотностью, для которых требуется предварительное обжатие перед окончательным уплотнением в валках пресса. Для материалов такого типа изучены физико–механические свойства и особенности уплотнения при однократном и многократном нагружении. На основе проведенных исследований разработан метод, позволяющий построить графические зависимости параметров уплотнения от давления материалов при многократном их нагружении, установить границы стадий уплотнения, отличающихся характером деформационных процессов, определить количество обжатий и величину нагрузки, необходимых для достижения заданного коэффициента уплотнения исследуемого материала.

мелкофракционные материалы, физико–механические свойства, многократное нагружение, границы стадий уплотнения, деформация.

Состояние вопроса и постановка задачи. В ходе выполняемых в течение ряда лет сотрудниками Института черной металлургии (ИЧМ) теоретических и экспериментальных исследований процесса брикетирования мелкофракционных шихтовых материалов с различными физико–механическими свойствами разработаны специальные методики изучения брикетируемости материалов при однократном нагружении [1]. Однако, как известно, имеется ряд материалов, характеризующихся высокой степенью дисперсности и низкой насыпной плотностью, прессование которых в валковых прессах без применения каких–либо дополнительных устройств является затруднительным, а в ряде случаев и невозможным. К таким материалам относятся пыли газоочисток различных производств, коксовая мелочь, угольные шламы, лигнин и др. Они могут служить как основным компонентом брикетов, так и входить в состав комплексных брикетов в качестве, например, восстанавливающей или энергетической добавки. Трудность достижения необходимых для этих материалов высоких коэффициентов уплотнения (K_v) – 3,5 и выше – может быть обусловлена негативным влиянием вытесняемого воздуха, плохой сыпучестью материала, геометрическими параметрами валков.

Из практики брикетирования известны различные способы решения этой проблемы [2]. Так, например, подобные материалы эффективно уплотняются при букельном прессовании в штемпельных прессах. В процессе прессования под действием высоких давлений происходит всестороннее сжатие материала в брикет. Материал, поступающий в пресс, сжимается между торцом штампера и группой образующихся брикетов в ко-

ническом матричном канале. Давление прессования развивается и поддерживается за счет сил трения брикетов в канале определенного промежутка времени. При таком прессовании реализуется принцип многократного нагружения, обеспечивающий эффективное уплотнение материала. Основными недостатками прессования материала в штемпельном прессе являются цикличность процесса, повышенный износ конической части канала, сложность удаления воздуха из материала, низкая производительность, а также большие динамические нагрузки.

В определенной степени эффективно данную задачу можно решить, используя пресса валкового типа, конструкция которых позволяет реализовать принцип многостадийного нагружения. К ним относятся пресса с принудительной подачей материала в валки с помощью подпрессовщиков различного типа, а также пресса, представляющие собой многовалковые системы различных комбинаций [2]. Помимо получения качественных брикетов, принцип многостадийного нагружения позволяет значительно повысить производительность, как за счет увеличения плотности полученных брикетов, так и за счет возможности увеличения скорости прессования.

Следует отметить, что, несмотря на перспективность данного направления, широкого внедрения в практике брикетирования конструкции прессов с многостадийным нагружением не получили. Вызвано это, прежде всего, недостаточной изученностью механизма постадийного деформирования шихт. Теория процесса брикетирования при такой схеме очага деформации не разработана, отсутствует методика расчета основных технологических, силовых и конструктивных параметров процесса и оборудования, невозможно прогнозировать необходимую степень уплотнения и требуемое при этом давление прессования. Развитие работ в данном направлении будет способствовать созданию и внедрению новых эффективных конструкций прессов для брикетирования мелкофракционных шихт.

Целью данного исследования является изучение особенностей механизма уплотнения мелкофракционных материалов при многократном нагружении и установление взаимосвязей степени уплотнения с их физико-механическими характеристиками.

Методика и результаты исследования. Для достижения поставленной цели необходимо было провести многочисленные и трудоемкие эксперименты. Для их систематизации и оптимизации была разработана методика, структурная схема которой представлена на рис.1. Используемые в исследовании характеристики материалов и составленных на их основе шихт существенно отличающихся по физико-механическим и технологическим свойствам, приведены в табл.1 и 2.

Основой проведения исследований при многостадийном уплотнении материалов, было, как и ранее [1], получение зависимости коэффициента уплотнения от давления прессования (P). Но, в отличие от предыдущих работ, зависимости $P=f(K_y)$ получали не только при однократном нагру-

жении до достижения выбранного конечного значения P (100 МПа), но и при поэтапном приложении давления прессования. Выбрано количество нагружений, их дискретность (количество обжатий на различных стадиях уплотнения) и величина нагрузки при каждом обжатии, что позволит учесть особенность поведения материала в процессе уплотнения. Так, например, на начальной стадии уплотнения количество нагружений выбрали с большей дискретностью, т.к. эта стадия характеризуется значительной усадкой прессовки при малом росте давления.

Согласно выбранной схеме нагружений выполняли последовательно нагрузку и разгрузку образцов прессуемых материалов, при этом были записаны диаграммы прессования для заданных значений давления для всех указанных в табл.2 материалов и шихт. Затем на основе полученных диаграмм построены графические зависимости $P = f(K_y)$. В качестве примера на рис.2,3 для одной из шихт – угольного шлама – представлены диаграммы прессования, а также графические зависимости $P = f(K_y)$ для каждого нагружения. Конечная точка каждой кривой (рис.3) соответствует уплотнению, достигнутому при заданной для каждого обжатия нагрузке. В результате соединения этих точек получена кусочно–линейная зависимость в координатах «давление прессования» – «коэффициент уплотнения», показывающая изменение сопротивления материала сжатию при последовательной нагрузке и разгрузке материала на каждом обжатии. На рис.4,5 представлены графики, иллюстрирующие зависимость $P = f(K_y)$ для угольного шлама и пыли электрофильтров при их однократном нагружении и кусочно–линейную зависимость – при многократном приложении нагрузки

Сравнение количественных показателей уплотнения при однократном и многократном нагружении (табл.3) показывает, что увеличение коэффициента уплотнения при многократном нагружении, по–сравнению с однократным, наблюдается у материалов с низкой насыпной плотностью – лигнина и полученных на его основе шихт ($0,21 \dots 0,24 \text{ г/см}^3$) и материала с размером частиц менее $0,05 \text{ мм}$ – пыли электрофильтров. Для материалов с насыпной плотностью больше $0,5 \text{ г/см}^3$ – угольный шлак ($0,87 \text{ г/см}^3$) и крупностью частиц больше $0,5 \text{ мм}$ – коксовая мелочь ($d_{cp} = 1,42 \text{ мм}$) рост коэффициента уплотнения при многократном нагружении незначителен.

Введение связующих добавок для формирования шихт на основе коксовой мелочи (органическое связующее) и лигнина (вода) в определенной степени влияет на насыпную плотность, коэффициенты внешнего и внутреннего трения (табл.2,3). Это способствует увеличению коэффициентов уплотнения при использовании связующих веществ (табл.3), причем с увеличением количества связующего наблюдается их рост.

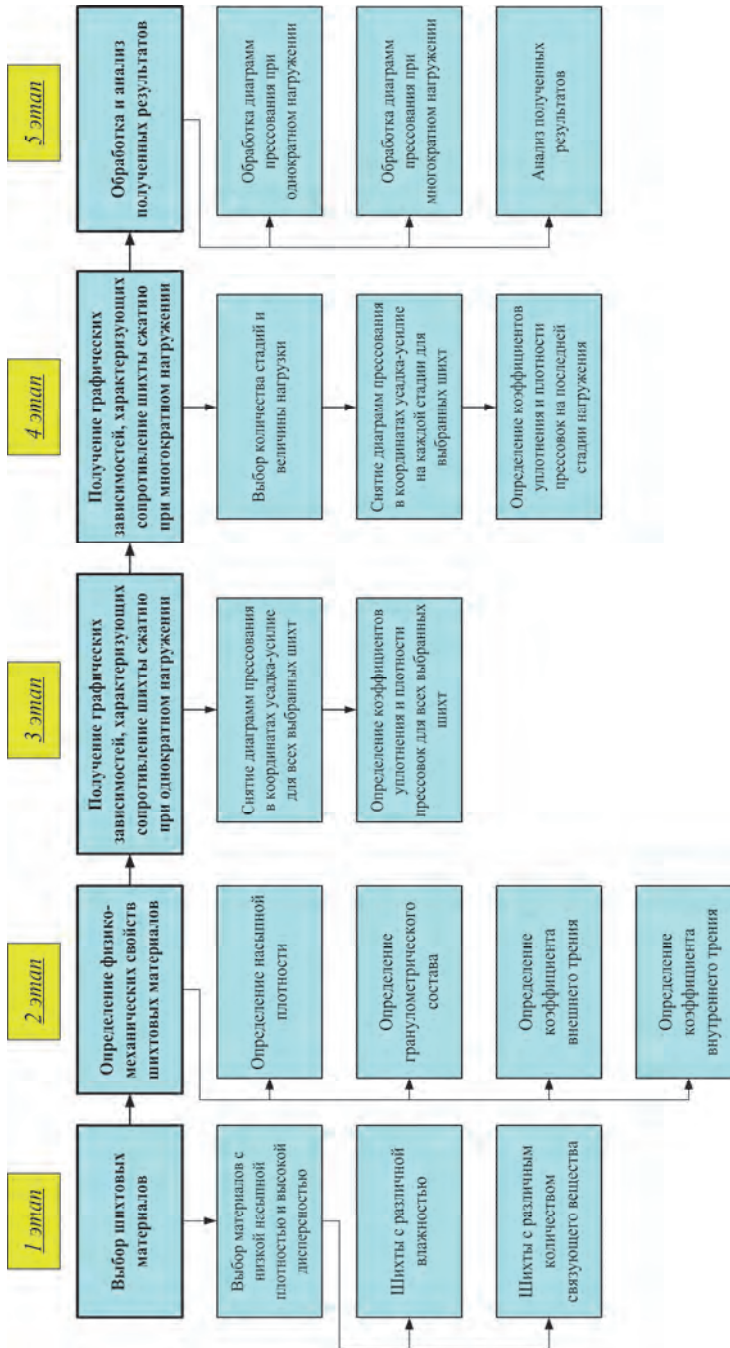


Рис.1. Схема, иллюстрирующая последовательность реализации методики экспериментальных исследований уплотнения мелкофракционных материалов

Таблица 1. Гранулометрический состав исследуемых материалов

Материалы	Фракция, мм	Содержание фракций, % масс.	Средний диаметр частиц, мм
Лигнин	+ 5	6,9	1,3
	- 5 ... + 3	4,8	
	- 3 ... + 2	5,3	
	- 2 ... + 1	32,2	
	- 1 ... + 0,5	3,2	
	- 0,5 ... 0	47,5	
Угольный шлам	- 5 ... + 3	12,12	1,26
	- 3 ... + 2	10,62	
	- 2 ... + 1	24,5	
	- 1 ... + 0,5	3,58	
	- 0,5 ... 0	49,18	
Коксовая мелочь	+ 5	0,79	1,42
	- 5 ... + 3	9,73	
	- 3 ... + 2	14,9	
	- 2 ... + 1	31,46	
	- 1 ... + 0,5	7,59	
	- 0,5 ... 0	35,53	

Кроме получения количественных характеристик уплотнения исследуемых материалов, представленные на рис.4,5 кривые, по нашему мнению, отражают характер деформационных процессов на отдельных этапах нагружения и позволяют выделить стадии уплотнения, в которых преобладающим является определенный вид деформации.

Из литературных источников известно, что процесс уплотнения мелкодисперсных материалов разделяется на несколько стадий, отличающихся характером деформационных процессов. Существование характерных участков на кривой уплотнения отмечается М.Ю.Бальшиным [3], А.С.Слюсаревым [4] и другими авторами, однако четкие критерии выделения участков, соответствующих конкретным стадиям с различным механизмом деформации, не приводятся. При этом выделяется начальная стадия, на которой уплотнение происходит за счет взаимного перемещения частиц и их укладки. На этой стадии уплотнение шихт происходит за счет перемещения частиц относительно друг друга (проскальзывания, сдвигов, поворотов) без изменения их внутренней структуры. Особенность этой стадии заключается в возможности достижения высоких показателей уплотнения при сравнительно низких давлениях прессования.

Таблица 2. Насыпная плотность и характеристики трения исследуемых материалов и шихты

Вид материала		Насыпная плотность, г/см ³	Угол начала сдвига (α_1), град.	Коэффициент внешнего трения ($f_1 = \operatorname{tg} \alpha_1$)	Угол естественного откоса (α_2), град.	Коэффициент внутреннего трения ($f_2 = \operatorname{tg} \alpha_2$)
Исходные материалы	Пыль электрофильтров	0,9	59,7	1,71	45	1
	Лигнин	0,24	37,2	0,76	36,7	0,75
	Угольный шлак	0,87	36,5	0,74	33,6	0,66
	Коксовая мелочь	0,53	44	0,97	40,5	0,85
Шихты	Пыль электрофильтров (W = 16%)	0,52	43	0,93	90*	–
	Лигнин (W = 18%)	0,21	49,7	1,18	40,4	0,85
	Лигнин (W = 25%)	0,22	50	1,19	40,6	0,86
	Лигнин (W = 30%)	0,22	50,7	1,22	42,2	0,91
	Угольный шлак (W = 12%)	0,71	40	0,84	37,4	0,76
	Коксовая мелочь (W = 10%)	0,45	48,7	1,14	42,5	0,92
	[97,8% Коксовая мелочь + 2% ОС + 0,2% NaOH] + 10% H ₂ O	0,47	38,3	0,79	35,6	0,72
	[95,6% Коксовая мелочь + 4% ОС + 0,4% NaOH] + 10% H ₂ O	0,44	40	0,84	36,2	0,73
[93,4% Коксовая мелочь + 6% ОС + 0,6% NaOH] + 10% H ₂ O	0,41	46,3	1,05	41,7	0,89	

* – материал образует вертикальную стенку

Затем следует стадия упруго–пластических деформаций, которая характеризуется тем, что частицы материала, упакованные плотно, оказывают сопротивление сжатию, при этом давление прессования растет. Уплотнение материала происходит как за счет упругих, так и за счет пластических деформаций. Следующая стадия характеризуется тем, что сжимается уже сформированный монолит, в котором преобладают только упругие деформации при резко возрастающем давлении.

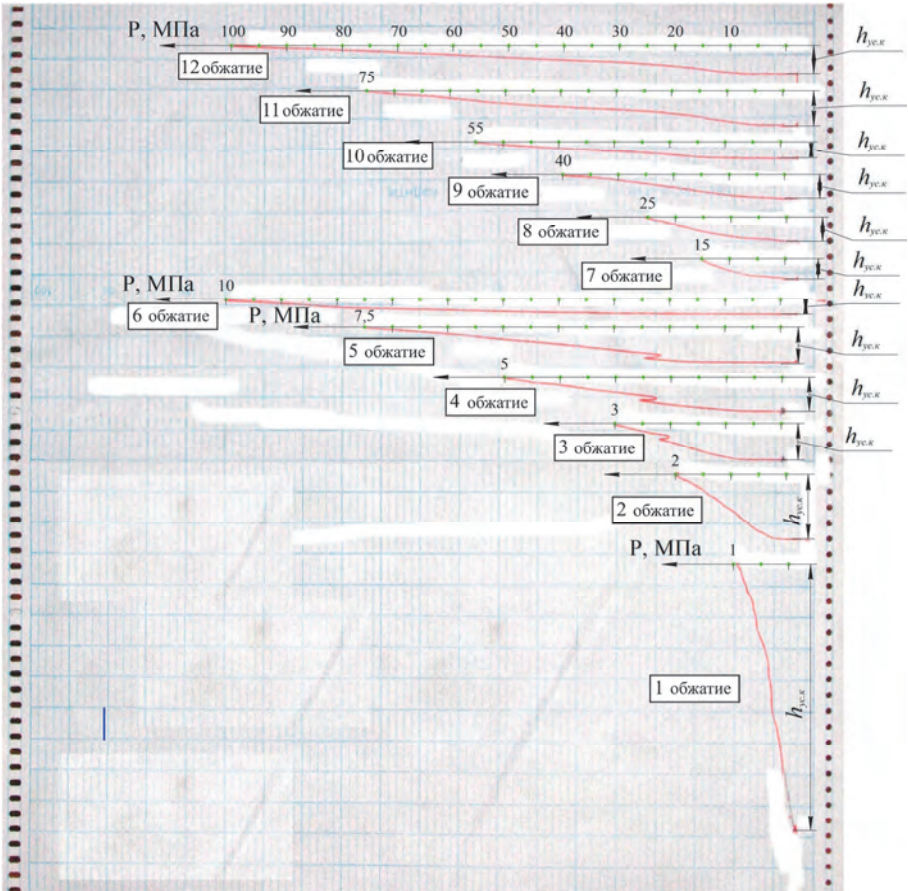


Рис.2. Диаграммы прессования шихты на основе угольного шлама влажностью 12% (1 – 12 обжатие)

В реальных условиях происходит наложение указанных стадий. Диаграмма прессования (графическая зависимость усадки материала от давления прессования) носит монотонный характер. Это хорошо видно на рис.4,5, из которых следует, что изменение давления прессования при однократном нагружении происходит плавно, что приводит к невозможности установления границ стадий с преобладанием определенного вида деформации.

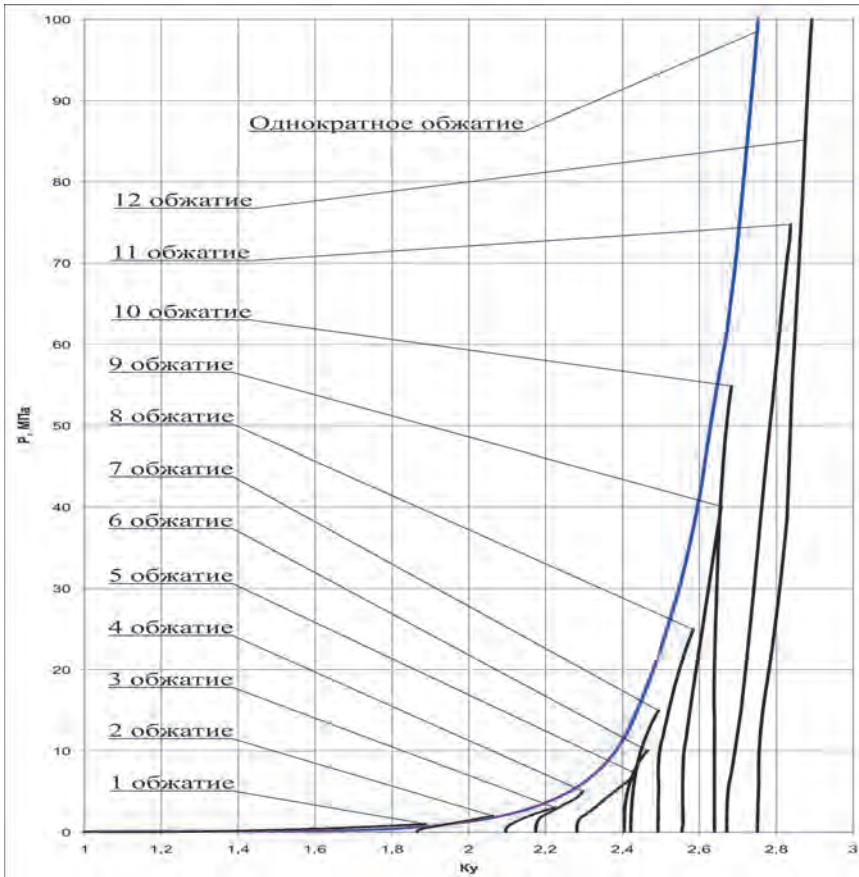


Рис.3. Зависимости коэффициентов уплотнения от давления прессования при различных способах нагружения для шихты на основе угольного шлама влажностью 12%.

В отличие от однократного нагружения, для условий многократного могут быть выделены стадии, характеризующие определенный вид деформаций прессуемого материала, а также выполнена оценка их протяженности (по достигаемой степени уплотнения). Например, в начальной стадии для пыли электрофильтров ($d_{cp} = 0,05$ мм) достигается $K_v = 5$, а для угольного шлама ($d_{cp} = 1,26$) – $K_v = 2,4$.

Анализ изменения характера деформации при уплотнении пыли электрофильтров (рис.5) показал, что с целью исключения развития упругих деформаций, характеризующихся незначительным уплотнением при увеличении давления, величина его не должна превышать 75 МПа.

Таблица 3. Показатели уплотнения шихт при различных способах нагружения до 100 МПа

Шихты	Коэффициент уплотнения при однократном нагружении до 100 МПа	Коэффициент уплотнения при многократном нагружении до 100 МПа
Пыль электрофильтров ($W = 16\%$)	6,16	7,2
Лигнин ($W = 18\%$)	6,98	8,56
Лигнин ($W = 25\%$)	7,89	9,59
Лигнин ($W = 30\%$)	8,98	9,98
Угольный шлак ($W = 12\%$)	2,75	2,89
Коксовая мелочь ($W = 10\%$)	3,45	3,51
[97,8% Коксовая мелочь + 2% ОС + 0,2% NaOH] + 10% H ₂ O	3,21	3,25
[95,6% Коксовая мелочь + 4% ОС + 0,4% NaOH] + 10% H ₂ O	3,46	3,53
[93,4% Коксовая мелочь + 6% ОС + 0,6% NaOH] + 10% H ₂ O	3,79	4,11

ОС – органическое связующее

В качестве примера рассмотрим процесс прессования пыли электрофильтров. Исходя из минимально необходимой плотности, обеспечивающей прочностные характеристики брикетов – $2,5 \text{ г/см}^3$ ($K_v = 5,5$), выбирается необходимое давление прессования. Как следует из рис.5, для получения брикетов требуемой плотности наиболее предпочтительным является интервал давлений до 25 МПа. При выборе нагружений в соответствии с графиком необходимо учесть, что первое обжатие должно находиться в интервале давлений от 5 МПа до 15 МПа для создания условий упругой разгрузки прессовок. Такой режим прессования может быть достигнут за счет применения подпрессовщиков. При более высоких требованиях к качеству брикетов плотность брикетов должна быть не менее $3,0...3,2 \text{ г/см}^3$. Для достижения такой степени уплотнения ($K_v = 6,8...7$) необходимо создание давлений не менее 75 МПа. Для реализации такого режима необходимо процесс уплотнения разбить на несколько обжатий:

- первое обжатие – $K_v = 5,1$ (интервал давлений до 15 МПа);
- второе обжатие – $K_v = 5,5$ (интервал давлений от 15 до 25 МПа);
- третье обжатие – $K_v = 5,8...6,8$ (интервал давлений от 55 до 75 МПа).

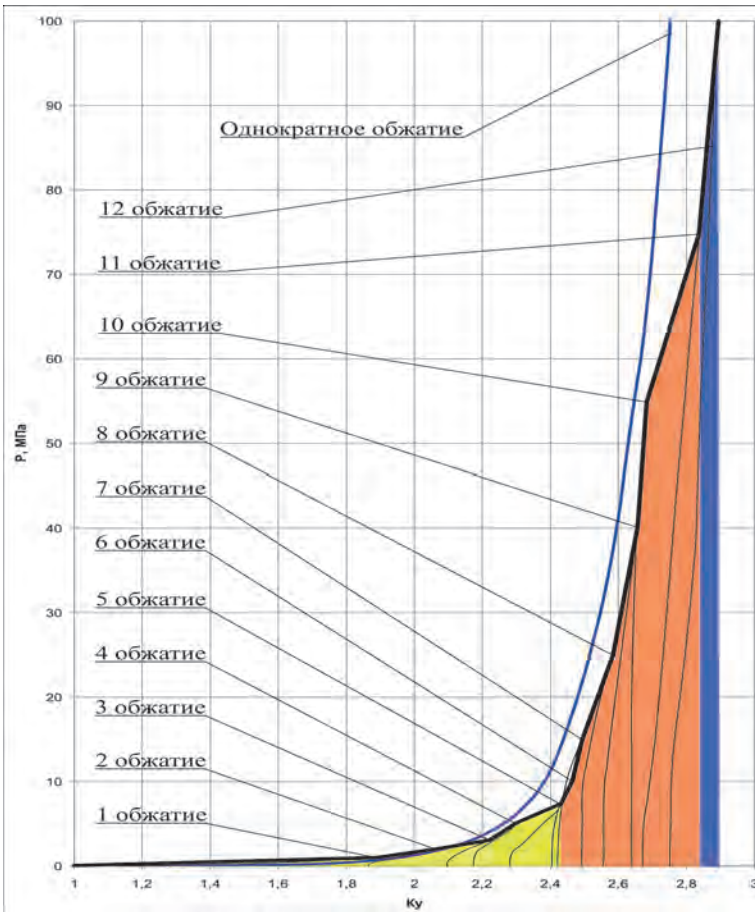


Рис.4. Графическая зависимость коэффициентов уплотнения от давления прессования при различных способах нагружения для угольного шлама влажностью 12%

- стадия перемещений частиц относительно друг друга (проскальзывание, сдвиги, повороты) без изменения их внутренней структуры;
- стадия упруго-пластических деформаций;
- стадия упругих деформаций.

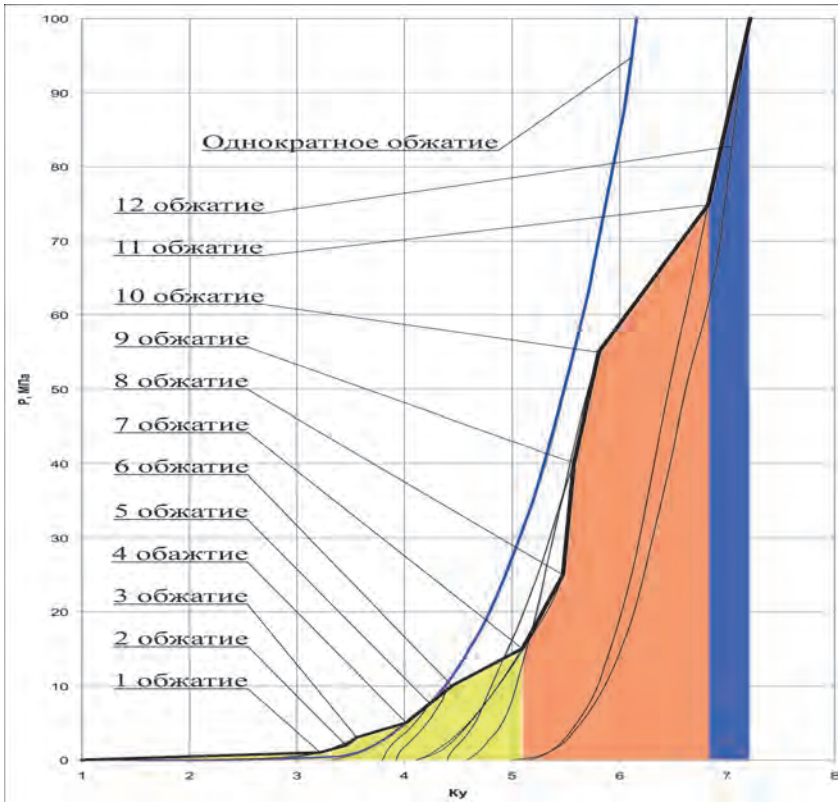


Рис.5. Графическая зависимость коэффициентов уплотнения от давления прессования при различных способах нагружения для пыли электрофильтров влажностью 16%. – стадия перемещений частиц относительно друг друга (проскальзывание, сдвиги, повороты) без изменения их внутренней структуры;

– стадия упруго–пластических деформаций;

– стадия упругих деформаций.

Закключение. В результате выполненных исследований предложен метод изучения уплотнения мелкофракционных материалов с помощью их многократного нагружения, который включает:

1. Построение и анализ, на основе экспериментальных исследований и разработанной методики, графических зависимостей коэффициента уплотнения мелкофракционных материалов от давления прессования при однократном и многократном их нагружении.

2. Установление границ стадий уплотнения, отличающихся характером деформационных процессов.

3. Определение целесообразности применения в каждом конкретном случае исследуемых материалов однократного либо многократного нагружения на основе сопоставления кривых их уплотнения.

4. Выбор количества нагружений и величины нагрузки при каждом обжатии с целью достижения заданного коэффициента уплотнения, на основе чего могут быть выбраны конкретная схема очага деформации и конструктивные решения для ее реализации.

Предложенный метод исследования уплотнения может быть использован при разработке прессового оборудования для брикетирования мелкофракционных шихт, характеризующихся высокой дисперсностью и низкой насыпной плотностью.

1. *Носков В.А., Маймур Б.Н., Петренко В.И., Лебедь А.Т.* // Исследование физико–механических свойств мелкофракционных промышленных отходов, определяющих их поведение при брикетировании / *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1998. – С.104 – 107.
2. *Носков В.А., Ващенко С.В.* Об использовании принципа многоступенчатого уплотнения при брикетировании мелкофракционных шихт // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Сб.научн.трудов ИЧМ НАН Украины. – Вып. 13.– 2006. – С.281-285.
3. *Бальшин М.Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М.: Металлургия, 1972. – С.336.
4. *Слюсарев А.С.* Разработка основ расчета и конструирования рабочих органов подъемно–транспортных машин, подвергающих сыпучий материал сжатию: Дис.д–ра техн. наук. – Нижний Новгород. 1991. – С.392.

*Статья рекомендована к печати
академиком НАН Украины В.И.Большаковым*

С.В.Ващенко, В.І.Петренко, Б.Н.Маймур, І.Г.Муравйова

Розробка методу дослідження ущільнення дрібнофракційних матеріалів при багаторазовому напруженні.

Розроблено методику експериментальних досліджень ущільнення дрібнофракційних матеріалів, що характеризуються високою мірою дисперсності і низькою насипною щільністю, для яких потрібно попереднє обтискання перед остаточним ущільненням у валках пресу. Для вибраних матеріалів такого типу вивчено фізико-механічні властивості і особливості ущільнення при одноразовому і багаторазовому навантаженні. На основі проведених досліджень розроблено метод побудови графічних залежностей параметрів ущільнення від тиску матеріалів. Встановлено межі стадій ущільнення, що відрізняються характером деформационних процесів, кількістю обтискань і величину навантаження, необхідних для досягнення заданого коефіцієнта ущільнення досліджуваного матеріалу.