

ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИТЫ ИЗ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Н.И. Буравчук, зав. лаб. ФГАОУ ВО «Южный Федеральный Университет»,
канд. хим. наук

Обобщены результаты экспериментальных исследований технологии брикетирования различных по физической природе, структуре, составу, свойствам углеродсодержащих материалов, имеющих определенный энергетический потенциал. Брикетирование позволяет утилизировать невостребованные мелкозернистые углеродсодержащие отходы, повысить полноту их сгорания, снизить уровень загрязнения окружающей природной среды.

Ключевые слова: брикетирование, связующее, мелкозернистые угольные отходы, горючие древесно-растительные остатки, топливные брикеты.

FUEL COMPOSITES OF FINELY-GRANULAR CARBON-CONTAINING TECHNOGENIC RAW MATERIAL

N.I. Buravchuk, Head of Laboratory, Federal STATE Autonomous Educational Institution «Southern Federal University», Doctor of Chemistry

Summarizes the results of theoretical and experimental researches the technology of briquetting of different the physical nature, structure, composition, properties of carbonaceous materials having a certain energy potential. Briquetting allows to dispose of unclaimed fine-grained carbonaceous waste, to increase the completeness of combustion, reduce the level of pollution of the natural environment.

Keywords: briquetting, binder, fine-granular coal waste, combustible wood-vegetable residues, fuel briquettes.

Экологическая напряженность в угледобывающих регионах страны во многом определяется высоким уровнем отходов добычи и переработки угля. Практически во всех угледобывающих районах на углеобогачительных фабриках, на шахтах накапливаются штыбы, угольная мелочь, шламы, энергетический потенциал которых трудно использовать из-за их мелкодисперсности и пылевидности. Неиспользованные отходы угледобывающей промышленности складываются в отвалы. Продолжительное хранение значительных объемов мелкозернистой и тонкодисперсной мелочи на открытом воздухе приводит к попаданию ее с паводковыми и ливневыми водами в бассейны близлежащих рек. В то же время изучение качественных характеристик углеродсодержащих материалов позволило установить их перспективность для использования после соответствующей переработки в качестве полноценного бытового топлива. Запасы таких отходов, имеющих определенный энергетический потенциал, велики.

В программе «Энергетическая стратегия России» в части угольной промышленности и углей как энергетического топлива стратегия состоит в том, что поставка угольного топлива на потребительский рынок должна осуществляться не в виде природного «горючего камня», а в виде угольной продукции, облагороженной до необходимой кондиции по золе, влаге, сере и гранулометрическому составу [1]. Потребность в твердом топливе неуклонно возрастает, топливный рынок практически пуст. Наиболее обоснованным технологическим направлением, которое может обеспечить получение топлива с удовлетворительными потре-

бительскими характеристиками, является брикетирование некондиционных углеродсодержащих отходов со связующими. Это универсальный способ получения брикетов практически из любых материалов. Организация производств по выпуску кондиционного брикетированного топлива дает возможность хотя бы частично уменьшить возрастающий дефицит угля и прежде всего для топочных устройств коммунально-бытового сектора и тепловых агрегатов промышленной энергетики. В отечественной практике практически нет предприятий по производству топливных брикетов из антрацитовых штыбов, каменноугольной и коксовой мелочи, шламов. Есть и другие горючие отходы. Это твердые сельскохозяйственные остатки (солома от зерновых культур, стебли и лужга подсолнечника, кукурузные початки и др.), отходы переработки древесины (опилки, обрезки от переработки первичной древесины, паркетная пыль и др.). Запасы некондиционных горючих отходов велики. Одна из причин – отсутствие экологически чистых, доступных и недорогих связующих веществ. Цель данных исследований – разработка универсальной технологии брикетирования, применимой как для углеотходов, так и других горючих отходов, например, растительной продукции сельского хозяйства и деревообрабатывающей отрасли.

Экспериментальная часть

При разработке технологии брикетирования исходной посылкой явилось положение о том, что создание топливной композиции представляет собой по-существу, процесс формирования в материале системы контактов и силовых связей в объеме брикета по критериям оптимальной их сопротивляемости атмосферным воздействиям в процессе хранения и температурно-механическим нагрузкам при их использовании. В рамках решения этой задачи осуществлялось обоснование требований к размерам зерен углесодержащего компонента (масштабный критерий структуры композита). Придавалось значение соотношению объемов твердофазовой (каркасообразующей) составляющей композиции и затворяющей смеси, условиям пространственного их размещения в объеме (плотность и оптимальная упаковка различной дисперсности зерен и пористых включений, толщина клеящей прослойки, параметры структурной их однородности и др.). Обоснование указанных требований отвечает условию управления параметрами однородности композиции, от чего зависит эффективность работы связей при действии на топливный брикет различных факторов в условиях их хранения и стабильность процесса горения.

Способность углей брикетироваться зависит от принадлежности угля к тому или иному классу. Нет строгих критериев оценки брикетируемости углей и углесодержащих материалов. При исследовании брикетирующей способности углей изучают влияние фракционного состава порошкообразного угля, давления прессования, температуры сушки исходного угля. Повысить эффективность брикетирования угля можно путем активации поверхности угольных частиц. Одним из способов активации является измельчение – механоактивация. При дроблении и измельчении под воздействием механических сил интенсифицируются физико-химические процессы, приводящие к изменению реакционной способности угля. Под действием ударных нагрузок или трения в твердом теле накапливаются разнообразные дефекты структуры, происходят полиморфные превращения и аморфизация. Полиморфные превращения или аморфизация при механоактивации объясняют качественные изменения реакционной способности угля. При этом обрабатываемый материал запасается свободной энергией. Качественной экспрессной оценкой брикетируемости углей может быть наиболее простой способ: определение брикетируемости шихты по установлению минимального количества связующего, которое требуется ввести в шихту, для получения механически прочного брикета при минимальном давлении прессования.

В экспериментальном исследовании брикетированию подвергались мелкозернистые угли: антрацитовые штыбы, коксовая, каменноугольная мелочь, угольные шламы, растительные отходы сельского хозяйства и деревообрабатывающей отрасли. Элементарный состав (углерод – C^{daf} , водород – H^{daf} , кислород + азот – $O^{daf} + N^{daf}$, сера – S^{daf}) и технические характери-

стики (зольность – A^d , массовая доля влаги рабочего топлива – W_t^r , выход летучих веществ – V^{daf} , низшая теплота сгорания – Q_s^{daf}) углеродсодержащего техногенного сырья приведены в табл. 1.

При разработке технологии брикетирования изучено [2–7] влияние на технологичность процесса и качество топливных брикетов таких факторов, как влажность и гранулометрический состав исходных углеродсодержащих материалов, соотношение компонентов шихты, состав и температура затворяющей смеси, давление прессования, режим упрочнения брикетов. Приведена оценка качества топливных брикетов по разработанной технологии.

Таблица 1

Характеристика углеродсодержащих продуктов

Компонент	Элементный состав, %				Технический анализ			
	C^{daf}	H^{daf}	$O^{daf}+N^{daf}$	S^{daf}	$A^d, \%$	$W_t^r, \%$	$V^{daf}, \%$	$Q_s^{daf}, \text{ МДж/кг}$
Штыб антрацитовый	94,4	1,4	1,6	2,6	19,0	4,7	3,8	34,25
Шлам угольный	83,2	4,3	2,3	10,2	29,9	20,6	19,7	22,16
Лузга подсолнечная	49,8	6,6	43,4	0,20	2,7	5,7	78,9	18,5
Опилки	51,7	5,9	42,23	0,17	0,6	7,2	77,3	17,1
Мякина	43,7	5,8	50,27	0,23	4,8	15,3	68,8	15,7

Планирование эксперимента и опытно-экспериментальная проверка пригодности шихты топливных композиций для брикетирования позволили определиться с составом связующего и оптимальным фракционным составом ингредиентов как наиболее важным фактором, определяющим возможность получения брикетов с заданными физико-механическими свойствами. На стадии проектирования критерием пригодности состава для топливных брикетов являлась прочность брикета-сырца. В исследованиях при подборе связующего для брикетирования исходили из следующих принципов: связующее должно быть доступным, обеспечивать технологичность процесса, обеспечивать необходимую и достаточную механическую прочность брикетов при их изготовлении, хранении и использовании.

В качестве основы связующего вещества для брикетирования углесодержащего сырья была выбрана меласса – побочный продукт сахарно-свекловичного производства. Меласса представляет собой густую сиропобразную непрозрачную вязкую жидкость темно-бурого цвета. Усредненный состав золы мелассы приведен в табл. 2

Таблица 2

Химический состав мелассы, вес. %

K_2O	Na_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	SO_3	Прочие оксиды
76,4	11,2	3,5	0,5	3,7	0,2	4,5

Гидрофобизирующей добавкой к мелассе были кубовые остатки термокрекинга парафинов. Кубовые остатки представляют собой высоковязкие, часто застывающие продукты темного цвета; температура плавления 35–38 °С. Действие гидрофобизатора проявляется в снижении вредного влияния воды, проникающей в брикетную композицию диффузионным путем. В качестве добавок-отвердителей к мелассе использовали карбидный ил, образующийся в виде мелкодисперсной пасты как отход при производстве ацетилена из карбида кальция. Это известь 2-го сорта, синеватого оттенка. Массовая доля гидроксида кальция не менее 35,0%. Другая добавка-отвердитель – фильтрационный осадок, отход свеклосахарного производства, содержащий в основном карбонат кальция и гашеную известь. Содержание гашеной извести составляет 50–60%.

Сложность брикетирования углесодержащих отходов связана с нестабильностью их свойств: морфологического и фракционного состава, влажности, плотности, содержания органического вещества, теплоты сгорания и др. Наибольшая трудность при утилизации таких отходов – высокая влажность и зольность. Изменение содержания влаги в углеотходах влияет на силы сцепления между частицами [8].

Антрацитовый штыб, получаемый при обогащении угля, имеет влажность 12–16%. Влажность угольных шламов из отстойников более 20%. Брикетирование таких переувлажненных отходов без предварительной сушки невозможно. Обезвоживание углеотходов чрезвычайно трудоемкая и затратная операция. Расширить диапазон влажности утилизируемых отходов можно, используя древесно-растительные волокнистые остатки, которые одновременно являются углеродсодержащим компонентом. Смешивание переувлажненных угольных отходов с растительными остатками (мякина, подсолнечная лузга, дробленая солома, листья и стебли подсолнечника и др.), древесными и паркетными опилками позволяет существенно сократить расходы на подготовку влажного сырья, т.е. исключить операцию обезвоживания. Влажность растительных отходов в естественном состоянии находится в пределах 4–28%. При такой влажности при визуальном осмотре опилки и растительные остатки воспринимаются как сухие, в отличие от шлама, у которого при такой влажности практически отсутствует удерживающая способность в отношении свободной воды и наблюдается ее самопроизвольное отделение. Древесные опилки и мякина содержат в полостях клеток свободную и в оболочках клеток связанную влагу. Максимальное количество связанной влаги при отсутствии свободной может составлять до 50–60%. В растительных остатках и опилках благодаря структурным особенностям этого сырья свободная вода является иммобилизованным структурным элементом материала и в смеси со шламом не оказывает дополнительного увлажнения смеси. Напротив, эти материалы способны адсорбировать воду из шлама, способствуя его обезвоживанию [5]. Брикетирование переувлажненных угольных отходов с древесно-растительными остатками принципиально меняет подход к технологии обезвоживания мелкозернистых влажных отходов. Из отечественного и зарубежного опыта следует, что оптимальным содержанием влаги угля мелких классов, предназначенного для брикетирования, считается 2–3% [8, 9]. Применение в составе шихты для брикетирования древесно-растительных остатков расширяет диапазон исходной влажности для угольных компонентов до 6–10%.

На качество брикета и его характеристики влияет крупность исходных компонентов и зерновой состав шихты. На рис. 1 показано изменение прочности брикетов от крупности частиц угольного компонента шихты. Наибольшее значение прочности на сжатие получено в образцах, содержащих уголь с фракцией 0–1 мм. У тонкодисперсного угля на твердой поверхности больше активных центров, взаимодействующих со связующим. В этом случае при формировании брикета эффективнее проникает связующее в поры и трещины угля (механическое защемление связующего), и усиливается адсорбционное взаимодействие на границе твердой и жидкой фаз. Эти процессы способствуют повышению прочности брикета.

Экспериментальным путем было установлено, что антрацитовый штыб крупностью 0–6 мм, должен включать частиц >6 мм – 5–7%; 3–6 мм – 25–30%; 1–3 мм – 30–33%; 0–1 мм – 35–45%. Для повышения пластичности, технологичности и улучшения зернового состава шихты для брикетирования вводили угольный шлам крупностью 0–3 мм. В угольном шламе содержание фракций 1–3 и 0–1 мм – по 40–45%, частиц свыше 3 мм – не более 10%. Пылевидные фракции угольного шлама заполняют пустоты каркаса, который создают более крупные фракции. Стабилизация крупных частиц мелкими основана на способности последних фиксирования за счет дальнедействующих межмолекулярных сил около крупных частиц, создавая более плотную упаковку частиц дисперсной фазы. Такая упаковка частиц характеризуется большой площадью контакта зерен. Растительные отходы сельского хозяйства, такие как солома, стебли и лузга подсолнечника обязательно подлежат дроблению.

Зерновой состав дробленых растительных остатков – 0–3 мм. Мякину можно не измельчать, отделив при необходимости частицы (стебли) крупнее 3 см.

Содержание связующего оказывает существенное влияние на брикетированность угольной мелочи и на прочность, как брикета-сырца, так и качество конечной продукции. На рис. 2 показана зависимость прочности топливных брикетов от содержания связующего – мелассы при различных влажностях брикетируемого антрацитового штыба. Установлено, что при расходе мелассы от 6 до 7% отформованные брикеты имеют прочность, достаточную для того, чтобы брикет не разрушился при транспортировке к месту упрочнения и складирования.

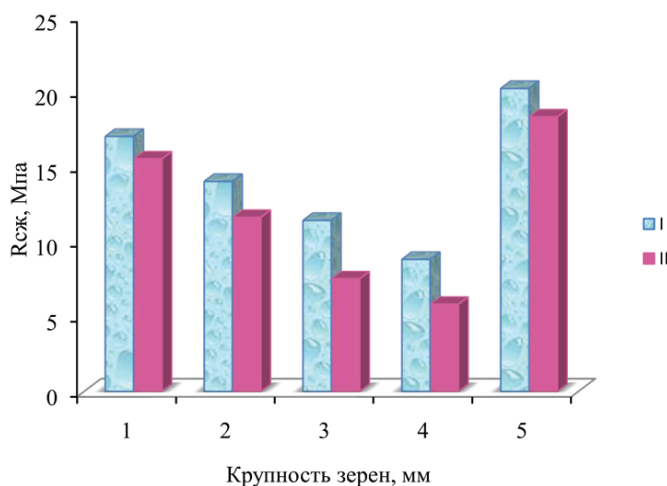


Рис. 1. Влияние крупности зерен угля на прочность брикетов

1 – 0–1 мм; 2 – 0–3 мм; 3 – 1–3 мм; 4 – оптимальный зерновой состав;
I – связующее: меласса; II – связующее: меласса + карбидный ил

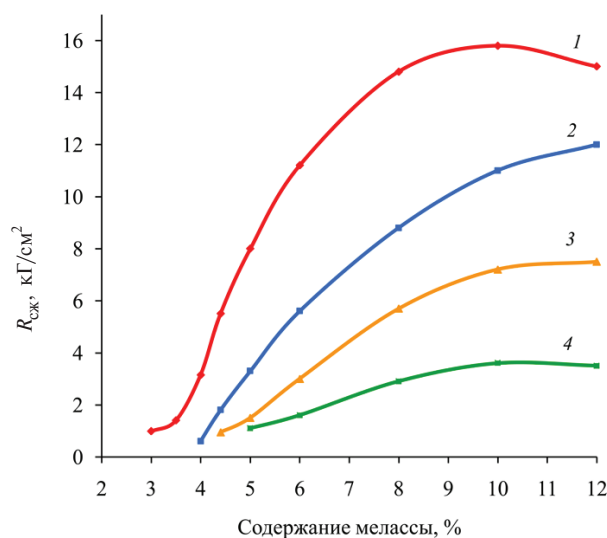


Рис. 2. Зависимость прочности брикетов от содержания связующего при разных влажностях антрацитового штыба (%)

1 – 2,0; 2 – 4,0; 3 – 6,0; 4 – 8,0

Формирование брикета из рыхлой шихты в плотное камнеподобное тело одинаковой формы и веса происходит при прессовании. Образование брикетов в прессе происходит в результате двухстороннего обжатия материала, что позволяет получать брикеты с высокой и равномерной плотностью. Давление прессования создает условия для проявления сил межмолекулярного взаимодействия при сближении поверхности угольных частиц. Уплотнение шихты в момент прессования является одним из важных факторов для получения прочного брикета. С приложением давления прессования происходит сближение зерен и активное взаимодействие контактирующих адсорбционно-сольватных слоев. Прочность брикета обусловлена проявлением сил механического, молекулярного, электрического, капиллярного взаимодействия и сил поверхностного натяжения. При брикетировании происходит изменение структуры и свойств мелкозернистых материалов: увеличивается площадь контактов между частицами, повышается плотность, уменьшается пористость, разрушаются конгломераты частиц, и даже сами частицы. Давление прессования изменяли в пределах 25–45 МПа.

Как связующее меласса проявляет высокие клеящие способности. Однако брикеты на этом связующем неводостойкие. Для обеспечения водостойкости топливных брикетов применена гидрофобизирующая добавка – кубовые остатки органического синтеза. Гидрофобизатор хорошо сочетается со связующим, образуя гомогенный раствор. Проникновение макромолекул кубовых остатков в адсорбционные слои связующего приводит к гидрофобным взаимодействиям, вследствие которых блокируются гидрофильные центры системы «твердая поверхность – связующее». В результате сродство к воде у такой системы понижается. Результаты исследования водопоглощения брикетов в зависимости от содержания кубовых остатков при различных расходах мелассы представлены на рис. 3. Полученные данные [3] позволяют определить наиболее оптимальный диапазон расхода мелассы (6–8 %) и гидрофобизатора (0,6–0,8 %) для получения брикетов, имеющих водопоглощение не более 2,0 %. Наличие гидрофобизатора в составе связующего обеспечивает объемную гидрофобизацию брикетной композиции и, как следствие, водостойкость брикетов. В лабораторных условиях изготовление топливных брикетов включало подготовку твердых компонентов, приготовление связующего, шихты и прессование. Антрацитовый штыб и угольный шлам определенного зернового состава и влажности подогревают до 50 °С и смешивают. В подогретую мелассу (40–45 °С) вводят кубовые остатки органического синтеза, подогретые до 45 °С. Смесь тщательно перемешивают. Подготовленным таким образом связующим затворяют смесь углесодержащих компонентов и тщательно перемешивают до равномерного распределения компонентов во всем объеме.

Полученную шихту с температурой 40–45 °С прессуют. Брикеты формируют на прессе с двухсторонним усилием прессования. Давление прессования 25–30 МПа. Доупрочнение брикетов происходит по мере охлаждения до температуры окружающего воздуха и в условиях хранения при температуре окружающего воздуха 18–20 °С и относительной влажности 55–60 %. Естественная сушка дает возможность получить брикеты с минимальным количеством дефектов, так как при этом происходит медленная усадка материала. Оптимальное соотношение компонентов шихты и технологических режимов изготовления топливных брикетов отражены в техническом решении [10].

Введение гидрофобизирующей добавки обеспечивает водостойкость брикетной композиции. Однако из-за гигроскопичности мелассы брикет хорошо сорбирует влагу из воздуха. При длительном хранении брикетов (более 20 дней) в условиях высокой влажности (90–95 %) брикеты теряют прочность. Процесс снижения прочности брикетов носит обратимый характер, и при уменьшении влажности окружающего воздуха наблюдается упрочнение брикетов и приобретение ими первоначальных свойств.

Для стабилизации свойств топливных композиций вводили специальные добавки – отвердители для блокировки сахаров, содержащихся в мелассе и отрицательно влияющих на свойства брикетов при длительном хранении во влажных условиях. Одна из таких добавок – уже

упоминавшийся карбидный ил. Карбидный ил используется как пластифицирующий и структурирующий реагент. Он не требует предварительной подготовки, смешивается с мелассой в любых соотношениях, понижает вязкость мелассы. Образующаяся затворяющая смесь равномерно распределяется на поверхности частиц, обволакивая все компоненты, придает пластичность шихте и обеспечивает хорошую формуемость при невысоком давлении прессования и высокую прочность брикета—сырца после изготовления. При нахождении брикетов, изготовленных связующем, состоящем из мелассы с добавкой карбидного ила, в течение года в условиях повышенной влажности наблюдается снижение их прочности в пределах 2,6–9,3%, прирост влаги у брикетов составил 3,3–4,7%. Некоторое снижение прочности и увеличение влагосодержания не повлияло на качество брикетов. Это подтверждается испытанием брикетов на сбрасывание на металлическую плиту по стандартной методике [11]. Прочность на сбрасывание брикетов, находившихся в климатической камере в условиях повышенной влажности, составляет 87–92%. В качестве другой добавки рекомендовано использовать фильтрационный осадок — отход свеклосахарного производства. Содержание гашеной извести в фильтрационном осадке составляет 50–60%. Замена карбидного ила на фильтрационный осадок приводит к улучшению прочностных показателей топливных брикетов. Это объясняется тем, что в отличие от карбидного ила в фильтрационном осадке содержатся кальциевые соли органических кислот, участвующие в формировании дополнительных комплексных органоминеральных соединений, устойчивых к различного рода воздействиям и улучшающим физико-механические свойства топливных брикетов. Связующее, состоящее из мелассы с фильтрационным осадком, имеет меньшую зольность в сравнении со связующим, содержащим карбидный ил (рис. 4).

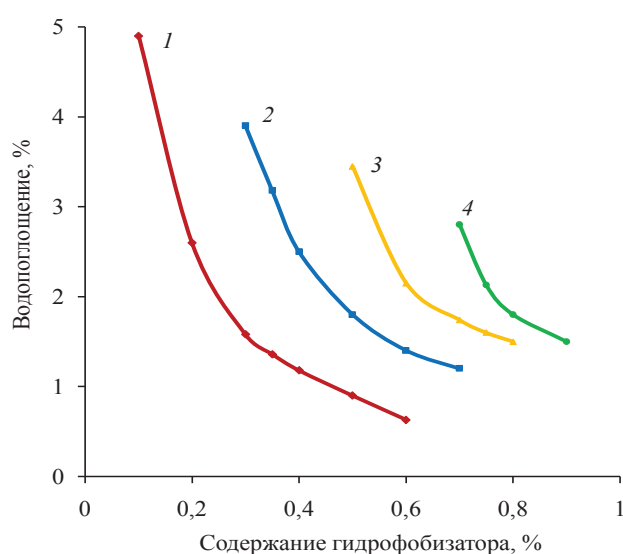


Рис. 3. Изменение водопоглощения брикетов от содержания гидрофобизатора и мелассы, %

1 — 4,0; 2 — 6,0; 3 — 8,0; 4 — 10,0

Замена карбидного ила на фильтрационный осадок позволяет снизить расход известьесодержащего компонента, так как в фильтрационном осадке его содержание примерно в 1,5 раза больше, чем в карбидном иле. В итоге зольность связующего, как и топливного брикета, уменьшается [13]. Таким образом, замена карбидного ила на фильтрационный осадок

приводит к снижению зольности топливных брикетов, повышению их прочностных свойств и улучшению условий окружающей среды при использовании топливных брикетов, снижению выделения вредных летучих веществ при их сжигании.

Топливные брикеты могут быть как чисто угольные, так и содержать кроме угля другие горючие материалы. Разработанное связующее и технология брикетирования пригодны как для изготовления чисто угольных или древесных, так и смешанных брикетов, содержащих углеотходы, древесные или растительные остатки. Проведены исследования [5] по брикетированию различных по влажности и физической природе отходов, имеющих энергетический потенциал, и получению брикетов с заданным набором свойств и характеристик. Свойства отходов растительного происхождения приведены выше в табл. 1. В составах многокомпонентных брикетов могут использоваться антрацитовый штыб, угольные шламы, коксовая или каменноугольная мелочь. Древесные опилки и древесная мука паркетных опилок, отходы растительного происхождения в технологии используются не только как энергонесущие компоненты, но и как наполнители, выполняющие роль армирующего и структурирующего компонентов шихты, и как адсорбенты избыточной влаги. Совместная переработка мелкодисперсных угольных отходов и древесно-растительных остатков позволяет брикетировать шихту, не проводя предварительную подготовку влажного дисперсного сырья.

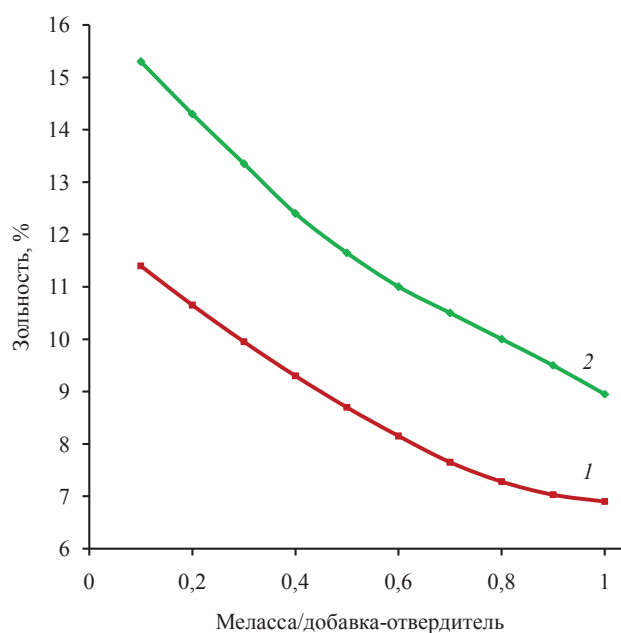


Рис. 4. Влияние содержания добавки-отвердителя на зольность связующего

1 – меласса + фильтрационный осадок; 2 – меласса + карбидный ил

В составе многокомпонентной шихты соотношение между растительными или древесными отходами, угольным шламом и антрацитовым штыбом выдерживалось по весу в пределах 1:1:3 соответственно. Подобранные соотношения антрацитового штыба, угольного шлама или коксового концентрата, установленный зерновой состава угольной смеси, выбранные добавки, выявленные расход связующего и величина давления прессования обеспечивают получение качественного топливного брикета. В лабораторных условиях технология приготовления шихты включала тщательное перемешивание антрацитового штыба и угольного шлама до равномерного распределения компонентов (оценка визуальная); последующее до-

бавление растительных остатков (опилок или мякины, или лузги подсолнечной) и тщательное перемешивание. Затворение смеси твердых компонентов предварительно приготовленным связующим (меласса + карбидный ил) и тщательное перемешивание до получения однородной массы. Перемешивание компонентов (углеотходов, растительных остатков и связующего) сопровождается перераспределением влаги между ними. Угольные частицы оказываются в каркасе растительных остатков. Прессование приготовленной шихты при давлении 25 МПа. Прочность отформованного брикета-сырца достаточна для сохранения его целостности после выхода из пресса и перемещения к месту складирования. На рис. 5 показано изменение прочности при сжатии испытываемых образцов с разными древесно-растительными остатками в зависимости от соотношения между мелассой и карбидным илом в составе связующего.

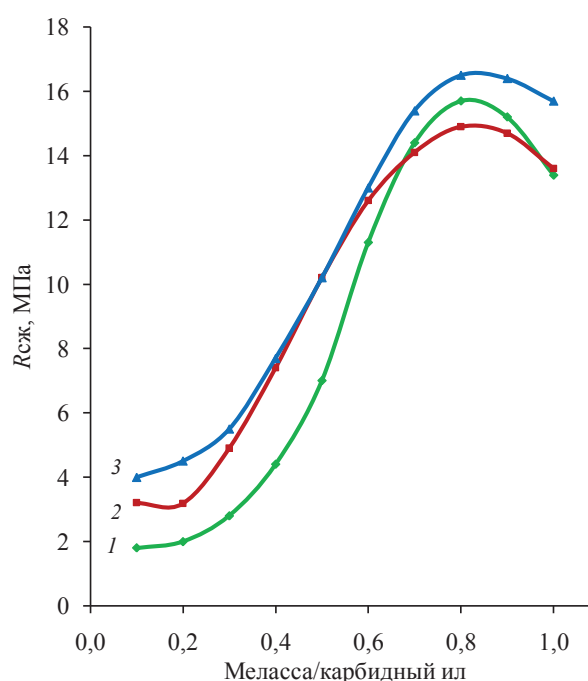


Рис. 5. Влияние многокомпонентного состава шихты на прочность топливных брикетов

1 — опилки; 2 — подсолнечная лузга; 3 — мякина (полова)

Как следует из рисунка, приемлемые по прочности составы шихты приходятся на область соотношений 0,4–0,8. В этом диапазоне прочность брикетов изменяется от 5,0 до 16,0 МПа. Максимум прочности для всех составов брикетов достигается при соотношении: меласса: карбидный ил, равном 0,8. По абсолютной величине прочности при сжатии наибольшие значения имеют образцы, содержащие мякину. По-видимому, податливость и эластичность («текучесть») мякины повышают пластичность шихты. Наличие пылеватой фракции придает дополнительную плотность упаковке частиц. Удлиненные плоские чешуйки от зерен создают армирующий эффект. В результате образуется высокопрочная композиция. В образцах с опилками армирующий эффект опилок снижается наличием упругих деформаций. Подсолнечная лузга при приложенном давлении прессования вследствие своей хрупкости частично измельчается и выпрямляется. Образцы с таким компонентом по структуре менее плотные, чем с мякиной и опилками, но достаточно прочные. Положительную роль в по-

вышении влагоустойчивости и технических характеристик топливных брикетов сыграло использование кальцийсодержащих добавок, отходов растительного происхождения, оптимальное соотношение компонентов и технологических приемов изготовления брикетов [14]. Способность древесно-растительных остатков содержать максимальное количество гигроскопической влаги в связанном состоянии, нивелировала снижение прочности брикетов за счет гигроскопичности мелассы. При длительном хранении (более трех месяцев) топливных брикетов в условиях высокой влажности окружающего воздуха (98–100 %) отмечалось снижение прочности брикетов не более чем на 1,0 %.

В табл. 3 приведены характеристики, в табл. 4 – результаты сравнительного сжигания опытной партии топливных брикетов.

Топливные брикеты воспламенялись от зажженных дров (как обыкновенный уголь крупных классов), горение не сопровождалось треском, выделением запахов, искр. Характер горения брикетов на связующем из мелассы с добавками и сортового угля сорта АМ практически идентичен. Термостойкость брикетов характеризуется как «хорошая», брикеты в процессе горения не рассыпаются, сохраняют свою форму, зольный остаток не спекается, по структуре пылевидный.

Таблица 3

Характеристики топливных брикетов экспериментальных партий

$R_{сбр}$	$R_{сж}$, МПа	W_t^r , %	A^d	V^{daf}	S_t^d	Теплота сгорания, МДж/кг	
						Q_s^{daf}	Q_i^r
Угольные брикеты							
100	12.0	7.9	8.5	6.3	1.00	27.75	33.44
Угольно-древесные брикеты							
100	16.6	4.4	197	29.0	0.81	21.55	28.60
Древесные брикеты							
100	17.5	1.0	9.5	76.4	0.08	15.92	18.09

Таблица 4

Результаты сравнительного сжигания топливных брикетов и угля

Вид топлива	Зольность A^d , %	Массовая доля влаги рабочего топлива W_t^r , %	Вес неперегоревшего остатка, %		Количество топлива, %	
			из топки	из поддувала	сгоревшего	несгоревшего (остаток)
Брикеты	13,9	4,0	1,05	12,95	64,5	35,5
Уголь, сорт АМ	9,0	3,2	1,5	8,7	75,2	24,8

Механизм образования прочных брикетов основывается на положениях физико-химической механики дисперсных систем [15]. Формирование структуры и свойств брикетов включает комплекс сложных протекающих одновременно физико-химических и физико-механических процессов. Основная роль при формировании структуры брикета принадлежит связующему. Под влиянием процессов, протекающих на границе контакта связующего с поверхностью адсорбента, происходит формирование структурирующих слоев вокруг углеродсодержащего компонента. При формировании структуры и прочности брикета важную

роль играет толщина адсорбционного слоя и когезия связующего в тонких слоях [16]. Взаимодействие углеродсодержащих частиц происходит через эти адсорбционные клеящие слои высокой степени упорядоченности. Прочность связи достигает максимума в том случае, когда клеящие прослойки в местах контакта становятся равными толщине адсорбционного слоя. Проявление сложных физико-химических процессов [17] на поверхности твердых углеродсодержащих частиц при смешивании со связующим усиливается в процессе прессования шихты. В начальной стадии формирования структуры прочность системы связана с возникновением коагуляционных структур. Дальнейшее упрочнение сопровождается превращением коагуляционных структур в конденсационно-кристаллизационные, обеспечивающие механическую прочность топливных композиций.

Вводимые кальцийсодержащие добавки интенсифицируют процесс отверждения, блокируют сахара и образуют с мелассой соединения, способствующие уплотнению и упрочнению структуры, созданию наиболее прочных связей, устойчивых к колебаниям влажностного и температурного режима окружающей среды. Присутствие в шихте волокнистых и игольчатых растительных остатков или древесных опилок, которые можно рассматривать как элементы короткой арматуры, влияет на прочность сцепления между частицами, способствуя их взаимному переплетению, создает эффект дисперсного армирования. Армирующий эффект наполнителей проявляется в формировании пространственных и компактных гетерополярных структурных связей, в дополнительном приросте прочности топливной композиции. Увеличение количества и площади контактов между частицами и интенсивность их сцепления усиливается при приложении давления прессования, когда имеет место максимальное контактирование и проявление адгезионно-когезионных свойств связующего к поверхности частиц составляющих компонентов шихты.

Заключение

Разработанная технология изготовления топливных брикетов не требует выполнения сложных операций и дорогостоящего уникального оборудования. Она включает следующие операции: подготовку материалов для брикетирования по гранулометрическому составу и влажности, приготовление связующего, смешивание всех ингредиентов в заданном соотношении, приготовление и прессование шихты, подсушка отформованных брикетов в естественных условиях, упаковка и складирование брикетов. Влажность отходов углеобогащения регулируется смешением их с древесно-растительными отходами. Особенности технологии — исключается принудительная сушка антрацитового штыба и угольного шлама, используется экологически чистое связующее, упрочнение отформованных брикетов происходит в естественных условиях окружающей среды, утилизируются угольные и древесностружечные отходы, растительные остатки сельскохозяйственной отрасли.

Топливные брикеты по всем показателям входят в число самых востребованных материалов. Масштабность решения проблем утилизации отходов, имеющих определенный энергетический потенциал, и дефицита угля позволяет рекомендовать разработанную технологию брикетирования мелкозернистых углеродсодержащих материалов и продукцию на их основе к широкому освоению в производстве и использованию в энергетических установках производственного и бытового назначения. По предложенной технологии брикетирования можно получать топливные брикеты с высокими потребительскими свойствами, конкурентоспособные на отечественном и мировом рынке.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.
2. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Влияние технологических параметров на качество топливных брикетов из мелкозернистых угольных отходов // Химия твердого топлива. 2015. № 5. С. 25–29.

3. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Получение топливных брикетов из мелких фракций антрацитов // Химия твердого топлива. 2014. № 4. С. 49–53.
4. Buravchuk N.I. and Guryanova O.V. Briquetting of Coal Products with a Binding Agent, published in *Khimiya Tverdogo Topliva*, 2016. No 6, pp. 352–356.
5. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Брикетирование угольных продуктов со связующим // Химия твердого топлива. 2016. № 6. С. 19–24.
6. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В., Огороков Е.П. и др. Влияние структурных и технологических факторов на прочность дисперсно-зернистых композитов на основе отходов углеобогащения // Труды III Всероссийской конференции по теории упругости с международным участием. Ростов-на-Дону. Азов. 13–16.10. Ростов-на-Дону. Новая книга. 2004. С. 101–103.
7. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Брикетирование антрацитовых штыбов со связующими. Сб. статей Международной научной конференции «Научные задачи технических наук и пути их решения» (20 февраля 2015 г.). Уфа. С. 16–23. Available at: aeterna-ufa.ru.
8. Елишевич А.Т. Брикетирование угля со связующими. М.: Недра. 1972. 180 с.
9. Воларович М.П., Гамаюнов Н.И., Цеплаков О.А. Роль влаги в процессе брикетирования гидрофильных дисперсных материалов. В сб. «Физико-химическая механика дисперсных структур». М.: Наука. 1966. С. 265–269.
10. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Пат. РФ 2149889 // Б.И. 2000. № 15.
11. Тайц Е.М., Андреева И.А. Методы анализа и испытания углей. М.: Недра. 1983. 301 с.
12. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В., Огороков Е.П. и др. Топливный брикет. Пат. РФ. 2205204 // Б.И. 2003. № 15.
13. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Состав для получения топливного брикета. Заявка на изобретение № 2016128381. 2016 г.
14. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Пат. РФ 2396306 // Б.И. 2010 г. № 22.
15. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. М.: Наука, 1979. 384 с.
16. Елишевич А.Т. Исследование механизма структурообразования в процессе брикетирования // Химия твердого топлива. 1978. № 6. С. 60–68.
17. Петровская Н.И. Брикетирование шламов станций нейтрализации рудничных вод медьдобывающих предприятий на основе брикетирования: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Екатеринбург. 2002. 21 с.

References

1. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 g. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 13 noyabrya 2009 g. No. 1715-r.* [Energy strategy of Russia for the period until 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of November 13, 2009, No. 1715-r].
2. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. (2015) *Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov na kachestvo toplivnykh briketov iz melkozernistykh ugol'nykh otkhodov* [Influence of technological parameters on the quality of fuel briquettes from fine-grained coal waste] *Khimiya tverdogo topliva* [Chemistry of Solid Fuel]. No. 5, pp. 25–29.
3. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. (2014) *Poluchenie toplivnykh briketov iz melkikh fraktsiy antratsitov* [Obtaining fuel briquettes from small fractions of anthracites] *Khimiya tverdogo topliva* [Chemistry of solid fuels]. No. 4, pp. 49–53.
4. Buravchuk N.I. and Guryanova O.V. (2016) Briquetting of Coal Products with a Binding Agent, published in *Chemistry of solid fuels*. No 6, pp. 352–356.
5. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. (2016) *Briketirovanie ugol'nykh produktov so svyazuyushchim* [Briquetting of coal products with a binder] *Khimiya tverdogo topliva* [Chemistry of solid fuels]. No. 6, pp. 19–24.
6. Buravchuk N.I., Guryanova O.V., Okorokov E.P. et al. (2004) *Vliyanie strukturnykh i tekhnologicheskikh faktorov na prochnost' dispersno-zernistykh kompozitov na osnove otkhodov ugleobogasheniya* [Influence of structural and technological factors on the strength of dispersed-granular composites based on coal enrichment]

waste] *Trudy III Vserossiyskoy konferentsii po teorii uprugosti s mezhdunarodnym uchastiem. Rostov-na-Donu. Azov. 13–16.10. Rostov-na-Donu. Novaya kniga* [Proceedings of the III All-Russian Conference on the Theory of Elasticity with International Participation. Rostov-on-Don. Azov. 13–16.10. Publishing house «A new book»]. Rostov-on-Don, pp. 101–103.

7. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. (2015) *Briketirovanie antratsitovykh shtybov so svyazuyushchimi* [Briquetting of anthracite scraps with binders] *Sb. statey Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Nauchnye zadachi tekhnicheskikh nauk i puti ikh resheniya» (20 fevralya 2015 g.)* [Collection of Articles of the International Scientific Conference «Scientific problems of engineering sciences and ways to solve them» (February 20, 2015)]. Ufa, pp. 16–23, Website: aeterna-ufa.ru.

8. Elishevich A.T. (1972) *Briketirovanie uglya so svyazuyushchimi* [Briquetting of coal with binders] *Nedra* [Nedra]. Moscow. 180 p.

9. Volarovich M.P., Gamayunov N.I., Tseplakov O.A. (1966) *Rol' vlagi v protsesse briketirovaniya gidrofil'nykh dispersnykh materialov* [The role of moisture in the process of briquetting of hydrophilic dispersed materials] *V sb. «Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur»*. Nauka [Collection «Physico-chemical mechanics of disperse structures». Publ. Nauka]. Moscow, pp. 265–269.

10. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. Pat. RF 2149889. B.I. 2000. No. 15.

11. Taits E.M., Andreeva I.A. (1983) *Metody analiza i ispytaniya ugley* [Methods of analysis and testing of coals] *Nedra* [Nedra] Moscow. 301 p.

12. Buravchuk N.I., Guryanova O.V., Okorokov E.P. *Toplivnyy briket* [Fuel briquette]. Pat. RF. 2205204. B.I. 2003. No. 15.

13. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. (2016) *Sostav dlya polucheniya toplivnogo briketa. Zayavka na izobretenie* [Composition for the production of fuel briquette]. Application for invention No. 2016128381.

14. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. Pat. RF 2396306 // B.I. 2010 No. 22.

15. Rebinder P.A. (1979) *Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika. Izbrannye Trudy* [Surface phenomena in disperse systems. Physico-chemical mechanics. Selected works] *Nauka* [Nauka]. Moscow, 384 p.

16. Elishevich A.T. (1978) *Issledovanie mekhanizma strukturoobrazovaniya v protsesse briketirovaniya* [Investigation of the mechanism of structure formation in the process of briquetting] *Khimiya tverdogo topliva* [Chemistry of solid fuel]. No. 6, pp. 60–68.

17. Petrovskaya N.I. (2002) *Briketirovanie shlamov stantsiy neytralizatsii rudnichnykh vod med'dobyvayushchikh predpriyatiy na osnove briketirovaniya* [Briquetting of slimes of neutralization stations of mine waters of copper-mining enterprises on the basis of briquetting] *Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk* [Abstract of Thesis for the degree of Ph.D. of Engineering]. Ekaterinburg, 21 p.