

вертикальная скорость спекания шихты).

Для стабилизации процесса спекания шихты с частичной заменой угля «АШ» торфом необходимо обеспечить дополнительный нагрев поверхности зажигаемого слоя шихты в сравнении с шихтой общепринятой (суглинок-возврат-уголь «АШ»).

На основные качественные характеристики аглопорита при частичной замене угля «АШ» торфом решающее влияние оказывает режим зажигания шихты.

Результаты заводских испытаний с использованием сырьевой смеси фрезерного торфа и дробленных топливных брикетов показали, что прочность и плотность аглопорита и керамического кирпича соответствуют республиканским стандартам.

УДК622.7: 622

### **ВОЗМОЖНОСТЬ РАСШИРЕНИЯ ИНТЕРВАЛА ПРИГОДНОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

**Березовский Н.И., Воронова Н.П., Костюкевич Е.К., Грибкова С.М., Лесун Б.В.**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

*Представлены комплексные малоотходная технология добычи и переработки нерудных строительных материалов, где вскрышиная порода при добыче силикатного песка может использоваться в технологии получения некоторых пористых строительных материалов на основе аглопорита и керамического кирпича, метод определения теплофизических характеристик различных материалов.*

Большое количество отходов и потерь на горно-перерабатывающих предприятиях обуславливает необходимость решения проблемы: рационального использования минеральных ресурсов.

Аглопоритовый щебень и песок – искусственные пористые материалы, полученные дроблением спеков, образующихся в результате термической обработки гранулированных шихт из алюмосиликатных и силикатных материалов природного происхождения или отходов промышленности методом агломерации. Применяют их в качестве заполнителя при изготовлении конструкционно-теплоизоляционных и конструкционных легких бетонов, а также в качестве утепляющих засыпок.

Структурно-механические свойства сырьевых материалов определяют соответствующие методы их подготовки к термической обработке. Основная технологическая операция при производстве аглопорита это спекание шихты на решетке агломерационной машины непрерывного действия, где теплота сгорания топлива должна быть выше 4000 ккал/кг. Спеканию подвергаются малопластичные глинистые породы, которые при обжиге не вспучиваются. Некоторые вскрышные породы горных предпри-

ятий Республики Беларусь, где добывают гравийно-песчаные смеси, отвечают этим требованиям. За счет горения угля, который вводится в шихту, развивается температура до 1300 К. Это приводит к спеканию шихты в виде пористой остеклованной массы. Следует отметить, что протекающие процессы тепломассопереноса не заканчиваются в зонах сушки и нагрева, а накладываются друг на друга и в большей части по всей длине ленты развиваются параллельно.

При производстве аглопорита преимущественно применяют природные глинистые породы, хотя с экономической точки зрения для этой цели целесообразно использовать отходы промышленности. Добавки выбирают с учетом наличия местных сырьевых ресурсов и характеристик основных компонентов шихты. При избыточном количестве топлива в топливосодержащем сырье в шихту вводят возврат, а также горелую или глинистую породу, а при недостатке топлива – уголь или углесодержащую добавку. Введение в шихту древесных опилок (до 10 %) и лигнина (до 25 % по объему) увеличивает пористость и ускоряет процессы горения топлива и спекания. Добавка сухой золы тепловых электростанций (ТЭС) снижает влажность обводненных глин и расход топлива за счет содержащихся в ней прокаленных минералов и несгоревшего углерода. Добавки вводят для улучшения гранулирования и повышения прочности гранул при их транспортировании и обжиге. Содержание топлива в шихте при использовании глинистых пород обычно 6-8 %, золы ТЭС – 10-12 % по массе. Предельный размер гранул (зерен) шихты не должен превышать 10-12 мм, а размер составных ее частей: исходного сырья – 5, угля – 3, твердых добавок от 5 (плотных) до 10 (пористых) мм.

В настоящее время в Беларуси активно развиваются исследования, направленные на экономию технологического привозного топлива, при одновременной замене дефицитных видов на местные, например, торф, сапрпель, промышленные отходы, содержащие значительное количество органических веществ (лигнин, древесные опилки и др.)

При агломерации силикатного сырья замена антрацитового штыба на местные виды топлива является актуальной проблемой, однако, использование топлива с малой теплотворной способностью требует разработки способов более эффективного их сжигания в агломерируемом слое шихты.

Систематизация накопленного экспериментального материала позволила выявить ряд общих закономерностей, характерных для агломерации шихт как на основе глинистого, так и железорудного сырья. Так, по мере уменьшения крупности топливных частиц заметно повышается восстановительный потенциал продуктов горения и снижается высота окислительной зоны, снижение крупности топлива с 7,2-9 мм до 4,8-6,0 мм приводит к уменьшению степени использования углерода с 7 до 14 %.

Аналогичные результаты приводятся по данным при сжигании топлива различной крупности с одновременным замером температур в слое и состава отходящего газа. С повышением крупности топлива абсолютные температуры в зоне горения возрастают, а газовая фаза обогащается двуокисью углерода. Теоретические расчеты подтверждают снижение температурного уровня процесса при использовании мелкого топлива в сравнении с более крупным.

Известно, что по степени углефикации можно прогнозировать возможную скорость спекания шихты, а, следовательно, и скорость горения топлива на основе тех или иных отходов углеобогащения. Так, низкометаморфизованные отходы с содержанием углерода в горючей массе менее 75 % позволяют (при прочих оптимальных условиях) достичь вертикальной скорости спекания шихты 13-23 мм/мин; среднеметаморфизованные отходы с содержанием углерода в горючей массе 75-90 % – 8-15 мм/мин; высокометаморфизованные отходы с содержанием углерода в горючей массе более 90 % – 4-10 мм/мин.

При спекании суглинков с использованием углей с содержанием летучих до 28-30 % процесс агломерации интенсифицируется. При увеличении же содержания летучих в углях свыше 28-30 %, например до 37 %, процесс агломерации замедляется. И в первом случае, и во втором наблюдается значительный унос летучих в газоды. Изучение химической активности и процессов газообразования при сжигании топлива различного вида в агломерируемом слое шихты показало, что с ростом химической активности топлива и с уменьшением его крупности восстановительная способность продуктов горения усиливается, что находит свое выражение в увеличении отношения  $CO/CO_2$ . Выше произведенные закономерности указывают на целесообразность использования, как торфа, так и сапропелей в качестве технологического топлива при рациональных способах их окискования и сжигания летучих.

На аглопоритовых предприятиях в качестве технологического топлива с малой теплотворной способностью применяется каменный и бурый уголь. Например, бурый уголь имеет следующие характеристики: марка угля – Б2, содержание серы на рабочую массу – 1-2 %; содержание углерода на рабочую массу – 41,1 %; содержание водорода на рабочую массу – 2,4 %; содержание азота на рабочую массу – 9,1 %; влажность на рабочую массу – 36 %; зольность на рабочую массу – 10 %; выход летучих на рабочую массу – 33 %; низшая теплота сгорания – 3380 ккал/кг.

При замене антрацита топливом с содержанием 28-30 % летучих процесс агломерации суглинков интенсифицируется, но зона горения растягивается. При увеличении содержания летучих в углях более 28-30 % процесс агломерации замедляется. Качественная характеристика аглопо-

рита, спекаемого с различными видами технологического топлива, практически не изменяется.

Однако при замене антрацита топливом с большим содержанием летучих часть их не успевает сгореть. Поэтому использовать топливо с большим содержанием летучих по общепринятой технологии производства аглопорита с учетом экологических соображений не целесообразно. Исследования показывают, что применение смеси топлива, состоящей из одной части антрацита и двух частей угля с большим содержанием летучих, за счет повышения температуры горения топлива в слое позволяет добиться большей полноты сгорания летучих.

Анализ теплотехнических характеристик торфа позволяет допустить использование торфа как технологического топлива при производстве аглопорита. Например, теплота сгорания горючей массы торфа колеблется от 3500 до 3700 ккал/кг, т.е. в сравнительно незначительных пределах. Теплота сгорания рабочей массы торфа колеблется в широких пределах в зависимости от влажности массы и ее зольности.

В процессе исследования получения аглопоритового щебня и песка с использованием фрезерного торфа определен оптимальный состав шихты по результатам предварительных исследований.

Необходимо отметить, что оптимальная влажность сырьевой смеси зависит от вида применяемого торфа. Высота укладываемого слоя для шихты с применением торфа не превышает 310 мм, что сказывается на скорости ее спекания. Разрежение при агломерации составляет 0,02 МПа.

Температура зажигания шихты 1000-1100 °С. Расход газа при этом не увеличивается. Вертикальная скорость спекания шихты составляет 4-6 мм/мин. Съем продукции по составам шихты составил 180-210 кг/м<sup>2</sup> с учетом выхода недожога.

Полученные аглопоритовый щебень и песок с применением фрезерного торфа и древесных опилок по показателям прочности и плотности соответствовал требованиям стандарта, согласно которому по показателям насыпной плотности аглопоритовый щебень и песок относятся к марке 600 (фракция 20-40 мм и 10-20 мм); к марке 700 (фракция 5-10 мм); к маркам 1000-1100 (фракция менее 5 мм). По показателям прочности аглопоритовый щебень относится к марке 75 (фракция 20-40 мм и 10-20 мм); к марке 200-250 (фракция 5-10 мм).

Представляет также практический интерес использование в технологии увеличение крупности частиц (фракционного состава) торфа до 10 мм с целью повышения его массы, что вызовет повышение температуры в спекаемом слое, изменение режимов полукоксования торфа и параметров агломерационного процесса, в частности выхода недожога. Большое значение имеет также изучение качественных показателей аглопорита, спекаемого с

различными видами технологического топлива, в которых различное содержание летучих веществ, что может увеличить выход недожога и повлиять на экологическую обстановку территории.

Работа действующих аглопоритовых предприятий, которые используют в качестве технологического топлива низкосортные угли позволяет рекомендовать проведение исследований по разработке технологических параметров производства аглопорита при замене угля и древесных опилок на местные виды топлива (фрезерный торф – топливный, для компостирования, топливные дробленые брикеты, сапропель и др.).

Опыт показывает, что неудачное конструктивное решение или неправильный режим охлаждения шихты приводит к низкому качеству полученного спекшегося прочного пористого конгломерата. Особое значение приобретает теплофизическое обоснование рациональных режимов охлаждения. В связи с этим актуальной задачей является исследование распределения поля температур внутри шихты в зависимости от различных скоростей движения ленты агломерационной машины, а, следовательно, от времени охлаждения.

Математическая модель процессов охлаждения с движущейся лентой в общем случае должна содержать сопряженные системы уравнений, описывающие различные физические процессы: затвердевание шихты; оплавление поверхности; перераспределение примесей, газов и др. Недостаточная изученность ряда физических явлений, сложность системы дифференциальных уравнений вынуждают упростить математическую формулировку задачи, описывающую охлаждение шихты.

В последнее время наблюдается тенденция изучения динамики затвердевания с помощью численных методов решения краевых задач для уравнения теплопроводности. Этот подход связан со значительными затратами времени на составление и отладку программ. Однако во многих случаях реальных теплотехнологических процессов не требуется та высокая степень точности, которую дают аналитические либо численные методы моделирования. В таких случаях можно воспользоваться упрощенными, так называемыми, инженерными способами расчетов, позволяющими проектировщику или технологу с достаточной для практических целей степенью точности определить технологически важные параметры процесса.

При исследовании процесса охлаждения шихты после расплава и сгорания вкраплений, необходимо знать, как перемещается в расплаве фронт затвердевания, как распределяются температуры в сечении твердой корки и каково время окончания затвердевания.

Процесс спекания шихты в производстве аглопорита с применением агломерационной машины делится на 4 этапа:

1. Испарение гигроскопической влаги при температурах до 100 °С.

2. Подогрев слоя шихты при температуре от 100 до 800 °С (в этот период происходит дегидратация глинистых минералов и гидроокислов железа).
3. Воспламенение топлива, находящегося в шихте (в этот период при температуре 800-1600 °С железные окислы восстанавливаются до закисного состояния и способствуют образованию жидкой фазы, происходит спекание зерен внутри отдельных частиц и контактное спекание их между собой, в результате сыпучий слой превращается в спекшийся пористый конгломерат).
4. Охлаждение конгломерата (в этот период завершаются процессы кристаллизации магнетита и акристобалита,  $\alpha$  кварц переходит в  $\beta$  кварц, при этом кристаллическими фазами являются: кварц, полевой шпат, кристобалит и муллит).

Сейчас в республике особую актуальность приобретают вопросы расширения исследований по экономии технологического топлива и замене дефицитных и дорогостоящих импортных на местные виды, такие как различные виды торфа, сапрпель, отходы торфобрикетного производства, которые имеют высокую теплоту сгорания и содержащие значительное количество органических веществ. При использовании силикатного сырья или утилизации вскрышных пород в агломерации замена импортных видов топлива на местные являются актуальной проблемой, а использование топлива с низкой теплотворной способностью требует разработки новых способов по обогащению, усреднению и определению оптимальных сырьевых составов с целью более эффективного их сжигания в агломерируемом слое шихты.

В цехе теплоизоляционных материалов ОАО «Минский завод строительных материалов» были проведены промышленные испытания щебня и песка аглопоритовых с использованием фрезерного торфа ОАО «Торфобрикетный завод Усяж» и выпущена опытная партия аглопорита в количестве 230 м<sup>3</sup>.

В процессе проведения испытаний контролировались следующие технологические параметры:

- дозировка компонентов шихты;
- влажность компонентов шихты;
- гранулированный состав шихты;
- влажность шихты;
- скорость движения машины;
- высота слоя спекаемой шихты;
- разрежение в вакуум-камерах агломерационной машины.

Определялись:

- визуальная характеристика коржа со стороны разгрузки машины;
- качественные показатели полученного аглопорита.

Использовались вскрышные породы (суглинки) месторождения гравино-песчаных смесей «Фаниполь», которые по физико-химическому составу могут использоваться для производства аглопорита. В качестве добавок использовался низинный фрезерованный торф степенью разложения 20 %, влажностью 50 %, зольность 10 %. В состав брикетов входил фрезерованный торф (90%) и древесные опилки (10 %). В смеси состав бурого угля был уменьшен на 3 % и добавлены дроблённые брикеты фракционным составом 0-5 мм.

Известно, что при исследовании веществ неоднородной структуры, пористых тел, к которым относится торф, существенную роль играет коэффициент теплопроводности. Существует ряд методов для определения коэффициента теплопроводности, которые исследуют зависимость коэффициента от температуры, влажности, структуры торфа по отдельности. Эквивалентный коэффициент теплопроводности ( $\lambda_s$ ) складывается из компонентов молекулярной ( $\lambda$ ), конвективной ( $\lambda_k$ ) и лучистой ( $\lambda_l$ ) теплопроводности:

$$\lambda_s = \lambda + \lambda_k + \lambda_l.$$

В капиллярно-пористом теле при малых перепадах температуры передача тепла конвекцией и излучением в порах тела мала по сравнению с передачей молекулярной теплопроводностью.

Нами предложен комплексный метод определения теплофизических характеристик различных материалов, с помощью которого был исследован торф кусковой, измельченный, фрезерный и брикетированный. Известно, что изменение коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры и влагосодержания описывается соотношением:

$$\lambda = \lambda_0 + A t u e^{-b u},$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности абсолютно сухого тела при 0 °С, ккал/м·ч·°С;

$A$  и  $b$  – постоянные,

$t$  – температура, °С;

$u$  – влагосодержание торфа, %.

В расчетах использовались измерения при температурах 10 и 15 °С, соответственно со средним влагосодержанием 58 и 69 %,  $\lambda_0 = 0,06$  ккал/м·ч·°С. Получены аналитические зависимости коэффициента теплопроводности для рассмотренных разновидностей торфа.

Так, для торфа брикетированного получилась аналитическая зависимость коэффициента теплопроводности от температуры и влагосодержания в виде:

$$\lambda = \lambda_0 + 10,59tue^{-1,81u}.$$

Использование таких функциональных зависимостей для теплофизических коэффициентов торфа позволяет оптимизировать процессы сушки и брикетирования торфа.

Предлагаемая комплексная малоотходная технология добычи и переработки нерудных строительных материалов, где вскрышная порода (суглинка) при добыче силикатного песка на карьере «Фаниполь» Минского района могут использоваться в технологии получения некоторых пористых строительных материалов на основе аглопорита и керамического кирпича на ОАО «Минский завод строительных материалов». Также в качестве импортозамещающих материалов нами предлагается использовать местные виды топлива на основе фрезерного торфа, топливных брикетов и древесные опилки. Это позволит не только уменьшить себестоимость аглопорита и керамического кирпича, но и получить значительный экономический эффект при выпуске единицы продукции.

#### Литература

1. Березовский, Н.И. Природные ресурсы и их использование / Н.И. Березовский, Е.К.Костюкевич. // Минск : БНТУ. – 2005. – 188 с.
2. Сырьевая смесь для получения аглопорита. – Решение о выдаче патента на изобретение № а20111621 от 31.05.2013 г. Авторы Н.И. Березовский, Н.П. Воронова, Е.С. Драгун, Е.К. Костюкевич и др.
3. Березовский Н.И., Воронова Н.П., Грибкова С.М., Лесун Б.В., Драгун.Е.С. // Некоторые вопросы утилизации сырья при обогащении на горно-перерабатывающих предприятиях Беларуси /Горная механика №3, 2013. –с. 25–35.

УДК 622.258

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОННОЙ СМЕСИ ДЛЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Борщевский С.В., Михеева А.А.**

*Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина*

*В статье представлены результаты исследований воздействия омагниченной воды на прочностные характеристики бетонной крепи стволов в условиях агрессивной среды.*

Важнейшим элементом большинства горнодобывающих предприятий являются вертикальные стволы, которые по своему конструктивному исполнению и безопасности эксплуатации должны отвечать самым высоким требованиям.

В связи с этим все больше актуализируется вопрос разработки и применения наиболее инновационных и высокопрочных материалов для сооружения бетонного крепления вертикальных стволов. Особую роль в