Ю.В.Шувалов, Ю.А.Нифонтов, Т.И.Нифонтова, А.А.Бенин

УДК. 622.693.26.002.8:622.7.8.05

УТИЛИЗАЦИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ УГОЛЬНОЙ И ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Непрерывно накапливающиеся углеродсодержащие отходы на угледобывающих и лесоперерабатывающих предприятиях в объемах, соизмеримых с объемами первичной добычи сырьевых ресурсов, оказывают отрицательное влияние на окружающую природную среду. Уже в обозримом будущем представляется реальной опасность возникновения экологической катастрофы. Накапливаемые в больших количествах углеродсодержащие отходы являются ценным энергетическим сырьем, их эффективная вторичная переработка позволит сэкономить значительные объемы первичного топливно-энергетического сырья – нефти, природного газа, угля и горючих сланцев, которые в настоящее время составляют основу топливного и сырьевого баланса России, и получить высокий уровень дохода. По оценке ряда специалистов в период до 2005 г. ежегодный дефицит потребности коммунального сектора в облагороженном топливе, который составляет около 10 млн т, может быть покрыт за счет производства брикетного топлива, путем вовлечения во вторичную переработку углеродсодержащего сырья – отходов лесопиления и переработки деловой древесины, а также ограниченно используемых в настоящее время горючих сланцев месторождений Ленинградской области. Переработка древесных отходов и горючих сланцев в брикетное топливо возможна за счет использования современных технических средств и оборудования, а также комплекса нетрадиционных технологических решений (применение прессового оборудования с уплотнением брикетной смеси путем одноосного сжатия в гидравлических прессах или сжатия "бесконечным клином" в экструдерном прессе).

Permanently accumulating carbonic waste at coal producing and timber enterprises in volumes comparable with the volumes of primary recovery has great environmental impact. Even an ecological catastrophe can be foreseen in the nearest future. Large volumes of accumulated carbonic waste represent a valuable energy source. Their effective recycling will allow economizing of large volumes of energy resources such as oil, natural gas, coal and shale oil, which form the basis of the fuel and energy balance of Russia, and bring in a large income. It has been estimated that annual refined fuel shortage of about 10 mln. t for public utilities sector for the period till 2005 can be closed with briquette fuel production, using recycled carbonic waste – sawmill and timber waste and shale oil deposits of Leningrad Oblast. Recycling of sawmill and timber waste and shale oil into briquette fuel is possible at the cost of modern technology and equipment as well as nontraditional technological solutions (briquette mixture compression using uniaxial compression in hydraulic presses or "endless wedge" compression in extrusion presses).

* * *

На рубеже второго и третьего тысячелетий общество вплотную подошло к необходимости решения проблемы обеспечения безопасности человека и окружающей природной среды от воздействия неблагоприятных факторов техногенного характера. Скопление огромного, неподдающегося точному учету количества сбрасываемых в окружающую природную среду вредных веществ, представленных в большинстве своем отходами добычи и переработки минеральной и растительной продукции, послужило начальным толчком к широкой их утилизации.

В высокоразвитых странах, таких как США, Япония, Великобритания, Германия и Франция, необходимость безотлагательных мер для решения проблемы загрязнения была продиктована осознанием реально надвигающейся опасности глобальных изменений окружающей природной среды, а также периодически возникающей в различных районах планеты череды локальных экологических катастроф (загрязнение Великих озер в США, отравление ртутью в Миномата и Ниигата в Японии, тяжелые смоги в 50-х и 60-х годах в Великобритании и т.д.) [6]. Положение усугублялось еще и тем, что огромное количество накопившихся отходов,

превратившихся в непосредственную угрозу для здоровья и жизни людей, одновременно способствовало изъятию из хозяйственного оборота обширных земельных территорий, которые в современных условиях для ряда развитых стран являются остродефицитными. Кроме этого, не последнюю роль в освоении быстрыми, порой ошеломляющими, темпами ресурсов вторичного сырья в ряде стран Западной Европы, США и Японии сыграло то обстоятельство, что объемы запасов вторичного сырья оказались равными, либо превышали запасы естественных природных ресурсов. При этом существенную роль сыграло решение правительствами этих государств комплекса геополитических задач, в том числе стремление повысить независимость от импорта природного сырья за счет мобилизации неиспользуемых внутренних резервов [6]. В отличие от развитых стран мира в России, не имеющей давних традиций использования вторичных ресурсов, развитие направлений использования вторичных ресурсов переживает фактически начальный период. Проблема утилизации отходов производства пока еще не стала приоритетным направлением социально-экономического и экологического развития страны в целом. Очевидно, что государство на сегодняшний день не в состоянии законодательными и административными мерами стимулировать поступательное развитие этого процесса. В то же время, решение этой проблемы позволило бы обеспечить страну необходимым сырьем и энергией при одновременном снижении уровня влияния отходов производства на окружающую природную среду и здоровье человека. Особый интерес при этом представляет возможность крупномасштабного использования вторичных углеродсодержащих ресурсов.

В настоящее время основу топливного и сырьевого балансов России составляют нефть, природный газ, уголь и горючие сланцы. Это обусловлено их большими запасами и наличием технических решений по добыче и переработке сырья, а также постоянным спросом на продукцию, получаемую на его основе. Объемы добычи энергоресурсов, несмотря на некоторое их снижение, сохраняются на относительно высоком уровне. Однако нефть, природный газ, уголь и горючие сланцы, фактически не возобновляемые природные ресурсы, являются одними из основных источников загрязнения окружающей среды при их добыче, переработке и сжигании. Получаемые на этих стадиях твердые, жидкие и газообразные отходы в значительной мере участвуют в формировании экологической обстановки в районах их образования.

Исключительную роль при этом играют низкосортные угли и горючие сланцы. Использование их в энергетических установках приводит к тому, что твердые отходы, получаемые на стадиях добычи, обогащения и сжигания, являются важными источниками загрязнения окружающей среды. Как известно [3], многобалластные угли и горючие сланцы занимают относительно высокий удельный вес в удовлетворении потребности страны в энергетическом топливе. В то же время их переработка и сжигание сопровождаются образованием угольной и сланцевой пыли, оксидов серы и азота, хвостов обогащения, которые являются источниками загрязнения окружающей среды [8]. В дополнение к угольным и сланцевым углеродсодержащим отходам следует отнести и отходы лесной и деревообрабатывающей отраслей промышленности. На предприятиях лесной и деревообрабатывающей промышленности ежегодно накапливаются миллионы кубометров низкосортной древесины и древесных отходов, которые не используются с пользой для общества, пропадают естественным способом или сжигаются в неприспособленном виде в топках с низким КПД.

Вещественный состав перечисленных отходов и вредных выбросов в большинстве случаев позволяет использовать их в качестве технологического сырья или энергетического топлива и одновременно решать экологические задачи.

Полное устранение или частичное снижение негативных последствий, связанных с использованием углей и сланцев, обладающих высокой зольностью, влажностью или повышенным содержанием серы, а также древесных отходов может быть достигнуто

благодаря использованию новых технологий переработки углей, сланцев и продукции лесной и деревообрабатывающей промышленности, утилизации отходов и вредных выбросов.

Анализ современного состояния промышленности и экономики России позволяет определить в качестве основного метод переработки углеродсодержащих отходов в квалифицированное высокоэффективное топливо для коммунально-бытового сектора страны. С одной стороны это обусловлено уровнем технической и технологической подготовки промышленности, с другой – в фактически не снижающейся потребности жилищно-коммунального хозяйства страны в эффективном и экологически чистом топливе.

По оценке ведущих ученых топливно-энергетической отрасли, специалистов Института горючих ископаемых (Г.С.Головин, В.А.Рубан, А.П.Фомин, О.Г.Потапенко) [1] в России вплоть до 2005 г. при годовой потребности жилищно-коммунального сектора в 40-50 млн т окускованного топлива сохранится устойчивый дефицит около 10 млн т. Покрытие этого дефицита может быть обеспечено только за счет дополнительных объемов окускованного облагороженного топлива, которое может быть получено без существенного увеличения уровня добычи твердых горючих ископаемых путем брикетирования (таблетирования и производства пеллет) вторичного углеродсодержащего сырья.

Большое количество древесных отходов, образующихся на деревообрабатывающих и лесозаготовительных предприятиях, не может быть использовано в производстве или из-за их свойств (опилки, кора, шлифовальная пыль, пораженная гнилью и другими пороками древесина), или из-за чрезмерной дороговизны транспортировки. В таких случаях сжигание отходов в топках сушилок, паровых и водогрейных котлов может дать существенную экономию энергоносителей (сжигание 5 т древесных отходов позволяет сберечь 1 т мазута или 1000 м^3 газа). В то же время в России не выпускаются паровые и водогрейные котлы, оборудованные топками для сжигания высоковлажных древесных отходов. Ранее установленные котлы укомплектованы топочными устройствами (топка ЦКТИ Померанцева, топка с наклонной колосниковой решеткой), не обеспечивающими достаточно эффективного сжигания отходов, так как в конструкциях топок не полностью учтены особенности отходов как котельного топлива.

Влажные древесные отходы (с относительной влажностью 55 %), в том числе мелкие, для полного сжигания должны быть подсушены перед воспламенением. В связи с этим, а также из-за разнородности фракционного состава применение камерного или вихревого сжигания затруднительно.

Известен способ термической переработки биомассы (древесины) в газогенераторе с получением газообразного топлива, практически свободного от активных примесей – смол и кислот. Оно может быть использовано без сложной дополнительной очистки для сжигания в топках паровых и водогрейных котлов, в различных технологических установках для нагрева и сушки, в стационарных двигателях внутреннего сгорания с получением электроэнергии, в коммунально-бытовом хозяйстве для нагрева воды и обогрева помещений. Исходным сырьем для газогенератора могут быть любые углеродсодержащие отходы: древесина, щепа, кора, сельскохозяйственные отходы, коммунальные и бытовые отходы. Получаемый газ имеет высокую калорийность (8,5 м^3 генераторного газа эквивалентно 1 кг мазута); по сравнению с прямым сжиганием твердого топлива использование генераторного газа является в экологическом отношении значительно более чистым процессом. Однако сложность заключается в том, что для широкого внедрения такого эффективного метода утилизации необходимо решение целого ряда проблем: создание модульных мобильных газогенераторных установок малой производительности, так как транспортирование древесных отходов с лесосек, отдельно стоящих складов и скоплений биомассы затруднительно и требует специальной подготовки по величине куска и влажности; транспортирование получен-

ного при переработке модульными установками газа или электроэнергии.

Наряду с прямым сжиганием и газификацией биомассы может быть использован пиролиз, который является эффективным методом термохимической переработки биомассы (БМ) промышленных и бытовых отходов и одновременно одной из наименее развитых технологий энергетического использования БМ. Пиролиз представляет собой процесс термического разложения органических соединений без доступа кислорода и происходит при относительно низких температурах (500-800 °С) по сравнению с процессами газификации (800-1300 °С) и горения (900-2000° С).

Реакцию пиролиза БМ можно представить следующим образом: БМ + тепло = С (углистое вещество) + смолы + CO + CO_2 + + H_2 + H_2O + CH_4 + C_nH_m. Первичными продуктами могут быть жидкость, твердое углистое вещество и газы в зависимости от вида и параметров процесса пиролиза, вторичными – энергия, топливо и химические продукты.

Недостаток метода заключается в необходимости стационарного базирования установки, специальной подготовки пиротоплива и трудностях транспортирования получаемых пиропродуктов. В тоже время, метод быть использован как конечный этап переработки подготовленных методом окускования или измельчения древесных и растительных отходов.

Из мирового опыта известно, что для энергетического использования высокозольных и низкокалорийных топлив используются котлы небольшой единичной мощности с кипящим слоем (КС), циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) и внутрицикловой газификацией топлива (ВЦГ) [3]. Это объясняется необходимостью соблюдения современных требований по автоматизации энергоблоков и организации процессов горения с оптимально низким выходом загрязняющих веществ в атмосферу. Такие котлы изготавливаются и эксплуатируются за рубежом на буром угле и отсеве каменного угля, лигнитах, торфе, отходах лесной промышленности (АВВ, Лурги, Вестингауз и др.). В тоже время сланец в энергетических целях за рубежом практически не используется. Известен опыт испытания энергетической установки фирмы Альстрем с ЦКС на израильском сланце электрической мощностью 6 МВт и предложение использования котлов, созданных и работающих на отсеве каменного угля для прямого сжигания сланца (фирма Foster Wilier, США). Российский опыт применения сланца ограничивается испытанием котла БКЗ-75 на ТЭЦ (г.Ахтме), не получившим в дальнейшем промышленного развития.

Таким образом, в сланцевой энергетике имеются разработки и готовые конструкции котлов, они перспективны для использования, но пока не подготовлены к промышленному внедрению.

Анализ современного состояния проблемы снижения вредного влияния на окружающую природную среду скоплений углеродсодержащих отходов и уровня их вторичного использования позволяет определить два основных направления: снижение объема производства отходов путем совершенствования технологий рациональной переработки первичного минеральных и растительных ресурсов; разработка и внедрение технологий переработки вторичного углеродсодержащего сырья (отходов) [5].

К наиболее эффективным способам рационального использования первичного углеродсодержащего сырья на Севере и Северо-Западе России относятся:

- способ обогащения труднообогатимых средне- и высокозольных, высокосернистых каменных углей, таких как интинские угли марки Д и воргашорские – марки ГЖО (Печорский каменноугольный бассейн) с применением винтовых сепараторов, позволяющий снизить уровень содержания негорючего зольного остатка и серы общей вдвое и более;
- способы раскроя древесины и малоотходная технология ее разделки, способ уплотнения приповерхностных слоев деловой древесины и долгосрочной консервации путем пропитки специальными консервирующими составами;

• способ уплотнения низинных и верховых торфов брикетированием для снижения затрат на транспортирование к месту потребления и т.д.

В настоящее время наиболее перспективными и максимально возможными методами переработки вторичных углеродсодержащих ресурсов (отходов) являются:

• брикетирование каменноугольной мелочи нетрадиционными способами с применением активных тонкодисперсных связующих материалов или без них [4];

• транспортирование и сжигание тонких классов угольных отходов в виде водоугольной суспензии;

• брикетирование мелочи низкосортных бурых углей без применения связующих материалов термическим способом (термобрикетирование) [1];

• окускование (гранулирование и брикетирование) тонкодисперсных отходов горючих сланцев для последующей газификации или слоевого сжигания в коммунально-бытовых топочных устройствах;

• окускование древесных отходов тонких классов (брикеты, гранулы, пеллеты) для последующей газификации или слоевого сжигания в коммунально-бытовых топочных устройствах [8].

Становится очевидным, что способ использования таких отходов должен основываться на специальном методе подготовки: либо сушке и измельчении до необходимого размера при вихревом сжигании, либо агломерации до размеров куска, приемлемого при сжигании в слоевых топках. Оба предложенных способа могут быть использованы для подготовки биомассы для последующей переработки в газогенераторной установке любого типа.

Таким образом, при проведении утилизации углеродсодержащих отходов становится очевидной необходимость выполнения специальной операции подготовки по влажности и фракционному составу. Как показывают практический опыт и проведенный комплекс исследований, наиболее перспективным по причине технической подготовленности и универсальности является метод окускования способом брикетирования.

Для формования брикетной шихты на современном этапе развития техники и технологии брикетирования возможно использование различных технико-технологических решений от формования всесторонним сжатием до формования с приложением формующего усилия по касательной относительно движения уплотняемых частиц. С точки зрения экономичности процесса выделяются два основных способа: формование при одноосном двустороннем сжатии в гидравлическом прессе с неподвижным рабочим столом (конструкции НИИСТРОМ, АО «СМАиК»); формование экструдером.

Процесс структурообразования брикета при формовании и первым и вторым способом с достаточной степенью достоверности описывается новой гипотезой брикетирования каменноугольной мелочи с применением тонкодисперсного активного связующего материала (компонента). Характерной особенностью этих способов является их универсальность, можно брикетировать любые углеродсодержащие материалы от жестких каменных углей до древесного опила, торфа и бытовых отходов.

Первый способ используется в ряде современных технологических решений при брикетировании каменноугольной мелочи с применением нетрадиционных связующих материалов и компонентов или без них [4] способом полусухого формования, традиционно используемым в промышленности строительных материалов. Формование брикетов проводится аналогично формованию сырца силикатного и глиняного кирпича способом полусухого формования, который является основой технологического передела, и в значительной мере обусловливает качество изделий.

Проведенные исследования процессов, протекающих в брикете из каменноугольной мелочи с применением тонкодисперсных связующих материалов и компонентов при формовании и последующей термической обработке, позволили достоверно описать механизм структурообразования брикета и разработать новую гипотезу брикетирования [4]. В тоже время, изучению закономерностей процесса формоизменения, с точки

зрения снижения необходимых для этого энергозатрат, должного внимания не уделяется. Недостаток достоверной информации затрудняет разработку исходных требований (регламента) для создания новых высокопроизводительных и экономичных прессов и оптимальных режимов формования. Развитие теории брикетирования из каменноугольной или сланцевой мелочи, а также древесных отходов [8] имеет существенное значение для совершенствования конкретных технологических процессов на действующих, строящихся и проектирующихся предприятиях.

Первоначально необходимость в выборе оптимальных параметров прессования возникла при создании новых высокопроизводительных прессов для изделий из неорганических материалов (силикатных и керамических) [7]. Однако, учитывая схожесть их свойств со свойствами формуемых углеродсодержащих материалов, а также аналогичность технологических решений, выбор оптимальных параметров прессования представляет интерес для топливно-энергетической отрасли. Некоторые авторы считают, что для прессования тонкодисперсных углеродсодержащих материалов необходимо формующее усилие в 40-50 МПа и более, при этом фактору времени прессования должного внимания не уделяется. В результате опытного брикетирования на современных гидравлических прессах, в том числе на прессе с неподвижным столом конструкции НИИСТРОМ и ОАО «СМАиК», это мнение не подтвердилось. Установлено, что обеспечивающие хороший внешний вид, высокую прочность изделия и саму возможность формования брикетов, эти прессы работают при удельном давлении в пределах 15-25 МПа. Время прессования для механических прессов составляет около 2 с, а для гидравлических прессов от 3,5 до 8 с. Тот же параметр для отечественных прессов СМ-816 и СМС-152 равен 0,6-0,7 с.

Длительность приложения нагрузки при прессовании и одновременное увеличение производительности прессов обеспечиваются применением многогнездовых пресс-форм (от двух до шести одинарных брикетов формата 60 × 60 × 120, прессуемых одновременно). Таким образом, конструирование прессов с повышенным удельным давлением (40-50 МПа) признано ошибочным [7].

Для технической характеристики вводится понятие «удельной работы прессования», равной работе прессования, отнесенной к единице объема или массы сформованного изделия. Тогда удельная работа формования определяется по следующей формуле:

$$A_{уд} = \frac{A}{m} = \frac{1}{m}\int_0^h Pdh \quad \text{или} \quad A_{уд} = \frac{1}{m}\int_0^\tau Wd\tau,$$

где A – работа формоизменения, Дж; P – сила формования, Н; m – масса изделия, кг; h – осадка при формовании, мм; W – мощность, затрачиваемая на формование, Вт; τ – время, с.

Применение $A_{уд}$ обеспечивает объективную характеристику процесса прессования и прессового агрегата вне зависимости от вида и размера изделий, их расположения и количества в пресс-форме.

Собственно процессу прессования предшествует засыпка формовочных коробок пресс-форм сырьевой смесью (шихтой), хорошо дозированной и гомогенизированной, обладающей стабильными свойствами. В этой операции основным является обеспечение равномерной засыпки всех формовочных коробок сырьевой смесью, что достигается путем применения засыпных и перемешивающих устройств различных конструкций. Наиболее удачными оказались мешалки рамочного типа. Хорошие перспективы имеют устройства для заполнения пресс-форм с использованием вибропобудителей, в том числе и вибрация штампов в период заполнения [7].

В результате изучения процесса прессования камней (кирпичей и брикетов различной формы) на гидравлических прессах с максимальным усилием 1000 и 6000 кН с применением методики автоматической записи диаграмм давление – время и осадка – время установлена целесообразность выделения четырех этапов прессования, обладающих индивидуальными характеристика-

ми. При этом для упрощения процесс миграции сложных флюидных систем в сечении брикета не рассматривается.

Первый этап – интенсивная осадка смеси при движении штампов в пресс-форме (первичное сближение частиц шихты), при этом происходит выравнивание плотности заполнения, что особо важно при применении штампов с пустотообразователями, и уплотнение смеси в коробках. На этом этапе происходит выход основного количества воздуха из смеси (75-80 %), он характеризуется небольшим, но все возрастающим расходом энергии.

Второй этап образование брикета (сырца-кирпича) в результате окончательного сближения тонкодисперсных частиц и зерен смеси, заполнения межзернового пространства мелкими частицами и адгезионно-когезионного взаимодействия, а также за счет разрушения крупных частиц шихты. Этот этап прессования характеризуется дальнейшим ростом осадки h_2 смеси (до 15 %), интенсивным ростом потребляемой мощности W, давления P и работы прессования A. В тонкодисперсных смесях в прессовке происходит защемление и сжатие остаточного воздуха, в дисперсной системе возникают упругие напряжения. На этом этапе проявляется положительная роль воды в смеси наличие на поверхности частиц пленок воды снижает внутреннее и внешнее трение.

Третий этап время выдержки при максимальном давлении сырца, в течение которого происходит выход остаточного воздуха, окончательное смятие и заклинивание частиц, релаксация упругих напряжений, калибровка сырца. Осадка h_3 незначительна – 1-15 %, усилие прессования максимальное, желательное время 0,5-2 с, прирост работы прессования A_3 является незначительным. Наличие третьего этапа, характеризуемого указанной величиной времени, позволяет получать высокое качество изделий при оптимальных величинах удельного давления прессования, равных 10-20 МПа.

Четвертый этап – сброс давления и выталкивание сырца. При недостаточном по времени третьем этапе возникает опасность возникновения остаточной упругой деформации сырца (особенно при формовании древесины опила, торфа и пр.), а также вспучивание и расслоение в результате выхода сжатого воздуха. Усилие выталкивания зависит от ряда факторов: общей площади боковых поверхностей изделий, коэффициента внешнего трения, влажности и дисперсности сырья, наличия уклона на футеровочных пластинах (важный технологический фактор).

При образовании сырца в глубине пресс-формы, как это имеет место в кирпичных прессах СМ-1085 и СМК-301, усилие выталкивания возрастает, и возникают деструкционные дефекты в изделии. Поэтому наиболее целесообразным является одностороннее прессование снизу и применение верхнего неподвижного контрштампа. При необходимости двухстороннего прессования, при использовании тонкодисперсных смесей также рекомендуется применять основной ход штампа снизу (как на прессах ОАО «СМАиК»), а сверху осуществлять подпрессовку на втором и третьем этапах прессования на глубину 5-10 мм.

Внедрение в пресс-форму верхнего штампа на небольшую глубину (до 10 мм) при двухстороннем прессовании, обеспечивающем более равноплотный сырец, не изменяет общей картины прессования. Теоретические представления об этапах компрессионного прессования относятся к различного рода тонкодисперсным материалам, таких как угольная и сланцевая мелочь, силикатное и керамическое сырье. Тенденции современной технологии формования способом полусухого прессования сближаются. С одной стороны, возникает необходимость прессования силикатного кирпича и брикета из горючих сланцев с применением тонкодисперсных смесей, а в технологии производства угольных брикетов и керамического кирпича полусухого прессования весьма полезную роль может сыграть введение укрупняющих добавок (класса 0,35-3 мм).

Рассмотренные этапы прессования наглядно проявляются при растянутом во времени процессе. Так, для гидравлического пресса типа «Интертехник» при формовании

одинарного кирпича он составляет 3-4 с, а для пустотелых камней 5-8 с [7]. Несомненно, что при более сжатом цикле прессования, как это имеет место при формовании на механических и гидравлических прессах с неподвижным рабочим столом производства ОАО «СМАиК» (используемые на брикетной установке ОАО «Воркутинское брикетное производство» в г.Воркуте), выявленные этапы прессования менее четко выражены и могут частично совмещаться друг с другом.

Ранее установлено [7], что линии одинакового давления изобары – при одностороннем компрессионном формовании имеют куполообразную форму. Давление распространяется в вертикальном направлении, и это приводит к появлению и возрастанию сдвиговых усилий в нижней части изобары. При превышении сдвиговыми усилиями сил внутреннего трения нарушается сплошность сырца и возникает отслоение преимущественно угловых его частей (перепрессовка), т.е. $P_{сдв} \geq P_{вн.тр}$.

На перепрессовку оказывают влияние ряд факторов. Увеличение скорости приложения нагрузки на втором этапе прессования увеличивает величину сдвиговых усилий и, соответственно, кривизну изобар. Кривизну изобар увеличивает также применение смесей пониженной влажности, что также повышает вероятность перепрессовки. Последняя может возникать и при уменьшении внутреннего трения, например, при излишней влажности сырьевой смеси.

Учитывая, что для каждого пресса существует максимальная величина прессового усилия, определяемая конструктивными особенностями и прочностью его деталей, можно ввести понятие идеальной диаграммы прессования – площадь прямоугольника, где по оси ординат $P_{тч}$, а по оси абсцисс h. Очевидно, что параметры «идеального» процесса следующие: усилие прессования $P = \text{const}$, работа прессования $A_{уд} = P_{max}h/nm$, где n – количество формуемых изделий. Для характеристики реальных прессов целесообразно применять коэффициент эффективности формования (прессования), который определяется как отношение затраченной удельной работы формования, определяемой по диаграмме $P - h$, к идеальной работе:

$$\eta_{Ф} = \frac{A_{уд}}{P_{max}h} nm\,\eta_{ф} \leq 1.$$

Реальная работа формования не может быть больше идеальной и коэффициент эффективности формования не превышает единицы.

Таким образом, с помощью параметров $A_{уд}$ и $\eta_{ф}$ можно достаточно полно охарактеризовать работу прессового оборудования. Удельная работа формования технологический показатель качества продукции, коэффициент эффективности формования показатель рациональности конструкции пресса.

Изучение диаграмм прессования позволяет выбрать более выгодный режим процесса. Потенциальные возможности появляются за счет интенсификации (более резкого) подъема кривой на первом этапе прессования, что при сохранении общего времени прессования вызовет существенный прирост работы прессования. Положительный эффект может быть получен за счет повышения прочности брикета (при неизменном времени прессования τ) или повышения производительности пресса в результате сокращения времени прессования и сохранения прежнего уровня качества прессовки.

Таким образом, для повышения эффективности полусухого прессования целесообразно усовершенствовать кинематику прессов путем резкого повышения скорости движения поршня в начальном этапе процесса с последующим плавным замедлением по аналогии с гидравлическим прессом с неподвижным рабочим столом конструкции НИИСТРОМ и ОАО «СМАиК».

Второй способ брикетирования углеродсодержащих материалов (угля, горючего сланца, древесины и др.) с применением сдвиговых деформаций характеризуется кратным снижением энергозатрат на формообразование против предыдущего. Объяснение такого уровня снижения энергозатрат на формование при одинаковой прочности получаемого изделия представляется возможным за счет перераспределения на-

пряжений и деформации в упругой области деформирования твердого тела (свежесформованного брикета) [2]. Упрощенно процесс образования брикета представляется состоящим из двух последовательных процессов – уплотнения и возникновения сил сцепления между поверхностями прессуемого материала. Если величина сил сцепления в основном зависит от свойств брикетируемого материала, то решающим фактором в процессе уплотнения является условие приложения и действия давления прессования и характер подготовки материала (нагрев, увлажнение). При производстве брикета основными средствами регулирования прочности брикетов являются характер подготовки шихты и условия формования, обеспечивающие ее уплотнение за счет возникновения необходимых сил сцепления между частицами прессуемого материала.

Процесс уплотнение материала при формовании в идеальной форме можно представить в виде трех последовательно протекающих этапов:

1) сближение угольных частиц (внешнее давление преодолевает только сопротивление трению между перемещающимися частицами);

2) дальнейшее перемещение частиц в результате их разрушения;

3) уплотнение за счет остаточных пустот между частицами и упрочнение их структуры вследствие реформации сдвига при неравномерном всестороннем напряженном состоянии.

При брикетировании тонкодисперсных углеродсодержащих материалов наиболее важен последний этап, поскольку в этот момент шихта формируется в брикет. Способность угля, сланца и др. брикетироваться и прочность полученного брикета определяются равнодействующей двух сил, направленных в противоположные стороны: силы сцепления между поверхностями частиц шихты и силы упругого расширения их в момент снятия давления прессования [2]. Установлено, что для получения прочного брикета на последнем этапе формования необходимо создать условия, обеспечивающие максимальные сдвиговые деформации частиц шихты. Это особенно важно при брикетировании жестких и упругих углеродсодержащих материалов (каменноугольной и сланцевой мелочи), так как известно, что при определенных условиях жесткие углеродсодержащие материалы способны деформироваться пластически.

Всестороннее неравномерное сжатие осуществляется так, что в стадии упругой деформации за счет наличия пор и пустот между частицами происходит поперечное изменение любого элемента брикета. Частицы угля, уплотняясь и вытесняя из уменьшающихся пор остаточный воздух, входят в зацепление своими неровными краями, образуя монолитный блок. В случае уплотнения сжатием образование такого блока сопровождается в большей степени разрушением частиц формуемого материала, тогда как при уплотнении со сдвигом за счет радиального и одновременно поступательного перемещения частиц разрушение частиц не характерно. При этом главные напряжения, возникающие в теле образующегося брикета до равных значений плотности и прочности, в зависимости от условий уплотнения, сжатием или сжатием со сдвигом не будут равны.

Может быть подобрано такое соотношение между наибольшими и наименьшими главными напряжениями и такие их абсолютные значения, при которых будет полностью исключена возможность разрушения хрупкого материала в процессе формования под действием поперечного изменения элемента брикета. При этом в пределах упругих деформаций будет существовать возможность такого же изменения и наибольшего касательного напряжения. Повышение нормальных напряжений σ_n в допустимых пределах и увеличение τ_{max} при упругих деформациях может продолжаться без разрушения угля до преодоления сопротивления сдвигу.

Таким образом, чтобы получить значительные касательные напряжения для осуществления пластических деформаций, особенно для жестких углеродсодержащих материалов, необходимы большие нормальные напряжения, что повысит энергоемкость процесса. В случае приложения к брикетируемому углеродсодержащему материалу

крутящих усилий, при меньших нормальных напряжениях можно получить значительные касательные напряжения и заставить его пластически деформироваться.

Действие крутящих усилий можно видеть из рассмотрения двух сложных напряженных состояний шихты всестороннего неравномерного сжатия и сжатия с кручением. Максимальные сдвигающие напряжения при условии сжатия без кручения будут равны [2]:

$$\tau_{max} = \sigma/2(1 - 2\mu)/1 - \mu,$$

где σ – нормальное напряжение при сжатии.

При одновременном действии сжатия с кручением выражение для максимального касательного напряжения:

$$\tau_{max.c.к} = \tau_{max.c} + \tau_{max.к},$$

где $\tau_{max.}$ $\tau_{max.к}$ – максимальное касательное напряжение от сжатия и от кручения соответственно.

Касательное напряжение от кручения $\tau_{max.к} = M_к/W_р$, тогда

$$\tau_{max.c.x.} = \sigma'/2(1 - 2\mu)/1 - \mu + M_к/W_р,$$

где σ' – нормальное напряжение при одновременном действии сжатия и кручения; $M_к$ – момент кручения; $W_р$ – момент сопротивления при кручении.

При условии достижения одинаковых по величине касательных напряжений при сжатии и сжатии с кручением $\tau_{max} = \tau_{max.c.к}$ или $\sigma - \sigma' = 2M_к/W_р(1 - \mu)/(1 - 2\mu)$.

Разница в абсолютных величинах нормальных напряжений при достижении одинаковых величин касательных напряжений в рассмотренных случаях напряженных состояний шихты прямо пропорциональна моменту кручения $M_к$. Данное заключение экспериментально подтверждается при оценке степени уплотнения шихты формованием с поворотом пуансона и без поворота путем определения пористости материала брикета [2].

Таким образом, в определенных условиях всестороннего неравномерного напряженного состояния возможно пластическое деформирование жестких и упругих углеродсодержащих материалов, таких как старые бурые и каменные угли, горючие сланцы, древесный опил, и получение брикетов с применением связующих веществ или без них.

Для повышения прочности брикетов и кратного снижения энергоемкости процесса формования можно применить такую схему напряжения прессуемого материала, которая обеспечивает действие на него нормального давления с кручением. Наиболее удачным примером такой схемы формования, на наш взгляд, может служить способ формования бесконечным клином (шнеком) в экструдерном прессе, широко применяемом в промышленности строительных материалов при производстве кирпича и в фарфоровой промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Головин Г.С.* Современные направления получения окускованного бездымного топлива для малых энергетических установок и бытовых печей / Г.С.Головин, В.А.Рубан, А.П.Фомин, О.Г.Потапенко // Уголь. 1996. № 2. С.38-42.

2. *Егоров Н.С.* К вопросу брикетирования механически жестких углей / Исследования по брикетированию углей. М.: Наука, 1969. С.14-18.

3. *Климов Л.С.* Комплексное использование горючих сланцев / Л.С.Климов, Г.Б.Фрайман, Ю.В.Шувалов, Г.П.Грудинов. Липецк: Липецкое изд-во, 2000. 184 с.

4. *Нифонтов Ю.А.* Рациональное использование отходов обогащения угля и снижение экологической напряженности при разработке месторождений Севера России / СПГГИ (ТУ). СПб, 2000. 138 с.

5. *Остащенко Б.А.* Гравитационное обогащение энергетических углей / Б.А.Остащенко, И.Н.Бурцев, И.Х.Шумилов // Научные рекомендации народному хозяйству. Вып.115; УрО КНЦ РАН. Сыктывкар, 1997 23 с.

6. *Пахальчук Г.Ю.* Зарубежный опыт освоения вторичного потенциала: проблемы, пути их решения / Г.Ю.Пахальчук, М.Н.Игнатьева // Уральское горное обозрение. 1999. № 7-8. С.132-139.

7. *Хвостенков С.И.* Закономерности полусухого прессования кирпича и пустотелых камней / С.И.Хвостенков, А.А.Золотухин, М.Э.Купершмидт // Строительные материалы. 1985. № 11. С.24-25.

8. *Шувалов Ю.В.* Технология и техника брикетирования углеродсодержащих веществ / Ю.В.Шувалов, Ю.А.Нифонтов, А.А.Бенин / Международное бюро по горной теплофизике; СПГГИ. СПб, 2000. С.90-94.