

УДК 621.777.06:621.762.4.001.5

**Б.Н.Маймур, И.Г.Муравьева, В.И.Петренко, С.В.Вашенко****ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ УПЛОТНЕНИЕ В ВАЛКОВЫХ БРИКЕТНЫХ ПРЕССАХ***Институт черной металлургии НАН Украины*

На основе результатов экспериментальных исследований по прессованию мелкофракционных шихт с широким диапазоном физико-механических характеристик разработаны аналитические методы прогнозирования и оценки уплотняемости шихт и их сопротивления сжатию. Разработана методика исследования, изучены особенности уплотнения материалов. Показано, что для достижения необходимой плотности брикетов требуется многократное обжатие мелкофракционных шихт. Описан комплексный системный подход к выбору параметров брикетирования с учетом свойств шихтовых материалов.

**Ключевые слова:** мелкофракционные материалы, физико-механические свойства, уплотнение, валковый брикетный пресс

**Состояние вопроса и постановка задачи.** Брикетирование в валковых прессах в последние годы получает все большее распространение при окусковании широкого круга мелкофракционных материалов. Для отходов горнометаллургического комплекса оно все чаще становится альтернативой традиционному методу окускования (окомкованию и агломерации), а иногда является единственно возможным.

При решении технологических задач необходимо учитывать многообразие свойств брикетируемых материалов, их сложные взаимосвязи, влияние на процесс уплотнения каждого из свойств отдельно и в совокупности. При выборе технологических режимов брикетирования параметры и схема уплотнения для каждого конкретного материала, как правило, определяются экспериментальным путем, используя специальное лабораторное оборудование.

В работах ведущих специалистов по порошковой металлургии Бальшина М.Ю., Гогаева К.А., Ждановича Г.М., Каташинского В.П., Ковальченко М.С., Скорохода В.В. и др. рассмотрены самые различные аспекты процессов, происходящих при прессовании мелкофракционных материалов, изучено влияние их свойств на процесс уплотнения. Однако, ряд моментов связи характера уплотнения материалов с их свойствами требует дальнейшего изучения, установления зависимостей, применимых при разработке конкретных технологий брикетирования.

В данной работе приведены результаты исследований, позволяющие на базе представительных экспериментальных данных, полученных при прессовании широкого круга шихт, установить аналитические взаимосвязи характеристик уплотнения материалов с их свойствами. Установление таких взаимосвязей открывает возможность без проведения

специальных экспериментальных исследований прогнозировать характеристики уплотнения подлежащего брикетированию материала, предварительно выбрать рациональную схему уплотнения и оценить энергосиловые и кинематические характеристики необходимого прессового оборудования.

#### **Разработка аналитического метода определения уплотняемости мелкофракционных шихт.**

При разработке технологических режимов брикетирования первоначальным является определение свойств прессуемого материала, изучение его уплотняемости (способности изменять начальную плотность под действием прилагаемого давления) и определение сопротивления шихты сжатию, выраженного в виде функциональной зависимости между давлением прессования и уплотнением прессовок  $P = f(K_y)$  ( $K_y$  - коэффициент уплотнения) [1, 2]. Эта зависимость в интегральном виде отражает влияние совокупности свойств на величину и характер уплотнения прессуемых материалов и используется при определении силовых характеристик процесса, разработке технических решений и выборе конструктивных параметров оборудования для брикетирования.

На процесс уплотнения сыпучего материала при наложении давления в большей или меньшей мере влияет ряд характеристик, относящихся к свойствам как мелкофракционного материала в целом, так и к свойствам составляющих его частиц. Проведенный анализ дает основание считать, что в "иерархии" влияния различных характеристик шихт на их уплотняемость ведущая роль принадлежит насыпной плотности. Именно через нее проявляется влияние других характеристик сыпучего материала на его уплотнение [3].

Для проверки этого утверждения проведен комплекс экспериментальных исследований. Были выбраны 40 самых различных по происхождению, размеру и форме частиц, пикнометрической и насыпной плотности мелкофракционных материалов. Для сформированных на их основе 100 шихт, различающихся по химическому составу основного компонента, гранулометрическому составу, влажности, виду и количеству связующего, была определена насыпная плотность ( $\rho_0$ ) [3].

Для всех шихт по принятой в ИЧМ методике [1, 2] получены диаграммы прессования при давлении до 100 МПа, построены графические зависимости  $P = f(K_y)$  и определены коэффициенты уплотнения при 100 МПа. Коэффициент уплотнения при 100 МПа был выбран как показатель уплотняемости исходя из того, что при этом давлении для большинства прессуемых шихт рост усадки прессовки практически прекращается, следовательно, дальнейшее увеличение давления является нецелесообразным. При этом формируются достаточно прочные брикеты, сохраняющие форму при выпрессовке.

На основе результатов экспериментальных исследований построены графические отображения взаимосвязи коэффициента уплотнения при давлении 100 МПа ( $K_{y100}$ ) с насыпной плотностью для всех исследованных шихт [3].

Детальный анализ графического поля значений показал наличие четырех областей, характеризующихся тесной связью  $K_{y100}$  с  $\rho_o$  (рис.1), что позволило выделить четыре группы шихт, для которых зависимости  $K_{y100} = f(\rho_o)$  отличаются как по характеру изменения, так и по величине достигаемого показателя уплотняемости. Уравнения, которыми аппроксимированы зависимости  $K_{y100} = f(\rho_o)$  для каждой группы, приведены на рис.1. Высокие коэффициенты корреляции ( $R^2$ ) свидетельствуют о почти функциональной связи между коэффициентами уплотнения исследованных шихт и их насыпной плотностью.

Естественно предположить, что принадлежность того или иного материала к конкретной группе определяется его свойствами. В результате анализа механических, химических, технологических и физических свойств исследуемых шихт, которыми может определяться принадлежность материалов к конкретным группам, было установлено, что распределение шихт по группам определяется их пикнометрической, а для многокомпонентных шихт средневзвешенной арифметической пикнометрической плотностью, рассчитанной с учетом долевой части находящихся в шихте отдельных элементов и соединений ( $\rho_{пикн}$ ).

По-видимому, это можно объяснить тем, что плотность материала с ростом давления возрастает от насыпной плотности до плотности, близкой к плотности компактного тела, т.е. к пикнометрической плотности вещества частиц. При давлении 100 МПа "степень компактности" прессовок из исследованных материалов достаточно высока, пористость их незначительна, роль пикнометрической плотности материала частиц в плотности прессовки становится определяющей.

Для выделенных четырех групп материалов определены диапазоны изменения  $\rho_{пикн}$ : первая –  $\geq 4,6$  г/см<sup>3</sup>; вторая –  $4,6 \div 3,7$  г/см<sup>3</sup>; третья –  $3,7 \div 2,2$  г/см<sup>3</sup>; четвертая –  $< 2,2$  г/см<sup>3</sup>.

На основании вышеизложенных результатов нами принят следующий метод определения показателя уплотняемости шихтовых материалов с учетом их свойств [3]. Для шихты, подлежащей брикетированию, определяются насыпная и пикнометрическая плотности (последняя определяется экспериментально или рассчитывается по известным значениям  $\rho_{пикн}$ , входящих в состав шихты компонентов). По значению  $\rho_{пикн}$  определяется принадлежность материала к одной из выделенных групп. В соответствии с уравнением, описывающим зависимость  $K_{y100}$  от насыпной плотности для этой группы, рассчитывается величина коэффициента уплотняемости.

Таким образом, разработанный метод позволяет, определив насыпную и пикнометрическую плотности, аналитическим путем прогнозировать показатель уплотняемости, выраженный в виде коэффициента уплотнения при 100 МПа, для широкого круга материалов. Это дает возможность предварительно оценить возможность использования определенной схемы уплотнения для получения плотных и прочных прессовок.

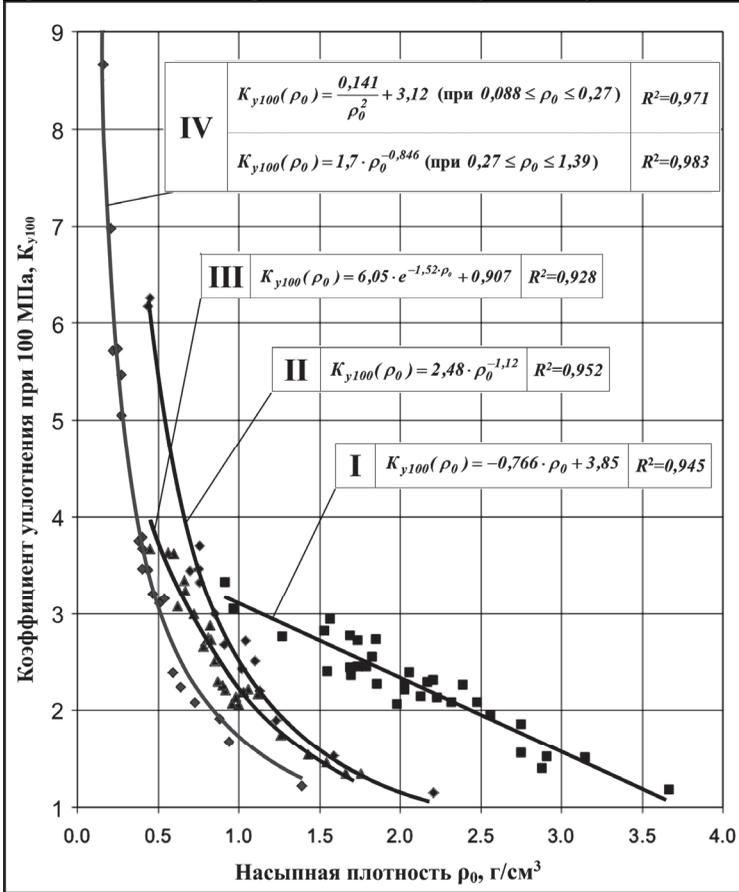


Рис.1. Взаимосвязь  $K_{y100}$  с  $\rho_0$  для выделенных групп материалов

### Разработка аналитического метода определения сопротивления шихт сжатию

Взаимосвязь между давлением прессования и коэффициентом уплотнения ( $P = f(K_y)$ ) разные авторы описывают уравнениями логарифмического либо степенного вида. Как правило, эти уравнения

справедливы для конкретных материалов и в определенном диапазоне прилагаемых давлений.

Исследования, проводившиеся в Институте черной металлургии НАН Украины, показали, что связь давления прессования с уплотнением в диапазоне используемых в технологических процессах нагрузок для широкого круга металлургических шихт удовлетворительно описывается степенным уравнением:

$$P = a \cdot K_y^b \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от свойств шихты. В настоящее время аналитических методов определения этих коэффициентов нет.

Анализ зависимостей  $P = f(K_y)$  для исследованных в работе шихт позволил получить представительный массив данных о коэффициентах  $a$  и  $b$ , характеризующих сопротивление сжатию материалов с широким диапазоном свойств. Затем, для каждой из выделенных 4-х групп материалов были построены графические отображения зависимости коэффициента  $b$  от насыпной плотности, в результате аппроксимации которых получены аналитические зависимости  $b = f(\rho_0)$  [4]:

- первая группа шихтовых материалов

$$b(\rho_0) = 3,79 \cdot \rho_0 + 5,38 \quad (2)$$

- вторая группа шихтовых материалов

$$b(\rho_0) = 4,23 \cdot \rho_0 + 5,8 \quad (3)$$

- третья группа шихтовых материалов

$$b(\rho_0) = 5,71 \cdot 10^{0,266 \cdot \rho_0} \quad (4)$$

- четвертая группа шихтовых материалов

$$b(\rho_0) = 2,53 \cdot 10^{0,776 \cdot \rho_0} \quad (5)$$

Используя установленные функциональные зависимости  $K_{y100} = f(\rho_0)$  и  $b = f(\rho_0)$ , для исследуемого шихтового материала, коэффициент  $a$  можно определить из выражения

$$a = \frac{100}{K_{y100}^b} \quad (6)$$

Зная коэффициенты  $a$  и  $b$ , получаем аналитическое выражение функциональной зависимости  $P(K_y) = a \cdot K_y^b$ .

Таким образом, аналитический метод определения сопротивления сжатию шихтового материала включает [4]:

- определение насыпной и пикнометрической плотности материала;
- определение принадлежности материала к одной из четырех групп в соответствии со значением его пикнометрической плотности;

– определение коэффициента уплотнения материала при 100 МПа на основе установленной для данной группы функциональной зависимости  $K_{y100} = f(\rho_o)$ ;

– определение коэффициента  $b$  на основе установленной для данной группы функциональной зависимости  $b = f(\rho_o)$ ;

– определение коэффициента  $a$  из аналитического выражения

$$a = \frac{100}{K_{y100}^b};$$

– построение, используя полученные значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , функциональной зависимости  $P(K_y) = a \cdot K_y^b$ .

Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей  $P = f(K_y)$  для ряда шихт, существенно различающихся по значению насыпной и пикнометрической плотности, показало удовлетворительное совпадение результатов. Для примера на рис.2 приведены экспериментальные и расчетные зависимости  $P = f(K_y)$  для силикомарганца, шлама Макеевского металлургического завода, графита и лигнина, относящихся, соответственно, к 1-й, 2-й, 3-й и 4-й выделенным группам.

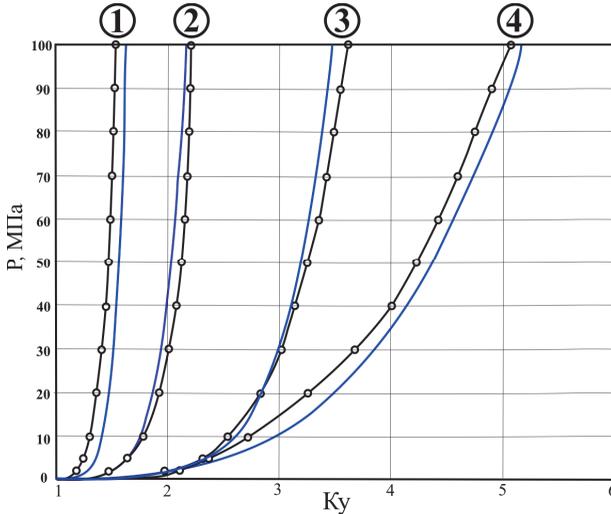


Рис.2. Экспериментальные (—) и расчетные (о—о—о) зависимости  $P = f(K_y)$  шихт:

1. SiMn (0–2 мм;  $d_{cp}$  – 1,0 мм;  $\rho_o$  – 2,91 г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{пикн}$  – 6,48 г/см<sup>3</sup>;  $W$  – 0%).
2. Шлам Макеевского металлургического завода с 10 % цемента (0–1 мм;  $d_{cp}$  – 0,5 мм;  $\rho_o$  – 1,13 г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{пикн}$  – 4,35 г/см<sup>3</sup>;  $W$  – 8 %).
3. Графит (0–0,5 мм;  $d_{cp}$  – 0,25 мм;  $\rho_o$  – 0,5 г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{пикн}$  – 2,23 г/см<sup>3</sup>;  $W$  – 0%).
4. Лигнин (0–2 мм;  $d_{cp}$  – 1,0 мм;  $\rho_o$  – 0,27 г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{пикн}$  – 1,30 г/см<sup>3</sup>;  $W$  – 0%).

Как показал анализ представленных на рис.2 зависимостей, экспериментальные и расчетные значения отличается не более чем на 10 %, что приемлемо для использования разработанного метода при практических расчетах энергосиловых параметров прессового оборудования.

### **Экспериментальные исследования уплотнения шихт при многократном нагружении**

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 ним относятся пыли газоочисток различных производств, торф, 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 – 3,5 и выше – в валковых прессах обусловлена негативным влиянием вытесняемого воздуха, плохой сыпучестью материала, геометрическими параметрами очага деформации.

В определенной степени эффективно данную задачу можно решить, используя пресса валкового типа, конструкция которых позволяет реализовать принцип многократного обжатия. К ним относятся пресса с принудительной подачей материала в валки с помощью подпрессовщиков различного типа, а также пресса, представляющие собой многовалковые системы различных конструкций. Помимо получения качественных брикетов, принцип многократного обжатия позволяет значительно повысить производительность, как за счет увеличения плотности полученных брикетов, так и за счет возможности увеличения скорости прессования [5].

Одной из задач данной работы является изучение особенностей механизма уплотнения мелкофракционных материалов при многократном нагружении и установление взаимосвязей степени уплотнения с их физико-механическими характеристиками.

Основной целью проведения исследований при многократном нагружении материалов было, как и ранее, получение зависимости коэффициента уплотнения от давления прессования. Но в данном случае зависимости  $P = f(K_y)$  получали не только при однократном нагружении до достижения выбранного конечного значения давления (100 МПа), но и при многократном нагружении образцов до промежуточных значений давления прессования. Выбрано количество нагружений, их дискретность (количество нагружений на различных стадиях уплотнения) и величина нагрузки при каждом из них, что позволяет учесть особенность поведения материала в процессе

уплотнения. На начальной стадии уплотнения, характеризующейся большой усадкой прессовки при незначительном росте давления, количество нагружений выбирали с бóльшей дискретностью. На базе материалов с высокой дисперсностью и низкой насыпной плотностью – пыли электрофильтров Побужского ферроникелевого комбината, лигнина, коксовой мелочи, угольного шлама – были сформированы шихты, отличающиеся по влажности, виду и количеству связующего [6].

Согласно выбранной схеме нагружений выполняли последовательно нагрузку и разгрузку образцов исследуемых материалов и шихт и записывали диаграммы прессования, а затем строили для каждого случая графические зависимости  $P = f(K_y)$ . В качестве примера на рис.3 для одной из шихт – влажного угольного шлама – представлены такие зависимости для каждого нагружения. Конечная точка каждой кривой соответствует уплотнению, достигнутому при заданной нагрузке. В результате соединения этих точек (рис.4) получена кусочно-линейная зависимость в координатах  $P - K_y$ , показывающая изменение сопротивления материала сжатию при последовательной нагрузке и разгрузке материала при каждом обжатии. На рис.4 представлены графики, иллюстрирующие зависимость  $P = f(K_y)$  для угольного шлама при их однократном нагружении, а также кусочно-линейная зависимость – при многократном приложении нагрузки.

Сравнение количественных показателей уплотнения при однократном и многократном нагружении (табл.1) 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 шлам ( $0,71 \text{ г/см}^3$ ) и крупностью частиц больше  $0,5 \text{ мм}$  – коксовая мелочь ( $d_{cp} = 1,42 \text{ мм}$ ) рост коэффициента уплотнения при многократном нагружении незначителен. Как показывает анализ, при введении связующих добавок для формирования шихт наблюдается рост коэффициентов уплотнения как при однократном, так и при многократном нагружении (табл.1). Таким образом, моделируя состав шихт путем изменения вида связующего и его количества, можно добиться наиболее благоприятных условий уплотнения и выбрать рациональную схему нагружения.

Кроме получения количественных характеристик уплотнения исследуемых материалов, представленные на рис.4 кусочно-линейные зависимости, по нашему мнению, отражают характер деформационных процессов на отдельных этапах нагружения и позволяют выделить стадии

уплотнения, в которых преобладающим является определенный вид деформации.

Таблица 1. Показатели уплотнения шихт при различных способах нагружения до 100 МПа

| Шихты   | Размер частиц, $d_{cp}$ , мм | $\rho_0$ , г/см <sup>3</sup> | Коэффициент уплотнения при однократном нагружении до 100 МПа | Коэффициент уплотнения при многократном нагружении до 100 МПа |
|---|------------------------------|------------------------------|--|---|
| Пыль электрофильтров (W = 16 %)                                     | 0,05                         | 0,90                         | 6,16   | 7,2   |
| Лигнин (W = 0 %)  | 1,30                         | 0,24                         | 6,80   | 8,48  |
| Лигнин (W = 18 %)   | 1,30                         | 0,21                         | 6,98   | 8,56  |
| Лигнин (W = 25 %)   | 1,30                         | 0,22                         | 7,89   | 9,59  |
| Лигнин (W = 30 %)   | 1,30                         | 0,22                         | 8,98   | 9,98  |
| Угольный шлак (W = 12 %)  | 1,26                         | 0,71                         | 2,75   | 2,89  |
| Коксовая мелочь (W = 10 %)  | 1,42                         | 0,45                         | 3,45   | 3,51  |
| [95,6 % Коксовая мелочь + 4% ОС + 0,4% NaOH] + 10% H <sub>2</sub> O | 1,42                         | 0,44                         | 3,46   | 3,53  |
| [93,4 % Коксовая мелочь + 6% ОС + 0,6% NaOH] + 10% H <sub>2</sub> O | 1.42                         | 0,41                         | 3,79   | 4,11  |

Известно, что процесс уплотнения мелкодисперсных материалов разделяется на несколько стадий, отличающихся характером деформационных процессов. Существование характерных участков на кривой уплотнения отмечается М.Ю.Бальшиным и другими авторами, однако четкие критерии выделения участков, соответствующих конкретным стадиям с различным механизмом деформации, не приводятся. При этом выделяется начальная зона, 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 коэффициентов уплотнения при сравнительно низких давлениях прессования. Затем следует стадия упругопластических 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 сформированное плотное тело, в котором преобладают только упругие деформации при возрастающем давлении.

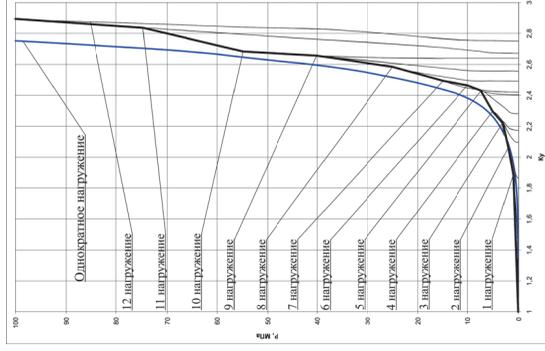


Рис. 1. Зависимости коэффициентов уплотнения от давления прессования при различных способах нагружения угольного шлама с влажностью 12%

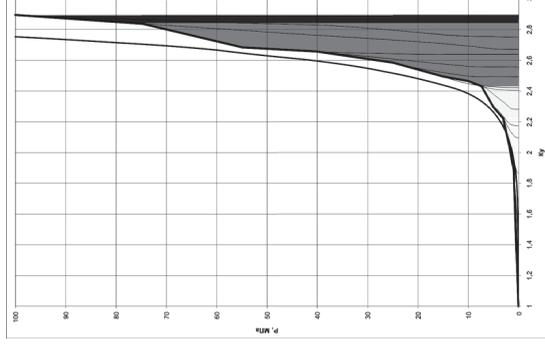


Рис. 2. Графическая зависимость коэффициентов уплотнения от давления прессования при различных способах нагружения угольного шлама с влажностью 12 %

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

В реальных условиях происходит наложение указанных стадий. Это хорошо иллюстрирует рис.4. На рисунке видно, что при однократном нагружении зависимость ( $P = f(K_y)$ ) имеет монотонный характер, изменение давления прессования происходит плавно, что не позволяет выделить стадии с преобладанием определенного вида деформации. При многократном же нагружении такие стадии можно выделить и оценить их протяженность (по достигаемой степени уплотнения).

Как показано в работе [6] на конкретном примере, графические зависимости, представленные на рис.4, могут быть использованы при выборе рациональной схемы нагружения при прессовании материалов, характеризующихся высокой дисперсностью и низкой насыпной плотностью.

Таким образом, в результате выполненных исследований предложен метод изучения уплотнения мелкофракционных материалов при многократном нагружении, который включает:

- 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;

- выделение стадий уплотнения, отличающихся характером деформационных процессов;

- определение целесообразности применения в каждом конкретном случае исследуемых материалов однократного либо многократного нагружения на основе сопоставления зависимостей ( $P = f(K_y)$ ).

Предложенный метод может быть использован при разработке прессового оборудования для брикетирования шихт, требующих многократного обжатия.

### **Комплексный системный подход к определению параметров брикетирования мелкофракционных шихтовых материалов с учетом их свойств**

Проведенными в данной работе исследованиями в очередной раз подтверждается определяющее влияние физико-механических характеристик, и, в первую очередь, интегрального их показателя – насыпной плотности – на процесс уплотнения мелкофракционных материалов при приложении давления. Это влияние проявляется при прессовании материалов в прессующих устройствах всех видов и конструкций. Но особенно важно и сложно учитывать свойства шихт при брикетировании в валковых прессах, когда сжатие материала осуществляется в межвалковом пространстве в постепенно замыкающемся объеме прессующих калибров. Здесь начинают играть существенную роль сыпучесть материала, коэффициенты внутреннего и внешнего трения (определяющие захват шихт валками) и др. Коэффициент уплотнения определяется также геометрией очага деформации – диаметром валков ( $D_o$ ), размерами формирующего элемента

( $h_{\delta p}$ ) и углом прессования ( $\alpha_{np}$ ), который, в свою очередь непосредственно зависит от коэффициентов трения. Схема формирования очага деформации при гравитационной подаче шихты в валки приведена на рис.5.

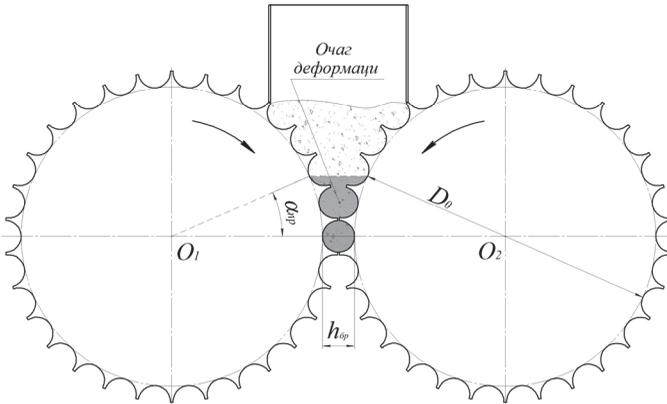


Рис.5. Схема формирования очага деформации при брикетировании мелкофракционных шихт в валковом прессе с гравитационной подачей материала

Согласно схеме (рис.5), коэффициент уплотнения определяется из выражения

$$K_y = \frac{D_o(1 - \cos \alpha_{np}) + h_{\delta p}}{h_{\delta p}} \quad (7)$$

Выше было обоснованно использование показателя уплотняемости исследованных шихт ( $K_{y100}$ ), показана его взаимосвязь со свойствами прессуемых материалов. Рассматривая процесс уплотнения во взаимосвязи с характеристиками очага деформации, можем записать условие, при котором в валковом прессе при гравитационной подаче материала могут быть получены брикеты с удовлетворительными плотностью и прочностью:

$$K_{y100} \leq \frac{D_o(1 - \cos \alpha_{np}) + h_{\delta p}}{h_{\delta p}} \quad (8)$$

На основе полученных в работе результатов сформирован комплексный системный подход (КСП) к определению параметров брикетирования мелкофракционных материалов с учетом их свойств, структурная схема которого представлена на рис.6. КСП предусматривает последовательное проведение операций, реализующих разработанные аналитические и экспериментальные методы определения характеристик уплотнения прессуемого материала и, в конечном счете, позволяющих выбрать схему уплотнения и энергосиловые параметры прессового оборудования.

Как следует из структурной схемы, отправной точкой в КСП является исследуемый шихтовый материал с присущими ему свойствами.

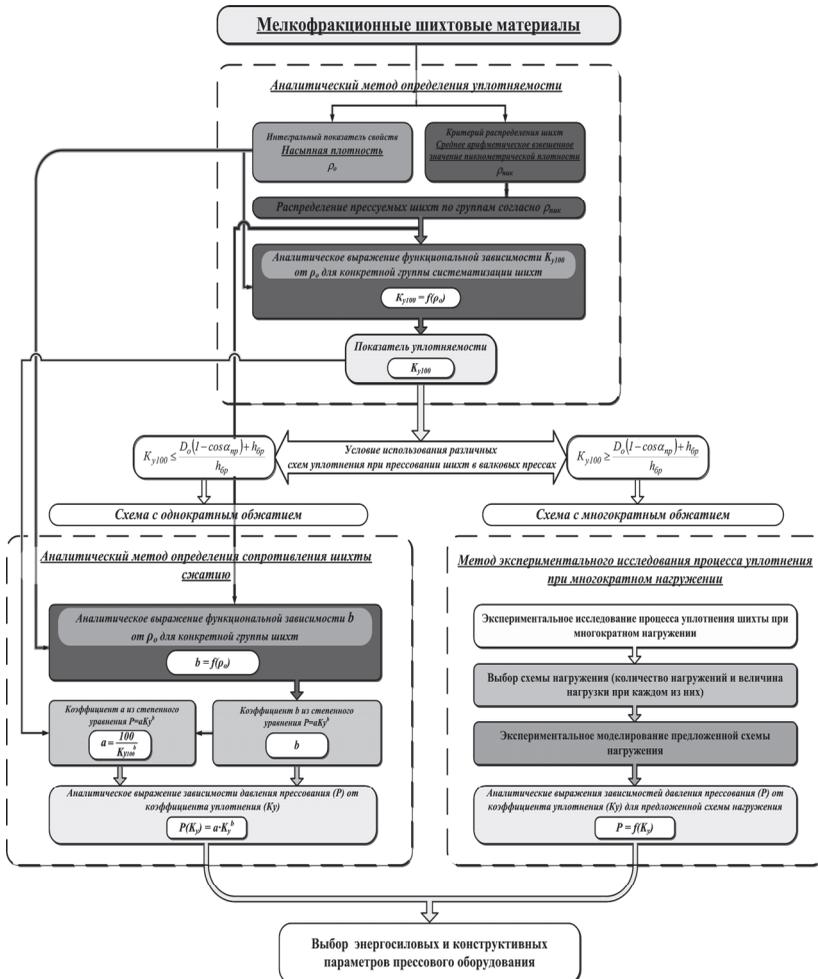


Рис.6. Структурная схема комплексного системного подхода к определению параметров брикетирования мелкофракционных шихтовых материалов с учетом их свойств

Первым шагом КСП является определение уплотняемости материала с использованием изложенного выше аналитического метода. Для этого определяются интегральный показатель свойств (насыпная плотность  $\rho_0$ ) и критерий систематизации шихт (пикнометрическая плотность, или, для шихт сложного состава, среднее арифметическое значение пикнометрической плотности). По значению  $\rho_{пикн}$  устанавливается

принадлежность шихты к одной из четырех выделенных групп, а затем выбирается выражение взаимосвязи  $K_{y100}$  и  $\rho_0$  (рис.1).

Следующий шаг предусматривает выбор схемы уплотнения. С помощью сформулированного условия (8) оценивается возможность достижения в прессе с заданными  $D_0$  и  $h_{бр}$  требуемого показателя уплотняемости. Необходимые при расчете значения  $a_{np}$  исследуемых шихт определяем по известным методикам [7, 8].

В случае выбора схемы с однократным обжатием используется аналитический метод определения шихты сжатую, описанный выше. При выборе схемы с многократным обжатием используется описанный метод экспериментального исследования процесса уплотнения при многократном нагружении.

Предложенный комплексный системный подход, позволяет, по нашему мнению, обеспечить учет влияния свойств подлежащих брикетированию материалов на их уплотнение и расширяет возможности применения аналитических методов при выборе энергосиловых параметров процесса брикетирования широкого круга мелкофракционных шихт. Такой подход дает возможность предварительной оценки и прогнозирования технических характеристик валковых прессов, необходимых для получения из конкретного шихтового материала брикетов с требуемыми свойствами.

**Закключение.** Выполнены экспериментальные исследования процесса уплотнения широкого круга мелкофракционных шихт, значительно отличающихся по физико-механическим характеристикам. В качестве показателя уплотняемости принят коэффициент уплотнения при давлении прессования 100 МПа ( $K_{y100}$ ), а в качестве интегрального показателя свойств – насыпная плотность ( $\rho_0$ ).

Показано, что исследованные шихты можно разделить на 4 группы, характеризующиеся тесной связью  $K_{y100}$  и  $\rho_0$ . Для каждой из этих групп получены аппроксимированные зависимости, характеризующие взаимосвязь  $K_{y100}$  и  $\rho_0$ . Установлено, что распределение шихт по группам определяется их пикнометрической плотностью.

Разработаны аналитические методы оценки уплотняемости шихт и их сопротивления сжатию, дающие удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

Разработан метод исследования уплотнения шихт при многократном нагружении, позволяющий выделить области преимущественного развития видов деформации.

Сформулировано условие выбора схемы уплотнения при брикетировании в валковом прессе.

Создан комплексный системный подход к определению параметров прессования шихтовых материалов в валковых прессах, учитывающий свойства шихтовых материалов.

1. *Носков В.А.* Исследование физико-механических свойств мелкофракционных промышленных отходов, определяющих их поведение при брикетировании / В.А. Носков, Б.Н. Маймур, В.И. Петренко, А.Т. Лебедь // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1998. – №4. – С.104 – 107.
2. *Носков В.А.* Научно-методические основы определения характеристик и режимов процесса брикетирования мелкофракционных материалов / В.А.Носков, Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, А.Т.Лебедь, К.В.Баюл // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. Трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 5 – К.: Наукова думка. – 2002. – С.344 – 347.*
3. *Ващенко С.В.* Разработка методического подхода к определению уплотняемости прессуемых шихт с учетом их свойств / С.В.Ващенко, Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, И.Г.Муравьева // *Сучасні проблеми металургії. – 2011. – №14. – С.85 – 92.*
4. *Ващенко С.В.* Разработка аналитического метода прогнозирования и оценки сопротивления шихт сжатию с учетом их свойств. / С.В.Ващенко, Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, И.Г.Муравьева // *Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 4 (81). – Днепропетровск, 2012. – С.3 – 10.*
5. *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.*
6. *Ващенко С.В.* Разработка метода исследования уплотнения мелкофракционных материалов при многократном нагружении / С.В.Ващенко, В.И.Петренко, Б.Н.Маймур, И.Г.Муравьева // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. – Вып. 23. – 2011. – С.277 – 288.*
7. *Виноградов Г.А.* Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул / Виноградов Г. А., Каташинский В. П. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.
8. *Ложечников Е.Б.* Прокатка в порошковой металлургии / Е.Б. Ложечников. – М.: Металлургия, 1987. – 184с.

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

*Б.М.Маймур, І.Г.Муравйова, В.І.Петренко, С.В.Ващенко*

**Дослідження впливу властивостей дрібнофракційних шихтових матеріалів на їх ущільнення у валкових брикетних пресах**

На основі результатів експериментальних досліджень по пресуванню дрібнофракційних шихт з широким діапазоном фізико-механічних характеристик розроблено аналітичні методи прогнозування і оцінки ущільненості шихт та їх опору стисненню. Розроблено методику дослідження, вивчено особливості ущільнення матеріалів. Показано, що для досягнення необхідної щільності брикетів потрібне багаторазове обтиснення дрібнофракційних шихтових матеріалів. Описано комплексний системний підхід до вибору параметрів брикетування з урахуванням властивостей шихтового матеріалу.

**Ключові слова:** дрібнофракційні матеріали, фізико-механічні властивості, ущільнення, валковий брикетний прес.

*B.N.Maymur, I.G.Muravyova, V.I. Petrenko, S.V.Vashenko*

**Investigation of the influence of properties of small fraction of charge materials on their seal roller briquetting presses**

Based on the results of experimental research on compressed fine charge materials with a wide range of physical and mechanical characteristics of the developed analytical methods for prediction and assessment of compactibility charge materials and resistance to compression. The technique of investigation, the specifics of seal materials to achieve the required density briquettes requires the repeated compression. Described a comprehensive systems approach to the choice of parameters of briquetting fine charge materials according to their properties.

**Keywords:** fine charge materials, physical and mechanical properties, compaction, roller briquetting press.