

Б.Н.Маймур

**РАЗВИТИЕ В ИЧМ РАЗРАБОТОК ПО ТЕХНОЛОГИИ
И ОБОРУДОВАНИЮ ДЛЯ БРИКЕТИРОВАНИЯ МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ
СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ**

Приведены основные результаты научных исследований, технологических и конструкторских разработок, выполненных специалистами отдела технологического оборудования и систем управления ИЧМ за последние 5 лет в развитие работ по брикетированию, проводившихся в Институте ранее. Сформулированы задачи, которые должны решаться в плане дальнейшего развития данного направления.

Ключевые слова: брикетирование, научные исследования, технологические и конструкторские разработки

В тематике Института черной металлургии разработки, направленные на получение окучкованного сырья для металлургических агрегатов методом брикетирования мелкофракционных материалов, постоянно присутствуют еще с 60-годов прошлого века. Инициатором создания этого направления был академик АН УССР З.И.Некрасов. Работы возглавляемого им коллектива исследователей различных специальностей первоначально были направлены на создание нового вида сырья для доменной плавки - офлюсованных углеродсодержащих брикетов горячего прессования из частично восстановленных богатых магнетитовых концентраций [1].

В связи с обострением ситуации на рынке энергоносителей, расширением номенклатуры брикетируемых материалов, прежде всего, за счет промышленных отходов горно-металлургического комплекса, более универсальным, менее энергозатратным, а, следовательно, и приоритетным в разработках ИЧМ оказался процесс брикетирования шихт с использованием связующих добавок.

Работы сотрудников ИЧМ по созданию и внедрению технологий и оборудования для брикетирования мелкофракционных материалов, выполненные в предыдущие годы, освещены как в обзорных статьях [2, 3], так и в публикациях по результатам конкретных разработок. В данной статье предпринята попытка изложить основные результаты работ, выполненных в течение пяти последних (2009-2014 гг.) лет.

Проводившиеся в ходе выполнения фундаментальных, поисковых и хозяйственных работ исследования и разработки условно можно свести к трем направлениям:

1. Развитие теоретических основ процесса брикетирования мелкофракционных шихт, установление общих закономерностей их уплотнения.

2. Разработка технологических режимов брикетирования конкретных шихтовых материалов, разработка технологических регламентов на производство из них брикетов с заданными свойствами.

3. Совершенствование конструкции валковых брикетных прессов, улучшение их технических и эксплуатационных характеристик.

По первому направлению особое внимание уделялось установлению взаимосвязей уплотняемости и сопротивления сжатию шихт с их физико-механическими характеристиками.

Согласно разработанному в Институте научно-методическому подходу к определению основных характеристик и режимов процесса брикетирования первым этапом работы по созданию технологии брикетирования является изучение физико-механических свойств мелкофракционных шихт и характеристик их уплотнения [4]. Такие исследования практически приходится проводить при разработке технологии для каждого нового материала, так как результаты экспериментальных исследований корректны для конкретных материалов и принятых условий прессования. Не существует аналитических методов, позволяющих без проведения специальных экспериментов выбирать оптимальный состав шихты, определять параметры её прессования, выбирать рациональную схему уплотнения и оборудование для её реализации.

Решая задачу создания таких методов, специалисты ИЧМ экспериментально изучили процесс уплотнения около 100 шихт с широким диапазоном химического состава и физико-механических свойств. Для исследованных шихт выполнен анализ влияния их свойств на уплотняемость. В качестве показателя уплотняемости был выбран коэффициент уплотнения при давлении прессования 100 МПа ($K_{y, 100}$). Для определения характеристики шихтовых материалов, которая в интегральном виде отражает изменение физико-механических и технологических свойств шихт, влияющих на процесс их уплотнения, выполнены исследования взаимосвязи свойств шихт и оценка их влияния на уплотняемость. Показано, что характеристикой, отражающей влияние всех других свойств на процесс уплотнения, является насыпная плотность (ρ_0).

На основе массива экспериментальных данных построено графическое отображение зависимости $K_{y, 100}$ от ρ_0 , по результатам анализа которого выделены четыре области значений, характеризующихся тесной связью. Это дало основание сформировать четыре группы систематизации шихтовых материалов по их способности уплотняться [5].

Анализ свойств исследованных шихт, которыми может определяться принадлежность их к сформированным группам, показал, что распределение шихт по группам определяется их пикнометрической плотностью – $\rho_{\text{пикн}}$. (для сложных шихт средневзвешенным значением $\rho_{\text{пикн}}$, рассчитанным с учетом долевой части участвующих элементов и соединений). Установлены диапазоны $\rho_{\text{пикн}}$ для каждой из четырех групп систематизации. Для каждой группы было получено аналитическое описание зависимости показателя уплотняемости от насыпной плотности. Зная ρ_0 и $\rho_{\text{пикн}}$ для конкретной исследуемой шихты, определяется принадлежность её к группе

систематизации и по зависимости $K_{y100} = f(\rho_0)$ для этой группы рассчитывается показатель уплотняемости шихты.

Таким образом, разработанный метод позволяет аналитическим путем спрогнозировать показатель уплотняемости для любого материала с различными свойствами. Это дает возможность предварительно выбрать состав шихты и схему уплотнения, необходимые для получения брикетов с требуемыми показателями уплотнения [5].

Описанный выше метод определения уплотняемости позволил разработать аналитический метод определения сопротивления шихт сжатию.

Исследования, проводившиеся в разное время в Институте черной металлургии, показали, что связь давления прессования с коэффициентом уплотнения K_y в диапазоне используемых в технологических процессах нагрузок для широкого круга металлургических шихт удовлетворительно описывается уравнением степенного типа

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

где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств шихты и определяемые путем аппроксимации экспериментальных зависимостей (1) для исследуемого материала. Используя массив экспериментальных данных, полученных при аппроксимации графических зависимостей $K_{y100} = f(\rho_0)$ для выше упоминавшихся 100 шихт, была получена аналитическая зависимость коэффициента b от насыпной плотности ($b = f(\rho_0)$) для каждой из четырех групп систематизации. Зная коэффициент b и K_{y100} для каждой шихты можно определить коэффициент a_x и можно построить графическую функциональную зависимость $P_{(K_y)} = a K_y^b$ для каждой конкретной шихты, отражающую её сопротивление сжатию и используемую для расчета энергосиловых параметров прессового оборудования. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей $P = f(K_y)$, проведенные для ряда шихт из разных групп систематизации, показало удовлетворительное совпадение результатов. Расхождение экспериментальных и расчетных данных составляет не более 10 %, что приемлемо для использования разработанного метода для решения практических задач [6].

Таким образом, разработанные аналитические методы определения уплотняемости шихт и их сопротивление сжатию позволяют без проведения экспериментальных исследований для любой подлежащей брикетированию шихты оценивать возможность достижения необходимой степени уплотнения, разрабатывать технологические режимы брикетирования и осуществлять выбор энергосиловых параметров прессы зная только две легко определяемые характеристики шихты – насыпную и пикнометрическую плотности.

Учет характеристик шихты приобретает особое значение при брикетировании в валковых прессах материалов с высокой дисперсностью и низкой насыпной плотностью, для которых требуется предварительное обжатие перед окончательным уплотнением в валках. В Институте разработан экспериментально-аналитический метод определения параметров

прессования такой шихты при многократном обжати, позволяющий построить графические зависимости параметров уплотнения от давления при многократном нагружении, установить границу стадий уплотнения, отличающихся характером деформационных процессов. Метод дает возможность получать аналитические выражения, описывающие сопротивление шихты при каждом обжати, которые могут быть использованы при разработке валкового прессового оборудования, необходимого для брикетирования шихт, характеризующихся низкой насыпной плотностью и требующих подпрессовки. Сформулировано условие выбора, в зависимости от свойств шихты рациональной схемы уплотнения – с однократным или многократным обжатием.

На основе разработанной систематизации шихтовых материалов, новых аналитических методов оценки влияния свойств шихт на их уплотняемость и сопротивление сжатию, сформулированного условия выбора схемы уплотнения был разработан комплексный метод выбора технологии производства металлургических брикетов [8].

Результаты исследований теоретического плана, касающиеся влияния состава и свойств шихт на формирование брикетов с требуемыми характеристиками, использовались в конкретных технологических разработках. Специалистами Института в последние годы по заявкам предприятий разработаны технологические регламенты на производство брикетов металлургического назначения из прокатной окалины и шламов завода им. Петровского (заказчик – ООО "НПП Укрметпром"), карбида кремния (ЗАО "Стандарт"), пыли электрофильтров Побужского ферроникелевого комбината (ООО "ПФК"), брикетированных магнезиальных флюсов (ПАО Пантелеймоновский огнеупорный завод), флюоритового концентрата (ООО "ССАРТ-НЕРУДПРОМ"). Требуемые свойства сырых и упрочненных брикетов при относительно низких давлениях прессования достигались при этом направленным формированием свойств шихты, в первую очередь, за счет выбора и количества связующих добавок. В ряде случаев эффективно использовали органическое связующее по разработанному в Институте способу [9].

Непременным условием создания эффективного производства брикетов наряду с правильно выбранной технологией является наличие высокопроизводительного прессового оборудования с соответствующими брикетируемой шихте энергосиловыми параметрами, надежного и удобного в эксплуатации. В 2009-2014 гг. в Институте выполнено ряд разработок, направленных на совершенствование конструкции и улучшение эксплуатационных характеристик пресса конструкции ИЧМ [10], изготавливаемого Экспериментально-производственным предприятием Института в соответствии с зарегистрированными в 2010 г. Техническими условиями ТУ У 29.4-00190578-001:2010. Расширение номенклатуры брикетируемых шихт, ряд из которых характеризуется повышенным сопротивлением сжа-

тию, потребовало увеличения общего усилия прессования, а, следовательно, усиления элементов конструкции, реконструкции линии привода [11].

При всей важности обеспечения требований к прессу по энергосиловым и эксплуатационным характеристикам производительность пресса является одним из важнейших факторов, определяющих его выбор для использования в создаваемой технологической линии.

Были рассмотрены и проанализированы, с учетом свойств брикетируемых материалов, возможности повышения производительности прессов за счет следующих основных направлений: увеличения частоты вращения валков; изменения плотности и объема брикетов за счет выбора конфигурации и размеров формирующих элементов; увеличения массы брикетов, получаемых за один оборот валков, за счет увеличения их диаметра и ширины бандажей; изменения схемы очага деформации. Показано, что для материалов с широким диапазоном физико-механических свойств не существует универсального метода уплотнения, обеспечивающего высокую эффективность процесса брикетирования, простоту эксплуатации и компактность оборудования. Сформулирован системный подход и разработана и представлена в виде структурной схемы методология выбора рациональных путей повышения производительности валкового пресса [12, 13]. Схема позволяет для каждого конкретного материала, с учетом его физико-механических свойств, выбрать основные конструктивные решения и технические характеристики пресса, обеспечивающие необходимую конечную плотность брикетов и производительность.

На базе схемы составлен алгоритм выбора конструктивных параметров валкового пресса с требуемой производительностью, реализация которого в виде программного продукта позволит в дальнейшем при конструировании пресса для конкретного вида шихты учесть все возможности повышения производительности агрегата с соблюдением требований к качеству брикетов [12].

С применением разработанной методологии в ИЧМ разработана конструкция и техническая документация на изготовление высокопроизводительного пресса (по брикетам из отсевов ферросплавов – до 60 т/час), предназначенного для металлургических шихт, которые можно спрессовать без применения подпрессовщиков [14].

В ИЧМ ранее проведены серьезные исследования по изучению влияния формы и размера формирующих элементов валковых прессов на параметры уплотнения шихт и энергосиловые параметры процесса брикетирования [15–17]. В анализируемом периоде эти работы были развиты с акцентом на исследование особенностей процесса формирования брикетов в изношенных бандажах и влияния износа на технологические и энергосиловые параметры брикетирования, оценку допустимой степени износа формирующих калибров.

Разработана концепция исследования влияния степени износа бандажей на параметры брикетирования, заключающаяся в установлении взаи-

мосвязей между нагрузками, действующими на рабочие поверхности бандажей, характером и величиной их износа, энергосиловыми и технологическими параметрами брикетирования. Разработанная для её реализации исследовательская система объединяет комплекс экспериментальных и аналитических методов, математических моделей и позволяет определить рациональные пути увеличения ресурса эксплуатации бандажей с учетом их износа [18]. Выполнен анализ сил, действующих в очаге деформации. Разработаны расчетные схемы для определения контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей, которые используются при разработке методов прогнозирования их износа [19].

Разработана математическая модель, которая позволяет определить величину линейного износа и построить совокупность профилей бандажей валковых прессов на разных стадиях износа (топограмм) с учетом физико-механических характеристик шихтовых материалов, свойств материала бандажа и конфигурации формирующих элементов. На базе этой математической модели предложен новый метод расчетно-аналитического исследования износа бандажей валковых прессов. Показана возможность применения этого метода для прогнозирования влияния износа на технологические и энергосиловые параметры брикетирования. Установленные с помощью представленного метода графические и аналитические зависимости между величиной износа и параметрами брикетирования используются для оценки условий эксплуатации бандажей на разных стадиях износа, определения предельно допустимой величины износа, при которой возможно получение брикетов требуемого качества без нарушений режима работы прессового оборудования [20].

Разработан новый графоаналитический метод для комплексной оценки влияния износа рабочих поверхностей бандажей валковых прессов на параметры брикетирования. Данный метод включает построение номограмм, объединяющих взаимосвязанные функциональные зависимости между величиной износа, технологическими и энергосиловыми параметрами брикетирования. На конкретных примерах показано применение номограмм для решения практических задач, связанных с установлением предельной величины износа и выбора рациональных режимов эксплуатации бандажей на разных стадиях их износа с учетом физико-механических свойств шихты и конфигурации формирующих элементов [21].

Разработана экспертная система для оптимизации условий эксплуатации бандажей валковых прессов, с помощью которой реализуется комплексный подход к решению задач по определению рациональных режимов работы бандажей на различных стадиях их износа с учетом многофакторности процессов брикетирования мелкофракционных шихт и изнашивания бандажей [22].

Следует отметить, что в последние годы при разработке технической документации на изготовление прессов сотрудниками ИЧМ эффективно

используются современные системы автоматического проектирования, что позволяет быстро проработать различные варианты выполнения узлов и деталей и выбрать лучшие решения. В частности, автоматическое проектирование успешно использовалось при разработке прессы с усилием прессования 200 т, изготовленного ЭПП ИЧМ в 2012 г. для линии брикетирования флюсов Пантелеймоновского огнеупорного завода. В прессе использовано ряд новых технических решений, которые еще в ходе разработки всесторонне обсуждались со специалистами ЭПП и оптимальные варианты выбирались с учетом технических возможностей предприятия-изготовителя.

В настоящее время в электронный вариант переведены чертежи всех моделей прессов, разработанных в ИЧМ в предыдущие годы.

Специалисты ИЧМ поддерживают тесный контакт с предприятиями, на которых эксплуатируются прессы конструкции Института. При взаимодействии с производственным персоналом были разработаны ряд технических решений, способствующих повышению удобства обслуживания агрегата.

В заключение следует сформулировать задачи, которые по нашему представлению, должны решаться в плане дальнейшего развития в ИЧМ разработок по брикетированию мелкофракционных материалов.

1. Должны быть проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на уточнение механизма упрочнения брикетов из материалов с различными свойствами, выяснение роли физических, физико-химических и химических процессов в обеспечении прочности сырых и упрочненных брикетов и возможностей управления этими процессами. Необходимо исследовать явление упругого последствия и его влияние на свойства брикетов в различных условиях их формирования, в частности при разных форме и размерах прессующих калибров. Следует уточнить ряд вопросов по влиянию скорости прессования на формирование брикетов, оценить возможности повышения частоты вращения валков прессы при брикетировании шихт с широким диапазоном физико-механических характеристик.

2. В технологических разработках особое внимание следует уделить обеспечению влагостойкости и термостойкости брикетов. Применением доступных и относительно недорогих связующих далеко не всегда удается обеспечить эти свойства. Неудовлетворительная влагостойкость усложняет хранение и перевозки брикетов, а недостаточная термостойкость ограничивает применение их в технологических пределах, прежде всего, в доменном производстве. К работе по выбору эффективных связующих добавок должны привлекаться специалисты-химики.

3. Совершенствуя пресс конструкции ИЧМ, необходимо снабдить его эффективным подпрессовщиком, что позволит расширить круг брикетируемых материалов. Пресс также должен быть оснащен современными средствами контроля усилия прессования. Необходимо разработать и реа-

лизовать технические решения, которые позволяют регулировать совмещение полуформ при применении бандажей с симметричными калибрами ("подушками", линзами).

Работа по решению некоторых из перечисленных задач уже ведется, другие предполагается решать в ходе выполнения последующих разработок.

1. *Некрасов З.И.* Железородные углеродсодержащие брикететы – новый вид окискованного сырья. / З.И.Некрасов, В.Ф.Мороз, Б.Н.Маймур, Б.А.Нижегородов // Сб. «Черная металлургия. Наука. Технология. Производство». М.: Металлургия, 1989. – С.15–19.
2. *Носков В.А., Маймур Б.Н.* Научные разработки ИЧМ в области брикетирования мелкофракционных шихтовых материалов. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. – Вып. 8. – 2004. – С.363–369.
3. *Носков В.А.* Развитие разработок ИЧМ в области создания прессового оборудования для брикетирования мелкофракционных шихтовых материалов / В.А. Носков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 12. – 2006. – С.253–266.
4. *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.*
5. *Разработка методического подхода к определению уплотняемости прессуемых шихт с учетом их свойств. / С.В.Вашенко, Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, И.Г.Муравьева // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті Національної металургійної академії України. Том XIV. – Дніпропетровськ. – 2011. – С. 85–92.*
6. *Разработка аналитического метода прогнозирования и оценки сопротивления шихт сжатию с учетом их свойств. / С.В.Вашенко, Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, И.Г.Муравьева. // Системные технологи. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Днепропетровск: 2012. – Вып. 4(81). – С.3–10.*
7. *Разработка метода исследования уплотнения мелкофракционных материалов при многократном нагружении. / / С.В.Вашенко, Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, И.Г.Муравьева // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. – 2011. – Вып. 23. – С. 277–288.*
8. *Вашенко С.В.* Развитие научных основ производства сырья для металлургической отрасли методом брикетирования. Автореферат канд. дисс. 05.16.02. – Днепропетровск, 2014. – 25 с.
9. *Патент України № 94677 Спосіб виробництва брикетів на крохмалевмісному сполучному / Б.М.Маймур, В.І.Петренко, О.В.Коробцов // ІЧМ НАН України; опубл. 25.05.2011. – Бюл. № 10.*

10. *Патент* України № 88846 Валковий прес для брикетування дрібно фракційних матеріалів / В.О.Носков, Б.М.Маймур, В.І.Петренко // ІЧМ НАН України; опубл. 25.11.2009. – Бюл. № 22.
11. *Совершенствование* конструкции и улучшение эксплуатационных характеристик валковых брикетных прессов / Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, А.Т.Лебедь. // Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия". – Вып. 12. – 2011. – С. 67–71.
12. *Выбор* рациональных путей повышения производительности валкового пресса для брикетирования / В.И.Большаков, Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, И.Г.Муравьева, С.В.Вашенко, К.В.Баюл // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 6. – С. 79–82.
13. *Методология* выбора методов и средств повышения эффективности работы валковых брикетных прессов / Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, И.Г.Муравьева, С.В.Вашенко // IV-я Международная научно-техническая конференция УкрФА «Ключевые вопросы развития электрометаллургической отрасли». – Киев. – 2011. – С.12-17.
14. *Выбор* и расчет технических характеристик и конструктивных параметров валкового брикетного пресса с заданной / Б.Н.Маймур, В.И.Петренко, А.Т.Лебедь, С.В.Вашенко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 22. – 2010. – С.315–323.
15. *Носков В.А., Баюл К.В.* Оценка влияния конфигурации формующих элементов на энергосиловые параметры брикетирования в валках. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. 12. – 2007. – С. 278–285.
16. *Баюл К.В.* Разработка параметров формующих элементов валковых прессов для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов. Автореферат канд. дисс. 05.05.08. – Днепропетровск, 2008. – 20 с.
17. *Баюл К.В.* Аналитическое исследование влияния геометрических параметров формующих элементов валковых прессов на процесс брикетирования. // Порошковая металлургия. – 2012. – № 3/4. – С. 38–43.
18. *Баюл К.В., Петренко В.И., Маймур Б.Н.* Выбор концепции и методов исследования влияния износа бандажей валковых прессов на технологические и энергосиловые параметры процесса брикетирования. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. – Вып. 24. – 2011. – С. 241–246.
19. *Баюл К.В., Петренко В.И.* Анализ контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей валкового пресса. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. Вып. – 25. – 2012. – С.243–253.
20. *Баюл К.В., Петренко В.И.* Метод оценки износа бандажей валковых прессов на различных стадиях их эксплуатации. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. – 2012. – Вып. 26. – С.270–281.
21. *Баюл К.В., Петренко В.И.* Метод оценки влияния износа бандажей валковых прессов на технологические и энергосиловые параметры брикетирования. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн. трудов ИЧМ НАН Украины. – 2013. – Вып. 27. – С.266–274.

22. Баюл К.В., Петренко В.И. Разработка экспертной системы принятия оптимальных решений, обеспечивающих увеличение ресурса эксплуатации бандажей валковых прес сов. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (85). – Дніпропетровськ, 2013. – С. 3-11.

*Статья рекомендована к печати
докт. техн. наук И.Г.Муравьевой*

Б.М.Маймур

Розвиток в ІЧМ розробок з технологій та обладнання для брикетування дрібнофракційних сировинних матеріалів і промислових відходів

Приведено основні результати наукових досліджень, технологічних і конструкторських розробок, виконаних спеціалістами відділу технологічного обладнання та систем управління ІЧМ за останні 5 років в розвиток робіт з брикетування, що проводились в Інституті раніше. Сформульовано завдання, які необхідно вирішувати в плані подальшого розвитку даного напрямку.

Ключові слова: брикетування, наукові дослідження, техно-логічні та конструкторські розробки

B.N.Maymur

Development in ICHM development of technologies and equipment for briquetting small fraction of raw materials and industrial waste

The article presents the main results of scientific research, technological and development, carried out by specialists of the process equipment and control systems HMI for the last 5 years in the development of work on briquetting, held at the Institute earlier. The problems that must be addressed in terms of the further development of this area.

Keywords: briquetting, research, techno logical development and design