

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕСТНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА
И ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ
В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОРИСТЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ

Минск
БНТУ
2014

УДК 691–405.8:662.63/.64

А в т о р ы :

Н. И. Березовский, Н. П. Воронова,

С. М. Грибкова, Б. В. Лесун

Использование местных видов топлива и вторичных энергоресурсов в производстве пористых строительных материалов / Н. И. Березовский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – 129 с. – ISBN 978-985-550-657-8.

В издании рассмотрены вопросы использования местных видов топлива и вторичных энергоресурсов в производстве пористых строительных материалов.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованием местных видов топлива, вторичных энергоресурсов и пористых строительных материалов, а также для студентов вузов.

Табл. 56. Ил. 19. Библиогр. 52 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол № 10 от 17.10.2014 г.)

Р е ц е н з е н т ы :

зав. кафедрой «Кораблестроение и гидравлика» БНТУ,
д-р техн. наук, профессор *И. В. Качанов*;

ведущий научный сотрудник лаборатории
физико-химической механики природных дисперсных систем
ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси»,
канд. техн. наук, доцент *А. М. Абрамец*

ISBN 978-985-550-657-8

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Анализ вариантов оптимального использования местных видов топлив и вторичных энергетических ресурсов при производстве пористых строительных материалов.....	12
1.1 Оценка вариантов энергоэффективного использования органогенных материалов	12
1.2 Проведение патентных исследований по использованию топлива и вторичных энергоресурсов для ПСМ.....	19
1.3 Обоснование технологических параметров и физико-механических свойств сырья, применяемого в процессах при изготовлении пористых строительных материалов.....	25
1.4 Анализ использования в промышленности вторичных энергоресурсов.....	29
Выводы по разделу 1.....	35
2 Разработка методики определения состава и усреднения сырьевой смеси для улучшения качественных показателей ПСМ...37	
2.1 Проведение теоретических исследований по энергетической эффективности МВТ по обогащению и усреднению сырьевых смесей.....	37
2.2 Использование имитационного моделирования при разработке критерия оптимизации обогащения сырьевой смеси...40	
2.3 Разработка модели для управления процессом агломерации.....	46
Выводы по разделу 2.....	55
3 Определение степени влияния основных свойств торфа и топливных брикетов на технологические параметры и физико-механические свойства получения строительных материалов.....	56
3.1 Определение основных свойств сырьевой смеси и качественных показателей аглопорита.....	56
3.1.1 Методика проведения опытов.....	64
3.1.2 Технологические свойства и физико-технические параметры сырьевой смеси и аглопорита.....	65
3.2 Определение основных физико-механических и химических свойств сырьевой смеси для производства керамического кирпича с введением в состав сырьевой смеси фрезерного торфа и ВТЭР....	72

3.2.1 Физико-механические параметры образцов керамического кирпича, полученных лабораторным способом.....	75
3.2.2 Методика проведения испытаний.....	77
3.3 Разработка критерия оптимизации процесса сушки керамических изделий.....	79
3.3.1 Определение качественных показателей полученных изделий в производственных условиях.....	83
3.3.2 Определение основных свойств фрезерного торфа и топливных брикетов после их переработки в валковых дробилках.....	85
3.3.3 Разработка модели усреднения сырья по влажности.....	90
3.4 Разработка модели процесса агломерации сырьевой смеси с применением ортогонального композиционного планирования эксперимента.....	93
3.5 Разработки математической модели для оптимизации процесса обжига керамических изделий.....	99
3.6 Испытания блоков керамических поризованных пустотелых с использованием МВТ и ВТЭР.....	110
3.7 Влияние источников пылевыведения на экологические факторы на МЗСМ.....	112
3.7.1 Расчет количеств пыли от работы технологического оборудования.....	113
3.8 Разработка рекомендаций по промышленному внедрению проведенных исследований.....	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	124

Нормативные ссылки

- 1С СТБ 1160-99 «Кирпич и камни керамические»;
- 2С СТБ 1217-2000 «Щебень и песок искусственные пористые»;
- 3С СТБ 1217-2000 «Щебень аглопоритовый»;
- 4С СТБ 917-2006 «Торф фрезерный для производства топливных брикетов. ТУ»;
- 5С СТБ 832-2001 «Торф для приготовления компостов. ТУ»;
- 6С СТБ 2062-2010 «Торф топливный фрезерный. ТУ»;
- 7С СТБ 2229-2011 «Торф верховой фрезерный. ТУ»;
- 8С СТБ 1919-2001 «Брикеты топливные на основе торфа»;
- 9С СТБ 2042-2010 «Торф. Методы определения влаги и зольности»;
- 10С СТБ 1687-2006 «Торф. Правила приемки и методы отбора проб»;
- 11С ГОСТ 7.32-2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе».

Список сокращений в тексте

A^C – зольность, %;
 R – степень разложения торфа, %;
 W – влажность, %;
БД – база данных;
ВР – водорастворимые вещества;
ВТЭР – вторичные энергоресурсы;
ГПС – гравийно-песчаные смеси;
ЛГ – легкогидролизуемые вещества;
МВТ – местные виды топлива;
НСМ – нерудные строительные материалы;
ПДК – пределы допустимых концентраций;
ППП – потери при прокаливании;
ПСМ – пористые строительные материалы;
 pH – кислотность;
ТБЗ – торфобрикетный завод;
ТНПА – технические нормативные правовые акты;
ЭСБ – энергосбережение;
МЗСМ – Минский завод строительных материалов;
БНТУ – Белорусский национальный технический университет;
ГНУ – Государственное научное учреждение.

ВВЕДЕНИЕ

Решение задач экономического и социального развития требуют совершенствования технологических процессов в целях снижения энергоемкости производства и себестоимости продукции за счет использования местных видов топлива и вторичных энергетических ресурсов на основе фрезерного торфа, топливных брикетов, древесных опилок, лигнина, соломы и других видов. В технологии производства аглопорита и керамического кирпича в Республике Беларусь в настоящее время используют дорогостоящий импортный материал – антрацит или каменный уголь, который добывают на Украине.

Сейчас в Республике Беларусь идет развитие исследований по экономии технологического топлива и замене дефицитных и дорогостоящих импортных материалов на местные виды, такие как различные виды торфа, сапрпель, отходы торфобрикетного производства (лом брикетов), которые имеют высокую теплоту сгорания и содержащие значительное количество органических веществ. При использовании силикатного сырья или утилизации вскрышных горных 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, а также при сушке и обжиге в технологии получения керамических изделий. Вопросами обогащения и усреднения сыпучих горючих материалов занимались многие ученые Б.М. Авдохин, Б.А. Богатов, И.И. Лиштван, О.А. Мисников и другие [1-8].

Выступая на постоянно действующем семинаре руководящих работников Республики Беларусь 15–16 декабря 2011 г. «Импортозамещение как важный фактор достижения сбалансированного развития экономики Республики Беларусь», Президент Республики Беларусь А.Г. Лукашенко, указал, что импортозамещение является важнейшим элементом экономической политики и инструментом достижения главной цели – выхода на положительное сальдо внешней торговли товарами и услугами. Президент отметил, что в энергетике в ближайшее время необходимо не менее четверти объема

электрической и тепловой энергии производить за счет использования местных видов топлива, вторичных энергоресурсов и альтернативных источников энергии, а также уменьшить импортность в строительстве и ввести жесткое нормирование расхода материальных и энергетических ресурсов. В состав МВТ входят в основном торф, древесина, а ВТЭР образуется из отходов деревообработки (опилки), из технологии получения технического спирта (лигнин), которые использовались ранее в лабораторных исследованиях МЗСМ.

Основными направлениями экономии энергоресурсов являются: совершенствование технологических процессов, оборудования, снижение потерь топливно-энергетических ресурсов, структурные изменения в технологии производства, улучшение качества топлива и энергии. Следует развивать производства, имеющие высокую долю местных ресурсов, а также более глубокую их переработку. Это производство стройматериалов, деревообработка, химическая и топливная отрасли. Республика Беларусь располагает сырьевыми топливными ресурсами торфа, продуктами его добычи и переработки (торф для брикетирования и пылевидного сжигания, брикеты, кусковой торф), бурого угля, нефти, горючих сланцев, дров. Торфяное топливо в настоящее время играет значительную роль в обеспечении потребности Республики Беларусь в твердом топливе, в первую очередь в обеспечении потребности населения и коммунально-бытовых потребителей. В недрах Республики Беларусь имеются значительные запасы торфа, рациональное освоение которых может способствовать повышению эффективности в ряде отраслей экономики [3].

Одним из наиболее распространенных и эксплуатируемых видов горючих полезных ископаемых страны является торф, широко используемый для нужд сельского хозяйства и в качестве коммунально-бытового топлива. В составе торфяного фонда Беларуси имеются запасы особо ценных видов сырья: битуминозного, малоразложившегося сфагнового (гидролизного) и грязелечебного. Торф как молодое образование органогенной природы в ряду каустобиолитов сохраняет и накапливает много ценных свойств растений-торфообразователей, концентрирует их в своей структуре. Это обстоятельство выдвигает его в разряд ценных и уникальных сырьевых ресурсов. Рациональное освоение этого природного ресурса,

означает полное ресурсосберегающее использование потенциальной ценности этого сырья с получением широкого набора различных продуктов, не имеющих аналогов при переработке других видов природных ресурсов. Вопросами исследования торфа и его использования в промышленности занимались и занимаются долгое время И.И. Лиштван, Н.Н. Бамбалов, Г.П. Бровка, Б.А. Богатов, Г.А. Камышенко, Л.С. Лис и др. [9-18].

В Государственной программе «Торф» предусмотрено увеличение добычи торфа для топливных целей на период до 2020 г.: 2015–4380, 2020–5100 тыс.т. Выполнение новых задач в области торфяных ресурсов связано также с обновлением некоторых нормативных документов и, в частности, с разработкой нового варианта «Схемы рационального использования и охраны торфяных ресурсов Республики Беларусь на период 2010-2020 годов». В последние годы экономика Республики Беларусь испытывает постоянный дефицит в энергетическом сырье, в состав которого входят различные виды углей, антрацит, которые используются при производстве аглопорита.

В течение последнего десятилетия в энергетике наблюдается тенденция к росту использования биотоплива – древесины и растительной биомассы (как отходов, так и специально культивируемых культур), бытовых отходов. Эта тенденция вписывается в современную стратегию устойчивого развития, поскольку биомасса практически не содержит золы и серы и относится к возобновляемым энергоресурсам, использование которых позволит оптимизировать потребление ограниченных запасов торфа и смягчить проблемы выбросов в атмосферу вредных продуктов сгорания и захоронения отходов. В то же время биомассе как энергетическому топливу присущи определенные недостатки. В настоящее время в Республике Беларусь сжигаются или газифицируются отходы древесины влажностью до 40–60%, имеющие низкую теплотворную способность, что требует максимального приближения энергетических объектов к источникам топлива [26-32].

В работе рассматриваются вопросы исследования в лабораторных и производственных условиях использования местных видов топлива и вторичных энергоресурсов на основе фрезерного торфа, продуктов его переработки и древесных опилок в технологии получения аглопорита и керамического кирпича рядового полнотелого

одинарного, а также блока керамического поризованного пустотелого. Разработаны научные основы процесса агломерации сырьевой смеси, процессов сушки и обжига материалов для производства пористых строительных материалов, включающие математические модели:

- процессов рациональной загрузки шихты и охлаждения с движущейся лентой;
- зависимости между прочностью аглопорита и его составом шихты при различном содержании угля и лома брикетов;
- зависимости водопоглощения и прочности керамического рядового кирпича от его плотности;
- технологии тепловой работы агломерационной машины с расчетом его длины при заданных скоростях движения паллет;
- зависимости прочности аглопорита от его плотности с различными видами выгорающих добавок (торф и древесные опилки);
- для керамического рядового кирпича, полученные методом математического планирования;
- для оптимизации теплотехнологических процессов нагрева, сушки и обжига керамических стеновых.

Сформулированы основные рекомендации для усовершенствования технологии получения пористых строительных материалов на основе аглопорита и керамического кирпича. В работе рассмотрены вопросы комплексного использования местных видов топлива и вторичных энергоресурсов в производстве некоторых пористых строительных материалов на основе аглопорита, кирпича и блоков керамических, которые широко применяются в промышленности как теплоизоляционный материал, и входят в состав бетонной смеси, а также строительных материалов. Проведены лабораторные и промышленные испытания на ОАО «Минский завод строительных материалов» с целью ввода в состав сырьевой смеси торфа вместо дорогостоящих выгорающих составляющих добавок (антрацит, уголь, древесные опилки) в производстве керамического кирпича и аглопорита. Результаты исследований показали, что качественные показатели аглопорита и керамического кирпича (прочность, плотность, морозостойкость, водопоглощение и др.) соответствуют нормативным показателям [1С-3С].

Внедрение научных разработок в производство позволит получить значительный экономический эффект за счёт разницы цен со-

ставляющих сырьевой смеси и уменьшения энергозатраты при их сушке и обжиге.

Для достижения этой цели следует развивать производства, имеющие высокую долю местных ресурсов, а также более глубокую их переработку. Это производство стройматериалов, деревообработка, химическая и биотехнологическая отрасли и др.

На заводах строительных материалов выпускается аглопоритовый песок, гравий и щебень, которые применяются в промышленности как теплоизолирующие материалы и в качестве добавок в разные виды бетонов, а также теплоизоляционных засыпок. На строительных заводах также в больших объемах выпускаются различные виды керамических блоков и кирпича, которые за счет выгорающих добавок имеют пористую структуру, которая значительно уменьшает вес изделия при допустимых нормативных показателях по прочности, плотности, водопоглощению и морозостойкости.

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

В технологии получения некоторых строительных материалов (кирпич керамический, аглопорит) используются дорогостоящие компоненты и сырьевой смеси (уголь, антрацит, опилки древесные). Проведенные исследования показали возможность применения некоторых видов фрезерного торфа, а также дробленых топливных брикетов с размером частиц до 5 мм. В данной технологии это позволяет уменьшить себестоимость продукции, а также энергозатраты при производстве 1 т товарной продукции. В результате решается актуальная задача разработки энергосберегающей и экологически безопасной технологии получения ПСМ с использованием местных видов топлив; ВТЭР и отходов промышленности (вскрышные породы, недожог сырьевой смеси и др.). Вопросами исследования пористых строительных материалов на основе аглопорита и керамического кирпича и их использования в новых технологиях занимались в НИИСМИ, ученые и производственники (МЗСМ) [19-25].

1. АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ОПТИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВ И ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОРИСТЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Оценка вариантов энергоэффективного использования органогенных материалов

Горно-химическая отрасль при комплексном использовании минеральных ресурсов обеспечит максимальное извлечение полезных компонентов, содержащихся в горно-химических рудах, утилизацию вмещающих пород и отходов производства для удовлетворения потребностей других отраслей народного хозяйства, а также пополнит минерально-сырьевую базу отрасли за счет попутного извлечения других полезных компонентов, улучшит свои технико-экономические показатели. В настоящее время интерес наблюдается к собственным природным ресурсам, где значительное место отводится торфяному фонду. Торфяные месторождения, в настоящее время востребованы как топливный ресурс, как значительный объем сельскохозяйственных угодий и как важнейший объект природоохранного использования. Новые задачи требуют для своего решения системных обращений к торфяному фонду. При этих запросах возникают трудности в формировании набора показателей, т.к. не вся необходимая информация может быть получена из имеющихся материалов [18,32].

Торфяная отрасль ориентирована на развитие новых инновационных производств по «альтернативным направлениям использования торфа и продукции на его основе». Эффективным вариантом использования торфа следует считать такой, который обеспечивает максимальную экономическую выгоду от использования потенциальной ценности полезного ископаемого при ограничении негативного воздействия на составляющие окружающей среды при этом использовании [14, 18, 33, 34].

Особую группу нетрадиционных видов минерального сырья составляют отходы, образующиеся при добыче и переработке полезных ископаемых. Их следует рассматривать как

существенные, но мало вовлеченные в развитие экономики ресурсы, использование которых позволило бы одновременно решать сырьевую и экологическую задачи.

В последнее время возникают новые потребности в торфяном топливе: строительство мини-ТЭЦ, потребность цементной промышленности и т. п. В программе «Торф» запланирована ежегодная добыча торфа до 3 млн. т на нужды сельского хозяйства для утилизации жидкого навоза крупных животноводческих ферм с получением компостов для пахотных полей. Кроме того, при анализе хода выполнения этой программы Президиум Совета Министров ориентировал причастные к этим ресурсам министерства и ведомства на доработку программы, предусматривающую развитие новых инновационных производств по «альтернативным» направлениям использования торфа и продукции на его основе, т. е. на процессах комплексного освоения [18].

В ГНУ «Природопользования НАН Беларуси», накоплен многолетний опыт по различным направлениям использования торфа. Созданы производства по выпуску разнообразной продукции и материалов на основе торфа. Это широкий класс органических и органоминеральных удобрений, мелиоративных и удобрительных смесей, грунтов, биостимуляторов, ростовых веществ, кормовых добавок и другой продукции для сельского хозяйства, сорбционных материалов, торфощелочных реагентов, литейных и антиадгезионных составов для промышленных производств, восков, лекарственных средств, предметов бытовой химии, косметики и других продуктов [9, 12-14].

Следует отметить, что опробованные на практике такие производства относятся к ресурсосберегающим, а предварительные технико-экономические расчеты свидетельствуют об их рентабельности. Социально-экономическое значение такого направления использования торфа заключается в расширении ассортимента товаров для населения, в экономном использовании торфа, возможном импортозамещении.

Важными требованиями к исходному сырью для многих производств комплексного использования торфа является обеспечение функционального состава. Это достигается как технологиями добычи, так и подготовкой добытого сырья (дробление, гранулирование). Ряд производств критичны к технологическим показателям

исходной продукции, в особенности к условиям хранения. Специфические требования предъявляет производство активных углей, верховой торф высокой степени разложения ($R > 30\%$), пушицевый, сосново-пушицевый, пушицево-сфагновый со строгими ограничениями по зольности ($A^c < 3\%$).

Республика Беларусь обладает большими запасами древесины и торфа, которые относят к местным видам топлива, где в качестве местного коммунально-бытового топлива используется фрезерный торф, кусковой торф и топливные брикеты. Потребителями топливного торфа являются тепловые электростанции, коммунально-бытовые потребители печного топлива, торфобрикетные заводы, поселковые котельные торфопредприятий. Анализ потребления торфяного топлива в Республике Беларусь (рис. 1.1) показывает, что наибольшим спросом пользуется брикет. Так, по статистическим данным, в балансе использования торфа в энергетических целях в стране доля топлива, отпущенного населению, составляет 55,3%, из них 65,9% – брикеты. Полностью обеспечивая потребности внутреннего рынка, предприятия торфяной отрасли осуществляют также поставку брикетов на экспорт [12,14].



Рис. 1.1. Структура потребления торфяного топлива в Республике Беларусь

Прогноз объемов добычи торфа в Республике Беларусь на период до 2020 г. представлен на рис. 1.2.

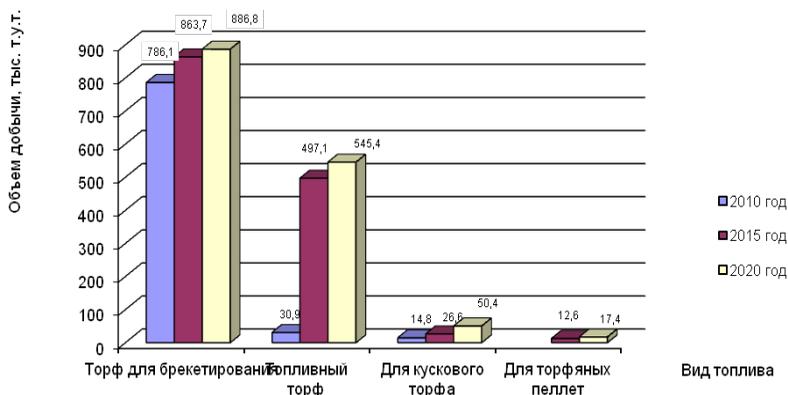


Рис. 1.2. Прогноз объемов добычи торфа в Республике Беларусь на период до 2020 г.

Согласно Государственной программе «Торф» в Беларуси предусмотрен рост объемов потребления торфа на энергетические цели, где намечено повысить производительность и снизить энергоёмкость производства продукции из торфа [18].

Следует отметить, что использованием торфа и древесных отходов в различных областях строительной промышленности занимались ряд ученых и организаций [20, 35-38].

Часть из описанной выше продукции в настоящее время производится в ряде регионов республики и используется во многих хозяйствах. На другие у разработчиков имеется документация, которая необходима для организации производств [9, 14, 18, 33].

В Республике Беларусь выявлены угленосные отложения различного возраста. Однако из-за их маломощности промышленная добыча угля пока не организована. Торф по сравнению с бурым углем наиболее молодой вид ископаемого минерального топлива, залежи его формируются и в современную эпоху. Теплота сгорания рабочей массы торфа колеблется в широких пределах в зависимости от влажности, массы и её зольности (табл. 1.1) [23-25].

Таблица 1.1

Средний состав торфа, теплота сгорания при его различной
влажности

Состав рабочей массы, %							Теплота сгорания, ккал/кг
W _p	C _p	H _p	S _p	O _p	N _p	A _p	
20	41.1	4.3	0.2	23.8	1.8	8.8	3610
40	30.9	3.2	0.2	17.8	1.3	6.6	2560
50	25.7	2.7	0.1	14.9	1.1	5.5	2030

Следует отметить, что с увеличением влажности торфа значительно уменьшается содержание углерода, что приводит к изменению теплоты сгорания [20, 35-38].

Фрезерный торф как сырье для брикетирования и компостирования характеризуется показателями: влажностью, зольностью, различным видом, степенью разложения залежи, фракционным составом и теплотой сгорания [4С-8С]. На современном технологическом оборудовании брикетных заводов представляется возможным брикетировать фрезерный торф всех типов. Наиболее же эффективно перерабатывать торф средней и повышенной степени разложения. Оптимальная влажность, при которой обеспечивается наиболее низкая себестоимость заводского передела, составляет 40-50%. Предел зольности фрезерного торфа для брикетирования установлен с учетом того, что зола является балластным компонентом, снижающим теплоту сгорания топлива. Для торфобрикетных предприятий норма предельной зольности фрезерного торфа устанавливается в зависимости от естественной зольности залежи по данным паспортизации, но не более 23%. Наиболее успешно перерабатывается в брикеты торф равномерного фракционного состава, состоящий из части размером до 8 мм. Из такого торфа получается сушенка с минимальной влагоразмерностью по фракциям, что обеспечивает получение наиболее прочных брикетов. Измельчение способствует повышению плотности и влагоустойчивости [4, 8]. Одним из основных требований к фрезерному торфу как сырью для брикетирования является постоянство показателей его качества. В табл. 1.2-1.7 приведены основные физико-технические и химические характеристики основных видов торфа, которые могут исполь-

зваться в промышленности производства пористых строительных материалов[4,15,20].

Таблица 1.2

Технические свойства низинных торфов

Показатели	Средние значения показателей		
	древесная	травяная	моховая
R , %	45	29	21
A^c , %	9,6	6,7	6,5
W , %	87	91	92
Q^f , кДж/кг	23,20	23,36	22,69

Таблица 1.3

Полная влагоемкость низинных торфов, кг/кг

Показатели	По группам		
	древесная	травяная	моховая
Полная влагоемкость, кг/кг средняя	8,5	12,5	11,4

Таблица 1.4

Показатели элементного и группового химического составов органической массы низинного торфа, %

Показатели	Средние значения по группам		
	древесная	травяная	моховая
Элементный состав			
C	58,4	57,8	36,7
H	5,7	5,9	3,7
N	2,7	2,7	2,2
S	0,7	0,4	0,6
O	32,5	33,2	34,8
Групповой состав			
Б	3,7	4,4	3,9
ЛГ	20,9	26,4	29,3
РВ	9,1	14,8	17,1
ГК	41,6	38,9	36,1
ФК	17,4	14,3	16,5
Ц	1,5	2,4	4,0
Л	13,9	12,7	9,2

Условные обозначения: *C* – углерод, *H* – водород, *N* – азот, *S* – сера, *O* – кислород, Б – битумы, ВР и ЛГ – водорастворимые и легкогидролизные вещества, РВ – редуцирующие вещества, ГК – гуминовые кислоты, ФК – фульвокислоты, Ц – целлюлоза, Л – лигнин.

Здесь следует отметить, что в технологии получения ПСМ выгоднее использовать древесную и травяную группу торфа, которые содержат больше углерода и имеют высокую теплоту сгорания при агломерации.

Таблица 1.5

Состав зольной части низинных торфов, % (абсолютно сухого вещества)

Средние значения по группам		
древесная	травяная	моховая
2,7	1,3	2,1
3,4	2,2	2,3
1,2	1,0	0,9
0,8	0,5	0,4
0,1	0,1	0,1
0,6	0,4	0,6

Таблица 1.6

Характеристика химического состава низинного торфа, % на сухое вещество

Показатели	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	P ₂ O ₅
1980 г.	20,3	4,2	0,5	2,5	1,2	0,3
2011 г. (по Фалюшину)	44,24	6,63	13,28	23,52	6,60	1,34

Таблица 1.7

Групповые компоненты и элементный состав, % на органическое вещество

Би-ту-мы	Легко гидролизуемые вещества	Гуминовые вещества	Трудно гидролизуемые вещества	Негидролизуемый остаток	C	H	N	S+O
3,9	37,7	25,2	8,9	28,5	52,1	6,3	4,3	36,8

Таким образом, установлено, что с увеличением влажности торфа значительно уменьшается содержание углерода, что приводит к изменению теплоты сгорания, а также следует отметить, что в технологии получения ПСМ выгоднее использовать древесную и травяную группу торфа, которые содержат больше углерода и имеют высокую теплоту сгорания при агломерации. Установлено, что химический состав торфа имеет отличие до 30% по сравнению с химическим составом, исследованным в 2011 году в ГНУ «Институт природопользования НАНБ» – $S+O=32,4\%$; $N=3,6\%$; $A^c=17,76\%$; $C^c=58\%$.

1.2. Проведение патентных исследований по использованию топлива и вторичных энергоресурсов для ПСМ

Для патентного поиска заявок на изобретение экологобезопасной технологии получения пористых строительных материалов с использованием местных видов топлив и вторичных энергоресурсов по единой Международной патентной классификации был выбран раздел 040 «Цементы; бетон; искусственные камни; керамика; огнеупоры». Подраздел C04B «Известь; магнезия; шлак; цементы; их составы; например строительные растворы; бетон или аналогичные строительные материалы; искусственные камни; керамика; огнеупоры; обработка природного камня».

Результаты патентного поиска по базе данных патентов Российской Федерации, Республики Беларусь, стран мира сведены в табл. 1.8, 1.9.

Таблица 1.8

Результаты патентного поиска

Страна	Патент на изобретение	
	Сырьевая смесь для производства керамзита	Сырьевая смесь для производства аглопорита
Российская федерация (RU)	02013409; 02023701; 02023700; 02031879; 02031880; 02036179; 02040499; 02045490; 02059582; 02059583; 02098374; 02109704; 02111186; 02112758; 02123481; 02134671; 02150445; 02153476; 02158242; 02158243; 02171236; 02188173; 02235074; 02318764; 0233470; 02334709; 02343126; 02359932; 02363676; 02366629; 02366630; 02368581; 02391305; 02397962; 02397963; 02403216.	02031878; 02332374; 02341478; 02393126.
Республика Беларусь	20040123	-
Великобритания (GB) Германия (DE) США (US) Франция (FR) Швейцария (CH) Япония (JP) ВОИС (WO) ЕПВ (EP)	-	-

Таблица 1.9

Количество патентов на изобретение

Год	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Количество патентов на изобретение Стран мира. Подраздел С04В.	3	6	16	3	6	2	4
Год	2003	2004	2005	2006	2008	2010	2012
Количество патентов на изобретение Стран мира. Подраздел С04В.	2	3	5	6	6	7	-

RU 02031878 В состав сырьевой смеси для получения аглопорита входит: глинистое сырье 80 -90%; уголь 4-8; опилки 2-4; продукт гальванического производства на основе солей и нефтепродуктов 2 -10%.

RU 02332374 Масса для изготовления аглопорита: суглинок 45,0 – 55,0%; жидкие алюмонатриевые отходы 1,0 – 2,0%; зола – унос ТЭЦ 35,0 – 45,0%; апатит 1,0 – 2,0; ашарит 4,0 – 6,0; магнезит 1,0, 2,0.

RU 02341478 В состав сырьевой смеси для получения аглопорита входит: глина 80 -84%; уголь 6 – 8%; обсидиан 8 – 14%.

RU 02393126. В состав сырьевой смеси для получения аглопорита входит: глина 76-82%; уголь 6 – 8%; молотый доменный шлак 6 - 8%.

Поиск по разделу 040 «Цементы; бетон; искусственные камни; керамика; огнеупоры», подразделу С04В «Известь; магнезия; шлак; цементы; их составы; например строительные растворы; бетон или аналогичные строительные материалы; искусственные камни; керамика; огнеупоры; обработка природного камня» дал следующие результаты:

БД России – 40 патентов, из них 36 - сырьевая смесь для производства керамзита;

4 - сырьевая смесь.

БД Республики Беларусь – 1 патент - смесь для производства керамзита;

БД Стран мира – из 69 патентов по подразделу C04B патентов на смесь для производства керамзита, аглопорита – нет.

Анализ полученных данных патентных исследований показал, что только один процент от всех зарегистрированных патентов России составили патенты «Сырьевая смесь для производства аглопорита». В Республике Беларусь работа по разработке экологически безопасной технологии получения пористых строительных материалов с использованием местных видов топлив и вторичных энергоресурсов проводилась на МЗСМ и НИИСМИ. Для обобщения результатов предшествующих исследовательских работ по использованию торфа в топливной и строительной индустрии, в частности, были изучены основные патенты:

RU 2183710 C2, 20.06.2002. RU 2304674 C1, 20.08.2007. RU 2120923, МПК C04B 33/00, 27.10.1998. RU 2108430, МПК E04C 2/04, 04.10.1998. RU 2183710, МПК E04C 1/00, 20.06.2002. RU 2183710, МПК E04C 1/00, 20.06.2002. RU 2169240, МПК E04B 2/02, 20.06.2001 (пористый керамический кирпич-блок).

Составы изобретения: 1) глина – до 70%; выгорающий мелкодробленый древесный уголь – до 10%, ТЭС зола – до 20%.; 2) глина – до 70%; просеянный торф – до 10%, древесные опилки – до 20%. Технический результат: 1) улучшение физико-технических показателей за счет использования доступного, экологически чистого, надежного однородного материала; 2) высокие теплозащитные, и экономические показатели; 3) снижение теплопроводности до 0,17 Вт/м.с и объемной массы до 850 кг/м³ за счет теплозащитного воздуха, размещенного в закрытых порах и в пустотах конструкционно-теплозащитной структуры. Недостаток: трудность сохранения высоких показателей при сооружении однородных стен многоэтажных и даже малоэтажных зданий.

RU 2274619 C2, 20.04.2006. RU 2179960 C2, 27.02.2002. SU 1433934 A1, 30.10.1988. US 4310486 A, 12.01.1982. РФ 2274619, C04B 28/18 08.02.2001 (Состав шпатлевок).

Составы изобретения: шлакопортландцемент 35–40%; отходы мокрого обогащения железных руд крупностью частиц менее 1 мм, в том числе около 30% – крупностью менее 0,01 мм, 40–50%; карбоксиметилцеллюлоза 0,2–0,9%; комплексная пластифицирующая добавка «Реламикс, тип 2» 0,01–0,08%; зола-унос от сжигания каменных углей, древесины, торфа – остальное. Технический результат: 1) улучшение технологических свойств шпатлевки (увеличение пластичности, вязкости, прочности, снижение трещинообразования). Недостаток: использование дорогостоящих искусственных материалов.

RU 02107050 C1 19980320 (Сырьевая смесь для изготовления поризованных строительных изделий) [Патент РФ №2107050. С 04 В 38/06, 1998]. Состав изобретения: глина 50–71,4; волокнистая гигроскопическая добавка растительного происхождения 28,6–50%. При этом сырьевая смесь в качестве добавки может содержать древесные опилки с влажностью 23–38% или торф с влажностью 23–55%. Технический результат: масса кирпичей 3,0 кг, теплопроводность 0,65 Вт/м оС, предел прочности при сжатии 250–300 кгс/см² – добавки снижают вес кирпича и теплопроводность. Недостаток: добавки уменьшают предел прочности при сжатии.

RU 02273620 C2 20060410 (торфодревесная композиция для изготовления теплоизолирующих строительных материалов). Состав изобретения: низинный торф 20,5–28,5%; древесные опилки 61–73%; гидрофобизирующая добавка 3,0–5,0%; пенообразующая добавка 3,5–6,5% при водотвердом отношении 2,0–2,4%. Технический результат: получение водостойкого однородного строительного материала с низкой плотностью и низким коэффициентом теплопроводности.

RU 02422409 C1 20110627 (Способ производства поризованного строительного кирпича).

Суть способа: увлажнение глинистого сырья, его измельчение, введение выгорающих добавок, формование, сушка и обжиг в интервале 980–1500 °С. В качестве выгорающих добавок используют фрезерный торф. Технический результат: снижение энергозатрат, повышение физико-химических характеристик. На основании проведенного обзора в табл. 1.10 представлены шихтовые составы масс для производства керамического кирпича.

Таблица 1.10

Некоторые шихтовые составы масс для производства керамического кирпича

Материалы	Содержание, об. %
Глина	86-93
Опилки	7-14
Глина	95
Шамот	5
Глина	82-83
Опилки	10
Шамот	7-8
Глина	85-90
Шамот	0-5
Песок, зола	10-15
Глина	60
Дегидратированная глина	40

Следует отметить, что изобретения по тематике сырьевых смесей в производстве ПСМ относятся к 1970-1980 годам.

А.с. 570569 / СССР/. Сырьевая смесь для изготовления аглопорита / Новиков Е.С., Шишканов Г.Я., Ходская Р.И., Леках Ц.А., МКИ С04В31/20, опубликовано 20.10.1977 г.

А.с. 474518/СССР/ Масса для изготовления аглопорита/ Шикулин В.Н. и др., МКИ С04В31/02, опубликовано 25.06.1975 г.

А.с. 577191/СССР/ Шихта для производства аглопорита / Захаров Ю.И. и др., МКИ С04В21/00, опубликовано 25.10.1977 г.

А.с. 580195/СССР/ Сырьевая смесь для изготовления легкого заполнителя / Захаров Ю.И. и др., МКИ С04В21/08, опубликовано 15.11.1977 г.

А.с. 544633/СССР/ Сырьевая смесь для изготовления легкого заполнителя / Кабанова М.К. и др., МКИ С04В31/02, опубликовано 30.01.1976 г.

А.с. 842493/СССР/ Сырьевая смесь для изготовления жаростойкого бетона / Израелит М.М. и др., МКИ С04В15/00, опубликовано 15.10.1981 г.

А.с. 691666/СССР Агломерационная машина / Авт. Шухатович Ф.М. и др. Бюллетень № 38, 1979.

А.с. 637377/СССР Сырьевая смесь для изготовления аглопорита/ Авт. Ходская Р.И. и др. Бюллетень № 46, 1978.

А.с. 546588/СССР Сырьевая смесь для производства аглопорита/ Авт. Ходская Р.И. и др. Бюллетень № 6, 1977.

Таким образом, патентный поиск показал, что полученные патенты относятся к 1970-80-ым годам по применению органогенных материалов, лигнина, древесных опилок, угля и антрацита в производстве ПСМ (в частности аглопорита и керамических изделий). Определено что в шихтовые составы в основном входят глина, опилки, шамот, зола и др.

1.3. Обоснование технологических параметров и физико-механических свойств сырья, применяемого в процессах при изготовлении пористых строительных материалов

Аглопоритовый щебень, песок, керамические блоки, кирпичи относятся к искусственным пористым материалам, получаемыми в результате термической обработки шихт из алюмосиликатных материалов природного происхождения и отходов промышленности. Применяют их в качестве заполнителей при изготовлении теплоизоляционных и конструкционных строительных материалов и бетонов, а также в качестве утепляющих засыпок. Структурно-механические свойства сырьевых материалов определяют соответствующие методы их подготовки к термической обработке. Для выбора метода подготовки шихты основные исходные сырьевые материалы разделяют на следующие группы: 1) сухие плотные или зернистые материалы – природные глинистые и углесодержащие сланцы от добычи и обогащения угля и топливные кусковые шлаки; рыхлые природные глинистые породы и отходы промышленности – глины, суглинки, супеси, лессы, а также глинистые углесодержащие отходы добычи и обогащения угля: сухие пылевидные или зернистые материалы – золы от сжигания углей и газогенераторные золы [21-24].

Природные глинистые породы применяют в производстве аглопорита, хотя с экономической точки зрения для этой цели целесообразны отходы промышленности [11, 27]. Добавки выбирают с учётом наличия местных сырьевых ресурсов и характеристик основных компонентов шихты. При избыточном количестве топлива в

топливосодержащем сырье в шихту вводят возврат (до 20%), 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 объёму) увеличивает пористость и ускоряет процессы горения топлива и спекания. Добавка сухой золы ТЭС снижает влажность обводненных глин и снижает расход топлива за счёт содержащихся в ней прокалённых материалов и несгоревшего углерода. Содержание топлива в шихте при использовании глинистых пород обычно 6–8, шахтных пород – 8–10, золы ТЭС – 10–12% по массе. Предельный размер гранул шихты не должен превышать 10–12 мм, а размер составных её частей: исходного сырья – 5, угля – 3, твёрдых добавок от 5 (плотных) до 10 (пористых) мм [23-25].

По своему химическому составу вскрышные породы месторождения «Ольшанка» раньше использовались для производства аглопорита с добавками местного топлива, которое может создавать необходимую теплоту (до 4200 ккал/кг) сгорания в зоне агломерационной машины на основе торфа. В лабораторных условиях ранее использовались фрезерный торф, гранулы, сапропель, древесные опилки и лигнин, которые являются отходами в топливной, деревообрабатывающей и гидролизной промышленности [20, 24].

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 предприятий Республики Беларусь отвечают этим требованиям. За счет горения угля, который вводится в шихту, развивается температура до 1300 К. Это приводит к спеканию шихты в пористую остеклованную массу. Следует отметить, что протекающие процессы тепломассопереноса не заканчиваются в зонах сушки и нагрева, а накладываются друг на друга по всей длине ленты и развиваются параллельно [20, 23].

Для выбора метода подготовки шихты основные исходные сырьевые материалы условно разделяют на следующие три группы: 1) сухие плотные или зернистые материалы – природные глинистые и

углесодержащие сланцы, получаемые при добыче и обогащении угля и топливные кусковые шлаки; 2) рыхлые природные глинистые породы и отходы промышленности – глины, суглинки, супеси, лессы, а также глинистые углесодержащие отходы добычи и обогащения угля; 3) сухие пылевидные или зернистые материалы – золы от сжигания углей и газогенераторные золы. На заводах строительных материалов Республики Беларусь выпускается аглопоритовый песок, гравий и щебень. Способ изготовления – термическая обработка силикатных материалов методом агломерации. На заводе готовой продукцией являются: песок аглопоритовый фракции 0–5 мм, марка 1000, марка 1100; щебень аглопоритовый фракции 2,5–10 мм, марка 800, марка 900; щебень фракции 10–20 мм, марка 700, марка 800; щебень фракции 20–40 мм, марка 600, марка 700 [19, 20].

ОАО «Минский завод строительных материалов» выпускает в основном кирпич керамический, песок и щебень аглопоритовые, песок перлитовый, плиты теплоизоляционные. В зависимости от назначения кирпич изготавливают рядовым и лицевым. Керамический кирпич относится к группе негорючих строительных материалов. Объем производства: 87459,927 тыс. шт. условного кирпича в год. Аглопорит используется в качестве заполнителя легких бетонов и теплоизоляционных засыпок, щебень и песок аглопоритовые выпускаются согласно [2С-3С] и являются негорючими материалами. Объем производства: 63400 м³ в год. Вспученный перлитовый песок используют в виде теплоизоляционной засыпки. Плиты представляют собой пористый легкий теплоизоляционный материал, изготовленный путем обезвоживания и прессования суспензии, состоящей из асбеста, перлита, глины и извести. Объем производства: 152,039 м³ в год. Большая часть материалов и изделий выпускаются массовым производством. Для получения этих материалов и изделий требуется добыть, переработать большое количество минерального сырья, материалов и топлива, поэтому необходимо своевременная разработка, эффективное использование наиболее совершенных, высокопроизводительных и экономичных машин и оборудования.

Сырьевые материалы, применяемые в производстве аглопоритового песка и щебня на ОАО «Минский завод строительных материалов»: глинистое сырье – суглинки месторождения «Фаниполь»

(используется в настоящее время) или «Ольшанка»; выгорающие добавки – уголь марки АШ и опилки; разувлажняющие добавки – недожог аглопорита (возврат) и пыль аспирационная.

Сырье желтовато-серого цвета, местами светло-серого, рыхлое, комковатое. Оно характеризуется равномерной микроструктурой. Глинистое вещество его имеет полиминеральный состав и представляет собой неоднородную смесь гидрослюда и каолита. Сырье месторождения «Фанипольское» (использовалось в 1970-80 г.г.) относится к группе сырья со средним содержанием включений, по размеру включений к группе с крупными, мелкими и средними включениями: по виду включений – к группе с включениями железистых и кварцевых минералов, по содержанию тонкодисперсных фракций – к группе грубодисперсного глинистого сырья, по пластичности – к группе непластичного глинистого сырья, по огнеупорности – к группе тугоплавкого сырья (табл. 1.11).

Таблица 1.11

Химический состав глинистого сырья месторождения
«Фанипольское»

Наименование месторождения	Содержание оксидов, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
Фанипольское	76,03	10,57	0,48	2,16	2,80	1,0	3,70
Фаниполь	80,3	6,3	0,34	2,42	3,54	1,6	2,5

Число пластичности сырья от 0 до 12, огнеупорность 1400-1460°C, карьерная влажность 18-23% [20, 23-24]. В табл. 1.12 приведен зерновой состав глинистого сырья месторождения «Фанипольское» [27, 29] и «Фаниполь».

Таблица 1.12

Зерновой состав глинистого сырья месторождения
«Фанипольское»

Наименование месторождения	Содержание фракций, %					
	Размер частиц, мм					
	более 0,25	0,23-0,01	менее 0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	менее 0,001
Фаниполь	6,04	71,43	22,53	5,84	7,69	9,01
Фанипольское	1,20	63,85	32,95	9,63	11,50	11,80

Основные технологические параметры производства аглопорита [22-25] разрабатывались применительно к агломерационной машине СМ-961, где высота спекаемого слоя составляла 300 мм, разрежение при зажигании – 60 мм вод.ст., при спекании – 200 мм вод.ст., выгрузка спека осуществлялась в основном через 45 мин. Верхний предел крупности гранул торфа 7-10 мм, наличие мелочи менее 1 мм нежелательно (увеличивается выход возврата, уменьшается 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»).

Таким образом, установлено, что химический и зерновой составы месторождений «Фанипольское» и «Фаниполь» имеют значительные отличия по основным свойствам, применяемым в технологии получения аглопорита (SiO_2 , Al_2O_3 и др.; размеры фракций 0,01 – 0,005 и др.) до 30%.

1.4. Анализ использования в промышленности вторичных энергоресурсов

Республика Беларусь имеет большие запасы древесины, которую относят к местным видам топлива. Древесина состоит из комплекса различных органических веществ, в состав которых входит 49,5% углерода, 44,1% кислорода, 6,3% водорода и 0,1% азота. Кроме органических веществ, в древесине есть минеральные соединения, дающие 0,2–1,7% золы, в состав которой входят соли щелочноземельных металлов. Основные органические вещества, образующие клеточную оболочку древесины – целлюлоза, лигнин и гемицеллюлозы, содержание которых в древесине зависит от породы, – представлены в табл. 1.13-1.14. В перспективе объем заготовок древесины будет увеличиваться, соответственно возрастет и объем вторичного древесного сырья. К малоценной древесине относится дровяная и тонкомерная древесина из деревьев диаметром на высоте 1,3 м 12 см и менее. Структура и динамика древесных ресурсов Республики Беларусь представлена в табл. 1.13.

Таблица 1.13

Основные органические вещества, образующие клеточную оболочку древесины, %

Органические вещества	Хвойные	Лиственные породы
Целлюлоза	48-56	46-48
Лигнин	26-30	10-28
Гемицеллюлозы:		
пентозаны	10-12	23-29

Таблица 1.14

Содержание органических веществ в древесине разных пород

Органические вещества	Содержание органических веществ, % от массы абсолютно сухой древесины				
	Сосны	Ель	Пихта	Береза	Осина
Растворимые в эфире	4,91	1,87	0,87	1,50	1,51
Растворимые в горячей воде	2,98	3,19	1,40	2,30	2,96
Целлюлоза, свободная от пентозанов	56,50	55,17	48,40	47,20	47,80
Лигнин	27,05	27,00	29,89	19,10	21,67

Таблица 1.15

Структура и динамика древесных ресурсов Республики Беларусь, млн. м³

Вид древесного сырья	Годы				
	1999	2000	2005	2010	2015
1	2	3	4	5	6
Ликвидная древесина, всего,	10,94	11,06	13,40	16,34	19,04
в том числе: деловая древесина,	6,40	6,42	8,20	10,41	12,70

1	2	3	4	5	6
Малоценная древесина (тонкомерная и дрова)	5,65	5,61	6,40	7,24	7,81
Вторичные древесные ресурсы,	6,10	6,10	7,12	8,74	10,27
в том числе: отходы лесозаготовок	4,60	4,6	5,20	6,30	7,30
отходы дерево-обработки	1,50	1,50	1,92	2,44	2,97

При разработках леса получается значительное количество древесных отходов, которые не нашли должного промышленного применения для получения дополнительного экологически безопасного источника энергии [36, 39]. Это снижает полноту использования лесных ресурсов для производства энергии, что имеет важное значения, потому что лес – возобновляемое растительное сырьё. Изыскание путей целесообразного использования лесосечных отходов для получения дополнительного источника энергии в настоящее время приобретает всё большее значение в связи с удорожанием газа и нефти. Перспективной является переработка лесосечных отходов для получения энергии путём их термического разложения. Известны данные по сухой перегонке берёзовых и хвойных лесосечных отходов, являющихся полноценным сырьём для термического разложения.

Наиболее перспективным способом использования неликвидной древесины, является их энергохимическая переработка для получения электроэнергии или пара, а также химических продуктов термолиза. Существенно подорожали импортируемые энергосырьевые ресурсы, что увеличивает долю использования местных сырьевых ресурсов и альтернативных источников энергии. В связи с этим назрела острая необходимость в увеличении объемов добычи торфа и использовании различных древесных отходов [7, 28, 36].

Вторичные ресурсы древесины – это отходы древесного происхождения, образующиеся при заготовке, химико-механической и химической переработке древесины, потреблении изделий из древесины, а также отходы при обрезке деревьев,

пригодные для использования на технические, топливно-энергетические и другие цели. Это ценные виды древесного сырья, однако, их полное использование проблематично, что связано со слабым развитием в Республике Беларусь производств по химико-механической переработке древесины. Целлюлоза представляет собой высокомолекулярное соединение, нерастворимое в воде и органических растворителях. Экзотермический процесс разложения целлюлозы начинается при 548 К. При взаимодействии целлюлозы с водой в присутствии минеральных кислот, происходит реакция гидролиза с образованием моносахаридов. Лигнин, входящий в состав клеточной оболочки, содержит значительно больше углерода, чем целлюлоза. При определенных условиях лигнин может выполнять роль связующего, что имеет значение при производстве из опилок некоторых видов продукции, изготавливаемой с применением высокотемпературной обработки массы. На изменение химического состава древесины оказывает влияние влажность древесного сырья. Чем выше влажность древесины, тем интенсивнее проходит гидролиз, сопровождаемый поликонденсацией продуктов распада. Влажность древесины зависит от метода ее производства и хранения. Степень воздействия влажности на теплоту сгорания свидетельствует о ее снижении при увеличении влажности топлива (рис. 1.3).

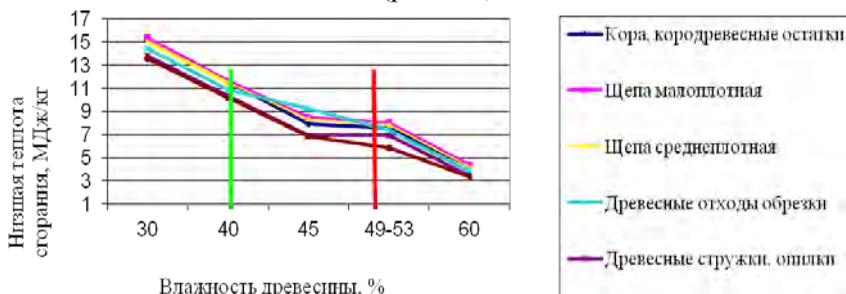


Рис.1.3. Зависимость теплотворной способности древесины от влажности

Скорость химических процессов в древесине возрастает также с увеличением давления прессования древесной массы от 2,5 до 40 МПа [30].

В табл. 1.16-1.17 представлены основные параметры древесины и изменение химического состава древесины в зависимости от температуры ее нагревания [7,10].

Таблица 1.16

Основные параметры древесины

Наименование топлива	Влажность древесины, %	Низшая рабочая теплота сгорания, МДж/кг	Коэффициент пересчета одного плотного куб.м в тонну натурального топлива	Калорийный эквивалент для пересчета 1 тонны натурального топлива в тонну условного топлива	Низшая рабочая теплота сгорания МДж/кг
Кора	40	11,56	0,39	0,42	7,53
Щепа из малоплотной древесины	40	11,68	0,42	0,4	8,47
Щепа из среднеплотной древесины (береза, ольха, орех, дуб, клен)	40	11,48	0,48	0,42	8,3
Древесные отходы, обрезки	40	10,9	0,48	0,36	9,28
Древесина, хвойные породы	40	10,01	0,65	0,38	2,77
Древесина, лиственные породы	40	10,22	0,7	0,39	7,05
Древесина, смешанные породы	40	10,47	0,67	0,4	5,83
Древесные стружки, опилки	40	10,32	0,29	0,36	6,97

Таблица 1.17

Изменение химического состава древесины в зависимости от температуры ее нагревания.

Порода	Продолжительность нагрева, ч	Содержание лигнина и пентозанов, % от абс. сухой древесины		
Лигнин				
Осина	2,0	18,2	20,3	23,0
Ель	2,0	27,2	29,0	30,0
Пентозаны				
Осина	2,0	22,1	21,1	9,5
Ель	2,0	12,3	11,3	7,1

При использовании ВТЭР рассчитываются следующие основные показатели: оценка выхода; выработка энергии, рациональное использование, экономия топлива, степень использования, коэффициент утилизации, показатель использования. Эти показатели характеризуются количеством ВТЭР, образующихся в процессе производства в данном технологическом агрегате за единицу времени, а также количеством энергии, получаемой при использовании ВТЭР в утилизационной установке.

При использовании древесных отходов надо знать свойства, характерные для отходов. Для кусковых отходов характерны свойства цельной древесины. Мелкие отходы имеют свои специфические свойства, вызванные условиями образования. Их утилизация является для лесопильных предприятий проблемой. Большое значение при производстве материалов из опилок имеет коэффициент гибкости, выраженный отношением длины древесных частиц к толщине. Важный показатель, влияющий на качество производимого материала, – пористость, складывающаяся из объема внутренних пустот частиц и межзерновых пор. Пористость выражается в % от объема древесины в абсолютно сухом состоянии. Пористость древесных опилок зависит от их крупности, способа уплотнения смеси, гранулометрического состава и других факторов [30-37].

Также большое значение имеет упругость, способность материала возвращаться к начальной форме и размерам при прекращении действия внешней силы. Упругость зависит от величины и времени действия давления, от крупности частиц и от термообработки.

Опилки имеют преимущество перед другими видами отходов и даже перед специально приготовленной стружкой. Таким образом, полнота и комплексность использования ресурсов может быть оценена с помощью ряда критериев:

- критерий рациональности (K_p)

$$K_p = \frac{Q_u}{Q_n} \cdot 100\% , \quad (1.1)$$

где Q_u – количество ресурсов, использованных в производстве;
 Q_n – количество ресурсов, изъятых из природной среды;

- критерий комплексности (K_k)

$$K_k = \frac{Ц_{п.}}{Ц_{с.}} \cdot 100\% , \quad (1.2)$$

где $Ц_{п.}$ – ценность продукции, фактически произведенной из минерального сырья;

$Ц_{с.}$ – суммарная ценность компонентов в сырье;

- критерий безотходности ($K_б$)

$$K_б = \frac{M_y}{M_b} \cdot 100\% , \quad (1.3)$$

где M_y – масса утилизируемых отходов,

M_b – масса отходов, выделившихся в процессе производства.

Комплексность использования сырья можно охарактеризовать критерием использования:

$$K_{исп} = N_p / N_T , \quad (1.4)$$

где N_p – число реализуемых вариантов использования сырья;

N_T – число теоретически возможных вариантов использования.

Выводы по разделу 1

1. Установлено, что структура потребления торфа в настоящее время в основном сводится к производству брикетов и производст-

ву сельскохозяйственной продукции, а малая доля торфа используется для производства кускового торфа, паллет и экспорта, а в производстве ПСМ не используется.

2. В последнее время найдены новые направления использования фрезерного торфа и дробленных торфяных брикетов в энергетике вместо импортного газа.

3. Установлено, что использование МВТ и ВТЭР в производстве ПСМ позволит улучшить показатели рациональности, комплексности, безотходности и снизить энергозатраты на производство единицы продукции.

4. Проведенные в НИИСМИ и МЗСМ лабораторные и полупромышленные исследования в 1970-1980-ых годах выявили основные направления использования торфа, угля и сапропелей в производстве аглопорита и в основном касались усовершенствования технологических параметров агломерационной установки. При этом лабораторные испытания проводились на суглинках месторождений «Ольшанка», «Фанипольское», «Гайдуковка» и торфа ОАО «ТБЗ Усяж», которые по своим характеристикам и составам сырьевых смесей значительно отличаются от современных физико-механических и химических свойств сырьевой смеси, в связи с вводом новых месторождений «Фаниполь», ОАО ТБЗ «Старобинский», ОАО «ТБЗ Усяж» (участок №3 «Рудня» по добыче торфа в системе каналов У16-18 – кадастровый № 527 введен в эксплуатацию в 2011 г.).

5. Определены составы сырьевой смеси, физико-механические свойства торфа, химический состав суглинков, а также качественные показатели готовой продукции по зерновому составу и прочности, позволяющие уменьшить до 10% энергозатраты, при производстве ПСМ..

6. Установлено, что химический и зерновой составы месторождений «Фанипольское» и «Фаниполь» имеют значительные отличия по основным свойствам, применяемым в технологии получения аглопорита (SiO_2 , Al_2O_3 и др.; размеры фракций 0,01 – 0,005 и др.) до 30%.

7. Физико – технические параметры фрезерного торфа ОАО «ТБЗ Усяж» имеют различия до 30% по сравнению с характеристикой, использованной на МЗСМ ранее (1970-1980 г.г.) с вводом нового месторождения.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА И УСРЕДНЕНИЯ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПСМ

2.1. Проведение теоретических исследований по энергетической эффективности МВТ по обогащению и усреднению сырьевых смесей

Для получения высококачественных, прочных и надежных строительных материалов необходимо подбирать и тщательно анализировать исходные компоненты с точки зрения рентабельности и ресурсосбережения. На МЗСМ производятся аглопоритный песок, гравий и щебень, которые применяются в промышленности как теплоизолирующие материалы и в качестве добавок в разные виды бетонов. На карьере «Ольшанка» (Минский район) при добыче силикатного песка, который используют для производства кирпича, значительное количество вскрышных пород поступало в отвалы (отходы), которые в последнее время утилизируются и используются для производства аглопорита на МЗСМ. Основным параметром оптимизации получаемой готовой продукции является ее плотность и прочность, которые зависят от эффективности смешивания или усреднения параметров сырьевой смеси. Смешивание малых объемов с весьма большими требует значительного времени усреднения в больших емкостях. Для того чтобы снизить расход времени, применяют последовательное смешивание увеличивающихся объемов [1, 2, 40].

Если вещество 1 массой (m_0) смешать с веществом 2 массой (m_1), где ($m_1 > m_0$) и в результате чего получают смесь концентрацией

$$P = \frac{m_0}{m_0 + m_1} . \quad (2.1)$$

Вещество 2 в количестве $m^{(1)} = m_0$ смешивают, получают концентрацию $P = \frac{m_0}{2m_0}$. Затем берут массу вещества 2 в количестве $m^{(2)} = 2m_0$ и смешивают с предыдущей смесью, получают концентрацию

$P^{(2)} = \frac{m_0}{4m_0}$. В первой операции смешивания получают

$P^{(i)} = \frac{m_0}{2^i m_0} = \frac{1}{2^i}$. Так поступают до тех пор, пока $P^{(i)} = P_o$.

Необходимое количество операций смешивания находят по соотношению

$$i = -\frac{\ln P_o}{\ln 2}. \quad (2.2)$$

Перемешивание двух и более продуктов в соизмеримых пропорциях дает в результате новые показатели, которые являются средневзвешенными от ингредиентов.

Однако число i должно быть натуральным, поэтому в качестве i необходимо брать целую часть от правой части формулы, т.е.

$$i = \left[\frac{\ln P_o}{\ln 2} \right] \quad (2.3)$$

Неудобством является и задаваемое значение концентрации, ко-

торое в соответствии с величиной $\frac{1}{2^i}$ можем принимать лишь значения 50%, 25%, 12,5%,...

Предлагается к массе m_o первого вещества при первом смешивании добавить массу m_o второго вещества, при следующих смешиваниях добавлять второе вещество в соответствии с арифметической прогрессией в количестве km_o , тогда $p_{(i)}$ можно найти по формуле

$$p_i = \frac{m_o}{m_o + m_o + k \cdot (i-1) \cdot m_o} = \frac{1}{2 + k \cdot (i-1)} = p_o. \quad (2.4)$$

$$i = \frac{1 + (k-2) \cdot p_o}{k \cdot p_o}$$

Отсюда

Так при заданной концентрации $p_o=0,1$, соответствующей 10%, имеем

$$i = \frac{1 + (k - 2) \cdot 0,1}{k \cdot 0,1} = \frac{8 + k}{k} \quad (2.5)$$

Так как величина i есть натуральное число, большее 1, то при выполнении условия $8+k=k \cdot i$ и $8=k \cdot (i-1)$, k может принимать значение, равное 2, при этом $i=5$, что означает, что смешивание происходит добавляя вещество в количестве 2 единицы 5 раз, или же в количестве 4 единицы 3 раза. В связи с использованием на МЗСМ для производства аглопорита глинистого сырья месторождения «Фанипольское», физико-химические свойства которого не позволяют добиться требуемой скорости спекания и качества аглопорита при существующих технологических параметрах, возникла необходимость в совершенствовании технологии получения аглопорита и снижении энергозатрат на его производство.

Опыт работы действующих аглопоритовых предприятий, использующих в качестве технологического топлива низкосортные угли, а также результаты предварительных исследований по сжиганию углей с различным содержанием летучих агломируемом слое, анализ технологических характеристик торфа позволяют рекомендовать проведение исследований и разработку технологических параметров производства аглопорита при замене угля местными видами топлива. К местным видам топлива при производстве легких заполнителей можно также отнести сапропели. Насчитывается большое количество озер, в которых процесс сапропелеобразования стали необратимы. В этих условиях разработка сапропелей диктуется необходимостью сохранения водоемов. Поэтому, добыча носит промышленный характер и применение сапропелей возможно не только в сельском хозяйстве, но и в производстве легких заполнителей. Предыдущими исследованиями [24] установлено, что при существующей системе загрузки шихты на агломерационную машину на МЗСМ имеет место значительная неравномерность распределения шихты по крупности как по высоте слоя, так и по ширине палет. Существенные отличия алюмосиликатного сырья и обусловленные ими отличия, проявляющиеся в процессе формирования аглопоритового спека, вызвали необходимость в поиске и исследовании новых путей совершенствования режима агломерации.

2.2. Использование имитационного моделирования при разработке критерия оптимизации обогащения сырьевой смеси

Для технологии усреднения сырьевых смесей, которые используются при производстве некоторых строительных материалов (аглопорит, керамический кирпич), важным моментом является классификация и определение основных свойств составляющих смесей, а также методы их использования. Качество сырьевых смесей, поступающих на технологическую переработку, далеко от стабильности.

Проведенные лабораторные и промышленные опыты на МЗСМ по получению аглопорита, где использовался фрезерный торф ТБЗ «Усяж» торф низинный $R=25-30\%$, $A^c=18\%$ и ТБЗ «Старобинский» (участок «Слуцкий») торф верховой $R=15\%$, $A^c=10\%$, вид - моховый, показали, что для стабилизации готовой продукции по плотности и прочности аглопорита необходимо проводить усреднение сырьевой смеси (процентное содержание и влажность компонентов, гранулометрический состав и др.).

В производственных условиях наиболее удачными способами усреднения являются слоевой, реализуемый в штабелях, и конвейерный варианты продольного сдвига. На их основе можно создавать эффективные усреднительные системы. Однако оба эти способа требуют изучения с помощью моделей, которые отличаются наибольшей глубиной исследования процессов перемешивания. При этом основную информацию дает анализ связи спектров функции качества сырья до и после его усреднения или амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) способа, которые показывают, как меняются колебания функции качества на разных частотах. Функцией качества является, как правило, важные характеристики торфа – зольность и теплотворная способность.

Аргументом функции качества предлагается масса m . Модели с функцией качества $K(m)$ не только более просты, но и более информативны. Это подтверждается построенной ниже моделью слоевого штабеля (рис. 2.1), слои которого формируются в одном направлении, а отгрузка ведется с торца [1, 2, 8]. Например, при приготовлении сырьевой смеси для получения пористого керамического кирпича (глина+торф+песок аглопоритовый).

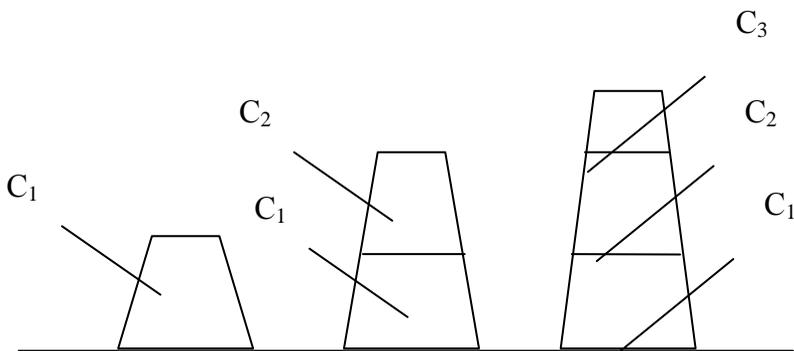


Рис. 2.1. Схема слоевого штабеля для 3-х компонентов:
 C_1 – уголь; C_2 –торф; C_3 –суглинок

На рис. 2.2 представлен бункер, который имеет усреднительный механизм. Данную схему можно использовать при выпуске кирпича керамического, а также аглопорита различного ассортимента, в состав которого входят уголь, суглинки, крошкообразный торф, возврат от производства аглопорита.

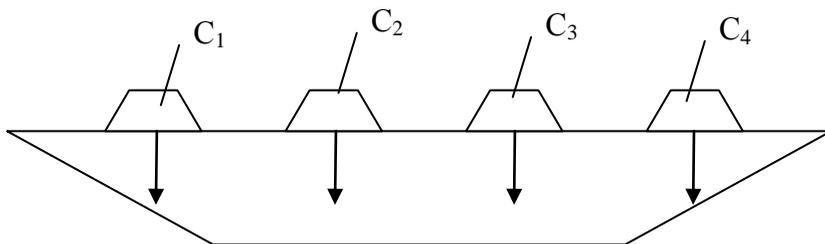


Рис. 2.2 – Схема усреднения с одновременной разгрузкой ячеек для 4-х компонентов сырьевой смеси для производства кирпича керамического:
 C_1 – торф; C_2 –глина; C_3 –песок аглопоритовый; C_4 –отсев из материалов дробления горных пород

Анализ показал, что данная методика характерна для последовательного поэтапного применения этой технологии усреднения сырьевой смеси по схеме «слоевой штабель – разгрузка ячеек», что приводит к значительным энерго- и ресурсозатратам, т.к. применяются 2 схемы. Это характеризуется качеством сырья и его массой..

На рис. 2.3 представлена структура программного модуля усреднительного склада.



Рис. 2.3. Структура программного модуля усреднительного склада для получения некоторых строительных материалов (аглопорит, кирпич)

В настоящее время имитационное моделирование является одним из современных методов научного обеспечения исследований и прогнозирования последствий принимаемых решений. Оно в основном используется для совершенствования методов расчета технико-производственных показателей с учетом случайных факторов и состоит в многократном воспроизведении функционирования исследуемой системы на основе анализа математической модели. Результаты представляют собой выборки случайных величин, характеризующих функционирование исследуемой системы. Имитационное моделирование как статистический эксперимент отличается от

обычного лабораторного эксперимента тем, что его полностью можно провести на ЭВМ. При его реализации со случайными исходами часто применяют метод статистических испытаний. Методом статистических испытаний решаются сложные задачи, но оправданным он может быть лишь в том случае, если процедура розыгрыша случайных исходов проще, чем другие методы расчета.

Чтобы описывать процесс с помощью аналитического аппарата, производится розыгрыш случайного явления с помощью специально организованной процедуры, включающей в себя случайность и дающей случайный результат. Множество таких исходов используют как статистический материал для получения математического ожидания и дисперсии случайных величин. Изучение физических процессов методом имитационного моделирования с помощью ЭВМ, при многократном проигрывании математических моделей, позволяет более точно определить влияние варибельности исходных данных на результаты расчетов, для чего нами были созданы расчетные программы. На первом этапе проводятся сбор и обработка статистических данных и на их основе определяются наиболее значимые параметры процесса. На втором этапе разрабатывается имитационная модель (ИМ), дающая возможность провести комплексное исследование оптимальных параметров. По разработанным программам проводится имитационное моделирование состава смеси при различном распределении возмущающих факторов.

Расчеты состава содержат формулы с детерминированными параметрами. Вместе с тем, многие характеристики составляющих сырьевой смеси имеют случайный характер. В результате неоднородности качественных характеристик составляющих смеси конечный результат вызывает неритмичность работы, потерю производительности и повышение энергозатрат оборудования. Поэтому возникает необходимость совершенствования методов расчета смеси с учетом случайного характера величин, влияющих на конечный результат. Эта задача с успехом решается применением имитационного моделирования. Для реализации модели процесса усреднения на складах целесообразным представляется метод имитационного моделирования.

Модель склада можно представить в виде информационного преобразователя – программного комплекса, который может быть реализован на ЭВМ. Входными параметрами являются задаваемые

векторы входных параметров , на основе которых программно вычисляются векторы выходных параметров (рис. 2.4). Если полученный результат удовлетворяет плановым показателям, то решение считается найденным и передается в систему, в другом случае моделирование повторяется с измененными входными параметрами[1, 2, 41].

По отношению к объекту управления – потоку, проходящему через усреднительный склад, на основе данной модели могут быть решены как прямая, так и обратная задачи.

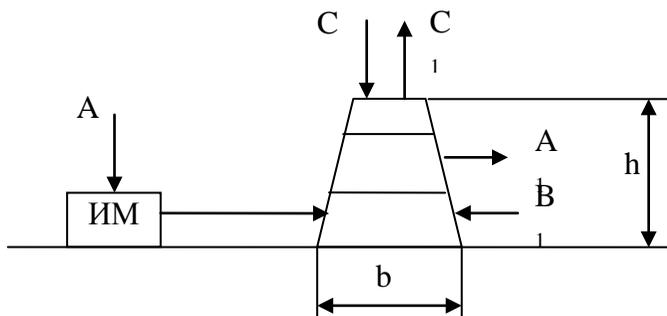


Рис. 2.4. Модель усреднительного склада

При решении прямой задачи искомым является вектор выходных параметров:

$$B_1(A, C). \quad (2.6.)$$

При решении обратной задачи вектор входных параметров определяется из соотношения:

$$A_1(B, C). \quad (2.7)$$

Задача оптимизации параметров усреднительного склада, при заданных векторах X и Y , описывается соотношением:

$$C_1 = F(A, B). \quad (2.8)$$

Постановка задачи в виде (2.6), (2.7) дает возможность использовать модель в процессе управления потоком, а постановка в форме (2.8) позволяет решить задачу оптимизации параметров склада.

Вектор параметров на входе системы – усреднительного склада – имеет вид:

$$A = \{ \gamma, \alpha_i, \beta_i, \lambda_{ii}, \sigma_{\alpha i} \}; \quad (2.9)$$

где γ – количество смеси качества, завезенного на усреднительный склад за моделируемый период; α_i – содержание компонента 1 в смеси, %; $\beta_i, \lambda_{ii}, i = (1, \dots, N)$ – среднее содержание компонентов 2 – 4 в смеси; $\sigma_{\alpha i}$ – средние квадратические отклонения общего содержания компонентов на входе усреднительного склада за моделируемый период.

Вектор технологических параметров проектируемой системы – усреднительного склада – имеет вид:

$$C = \{L, b, h, n, V\}, \quad (2.10)$$

где L – длина склада; b – ширина склада; h – высота склада; n – количество слоев в штабеле; V – объем смеси.

Вектор параметров на выходе проектируемой системы – усреднительного склада – имеет вид:

$$B_1 = \{ \alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \lambda_i, \sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma, \sigma_\lambda, \sigma_n^2 \}, \quad (2.11)$$

где $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \lambda_i, i = (1, \dots, m)$ – общее содержание всех составляющих смеси, отгружаемой со склада за моделируемый интервал времени, где m – количество отгруженных порций, %; $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma, \sigma_\lambda$ – среднеквадратические отклонения общего содержания компонентов в смеси; %; σ_n^2 – дисперсия качества смеси.

Для оценки корректности моделей, планирования и проведения эксперимента по определению рациональных параметров карьерных усреднительных складов постановка задачи управления потоков может выглядеть следующим образом: имеются данные об объемах и качестве формируемого штабеля. Требуется определить общее содержания сырья в штабеле, его ситовые характеристики и

дисперсию качества в отгружаемых порциях за период моделирования.

В качестве управляемых параметров при планировании эксперимента можно принять:

- длину усреднительного штабеля;
- режим поступления сырья в штабель;
- направления перемещения фронта разгрузки сырья.

Эффективность усреднения на карьерных складах может определяться общей дисперсией качества сырьевой смеси в отгружаемых со склада порциях смеси или критерием оптимальности при постановке эксперимента, который имеет вид:

$$\sigma^2 \rightarrow \min. \quad (2.12)$$

2.3. Разработка модели для управления процессом агломерации

В результате исследований, проведенных в НИИСМ, установлены закономерности, характерные для спекания шихты на основе суглинков с применением углей с большим содержанием летучих. Так при замене антрацита топлива с содержанием 28-30% летучих процесс агломерации минских суглинков интенсифицируется, но зона горения растягивается, а поэтому спек в нижней части раскален. При увеличении содержания летучих в углях более 28-30% процесс агломерации замедляется. Качественная характеристика аглопорита, спекаемого с различными видами технологического топлива, практически не изменится. 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 нецелесообразно. Однако, применение смеси топлива, состоящей из одной части антрацита и двух частей угля с большим содержанием летучих, за счет повышения температуры горения топлива в слое позволило добиться большей полноты сгорания летучих (по сравнению с антрацитом штыбом, сжигаемым в агломерируемом слое) [20, 23, 24].

Опыт показывает, что неудачное конструктивное решение или неправильный режим охлаждения шихты приводят к низкому каче-

ству 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.

Однако во многих случаях реальных теплотехнологических процессов не требуется та высокая степень точности, которую дают аналитические либо численные методы моделирования [42]. 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 [43, 44].

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

– Испарение гигроскопической влаги при температурах до 100°C.

– Подогрев слоя шихты при температуре от 100 до 800°C (в этот период происходит дегидратация глинистых минералов и гидроокислов железа).

– Воспламенение топлива, находящегося в шихте (в этот период при температуре 800–1600°C 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).

– Охлаждение конгломерата (в этот период завершаются процессы кристаллизации магнетита и α -кристобалита, α -кварц переходит в β -кварц, при этом кристаллическими фазами являются: кварц, полевой шпат, кристобалит и муллит).

Сейчас в республике идет развитие исследований по экономии технологического топлива и замене дефицитных и дорогостоящих импортных его видов на местные, 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 вскрытых 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.

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.

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

Весь процесс агломерации происходит при определенном аэродинамическом режиме. Разрежение по зонам спекания составляет 1,4-2,0 кПа.

Рассмотрим процесс, соответствующий третьему этапу технологии, при допущениях: скорость перемещения фронта затвердевания в корке шихты сравнительно невелика; параметры внешней охлаждающей среды T_c резко не изменяются; форма объекта может быть принята в разрезе квадратного сечения с закруглениями; изотермы фронта затвердевания сохраняют взаимное подобие по мере продвижения вглубь объекта, распределение температуры в сечении твердой корки шихты может быть найдено путем решения краевой задачи для расчетной области вида:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0, \quad (2.13)$$

$$T|_{r=r_\tau} = T_\tau, \quad T|_{r=l} = T_\Pi, \quad (2.14)$$

где x, y – координаты на плоскости; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, r_τ – текущее значение радиуса-вектора, l – размер объекта; T_τ, T_Π – соответственно температура кристаллизации и температура поверхности.

Перейдем в краевой задаче от декартовых координат к полярным: $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$, в результате получим:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0, \quad (2.15)$$

$$T|_{r=r_\tau} = T_\tau, \quad T|_{r=l} = T_\Pi. \quad (2.16)$$

Учитывая симметрию задачи, слагаемым, зависящим от φ , в уравнении (2.13) можно пренебречь.

Тогда имеем обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка, допускающее понижение порядка,

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0, \quad (2.17)$$

которое решается с помощью замены

$$\frac{dT}{dr} = p, \quad \frac{d^2 T}{dr^2} = p'.$$

В результате замены уравнение (2.15) сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению первого порядка с разделяющимися переменными

$$p' + \frac{1}{r} p = 0,$$

откуда $\frac{dp}{p} = -\frac{dr}{r}$ и $\ln p = -\ln r + \ln C_1$. Используя свойства логарифмов

$$\ln p = \ln \frac{C_1}{r} \quad p = \frac{C_1}{r},$$

возвращаемся к исходным переменным

$$\frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r} \quad \text{и} \quad dT = \frac{C_1}{r} dr.$$

Общее решение уравнения (2.13) имеет вид

$$T = C_1 \ln r + C_2. \tag{2.18}$$

С учетом граничных условий (2.14) получим

$$\begin{cases} C_1 \ln r_\tau + C_2 = T_\tau, \\ C_1 \ln l + C_2 = T_\Pi \end{cases}. \tag{2.19}$$

Вычитая из первого уравнения системы (2.18) второе, имеем

$$C_1 (\ln r_\tau - \ln l) = T_\tau - T_\Pi,$$

следовательно

$$C_1 = \frac{T_\tau - T_\Pi}{\ln \frac{r_\tau}{l}}.$$

Подставляем значение C_1 в первое уравнение системы

$$\frac{T_\tau - T_{II}}{\ln \frac{r_\tau}{l}} \ln r_\tau + C_2 = T_\tau.$$

Находим значение C_2 и подставляем в общее решение уравнения (2.13). Тогда после преобразований получим для каждого фиксированного значения времени

$$T_{(r,\tau)} = T_\tau + \frac{T_\tau - T_{II}}{\ln \frac{r_\tau}{l}} \cdot \ln \frac{r}{r_\tau}.$$

Рассмотрим уравнение теплового баланса с учетом фазового перехода в виде:

$$\int_0^l \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{r=0} dl = \rho (L + c(T_\tau - \bar{T})) \frac{dS}{d\tau}, \quad (2.20)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность; c – ко-

эффициент теплоемкости; $\bar{T}(\tau) = \frac{1}{S} \int \int T(x, y, \tau) dx dy$ – средняя массовая температура твердой корки к моменту τ ; $S(\tau)$ – площадь сечения твердой корки, L – удельная теплота кристаллизации.

Левая часть формулы (2.20) представляет собой расход теплоты с охлаждаемого участка длиной l , правая учитывает выделение теплоты фазового перехода и изменение состояния твердой корки при снижении температуры от T_τ до $\bar{T}(\tau)$.

Используя решение краевой задачи (2.13) – (2.14), с помощью уравнения теплового баланса (13) можно установить закон изменения во времени объема твердой корки шихты.

Для вычисления значений координат x и y воспользуемся формулами с коэффициентами, приведенными в работе [24]:

$$\begin{aligned}
 x &= l(\alpha_1 r \cos \varphi + \alpha_2 r^5 \cos 5\varphi), \\
 y &= l(\alpha_1 r \sin \varphi + \alpha_2 r^5 \sin 5\varphi).
 \end{aligned}$$

Тогда можно записать

$$M = \frac{2K\Theta_{\Pi}\tau}{2 + K\Theta_{\Pi}} = \frac{1}{4} \left[\alpha_1^2 (1 - (1 - 2 \ln r_{\tau}) r_{\tau}^2) + \alpha_2^2 (1 - (1 - 10 \ln r_{\tau}) r_{\tau}^{10}) \right] \quad (2.21)$$

где

$$K = \frac{c(T_{\tau} - T_{\Pi})}{L}; \quad \Theta_{\Pi} = \frac{T_{\tau} - T_{\Pi}}{T_{\tau} - T_c}. \quad (2.22)$$

Из формулы (2.20) можно найти величину безразмерного времени τ^0 и времени τ :

$$\tau^0 = \frac{M(2 + K\Theta_{\Pi})}{2K\Theta_{\Pi}}; \quad \tau = \frac{\rho c}{\lambda} l^2 \tau^0. \quad (2.23)$$

В момент окончания затвердения $r_{\tau} = 0$, расход теплоты с охлаждаемого участка M_0 можно вычислять по формуле

$$M_0 = \frac{1}{4} (\alpha_1^2 + \alpha_2^2).$$

Рассмотрим затвердение шихты в паллете размерами 0,7 м × 0,7 м ($l = 0,35$ м); $T_{\tau} = 1200$ °С; $T_{\Pi} = 800$ °С; $T_c = 1600$ °С.

Известно, что:

$$\lambda = 0,437 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}; \quad \rho = 1020 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad c = 0,53 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; \quad \frac{r_0}{l} = 0,5$$

– отношение радиуса закругления к половине стороны квадрата; $\alpha_1 = 1,073, \alpha_2 = -0,095$ – коэффициенты, соответствующие значению

$\frac{r_0}{l}$ l ; h_l – шаг изменения во времени фронта затвердения твердой

корки; критерий Био $B_i = \frac{\alpha^i l}{\lambda}$, (α^i – параметр, зависящий от конкретных условий теплотехнического процесса и требующий теоретико-экспериментальной идентификации) является безразмерной характеристикой размера объекта. Принимаем

$\alpha^i = 1,1 \cdot 3,8(T_{\Pi} + T_C^i)$, $i = 1, 2, \dots, \frac{1}{h_1} - 1$; $r_{\tau_0} = 1$ – положение фронта затвердения при $\tau = 0$, h_2 – шаг по толщине твердой корки для фронта

$$r_{\tau} \left(r_j = 1 - j h_2, j = 0, 1, \dots, \frac{1}{h_2} - 1 \right); \quad \varphi \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right] \text{ – полярный}$$

угол.

Вычисляем значения M_i по формуле (2.20) для значений r_{τ} с учетом шага h_l , затем находим K , Θ_{Π} по формулам (2.22), время τ_i^0 и τ_i по формулам (2.23). Для каждого значения τ_i распределение температуры с учетом шага h_2 ищем по формуле

$$T(x_j, y_j) = T_{\tau_j} + (T_{\tau_j} - T_{\Pi}) \frac{\ln \frac{r_j}{r_{\tau_j}}}{\ln \frac{r_j}{l}}$$

В момент окончания затвердения $r_{\tau} = 0$, тогда имеем

$$M_0 = (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) = 0,29; \quad \tau^0 = \frac{M_0(2 + K\Theta_{\Pi})}{2K\Theta_{\Pi}} = 0,4 \cdot 10^{-4};$$

$$\tau = \frac{\rho c}{\lambda} l^2 \tau^0 = 27(\text{мин}).$$

На основании вышеизложенного можно вычислить рекомендуемую скорость движения паллет в агломерационной машине, кото-

рая составляет 1,1 м/мин. Это значение входит в рамки технологически заложенных скоростей движения от 0,415 до 1,25 м/мин и является оптимальным для полного затвердевания шихты. По данным наибольший эффект в повышении газодинамических свойств спекаемого слоя за счёт сегрегации при загрузке достигается в том случае, когда в каждом элементарном слое по высоте соотношение крупных фракций и фракций, которые свободно укладываются в пустоты между гранулами одного размера, будет меньше величины, обеспечивающей минимальную порозность. Для подавляющего большинства шихт соотношение крупных и мелких фракций в каждом элементарном слое должно быть 4:1. Рациональная загрузка шихты на палеты агломерационной машины позволяет интенсифицировать процесс спекания и улучшить прочность щебня, данные исследования позволили получить оптимальные параметры подготовки шихты. Предшествующие спеканию технологические операции во многом определяют формирование свойств получаемого аглопорита и по существу сводятся к оптимизации газодинамических условий агломерации. Тем не менее, управлению процессом агломерации непосредственно на агломерационных установках отводится весьма значительная роль, как в производстве, так и в проводимых исследованиях.

Одним из способов управления процессом агломерации непосредственно на колосниковой решётке агломерационной установки является прямое воздействие на агломерируемый слой. В некоторых случаях целью такого воздействия является снижение газодинамического сопротивления путём его разрыхления, в других случаях преследуется противоположная цель, то есть повышение газодинамического сопротивления путём уплотнения его. Следует заметить, что оба указанных способа дают положительный эффект, но при строго определённых условиях. Большинство указанных исследований основано на теории фильтрации газа через пористые среды и газодинамике агломерационного процесса и представляет практический интерес, позволяя решать многие вопросы агломерационного производства. Однако сложность механизма тепло- и массопереноса в процессе агломерации, проявляющаяся при решении ряда систематически возникающих практических задач, вызывает необходимость его дальнейшего изучения.

Выводы по разделу 2

1 Проведен анализ способов усреднения материалов, который позволил выбрать необходимые материалы (торф фрезерный, дробленый брикет) и определить их основные физико-технические свойства (тип торфа, зольность, фракционный состав, влажность) для производства ПСМ.

2 Установлено, что для стабилизации ПСМ по плотности и прочности необходимо проводить усреднение сырьевой смеси по влажности, гранулометрическому составу, теплотворной способности, который позволит получить качественный ПСМ по прочности, плотности другим показателям.

3 Методом математического моделирования оптимизирован процесс получения аглопоритового щебня с использованием вскрышных пород месторождений нерудных строительных материалов

4 Получена модель, связывающая прочность аглопоритового щебня с предлагаемым составом сырьевой смеси.

5 В качестве добавок можно использовать отходы топливных брикетов (лом), которые по энергетическим свойствам не уступают покупаемым дорогостоящим добавкам (уголь), а по стоимости на порядок ниже древесных опилок.

6 Произведен инженерный расчет режимов агломерации шихты, позволяющий оптимизировать некоторые технологические параметры (скорость паллет, время агломерации).

7 Путем решения краевой задачи найдено распределение температуры в сечении твердой корки шихты и вычислена оптимальная скорость движения паллет в агломерационной машине, которая позволяет увеличить производительность оборудования.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ТОРФА И ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Определение основных свойств сырьевой смеси и качественных показателей аглопорита

При агломерации силикатного сырья замена антрацита 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. Выявлен ряд общих закономерностей, характерных для агломерации шихт как на основе глинистого, так и железорудного сырья. По мере уменьшения крупности топливных частиц заметно повышается восстановительный потенциал продуктов горения и снижается высота окислительной зоны. Так, снижение крупности топлива с 7,2–9 мм до 4,8–6,0 мм привело 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 также приводят к выводу о снижении температурного уровня процесса при использовании мелкого топлива в сравнении с более крупным. По степени углекислотности 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; среднетемпературные 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 [19, 20].

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 газоходы. 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. Вышеприведенные закономерности указывают на целесообразность использования как торфа, так и сапропелей в качестве технологического топлива при рациональных способах их окускования и сжигания летучих.

По данным обследования аглопоритовых предприятий в качестве технологического топлива с малой теплотворной способностью применяется каменный и бурый уголь. Характеристика бурого угля следующая: 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 [23, 24].

При замене антрацита топливом с содержанием 28–30% летучих процесс агломерации суглинков интенсифицируется, но зона горения растягивается, а поэтому спек в нижней части раскалывается. При увеличении содержания летучих в углях более 28–30% процесс агломерации замедляется. Качественная характеристика аглопорита, спекаемого с различными видами технологического топлива, практически не изменяется.

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. Однако применение смеси топлива, состоящей из одной части антрацита и двух частей угля с большим содержанием летучих, за счет повышения температуры горения топлива в слое позволило добиться большей полноты сгорания летучих.

В цехе теплоизоляционных материалов ОАО «Минский завод строительных материалов» были проведены промышленные испытания щебня и песка аглопоритовых, произведенных с использова-

нием фрезерного торфа ОАО «Торфобрикетный завод «Усяж»» и выпущена опытная партия аглопорита в количестве 230 м³.

Тип - торфа низинный, $A_c=10\%$, $W=47,3\%$; $R=30\%$.

Технологические параметры до проведения испытаний:

- температура в пламенном пространстве горна 950–1000 °С;
- скорость агломерационной машины (по вариатору) 80 В;
- уголь на отметке 4, на вариаторе 60 В;
- опилки на отметке 2;
- зазор между валками камневыделительных вальцев 10 мм;
- зазор между валками вальцев тонкого помола 5–15 мм.

Состав шихты(% по массе):

- суглинки месторождения Фаниполь– 89,3%;
- уголь марки АШ 0-6 мм–7,8%;
- древесные опилки–2,9%.

Состав шихты с использованием торфа фрезерного и влажность компонентов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Состав шихты и влажность ее компонентов

Наименование компонентов	Состав шихты без добавки, мас. %	Влажность компонентов шихты, %
Суглинки	88–89	18,3–18,5
Уголь марки АШ	7–8	10,5–11,2
Торф фрезерный	2–3	49,66–46,12
Возврат (сверх 100%)	10	–

Химический состав и физико-механические показатели суглинков месторождения «Фаниполь» приведены в табл. 3.2-3.3, которые применялись нами для использования на МЗСМ.

Таблица 3.2

Химический состав суглинков месторождений «Фанипольское»
и «Фаниполь»

Содержание оксидов, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
№ 1	78,03	8,57	0,48	2,16	2,80	1,0	3,70
№ 2	80,38	6,36	0,35	2,42	3,56	1,6	2,57

Примечание: в строке № 1 указан химический состав месторождения «Фанипольское», в строке № 2 месторождение «Фаниполь».

Анализ табл. 3.2 показывает, что имеется значительное отличие по химическому составу месторождений (данные 1980 г по месторождению «Фанипольское» и данные МЗСМ за 2011 г.)

Таблица 3.3

Физико-химические показатели суглинков месторождения
«Фаниполь»

№	Характеристика суглинков	Фактическое значение показателей
1	Пластичность, %	22,965
2	Число пластичности	3,055
3	Размер фракции, мм:	
	более 0,06	6,04
	0,06-0,01	71,43
	менее 0,01	22,53
	0,01-0,005	5,84
	0,005-0,001	7,69
	менее 0,001	9,01

Суглинки месторождения «Фаниполь», в зависимости от содержания Al₂O₃ относятся к группе «кислые», от содержания Fe₂O₃ – «со средним содержанием красящих оксидов», от содержания TiO₂ – «с низким содержанием красящих оксидов», от содержания свободного SiO₂ – «с высоким содержанием свободного кварца». Суглинки месторождения «Фаниполь» в зависимости от содержания тонкодисперсных фракций (частиц менее 0,01 и менее 0,001 мм)

относятся к группе «грубодисперсные», в зависимости от пластичности – «малопластичные».

В ходе проведения заводских испытаний древесные опилки были заменены на торф фрезерный ОАО «ТБЗ Усяж» в том же процентном соотношении. При этом первоначально была снижена подача угля на 1,5–2,0%.

Получены модели, характеризующие качественные показатели агпорита с вводом фрезерного торфа и опилок. Зависимость насыпной плотности от размера фракций с вводом фрезерного торфа представлена рис. 3.1. Зависимость насыпной плотности от размера фракций с вводом опилок представлена табл. 3.4 и рис.3.2. Зависимость прочности при сдавливании в цилиндре от размера фракций с вводом фрезерного торфа представлена табл. 3.2 и рис. 3.3. Зависимость прочности при сдавливании в цилиндре от размера фракций с вводом опилок представлена табл. 3.4 и рис. 3.1-3.2, 3.4.

Таблица 3.4

Зависимость насыпной плотности аглопорита от размера его фракций

№ п/п	Размер фракций, мм	Насыпная плотность, кг/м ³	
		торф	опилки
1	40	545	570
2	30	555	580
3	20	575	590
4	10	670	695
5	2.5	1030	1030

$$\rho(\phi) = b_0 + b_1 * \phi + b_2 * \phi^2 + b_3 * \phi^3 \quad (3.1)$$

1. где $b_0 = 1.196 * 10^3, b_1 = -76.109, b_2 = 2.887, b_3 = -0.035$

2. где $b_0 = 1.189 * 10^3, b_1 = -71.808, b_2 = 2.696, b_3 = -0.032$

1 – торф; 2 – опилки.

Разработаны математические модели, позволяет определить зависимость насыпной плотности аглопорита от размера его фракции при различном содержании сырьевой смеси фрезерного торфа (1) и древесных опилок (2), а также оптимизировать процесс в пределах 10-20 мм и сделать его менее затратным.

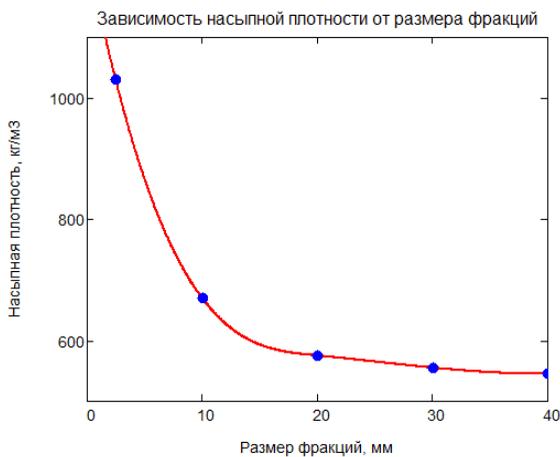


Рис.3.1. Зависимость насыпной плотности от размера фракций (торф)

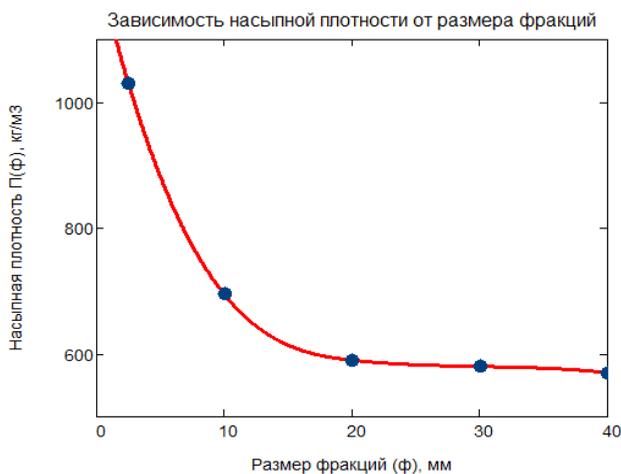


Рис. 3.2. Зависимость насыпной плотности от размера фракций (опилки)

$$\sigma(\phi) = b_0 + b_1 * \phi + b_2 * \phi^2 \quad (3.2)$$

1. где $b_0=2.42$, $b_1= -0.168$, $b_2= 5.3*10^{-3}$
 2. где $b_0=2.35$, $b_1= -0.14$, $b_2= 4.4*10^{-3}$
 1 – торф; 2 – опилки.

Разработаны математические модели, позволяющие определить зависимость насыпной плотности аглопорита от размера его фракции при различном содержании сырьевой смеси фрезерного торфа (1) и древесных опилок (2), а также оптимизировать процесс в пределах 10-30 мм и сделать его менее затратным.



Рис. 3.3. Зависимость прочности аглопорита при сжатии в цилиндре от размера его фракций с вводом фрезерного торфа

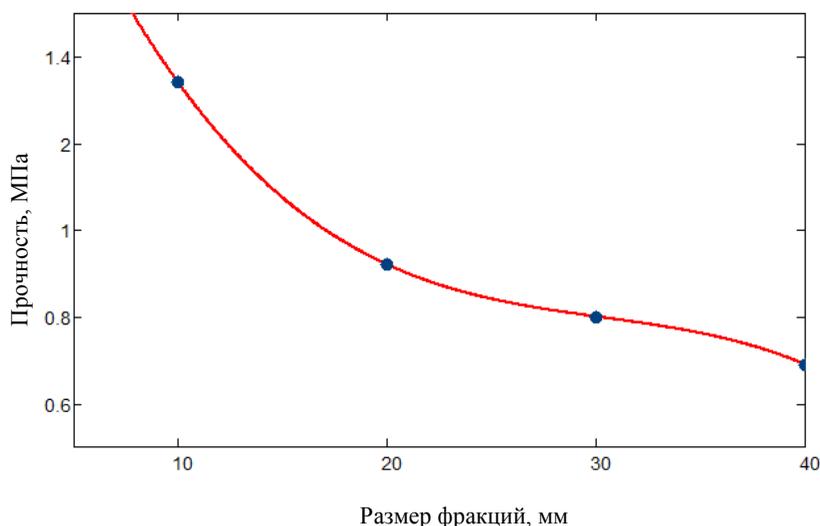


Рис. 3.4. Зависимость прочности аглопорита при сжатии в цилиндре от размера его фракций с вводом опилок

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.

Полученные аглопоритовый щебень и песок с применением фрезерного торфа и древесных опилок по показателям прочности и плотности соответствовал требованиям стандарта [2С – 3С], согласно которому по показателям насыпной плотности аглопоритовый щебень и песок относят: фракция 20–40 мм и 10–20 мм к марке 600; фракция 5–10 мм к марке 700; фракция менее 5 мм к маркам 1000–1100. По показателям прочности аглопоритовый щебень относится: фракция 20–40 мм и 10–20 мм к марке 75; фракция 5–10 мм к марке 200–250. Полученный нами аглопоритовый щебень и песок практически по всем качественным показателям близки показателям продукции с использованием обычной шихты. 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 может увеличить выход недожога и повлиять на экологическую обстановку территории. Работа действующих 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).

3.1.1. Методика проведения опытов

Фрезерный торф должен соответствовать [4С-7С], топливные брикеты [8С].

Основные контролируемые параметры фрезерного торфа:

- влажность (не более 50%);
- зольность (не более 23%);
- насыпная плотность при условной массовой доле влаги 40% (не менее 250 кг/м³).

Основные контролируемые параметры топливных брикетов марки БТ-7:

- влажность (не более 20%);
- зольность (не более 23%);
- механическая прочность (не менее 94%).

Один раз в месяц определяется:

- массовая доля мелочи топливных брикетов, куски размером менее 25мм (не более 8% от взятой партии);
- массовая доля частично разрушенных брикетов, куски размером более 25мм (не более 25% от взятой партии).

Подача торфа проводилась через питатель опилок. Заполнение паллет шихтой с торфом началось с 100-й паллеты. Скорость агломерационной машины по вариатору 80В. Шибер на питателе опилок опустили на минимальную отметку. С 125-й паллеты шибер на питателе угля установлен на среднюю отметку. Температура в горне не изменилась и составила 960–980 °С.

При повторном опыте с 25-й паллеты увеличили подачу угля на вариаторе с 60 В до 150 В. С 55-й паллеты увеличили подачу угля на вариаторе до 180 В. На разгрузке агломерационной машины с 100 по 120 паллету наблюдалось увеличение выхода недогара. С 120-й по 125-ю паллету недогар уменьшился до полного съема. С первой по 125 паллету недогара нет, постепенно увеличивается выход недожога. С первой паллеты корж полностью не спекшийся, весь ссыпается в недожог. С 25 паллеты корж снова снимается, но повышен выход недожога и несколько паллет рассыпалось. С 55 паллеты съем практически полный. С использованием фрезерного торфа было и произведено 230 м³ аглопорита. Со следующими технологическими параметрами: скорость агломерационной машины

по вариатору 80–90 В; уголь (180–190 В); температура в пламенном пространстве горна 950–1000°С.

В процессе проведения испытаний контролировались следующие технологические параметры:

дозировка компонентов шихты;

влажность компонентов шихты;

грансостав шихты;

влажность шихты;

скорость движения машины;

высота слоя спекаемой шихты;

разрезание в вакуум-камерах агломерационной машины.

Определялись:

визуально характеристика коржа со стороны разгрузки машины;

качественные показатели полученного аглопорита.

Были отобраны пробы:

аглопоритового песка и щебня с ленты галереи склада до проведения испытаний и после замены древесных опилок на торф;

аглопоритового щебня фракции (2,5–15) мм из силоса на следующий день.

3.1.2. Технологические свойства и физико-технические параметры сырьевой смеси и аглопорита

Результаты испытаний фрезерного торфа приведены в таблице 3.5, щебня и песка аглопоритовых до начала испытаний, с использованием опилок и фрезерного торфа – в табл. 3.6– 3.7.

Таблица 3.5

Физико-механические свойства фрезерного торфа

№ п/п	Техническая характеристика	Фактическое значение показателей
1	2	3
1.	Зерновой состав, % Размер фракции, мм	
	>20	0,31
	>10	18,18
	>5	28,25

1	2	3
	>2,5	12,14
	>1,25	5,54
	>0,63	5,28
	>0,315	6,23
	>0,14	8,00
	<0,14	16,07
2.	Влажность, %	47,3
3.	Зольность, %	10,0
4.	Степень разложения, %	30,0

Таблица 3.6

Результаты испытаний песка и щебня аглопоритовых с добавлением опилок

№ п/п	Техническая характеристика	Фактическое значение показателей
1	2	3
1.	Зерновой состав, %	
	Размер фракции, мм	
	>20	14,90
	>10	46,43
	>5	37,44
	>2,5	0,55
	<2,5	0,68
2.	Прочность заполнителя сдавливанием в цилиндре, %	0,96

Опилки делят на две основные категории: опилки от продольной распилки бревен на лесопильной раме (имеют форму, близкую к кубической) и опилки от обработки древесины на круглопильных станках (имеют волокнистую структуру). Фракционный состав опилок приведен в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Фракционный состав опилок, полученных на лесопильных рамах

Опилки	Диаметр отверстия сита или размер	Фракционный состав, %
Остаток на сите	10 мм	0,6
Остаток на сите	5 мм	2,6
Остаток на сите	2 мм	63,6
Остаток на сите	1×1 мм	20,2
Прошедшие через сито с отверстием	1×1 мм	13,0

Таблица 3.8

Результаты испытаний песка и щебня аглопоритовых добавлений фрезерного торфа

№ п/п	Техническая характеристика	Фактическое значение показателей для каждого образца		
		Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
1	2	3	4	5
1.	Зерновой состав, %			
	Размер фракции, мм			
	>20	5,65	6,21	5,61
	>10	23,54	35,70	43,10
	>5	37,21	34,05	28,73
	>2,5	19,30	12,45	11,55
	>1,25	4,88	3,93	3,42
	>0,63	2,78	2,43	2,12
	>0,315	1,70	1,23	1,25
	>0,14	1,57	1,08	1,13
	<0,14	3,37	2,86	3,09
2.	Прочность заполнителя сдавливанием в цилиндре, МПа	1,18	1,94	2,27

Определен оптимальный состав шихты по результатам предварительных исследований (табл. 3.9).

Таблица 3.9

Оптимальный состав шихты по результатам предварительных исследований

Наименование компонентов	Состав шихты без добавки, масс. %	Влажность компонентов шихты, %	
Суглинок	88-89	18,3	18,5
Уголь	7-8	10,5	11,2
Торф фрезерный	2-3	49,66	46,12
Возврат	10	-	-

Результаты проведенных исследований показали, что прочность и плотность аглопорита с добавлением фрезерного торфа соответствует стандартам [2С -3С].

Получены зависимости, характеризующие прочность аглопорита, полученные при вводе в состав шихты отходов брикетного производства (некондиционный брикет - лом брикета) от фракций аглопорита (табл. 3.10).

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 5,15 \phi_1^{-0,72} \\ R^2 &= 0,9991 \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= 4,66 \phi_2^{-0,68} \\ R^2 &= 0,9804 \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= 3,29 \phi_3^{-0,63} \\ R^2 &= 0,9991, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где $\phi_1=5-10$ мм, $\phi_2=10-20$ мм, $\phi_3=20-40$ мм.

С целью сокращения угля в состав шихты вводили до трех процентов лома брикетов, который обрабатывали в валковой дробилке до размера менее 5 мм (табл. 3.10)

Таблица 3.10

Состав шихты для получения аглопорита

Состав шихты	Состав шихты, %			
	Глина	Уголь	Опилки	Лом брикетов
№1	86	8	4	1
№2	86	7	4	2
№3	86	6	4	3

Формулы характеризуют зависимость плотности аглопорита от размера его фракций, полученных согласно техническим условиям. Следует отметить, что плотность и прочность аглопорита изменяется равномерно в диапазоне исследуемых фракций (5-40 мм). Модели (22-24) характеризуют зависимость плотности аглопорита от состава вводимых в сырьевую смесь выгорающих добавок (торф и опилки). По данной технологии произведен экономический расчет и получен годовой экономический эффект в сумме 110480500 рублей.

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 859,74 \phi_1^{-0,15} \\ R^2 &= 0,9865 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \rho_2 &= 835,75 \phi_2^{-0,14} \\ R^2 &= 0,972 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \rho_3 &= 811,81 \phi_3^{-0,13} \\ R^2 &= 0,9117 \end{aligned} \quad (3.8)$$

где $\phi_1=5-10$ мм, $\phi_2=10-20$ мм, $\phi_3=20-40$ мм.

Важным фактором получения аглопорита являются его теплоизолирующие свойства. При определении коэффициентов теплопроводности дисперсных материалов необходимо прежде всего принимать во внимание возможное перераспределение влаги в образце во время опыта под воздействием градиента температуры. Градиенты температуры, поэтому должны быть минимальными. В то же время общий перепад температуры в образце должен обеспечить необходимую точность опыта.

Устройство, разработанное в ГНУ «Институт природопользования» (авторы Бровка Г.П. и Бровка А.Г.), предназначено для определения коэффициентов теплопроводности материалов методом

стационарного теплового режима [45]. Технические характеристики устройства представлены в табл. 3.11.

Таблица 3.11
Технические характеристики устройства для определения коэффициентов теплопроводности стационарным способом

Параметр	Значение
Диаметр исследуемых образцов, мм	80-120
Высота исследуемых образцов, мм	20-45
Напряжение питания нагревателя, В	до 36
Сопротивление нагревателя, Ом	80-120
Чувствительность датчиков температуры, мкВ/°С	180-200
Диапазон температур, °С	от -30 до +40
Диапазон определяемых коэффициентов, Вт/м.К	0,10-3,0
Погрешность определения коэффициента теплопроводности, %	±6

Особенности конструкции устройства для определения коэффициентов теплопроводности материалов стационарным способом заключаются в использовании датчиков теплового потока, вмонтированных в металлические корпуса теплообменников. Такая конструкция позволяет в достаточной степени усреднять температурное поле в плоскостях измерений и защищать датчики теплового потока и температуры от механических и физико-химических повреждений.

Объектом исследования являлись образцы фрезерного торфа и топливных брикетов из ОАО «ТБЗ Усяж» и ОАО «ТБЗ Старобинский». Определялись их основные физико-механические свойства (влажность, зольность, фракционный состав) и коэффициенты теплопроводности аглопорита, где фрезерный торф и дробленый брикет использовался как местный вид топлива совместно с антрацитом и древесными опилками. Качественные показатели аглопорита по плотности и механической прочности с применением МВТ и вторичных энергоресурсов соответствовали стандартам[2С-3С].

Также нами определялся основной показатель аглопоритового песка (фракция 0-5 мм) и аглопоритового щебня (фракция 2,5-10 мм) при добавлении лома брикетов – коэффициент теплопроводности. Соответственно получены экспериментальные данные: $\lambda_{п}=0,157$ Вт/м·К и $\lambda_{щ}=0,136$ Вт/м·К.

Существует ряд методов для определения коэффициента теплопроводности, которые исследуют зависимость коэффициента от температуры, влажности, структуры торфа по отдельности[42,43].

Эквивалентный коэффициент теплопроводности ($\lambda_{э}$) складывается из компонентов молекулярной (λ), конвективной ($\lambda_{к}$) и лучистой ($\lambda_{л}$) теплопроводности:

$$\lambda_{э} = \lambda + \lambda_{к} + \lambda_{л}. \quad (3.9)$$

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. Известно, что изменение коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры и влагосодержания описывается соотношением

$$\lambda = \lambda_0 + A t u e^{-b u}, \quad (3.10)$$

где λ_0 (ккал/м·час·°С)– коэффициент теплопроводности абсолютно сухого тела при 0 °С; A и b – постоянные, t (°С) – температура; u (%) – влагосодержание торфа.

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

Таблица 3.12

Данные по теплопроводности аглопорита (λ)
от его фракционного состава (Φ)

Фракция (Φ), мм	λ , Вт/м·к
0-5	0,164
2,5-10	0,152
10-20	0,140
20-40	0,130

Так с помощью метода наименьших квадратов на основе экспериментальных данных для торфа брикетированного получилась аналитическая зависимость коэффициента теплопроводности от температуры и влагосодержания в экспоненциальном виде

$$\lambda = \lambda_0 + 10,59tue^{-1,81u}. \quad (3.11)$$

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

Аналогичным методом для аглопорита получена зависимость коэффициента теплопроводности от размера его фракций (ϕ) в виде логарифмической функции

$$\lambda = -0,014 \ln(\phi) + 0,18 \quad (R^2 = 0,99). \quad (3.12)$$

На основании методики [11] составлена таблица и графическое трехмерное определение теплоты сгорания топлива в зависимости от влажности и зольности на сухое вещество.

3.2. Определение основных физико-механических и химических свойств сырьевой смеси для производства керамического кирпича с введением в состав сырьевой смеси фрезерного торфа и ВТЭР

Производственный цикл по изготовлению керамического кирпича выглядит следующим образом:

- глина из карьера доставляется в отделение первичной переработки сырья, где сортируется и измельчается.;
- измельченная глина доставляется в отделение вторичной переработки, где она смешивается с водой до получения однородной массы. В этом же отделении на специальной производственной линии формуется кирпич-сырец;
- приготовленный кирпич-сырец доставляется в сушильное отделение;
- после того как кирпич-заготовка был подсушен, его доставляют в тоннельную печь. В тоннельной печи при определенной температуре, которая может различаться в зависимости от типа кирпича, происходит процесс обжига;
- после обжига кирпич доставляется на склад готовой продукции.

В лабораторных условиях были изготовлены образцы полноценного кирпича трех составов с фрезерным торфом и контрольный – без добавления торфа(с опилками).

Состав изготовленных образцов приведен в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Составы образцов с фрезерным торфом

Компонент	Состав 1 (контрольный)	Состав 2	Состав 3	Состав 4
Глина месторождения «Лукомль-1»	72	70	68	66
Отсев из материалов дробления горных пород	21	21	21	21
Песок аглопоритовый фр. (0-5) мм	7	7	7	7
Торф фрезерный	-	2	4	6

Образцы были сформованы методом ручной набивки в формы размером – 250×120×70 мм.

В качестве основного глинистого компонента использовалась глина месторождения «Лукомль-1». Химический состав и физико-

механические показатели глины месторождения «Лукомль-1» приведены ниже.

Содержание химических составляющих, % по массе, должно быть:

– диоксида кремния (SiO_2)	не более – 85;
– в т.ч. свободного кварца	не более – 60;
– оксида алюминия (Al_2O_3)	от 14 до 28;
– оксида титана (TiO_2)	менее – 1,0;
– оксида железа (III) Fe_2O_3	менее – 15;
– сумма оксидов кальция и магния ($\text{CaO} + \text{MgO}$)	не более – 20;
– сумма оксидов калия и натрия ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)	не более – 7;
– содержание общей серы в пересчете на SO_3	не более – 2.

Потери при прокаливании глины должны быть не более – 15 %. Глина месторождения «Лукомль-1» – плотная, слоистая, жирная, светло-шоколадного и темно-коричневого цвета порода. Согласно классификационным признакам [1С] глина месторождения «Лукомль-1» относится:

– по минеральному составу – к группе гидрослюдисто-каолининовой;

– по содержанию Al_2O_3 в прокаленном состоянии – к группе полукислого глинистого сырья (содержание Al_2O_3 , % – от 14 до 28);

– по содержанию красящих оксидов – к группе с высоким содержанием Fe_2O_3 (содержание Fe_2O_3 в пересчете на прокаленное вещество, % – свыше 3);

– по содержанию TiO_2 – к группе с низким содержанием красящих оксидов. Массовая доля TiO_2 , % – менее 1,0;

– по содержанию водорастворимых солей – к группе с низким содержанием. Содержание водорастворимых солей на 100 г глины, мг.экв – от 1 до 5;

– по содержанию свободного кремнезема (SiO_2) – к группам со средним и высоким содержанием. Содержание свободного кварца, % – свыше 10;

– по содержанию тонкодисперсных фракций – к группе среднедисперсного и высокодисперсного сырья. Содержание частиц размером менее 10 мкм, % – свыше 60. Содержание частиц размером менее 1 мкм, % – свыше 40;

- по содержанию крупнозернистых включений – к группам со средним и низким содержанием. Количество включений размером более 0,5 мм, % – не более 5;
- по механической прочности на изгиб в сухом состоянии – к группе со средней механической прочностью. Прочность при изгибе в сухом состоянии: 5÷10 МПа;
- по пластичности – к группам среднепластичного и умереннопластичного глинистого сырья. Число пластичности – от 7 до 25;
- по огнеупорности – к группе легкоплавкого сырья. Огнеупорность, °С – менее 1350;
- по спекаемости – к группе неспекающегося глинистого сырья. Водопоглощение образца без признаков пережога – свыше 5%.

3.2.1. Физико-механические параметры образцов керамического кирпича, полученных лабораторным способом

Результаты исследования изготовленных образцов приведены в табл. 3.14.

В ходе проведения заводских испытаний древесные опилки были заменены на фрезерный торф. Состав шихты для производства кирпича с использованием фрезерного торфа и влажность компонентов приведены в табл. 3.15.

На рис. 3.5 показана зависимость водопоглощения кирпича керамического от его плотности, а на рис. 3.6 показана зависимость прочности на сжатие кирпича керамического от его плотности.

Таблица 3.14

Результаты исследования образцов

Составы	№ обр.	Геометрические размеры, мм			Полная усадка, %	Масса сырца, г	Масса образца после обжига, г	Водопоглощение, %
		Длина	Ширина	Высота				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Состав 1	1	239	115	66	5,4	-	3234	13
	2	237	114	66	5,8	-	3309	-
	3	240	116	67	4,8	-	3329	-
Ср. знач.					5,3			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Состав 2	1	242	117	67	4,0	4339	3344	12,7
	2	242	117	67	4,0	4387	3390	-
	3	242	117	67	5,0	-	3374	-
Ср. знач.					4,3			
Состав 3	1	242	117	67	5,0	4255	3294	12,6
	2	242	117	67	6,6	4251	3229	-
	3	241	116	66	5,4	4311	3217	-
Ср. знач.					5,7			
Состав 4	1	240	117	66	6,2	-	3180	13,7
	2	240	117	66	5,6	4195	3107	-
	3	241	117	66	6,0	4082	2998	-
Ср. знач.					5,9			

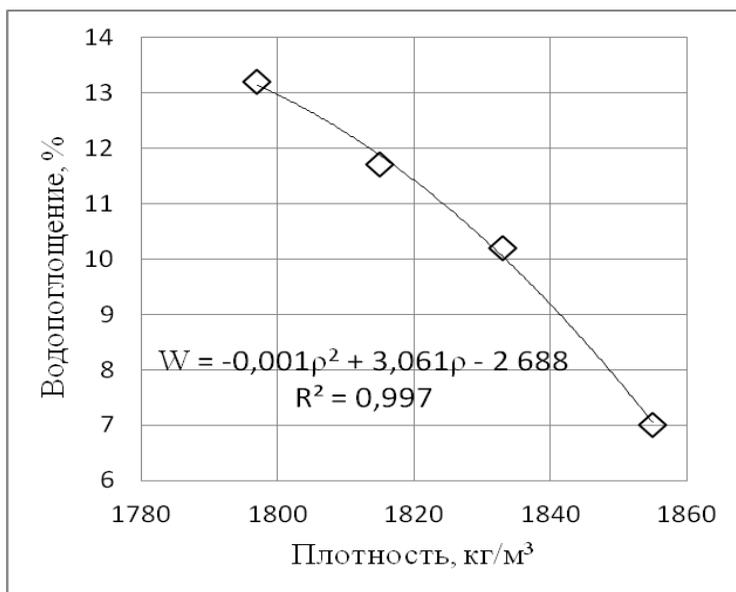


Рис. 3.5. Зависимость водопоглощения кирпича керамического от его плотности

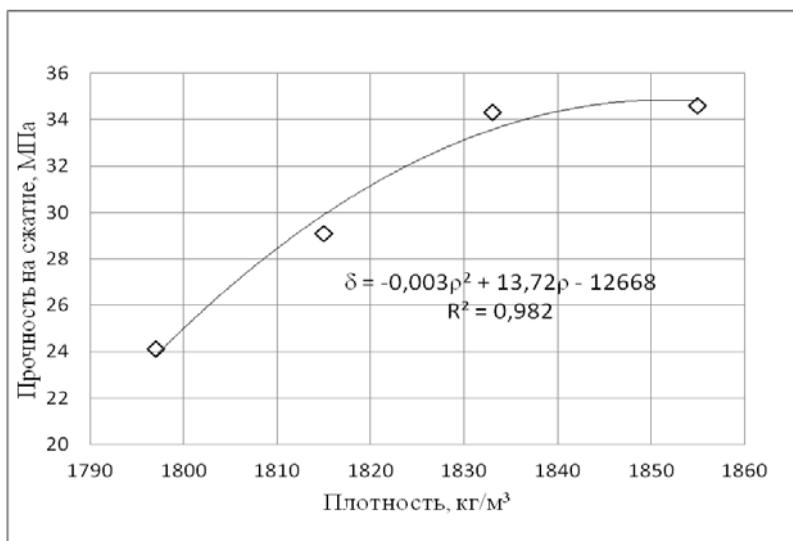


Рис. 3.6. Зависимость прочности на сжатие кирпича керамического от его плотности

Таблица 3.15

Состав шихты и влажность ее компонентов

Наименование компонентов	Состав шихты, мас. %	Влажность компонентов шихты, %	
глина м-я «Лукомль-1»	56-57	21,2	22
суглинки м-я «Фаниполь»	12	16,2	16,4
отсев из материалов дробления горных пород	23	3,8	3,6
песок аглопоритовый фр. (0-5) мм	6	6,4	7,4
торф фрезерный	2-3	49,66	46,12

3.2.2. Методика проведения испытаний

Подача торфа проводилась через питатель опилок. Количество подаваемого фрезерного торфа регулировалось (изменялось) частотой вращения двигателя привода питателя. Изготовление шихты

при подаче фрезерного торфа осуществлялась с частотой 12,7 Гц, затем подача была уменьшена до 10 Гц. Технологические параметры при изготовлении шихты с фрезерным торфом на первой линии МЗУ:

- зазор между валками камневыведительных вальцев 6–14 мм;
- зазор между валками вальцев тонкого помола до 3 мм;
- зазор между валками вальцев супертонкого помола до 2,5 мм;
- зазор между ножами и решетками чаши глинорастирателя – до 5 мм;
- подача торфа – 12,7–10 Гц;
- относительная влажность шихты – 17–18 мас. %.

Формование кирпича-сырца осуществлялось из свежеприготовленной шихты с торфом на вакуумном шнековом прессе «Petersen» (Германия). Технологические параметры формования кирпича-сырца:

- удельное давление прессования – 0,75–0,9 МПа;
- разряжение в вакуум-камере – 0,092–0,094 МПа;
- влажность бруса – 17,1–17,6 мас. %.

Всего было сформовано 9216 штук кирпича из шихты с фрезерным торфом. Технологические параметры сушки изделий:

- температура поступающего теплоносителя в тоннель – 62–72 °С;
- температура отработанного теплоносителя – 22–26 °С;
- время сушки 90 часов.

Обжиг высушенного кирпича-сырца осуществлялся в тоннельной печи.

Технологические параметры обжига изделий:

- режим толканий – 21 толк./сутки;
- максимальная температура обжига – 980 °С.

Температурная кривая обжига показана на рис. 3.7.

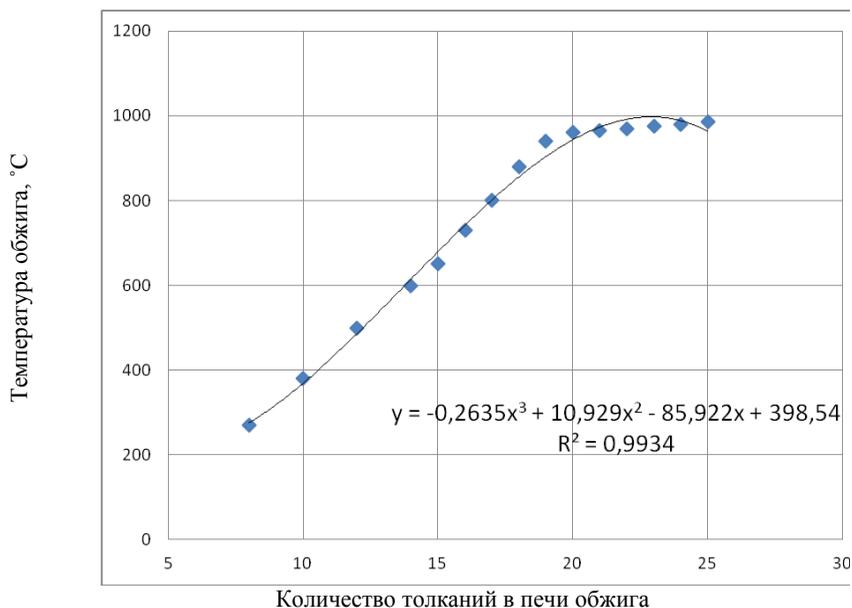


Рис. 3.7. Температурная кривая обжига керамического кирпича (одно толкание происходит в течении 1,14 часа)

3.3. Разработка критерия оптимизации процесса сушки керамических изделий

Весь процесс сушки при температуре среды T_c , влажности воздуха W и скорости движения v можно разделить на два периода:

1. период постоянной скорости сушки, когда изменение температуры объекта во времени τ постоянна $\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{const}\right)$ и скорость изменения влагосодержания постоянна $\left(\frac{\partial W}{\partial \tau} = \text{const}\right)$;

2. период падающей скорости сушки, когда скорость изменения влагосодержания убывает $\left(\frac{\partial W}{\partial \tau} < 0\right)$, а температура тела непрерыв-

но возрастает $\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} > 0\right)$. Переход от первого периода ко второму характеризуется критическим влагосодержанием на поверхности объекта W_k , которое для многих материалов близко к максимальному сорбционному влагосодержанию. Это характерно для мягких режимов сушки при не слишком больших значениях T_c , ν и значительном начальном влагосодержании.

Процесс сушки при первом этапе в условиях постоянства давления ($p = \text{const}$) характеризуется условиями [46]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial \tau} = -\frac{q_m}{\rho R}, \quad (3.13)$$

где q_m – интенсивность сушки, равная плотности потока влаги у поверхности тела; ρ – плотность материала; R – отношение объема тела к его поверхности. Рассмотрим систему дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса с учетом (3.13) в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_q \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon r q_m}{c_q \rho R} = 0, \end{array} \right. \quad (3.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_m \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{q_m}{\rho R} = 0, \end{array} \right. \quad (3.15)$$

где a_q, a_m – коэффициенты теплопроводности тепло- и массопереноса; ε – критерии испарения; r – характерный размер; c_q – удельная теплоемкость; δ – термоградиентный коэффициент.

Для такого описания процесса известно [47], что распределение температуры и влагосодержания внутри тела описывается параболической функцией, то есть

$$W = W_{\text{ц}} - \frac{x^2}{R^2} (W_{\text{ц}} - W_{\text{п}}), \quad (3.16)$$

$$T = T_{\text{ц}} + \frac{x^2}{R^2} (T_{\text{п}} - T_{\text{ц}}), \quad (3.17)$$

где индексы ц и П соответственно обозначают центр и поверхность объекта.

Перейдем к безразмерным величинам, используя критерии:

$$Ki_m = \frac{q_m R}{a_m \rho \Delta W} \quad - \text{массообменный критерий Кирпичёва}; \quad Ko = \frac{r \Delta W}{c_q \Delta T}$$

Lu = $\frac{a_m}{a_q}$ – критерий Коссовича; $\frac{a_m}{a_q}$ – критерий интенсивности распространения полей потенциала массопереноса относительно поля

температур; Pn = $\frac{\delta \Delta T}{\Delta W}$ – критерий Поснова, где ΔT и ΔW – заданные постоянные для T и W .

Решение системы (3.14)-(3.15) при условиях (3.16)-(3.17) примет вид [43]:

$$\begin{cases} W = \frac{W_{\text{ц}} - W_{\text{п}}}{\Delta W} = \frac{1}{2} Ki_m (1 + \varepsilon \cdot Pn \cdot Ko \cdot Lu), & (3.18) \\ T = \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{ц}}}{\Delta T} = \frac{1}{2} Ki_m \cdot \varepsilon \cdot Ko \cdot Lu. & (3.19) \end{cases}$$

Критерий Ki_m показывает скорость изменения относительного влагосодержания по относительному времени и в первом периоде сушки равен примерно 0,25, критерий испарения принимается $\varepsilon = 0,3$, критерий Lu характеризует интенсивность распространения влаги в теле по отношению к распространению тепла и принимается равным 3 [47].

Конец первого периода сушки соответствует критическому значению влагосодержания, определяемому величиной

$W_k = \frac{1}{3} Ki_m (W_o - W_p)$, где W_o и W_p – начальное и равновесное влагосодержание.

Во втором периоде сушки с падающей скоростью граничные условия имеют вид:

$$\left\{ -\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} + \alpha [T_c - T(R, \tau)] - r(1 - \varepsilon) \beta [W(R, \tau) - W_p] = 0, \quad (3.20) \right.$$

$$\left. a_m \left[\frac{\partial W(R, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} \right] + \beta [W(R, \tau) - W_p] = 0, \quad (3.21) \right.$$

$$\left. \frac{\partial W(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (3.22) \right.$$

где λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплоотдачи; β – коэффициент массопереноса.

Распределение влагосодержания и температуры в начальный момент второго этапа описывается в соответствии с формулами (3.16) и (3.17).

Таким образом, решая систему (3.18), (3.19) с граничными условиями (3.20), (3.21), (3.22) в критериальной форме получается результат

$$\left\{ T = f_1(\text{Fo}, \text{Lu}, \text{Bi}_q, \text{Ko}, \varepsilon), \quad (3.23) \right.$$

$$\left. W = f_2(\text{Fo}, \text{Lu}, \text{Bi}_m, \text{Pn}, \varphi_k), \quad (3.24) \right.$$

где $\text{Fo} = \frac{\alpha \tau}{R^2}$ – критерии Фурье; $\text{Bi} = \frac{\alpha R}{\lambda}$ – критерий Био: теплообменный – Bi_q и массообменный Bi_m .

Влияние критерия W_k сказывается лишь в начале второго периода, затем наступает регулярный режим, при котором интенсивность тепло- и массопереноса не зависит от W_k и зависимость будет иметь вид:

$$W = f_2 \left(\text{FoLu}; \frac{\text{Bi}_m}{\text{Pn}} \right). \quad (3.25)$$

На основании вышеизложенной математической модели с решением в виде (3.23)-(3.24) предложена технология тепловой работы печи с расчетом её длины при заданных скоростях сушки. Результаты вычислений показали, что скорость сушки зависит от влагосо-

держания, но не зависит от теплообменного критерия Био, однако скорость нагревания является функцией и температуры, и Viq . Соотношение (3.25) показывает, что при разных способах сушки скорость удаления влаги является функцией влагосодержания и ком-

Bim

плексного критерия Pn , причем это имеет место и в первом, и во втором периоде сушки. Следовательно, механизм переноса влаги при различных методах сушки один и тот же (сушка в среде с постоянной температурой; сушка в среде с переменной температурой). Температура тела сначала возрастает, затем убывает. До наступления максимального значения температуры температура поверхности повышается интенсивнее, чем температура центра. После прохождения максимального значения температуры поверхности тело начинает остывать, так как температура среды становится меньше температуры поверхности. Прогрев центральных слоев продолжается за счет того, что температура поверхности больше температуры центра. При уравнивании температур тело начинает охлаждаться. В связи с этим важно знать момент наступления максимальной температуры, чтобы правильно разработать технологию сушки. Целесообразно в момент максимальной температуры прекратить процесс сушки и предоставить возможность выравнивания температур поверхности и центра за счет естественной теплопроводности. Это дает возможность значительной экономии энергоресурсов, затрачиваемых на сушку. Изменение влагосодержания и скорости сушки практически мало изменится при использовании отключения сушки в момент максимального значения температуры поверхности. Это подтверждает эффективность предложенной технологии и обеспечивает качество продукции при минимальных энерго и ресурсозатратах.

3.3.1. Определение качественных показателей полученных изделий в производственных условиях

В табл. 3.16 приведены средние значения геометрических размеров и массы изделий с фрезерным торфом.

Таблица 3.16

Геометрические размеры и масса изделий с фрезерным торфом

Технологический передел		Геометрические размеры, мм			Масса, г
		длина	ширина	высота	
формовка		265	127	68	4688
сушка	10 Гц	250	120	64	3984
	12,7 Гц	250	120	64	3908
обжиг	10 Гц	248	119	64	3637
	12,7 Гц	244	117	63	3310

В табл. 3.17 приведены результаты испытаний кирпича керамического рядового полнотелого одинарного с добавлением фрезерного торфа (10 Гц).

Таблица 3.17

Результаты испытаний кирпича керамического рядового полнотелого одинарного с добавлением фрезерного торфа (10 Гц)

№ п/п	Техническая характеристика	Фактическое значение показателя
1	2	3
1.	Предел прочности при сжатии, МПа	34,02 М 300
2.	Предел прочности при изгибе, МПа	4,71 М 300
3.	Масса, кг	3,6
4.	Плотность, кг/м ³	1912
5.	Водопоглощение, %	10,3

По результатам испытаний образцы кирпича керамического рядового полнотелого одинарного с фрезерным торфом (10 Гц) соответствуют М 300, согласно требованиям [1С].

В табл. 3.18 приведены результаты испытаний кирпича керамического рядового полнотелого одинарного с добавлением фрезерного торфа (12,7 Гц).

Таблица 3.18

Результаты испытаний кирпича керамического рядового полного с добавлением фрезерного торфа (12,7 Гц)
 толстого одинарного с добавлением фрезерного торфа (12,7 Гц)

№ п/п	Техническая характеристика	Фактическое значение показателя
1	2	3
1.	Предел прочности при сжатии, МПа	32,7 М 250
2.	Предел прочности при изгибе, МПа	4,71 М 300
3.	Масса, кг	3,31
4.	Плотность, кг/м ³	1828
5.	Водопоглощение, %	10,1

Следует отметить, что увеличение частоты на вибраторе до 12,7 Гц (подача выгорающей добавок) размеры кирпича и его массы уменьшается на 5-7%, что характеризует улучшение качества изделий нагрузки в производственных условиях – строительство объектов. Сравнивая результаты полученные при различном сырьевом составе можно констатировать, что предел прочности кирпича при сжатии и изгибе отличается на 4-8%, а по водопоглощению на 1,4-2%, что не сказывается на качестве изделия [1С].

3.3.2 Определение основных свойств фрезерного торфа и топливных брикетов после их переработки в валковых дробилках

Среди различных отходов можно отметить лом брикетов, которые образуются при прессовании фрезерного торфа и подаче брикетов на кулерины, и по своим качествам не соответствуют республиканским стандартам, но могут использоваться как добавки в аглопорит и керамический кирпич. Это происходит на каждом торфобрикетном заводе и составляет до 2-3% от суточной производительности завода. В таблицах 35–39 приведены физико-механические свойства торфа, брикетов и их теплопроводная способ-

ность, полученная в лаборатории ОАО «ТБЗ Усяж» (участок дробления брикетов).

Таблица 3.19
Данные по содержанию общей влаги в торфе

Наименование операции	ОАО «ТБЗ Лидский»	ОАО «ТБЗ Старобинский»	ОАО «ТБЗ Усяж»	ОАО «ТБЗ Сергеевичский»
Номер бьюкса	1	3	1	2
Вес бьюкса с торфом, г	30,1	30,0	30,0	30,1
Вес бьюкса, г	24,74	23,73	24,74	24,91
Навеска бьюкса, г	5,36	6,27	5,26	5,19
Вес после сушки, г	29,1	28,4	28,65	28,9
Потери влаги, г	1,0	1,6	1,35	1,2
W, %	18,6	25,5	25,6	23,1

Таблица 3.20
Результаты анализа торфа на зольность

Наименование	ОАО «ТБЗ Усяж»	ОАО «ТБЗ Слуцкий»	ОАО «ТБЗ Старобинский»	ОАО «ТБЗ Сергеевичский»
Номера тиглей	20	19	20	18
Вес тиглей с торфом, г	26,9	25,8	27,0	25,4
Вес тиглей, г	24,87	23,67	24,87	23,38
Навеска торфа, г	2,03	2,13	2,23	2,02
Вес тиглей с золой после прокалки, г	25,23	23,9	25,27	23,63
Вес золы, г	0,36	0,23	0,4	0,26
A ^c , %	17,7	10,8	17,9	12,9

Таблица 3.21

Данные по определению элементного состава торфа (ОАО «ТБЗ
Усяж»), %

Элементный состав				
C^r	H^r	O^r	S^r	N^r
58,9	5,6	32,2	0,13	3,0

Таблица 3.22

Физико-механические свойства сырья и топливных брикетов

Влажность сырья, %	Насыпной вес, кг/м ³	Влажность брикета, %	Зольность брикета, %	Механическая прочность, %
52,0	430	20,0	22,0	95,4
48,6	494	19,0	22,5	95,4
50,4	458	20,2	23,0	95,4
50,3	461	20,1	22,5	95,4
51,0	460	20,0	23,0	95,0
52,1	444	20,5	22,0	95,4
53,9	411	21,0	21,5	95,0
52,3	427	20,0	22,1	95,1
53,0	430	20,0	21,0	95,0
53,1	431	20,0	22,0	95,4
54,4	404	20,0	22,5	95,2
53,5	419	20,0	21,8	95,2
52,8	431	20,0	22,5	95,0
54,3	398	20,0	22,5	95,6
53,3	419	20,0	22,5	95,4

В технологии получения дробленых торфяных брикетов использовались валковые дробилки для первой и второй стадии дробления. После установки минимального зазора между валками, был произведен контрольный анализ на фракционный состав топлива на основе торфа.

В процессе отсева были получены следующие результаты (табл. 3.23-3.26).

Торфодробилка предназначена для дробления торфяного топливного брикета сухим методом.

Показатели качества брикетов:

- механическая прочность не менее 94% [8С],

– плотность до 1200 кг/м³,
размеры: длина 180 мм, ширина 70 мм, высота от 40 мм до 70 мм.

Таблица 3.23

Данные фракционного состава после первого дробления

№ п/п	Размер фракции, мм	Масса, кг	%
1	Больше 100	--	--
2	50÷100	0,98	8,3
3	40÷50	1,48	12,5
4	25÷40	2,5	21,1
5	13÷25	2,6	21,9
6	10÷13	1,1	9,3
7	6÷10	1,5	12,6
8	Меньше 6	1,7	14,3
9	Итого	11,86	100

Таблица 3.24

Определение фракционного состава топлива на основе торфяных брикетов ОАО «ТБЗ Усяж»

№ п/п	Размер фракции, мм	1-е дробление, % среднее из 3 проб	2-е дробление, % среднее из 3 проб
1	Больше 100		
2	40-100		
3	25-40	9,8	5,0
4	13-25	19,4	17,1
5	10-13	9,8	7,1
6	6-10	13,9	11,3
7	1-6	30,4	32,7
8	Менее 6	16,7	26,8

Таблица 3.25

Определения фракционного состава топлива на основе топливных брикетов после первого дробления

Размер фракции, мм	№ пробы						% среднее
	ОАО «ТБЗ Старобинский» (участок «Слуцкий»)		ОАО «ТБЗ Невсвиж»		ОАО «ТБЗ Сергеевичский»		
	кг	%	кг	%	кг	%	
Больше 100							
40÷100							
25÷40	0,6	6,7	1,0	12,4	0,04	0,6	6,7
13÷25	2,64	29,3	4,24	52,6	1,74	24,0	35,3
10÷13	1,2	13,3	1,02	12,7	3,32	45,9	23,9
6÷10	1,4	15,5	0,94	11,7	0,7	9,6	12,2
1÷6	2,45	27,2	0,78	9,6	1,2	16,6	17,8
меньше 1	0,72	8,0	0,08	1,0	0,24	3,3	4,1
ИТОГО	9,01	100	8,06	100	7,24	100	100

Таблица 3.26

Определения фракционного состава топлива на основе топливных брикетов после 2-го дробления

Размер фракции, мм	№ пробы						% среднее
	ОАО «ТБЗ Старобинский» (участок «Слуцкий»)		ОАО «ТБЗ Невсвиж»		ОАО «ТБЗ Сергеевичский»		
	кг	%	кг	%	кг	%	
1	2	3	4	5	6	7	8
Больше 100							
40÷100							
25÷40	0,14	1,5	0,34	3,6	0,28	3,2	2,8

1	2	3	4	5	6	7	8
13÷25	1,74	18,8	2,38	25,4	1,6	18,5	20,9
10÷13	0,96	10,4	0,84	9,0	0,82	9,5	9,6
6÷10	1,28	13,9	1,32	14,0	1,4	16,1	14,6
1÷6	3,32	35,9	3,0	32,0	2,9	33,4	33,8
меньше 1	1,8	19,5	1,5	16,0	1,67	19,3	18,3
ИТОГО:	9,24	100	9,38	100	8,67	100	100

Основные технические данные и характеристики торфодробилки представлены в табл. 3.27.

Таблица 3.27

Технические данные торфодробилки

Наименование показателя	Значение
Размеры загрузочного окна, мм	1010×408
Производительность, м ³ /ч	от 10 до 25
Мощность привода, кВт	11
Габаритные размеры, мм	2640×990×1063
Среднее значение размера дробленого торфа, %	
от 25 мм до 35 мм	6
от 25 мм до 6 мм	48
менее 6 мм	46
Масса, кг	3170
Частота вращения валцов, об/мин	22
Расстояние между валками, мм	420

3.3.3. Разработка модели усреднения сырья по влажности

Проведенный анализ показал, что качество брикетов, поставляемых на переработку на ОАО «ТБЗ Усяж» (участок дробления), не обладает стабильностью. Например, зольность и влажность брикетов разных предприятий меняется от 16,8 до 29,1% по влажности, от 10,3 до 23,3% (зольность) (табл. 3.19, 3.20, рис. 3.8). Эти качества брикетов после их дробления являются наравне с теплотворными способностями, важными характеристиками для дальнейшего ис-

пользования для получения ПСМ. Здесь следует отметить, что наиболее удачными способами усреднения по зольности и влажности являются вариант «слоевой», реализуемый в штабелях (рис. 2.1), а также технология с разгрузкой от бункеров (рис. 2.2), где среднее значения по зольности составляет 16,8%, а по влажности 22,8%. Анализ известных спектральных моделей, способов усреднения [43-44] показал, что модели способов строятся быстрее и проще, если преобразование или ряд Фурье применяется непосредственно к функции качества продукции.

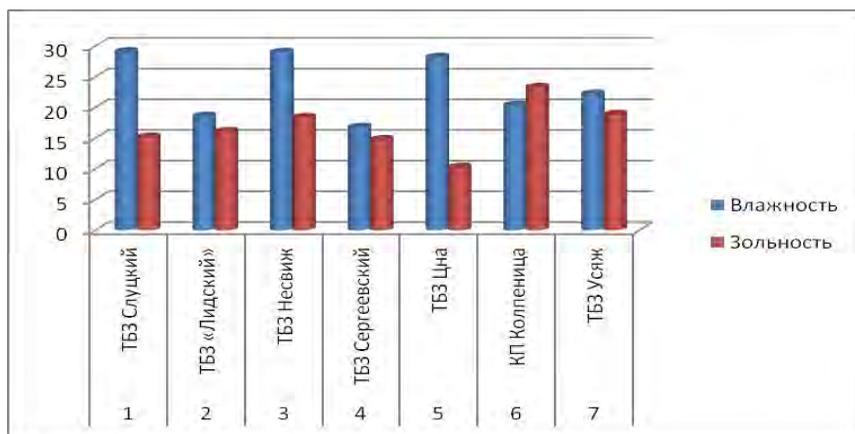


Рис. 3.8. Показатели влажности и зольности торфяных брикетов для измельчения

При смешивании торфа с различным влагосодержанием важно перед его обработкой знать концентрацию влаги в смеси, от этого зависит время сушки, энергоёмкость процесса брикетирования. Концентрация влаги смеси можно определить по формуле

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n m_{bi}}{\sum_{i=1}^n m_{ci}}, \quad (3.26)$$

где m_{bi} – количество влаги в i -ой компоненте смеси, m_{ci} – количество i -ой компоненты при смешивании, n – число компонент.

На основании теории массопереноса количество влаги, перешедшей от одной компоненты смеси к другой Δm_b может быть вычислена по закону

$$\Delta m_{bi} = c_{mi} m_{ci} (\theta_{i+1} - \theta_i), i = \overline{1, n}, \quad (3.27)$$

где c_{mi} – удельная влагоемкость i -ой компоненты, θ_i – потенциал массопереноса i -ой компоненты. Известно [48], что удельная влагоемкость есть величина постоянная при $\theta > 100^\circ M$.

Потенциал массопереноса на изометрических поверхностях есть

$$p = \frac{m_b}{m_c}.$$

функция удельного влагосодержания $\theta(p)$. На основании экспериментальных данных получена функциональная зависимость $\theta(p)$ для температуры окружающей среды $T = 25^\circ C$ для фрезерного торфа.

$$\theta(p) = 178 + 0,945u. \quad (3.28)$$

На основании линейной зависимости легко вычисляются значения потенциалов массопереноса компонентов смешиваемого торфа и, следовательно, количество дрейфующей влаги Δm_{bi} . Усреднение происходит за счет взаимной передачи влаги между партиями торфа с различным влагосодержанием.

Анализ этого процесса во времени t аналогичен процессу распространения тепла по закону

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_m \nabla^2 p, \quad (3.29)$$

где a_m – коэффициент массопроводности материала

$a_m = \frac{\lambda_m}{c_m \rho}$, λ_m – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность

вещества). Оператор ∇^2 в зависимости от формы объекта, может быть записан для линейного случая, плоского или пространственно-го в виде

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \nabla^2 u = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}, \nabla^2 u = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}. \quad (3.30)$$

3.4. Разработка модели процесса агломерации сырьевой смеси с применением ортогонального композиционного планирования эксперимента

Большое количество отходов и потерь на горно-перерабатывающих предприятиях предопределяет необходимость решения проблемы рационального использования минеральных ресурсов. Нами показана возможность расширения интервала пригодности сырья для использования в получении промышленных продуктов. В зависимости от химического и минералогического составов отходов они могут использоваться в качестве ценных добавок при производстве продукции.

Например, по своему химическому составу вскрышные породы (суглинки) месторождения песков «Ольшанка» Минской области могут использоваться для производства аглопорита с добавками местного топлива на основе торфа, лома топливных брикетов, древесных опилок и лигнина, являющихся отходами в топливной, деревообрабатывающей и гидролизной промышленности.

На основании предварительных опытов и нами были выбраны уровни факторов и интервалы их варьирования (табл. 3.28) торфяная крошка – 2–3%, суглинки – 87–89%, уголь-7-8%.

Таблица 3.28

Уровни факторов и интервалы их варьирования

№	Факторы	Суглинки – С		Торфя- ная крошка Т		Уголь-У	
		$X_1, \%$	x_1	$X_2, \%$	x_2	$X_3, \%$	x_3
1	Основной уровень $X=0$	88	0	2,5	0	7,5	0
2	Интервал варьирования	1		0,5		0,5	
3	Верхний уровень $X= +1$	89	+1	3	+1	8	+1
4	Нижний уровень $X= -1$	87	-1	2	-1	7	-1

В табл. 3.29 указаны x_1, x_2, x_3 – математические значения факторов; X_1, X_2, X_3 – физическое значение факторов (соответствует С, Т, У).

Введение в шихту торфяной крошки показало, что прочность полученного аглопоритового щебня и его плотность соответствуют требованиям [2С-4С].

Таблица 3.29

Результаты опытов по определению прочности аглопоритового щебня при сдавливании в цилиндре

Серии опытов	Уровни факторов			Параметр оптимизации, МПа
	X_1	X_2	X_3	
1	-	-	-	1,18
2	+	+	+	1,94
3	-	+	+	2,27
4	+	-	-	1,80

Полный факторный эксперимент для четырех факторов состоит из

$$N = 2^n, \quad (3.40)$$

где N – число опытов; n – число факторов.

Для уменьшения количества опытов была применена полуреплика типа 2^{n-1} , которая сохраняет способность математически характеризировать изучаемый процесс.

После проведения эксперимента дробной реплики и полного факторного эксперимента определялись коэффициенты регрессии:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}, \quad (3.41)$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N y_j \cdot x_{ji}}{N}, \quad (3.42)$$

$$b_{lm} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{jl} \cdot x_{jm} \cdot y_j}{N}, (l \neq m), \quad (3.43)$$

где j – номер опыта; i, l, m – номера факторов.

Если $F_p \leq F_T$, то уравнение регрессии считается адекватным. Для определения табличного значения критерия Фишера (F_T) необходимо знать число степеней свободы, связанных с числителем и знаменателем. Полученная линейная модель по результатам первой серии опытов адекватна.

Значения коэффициентов регрессии: $b_0 = 1,79, b_1 = 0,29, b_2 = 1,23, b_3 = 0,30$.

Для серии опытов по определению прочности аглопоритового щебня уравнение регрессии будет выглядеть следующим образом:

$$\delta = 1,79 + 1,29 \cdot x_1 + 1,23 \cdot x_2 + 0,30 \cdot x_3. \quad (3.44)$$

Математическое планирование экспериментов проводилось по методике [50-52], где однородность дисперсии определялась по

критерию Кохрена, расчетные значения критерия (0,25) после проведения опытов оказались меньше теоретического (0,39). После проведения экспериментов дробные реплики коэффициенты уравнения регрессии определялись с одинаковой погрешностью $b \geq s \cdot t$, где s – дисперсия коэффициентов, t – значение критерия Стьюдента. Уравнение регрессии проверялось по критерию Фишера на адекватность. Расчетное значение критерия равно 21,7, табличное значение – 4,07, что соответствует адекватности модели.

Полученные аглопоритовый щебень и песок с применением фрезерного торфа и древесных опилок по показателям прочности и плотности соответствовали требованиям стандарта, согласно которому по показателям насыпной плотности аглопоритовый щебень и песок относят: фракция 20–40 мм и 10–20 мм к марке 600; фракция 5–10 мм к марке 700; фракция менее 5 мм к маркам 1000–1100. По показателям прочности аглопоритовый щебень относится: фракция 20–40 мм и 10–20 мм к марке 75; фракция 5–10 мм к марке 200–250. Полученный нами аглопоритовый щебень и песок практически по всем качественным показателям близки показателям продукции с использованием обычной шихты. 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. Аналогично проводилось математическое планирование экспериментов для двух факторов по составу сырьевой смеси.

Для определения прочности керамического кирпича рядового одинарного на основании проведенных опытов на МЗСМ составлены уровни факторов и интервалы их варьирования (табл. 3.30)

Таблица 3.30

Уровни факторов и интервалы их варьирования

№ п/п	Факторы	Глина	Торф
		$X_1, \%$	$X_2, \%$
1	Основной уровень $X=0$	68	4
2	Интервал варьирования	2	2
3	Верхний уровень $X= +1$	70	6
4	Нижний уровень $X= -1$	66	2

Таблица 3.31

Результаты опытов по определению прочности керамического кирпича рядового одинарного

Серии опы- тов	Уровни факторов		Параметр оптимизации, МПа	
	X_1	X_2	$\sigma_{сж}$	$\sigma_{изг}$
1	+	-	34,3	3,39
2	-	+	21,1	4,75
3	+	+	34,6	5,63
4	-	-	36,5	5,33

$$\delta_{изг}=4,78-5,06 \cdot x_1+7,93 \cdot x_2 \quad (3.45)$$

$$\delta_{сж}=32,34+12,1 \cdot x_1-8,3 \cdot x_2 \quad (3.46)$$

Полученные математические модели характеризуют прочность керамического кирпича на изгиб и сжатие в зависимости от состава сырьевой смеси (глина - x_1 , торф - x_2).

Зависимость прочности аглопоритового щебня от его плотности при добавлении отходов торфяного производства и вскрышных пород показана на рис. 3.9-3.10.

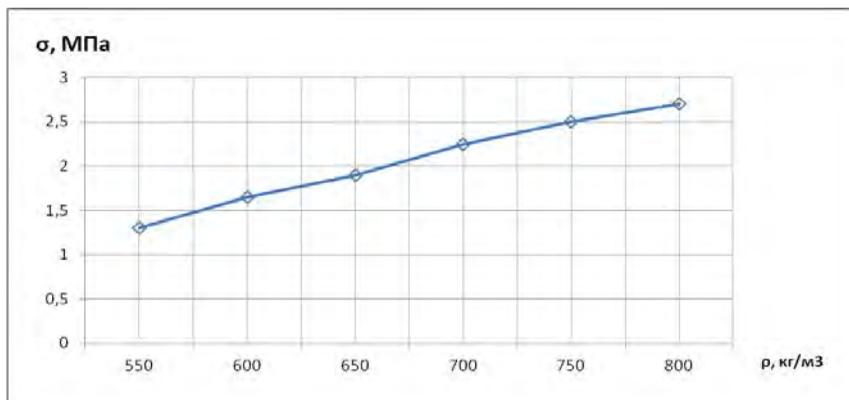


Рисунок 3.9. Зависимость прочности аглопорита от его плотности с добавкой брикетов дробленых

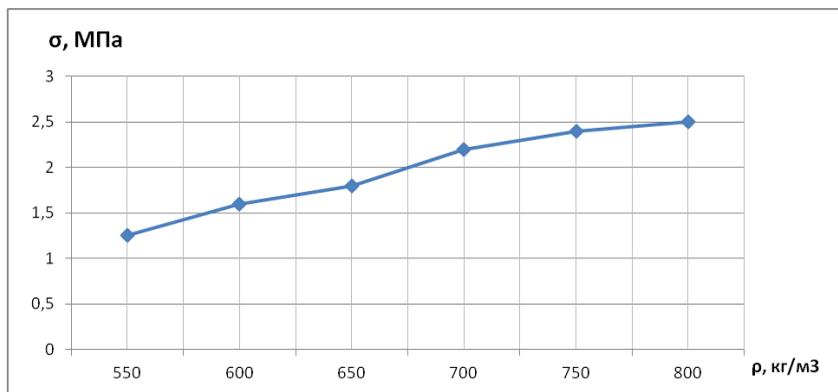


Рис. 3.10. Зависимость прочности аглопорита от его плотности с добавкой опилок

Обработкой экспериментальных данных методом наименьших квадратов получены математические модели, характеризующие зависимость прочности аглопорита от его плотности, количества и вида выгорающих добавок:

$$\sigma = 3,79 \cdot \ln(\rho) - 22,58 \quad (R^2 = 0,99) \quad (3.47)$$

а также плотность аглопорита:

$$\sigma = -9E-0,6 \cdot \rho^2 + 0,017 \cdot \rho - 5,54 \quad (R^2 = 0,98) \quad (3.48)$$

3.5. Разработки математической модели для оптимизации процесса обжига керамических изделий

Чаще всего сушка керамического кирпича и обжиг керамических стеновых материалов производится конвективным методом. В результате быстрого испарения влаги с поверхности изделий возможно превышение критического градиент влагосодержания, в результате чего изделия растрескиваются. В качестве теплоносителя и одновременно влагопоглотителя используется нагретый воздух или дымовые газы, поэтому скорость теплотехнологических процессов и их качество регулируется температурой и относительной влажностью, объемом и скоростью движения теплоносителя. На основании этого весьма важной задачей является оптимальный режим сушки и обжига, обеспечивающий получение высококачественных изделий за минимальное время, при минимальных затратах теплоты и электроэнергии. Решение таких задач возможно с использованием методов математического моделирования.

Бурное развитие науки и техники приводит к тому, что технологические процессы описываются математическими моделями не только обыкновенными дифференциальными уравнениями (система с сосредоточенными параметрами [46]), но и уравнениями в частных производных (системами с распределенными параметрами [47]). Система автоматического управления объектами с сосредоточенными параметрами, и особенно линейными объектами, уже относительно хорошо изучены.

Однако в большинстве технических приложений суть объектов управления такова, что описание их небольшим конечным набором сосредоточенных переменных не адекватно ни существу процесса, ни той цели управления, которая поставлена применительно к объекту.

Разработка теории и техники автоматического управления для объектов с распределенными параметрами в общем обуславливается тем, что [43-44]:

- состояние объекта описывается функциями нескольких независимых переменных;

- движение объекта описывается дифференциальными уравнениями с частными производными, интегро-дифференциальными уравнениями в частных и полных производных;
- управляющие воздействия на объект могут носить самый разнообразный характер. Они описываются функциями одной независимой переменной и многих переменных;
- на управляющие воздействия и функции состояния объекта могут накладываться дополнительные ограничения типа равенств и неравенств;
- техническая реализация управляющих систем связана с большими трудностями и проблемами новой технологии.

На основании сказанного можно сделать вывод о важности проблемы оптимальности, управляемости и наблюдаемости. Ряд работ посвящен важной задаче экономичного нагрева в различных технологических процессах [42,49]. Разработок, посвященных анализу процессов управления теплотехническими процессами с учетом термонапряжений, недостаточно.

В [43] рассматривается нагрев конструкции и исследуются термические напряжения, которые в ней возникают. При нагреве, сушке и обжиге тел возникают внутренние температурные напряжения, которые могут ограничивать скорость нагрева, особенно в начальной низкотемпературной стадии. Процесс нагрева должен проводиться таким образом, чтобы термонапряжения не превышали максимально допустимые значения с точки зрения появления различных микродефектов, а также возможности разрушения тела. В частности, при решении задач оптимального по быстродействию нагрева керамических тел необходимо учитывать не только управляющее воздействие, т. е. температуру греющей среды, но и ограничения на фазовые координаты (термонапряжения). Решение задачи оптимального по быстродействию нагрева при обжиге керамических стеновых материалов с учетом ограничений на термонапряжения гораздо сложнее, чем без учета этих ограничений [47].

Применяя метод, позволяющий ограничения на фазовые координаты заменить ограничениями на управляющее воздействие, упрощается выбор допустимой скорости нагрева, в частности при решении задач оптимального управления.

Рассмотрим теплотехнический процесс, описываемый системой:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u(l, \varphi)}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 u(l, \varphi)}{\partial l^2}; \\ \frac{\partial u}{\partial l} \Big|_{l=1} = \text{Bi}[Q(\varphi) - u(1, \varphi)]; \\ \frac{\partial u}{\partial l} \Big|_{l=-1} = \text{Bi}[Q(\varphi) - u(-1, \varphi)]; u(l; 0) = v; \\ -(1 - \chi) \leq Q(\varphi) \leq 1 + \chi, \end{array} \right. \quad (3.49)$$

где $\varphi = \frac{at}{s^2}$ – безразмерное время;

$l = \frac{x}{s}$ – безразмерная толщина ($-1 \leq l \leq 1$);

$\text{Bi} = \frac{\alpha s}{\lambda}$ – критерий Био; v – безразмерная начальная температура;

χ – критерий несимметричности нагрева,

$|\chi| < 1$; $u(l, \varphi)$ – безразмерная температура; $Q(\varphi)$ – температура греющей среды.

Система (3.49) описывает процесс нагрева тела толщиной $2s$, для которого a , λ , α – соответственно коэффициенты температуропроводности, теплопроводности материала и теплообмена.

Распределение температурных напряжений в теле согласно [44] приводит к максимальным растягивающим σ_{\max} и сжимающим σ_{\min} напряжениям в виде

$$\sigma_{\max \min} = \frac{\beta E}{1 - \Theta} \frac{s}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=s} f(\mu), \quad (3.50)$$

где Θ – коэффициент Пуассона; $f(\mu)$ – функция от коэффициента

несимметричности нагрева, $\mu = \frac{s + c}{2s}$, $c = \text{const}$, которая при нагреве

постоянным тепловым потоком в регулярном режиме дает параболическое распределение температуры по толщине пластины

$$u(x,t) = c(t) + c_1(x+c)^2, \quad (3.51)$$

где $c(t)$ – линейная функция времени; $c_1 = \text{const}$; β - коэффициент линейного расширения; E - модуль упругости.

Функция $f(\mu)$ определяется следующим образом [2]:

$$f(\mu) = \begin{cases} \left. \begin{array}{l} 3(\mu - 1) + \frac{1}{\mu}, \mu < 1; \\ 3 - \frac{2}{\mu}, \mu \geq 1; \end{array} \right\} \text{ - для } \sigma_{\max}; \\ \left. \begin{array}{l} 3 - \frac{2}{\mu}, \mu < 0,5; \\ \frac{1}{\mu} - 3, \mu \geq 0,5. \end{array} \right\} \text{ - для } \sigma_{\min}. \end{cases} \quad (3.52)$$

Если при нагреве наиболее опасны растягивающие напряжения, то введем ограничение

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\max}^*, \quad (3.53)$$

где σ_{\max}^* – предельно допустимое растягивающее напряжение.

На основании этого ограничения можно определить максимально допустимое значение теплового потока и, в свою очередь, по граничному условию задачи (3.49) – ограничение на температуру греющей среды

$$Q(t) = u(s,t) + \frac{c_m}{\alpha s f(\mu)}, \quad (3.54)$$

$$c_m = \frac{3\lambda(1-\theta)\sigma_{\max}^*}{\beta E}$$

где c_m – коэффициент, зависящий только от материала нагреваемого тела.

В регулярном режиме нагрева можно через внешний теплообмен судить о температурных напряжениях в теле.

Практическое применение формулы (3.54) позволяет при ограничении на температуру греющей среды

$$Q(\mu) \leq A = const \quad (3.55)$$

в начальной стадии нагрева, когда растягивающие термонапряжения не достигли максимально допустимой величины, ограничиться только ими. Начиная с момента времени t_1 , когда $\sigma_{\max}(t_1) \leq \sigma_{\max}^*$, необходимо, кроме ограничения (3.55), учитывать и ограничение (3.54). Момент времени t_1 определяется из условия

$$u(s, t_1) = u_0 + \Delta u_{\max}, \quad (3.56)$$

где u_0 – начальная температура; Δu_{\max} – максимально допустимый перепад температур по толщине пластины с точки зрения допустимых термонапряжений. Величину Δu_{\max} можно найти по формуле

$$\sigma_{\max}^* = \frac{\beta E}{1-\theta} \frac{\Delta u_{\max}}{3} \frac{f(\mu)}{\mu^2}. \quad (3.57)$$

Если $\min u(x, t) \geq \delta$; $-s \leq x \leq s$, где δ – температура, при которой материал имеет достаточную пластичность для погашения термонапряжений, то можно учитывать только ограничения [51].

Момент времени t_2 , когда ограничение (3.55) теряет силу, может быть определен по выражению

$$u(s, t_2) = \delta + \Delta u_{\max}. \quad (3.58)$$

Следовательно, для выполнения ограничений на внутренние термонапряжения σ_{\max} при использовании соотношения (3.55) необходимо знать температуру поверхности пластины $u(s,t)$ из системы (3.49). Тогда определяются моменты времени t_1 и t_2 , между которыми должно быть выполнено ограничение (3.55), использующее также текущее значение температуры поверхности $u(s,t)$; $t_1 \leq t \leq t_2$.

Рассмотрим численную реализацию задачи с применением решения смешанной задачи для уравнения упругих колебаний

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -a^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}; \quad 0 < x < b; 0 < t < T, \quad (3.59)$$

где u – величина отклонения от стационарного положения; c , a – коэффициенты, характеризующие состояние объекта в момент времени t с координатой x ; T – время процесса.

Для того чтобы полностью определить существо процесса, необходимо задать начальные и граничные условия. В качестве начальных условий возьмем начальное отклонение и начальную скорость;

$$u(x,0) = f(x); \quad \frac{\partial u}{\partial t} = g(x). \quad (3.60)$$

Граничные условия определяют режим изменений на концах объекта:

$$u(0,t) = 0; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(0,t) = 0; \quad u(b,t) = 0; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(b,t) = 0 \quad (3.61)$$

Решение задачи удобнее проводить с помощью безразмерных переменных. Произведем замену $x \rightarrow x\sqrt{b}$; $t \rightarrow \frac{1}{c}t$, тогда решение производится на отрезке $[0;1]$ и уравнение (3.59) примет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}. \quad (3.62)$$

Решение задачи (3.59) - (3.61) осуществим методом сеток, для этого введем две вспомогательные функции $v(x, t)$ и $\omega(x, t)$ по формулам:

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{и} \quad \omega = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (3.63)$$

Уравнение (3.59) заменяется системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \end{cases} \quad (3.64)$$

Дополним систему (3.64) начальными и граничными условиями:

$$v(x,0) = g(x); \omega(x,0) = f''(x); \quad (3.65)$$

$$v(0,t) = 0; \omega(0,t) = 0; v(1,t) = 0; \omega(1,t) = 0. \quad (3.66)$$

Если задача (3.64) – (3.66) решена, то решение задачи (3.59) – (3.61) находится по формуле

$$u(x,t) = f(x) + \int_0^T v(x,t) dt. \quad (3.67)$$

Частные производные по x будем аппроксимировать их суммой центральных разностных производных на слоях j и $j+1$:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{j-1}^{j+1} - 2v_i^{j+1} + v_{i+1}^{j+1}}{h^2} + \frac{v_{i-1}^j - 2v_i^j + v_{i+1}^j}{h^2} \right); \quad (3.68)$$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_{j-1}^{j+1} - 2\omega_i^{j+1} + \omega_{i+1}^{j+1}}{h^2} + \frac{\omega_{i-1}^j - 2\omega_i^j + \omega_{i+1}^j}{h^2} \right). \quad (3.69)$$

В частности, получаем систему (7) в разностном виде:

$$\begin{cases} \frac{v^{j+1} - v^j}{\tau} = \frac{(\omega_{i-1}^{j+1} - 2\omega_i^{j+1} + \omega_{i+1}^{j+1}) + (\omega_{i-1}^j - 2\omega_i^j + \omega_{i+1}^j)}{2h^2}; \\ \frac{\omega^{j+1} - \omega^j}{\tau} = \frac{(v_{i-1}^{j+1} - 2v_i^{j+1} + v_{i+1}^{j+1}) + (v_{i-1}^j - 2v_i^j + v_{i+1}^j)}{2h^2}. \end{cases} \quad (3.70)$$

Система (3.70) относится к классу неявных и аппроксимирует решение исходной задачи с точностью $O(\tau^2 + h^2)$. Она устойчива при любых соотношениях между τ и h .

Для решения системы (3.70) рассмотрим вектор

$$Z_i^{j+1} = \begin{pmatrix} v_i^{j+1} \\ \omega_i^{j+1} \end{pmatrix}. \quad (3.71)$$

Тогда система примет вид

$$-A_i Z_{i-1}^{j+1} + B_i Z_i^{j+1} - C_{i+1} Z_{i+1}^{j+1} = D_i, \quad i = \overline{1, n-1}, \quad (3.72)$$

где

$$A_i = C_i = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\tau}{2h^2} \\ \frac{\tau}{2h^2} & 0 \end{pmatrix}, \quad B_i = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\tau}{2h^2} \\ \frac{\tau}{2h^2} & 0 \end{pmatrix}, \quad (3.73)$$

$$D_i = \begin{pmatrix} v_i - \frac{\tau}{2h^2} (\omega_{i-1}^j - 2\omega_i^j + \omega_{i+1}^j) \\ \omega_i + \frac{\tau}{2h^2} (v_{i-1}^j - 2v_i^j + v_{i+1}^j) \end{pmatrix}. \quad (3.74)$$

Из начальных условий определяется вектор Z_i^0 на нулевом временном слое. Решив систему (3.72), получим значение векторов Z_i^1 , а по формулам (3.67) – значение функции u_i^1 . Продвигаясь на второй временной слой и далее, получим решение задачи на всем промежутке $[0; T]$.

Решение системы (3.72) осуществляется методом матричной прогонки. Сначала определяется вспомогательный набор двумерных матриц E_i и векторов F_i по рекуррентным формулам:

$$E_0 = 0, F_0 = 0; \quad (3.75)$$

$$E_i = (B_i - C_i E_{i-1})^{-1} A_i; \quad (3.76)$$

$$F_i = (B_i - C_i E_{i-1})^{-1} (D_i - C_i F_{i-1}), \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (3.77)$$

Далее находятся искомые величины

$$Z_{i-1}^{j+1} = E_i Z_i^{j+1} + F_i, \quad i = n-1; n-2, \dots, 1. \quad (3.78)$$

Описанный алгоритм решения задачи реализован специальной программой.

Для системы (3.78) поставим задачу: найти управление, удовлетворяющее системе, которое обеспечило бы минимальное время Φ_0 выполнения равенства $u(l, \Phi_0) = 0$ для всех $-1 \leq l \leq 1$.

Эта задача решается при помощи метода моментов [43,44]. Решение конечномерной проблемы моментов сведено к определению

чисел $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{k-1}, \Phi_0$, где Θ_i – точка переключения $Q(\varphi)$ из системы k трансцендентных уравнений с k неизвестными. Для $k=2$ эта система имеет вид

$$2e^{\mu_i^2 \Theta_i} + (\chi - 1)e^{\mu_i^2 \Phi_0} = 1 + \chi + \nu, \quad i = 1, 2, \quad (3.79)$$

где числа $\mu_i, i = 1, 2$ являются различными действительными положительными корнями характеристического уравнения

$$\frac{1}{Bi} \mu = \operatorname{ctg} \mu. \quad (3.80)$$

При решении задачи о нагреве функция $u(\varphi)$ на отрезке $[0; \Theta_1]$ должна принимать значения $1 + \chi$, а следовательно, на отрезке $[\Theta_1; \Phi_0]$ она имеет значение $1 - \chi$.

Зададим начальное управление $Q(\varphi)$ в интервале $\Theta' \leq \varphi \leq \Theta''$, где $0 \leq \Theta' < \Theta'' < \Theta_1$. Благодаря правильному выбору этого управления можно выполнить ограничения на термонапряжения. В этом случае оптимальное управление существует и величины Θ_1 и Φ_0 определяются из системы уравнений:

$$2e^{\mu_i^2 \Theta_1} + (\chi - 1)e^{\mu_i^2 \Phi_0} = \nu + (1 + \chi)e^{\mu_i^2 \Theta''} - \mu_i^2 s_i, \quad i = 1, 2, \quad (3.81)$$

где

$$s_i = \int_0^{\Theta'} (1 + \chi) e^{\mu_i^2 \varphi} d\varphi + \int_{\Theta'}^{\Theta''} Q(\varphi) e^{\mu_i^2 \varphi} d\varphi. \quad (3.82)$$

Решение данной системы получим из соотношений:

$$\left(\frac{2e^{\mu_1^2 \Theta_1} - (1 + \chi + \nu_1)}{1 - \chi} \right)^{\mu_2^2} = \left(\frac{2e^{\mu_2^2 \Theta_1} - (1 + \chi + \nu_2)}{1 - \chi} \right)^{\mu_1^2}; \quad (3.83)$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{\mu_1^2} \ln \left(\frac{2e^{\mu_2^2 \Theta_1} - (1 + \chi + \nu_1)}{1 - \chi} \right), \quad (3.84)$$

$$\text{где } \nu_i = \nu + (1 + \chi) \left(e^{\mu_i^2 \Theta''} - e^{\mu_i^2 \Theta'} \right) - \mu_i^2 \int_{\Theta'}^{\Theta''} Q(\varphi) e^{\mu_i^2 \varphi} d\varphi, \quad i = 1, 2.$$

Если принудительное управление является линейной функцией, т. е. $Q(\varphi) = d + g\varphi$, $\Theta' \leq \varphi \leq \Theta''$, то значения Θ_1 и φ_0 определяются из соотношения

$$\nu_i = \nu + e^{\mu_i^2 \Theta''} \left[1 + \chi - d - g \left(\Theta'' - \frac{1}{\mu_i^2} \right) \right] - e^{\mu_i^2 \Theta'} \left[1 + \chi - d - g \left(\Theta' - \frac{1}{\mu_i^2} \right) \right]. \quad (3.85)$$

где $d, g = \text{const}$.

Таким образом, используя прием для замены ограничения на фазовую координату ограничением на управляющее воздействие, приходим к тому, что метод решения задачи оптимального по быстродействию нагрева термически массивного тела с учетом ограничений на термонапряжения принципиально не отличается от метода решения той же задачи без учета ограничений на термонапряжения.

На основании предложенной математической модели для оптимизации теплотехнологических процессов нагрева, сушки и обжига керамических стеновых материалов с учетом термических напряжений разработана методика, в соответствии с которой, рекомендуется в начальный период процесса (до 150°C с оптимальным расчетным временем $t_1 = 2$ ч) увеличивать скорости газового потока при скорости повышения температуры 75°C/ч , при этом расчетный период температур по толщине составил 25°C , что обеспечивает качественный нагрев материала. В интервале температур 150°C - 300°C скорость подъема температуры теплоносителя рекомендуется не выше 33°C/ч (это связано с тем, что при этих температурах происходит максимальная усадка материала и оптимальное расчетное время составило $t_2 = 4,5$ ч). В интервале от 300°C до максимальных температур (900 - 1000°C) допускаемая скорость подъема температуры в соответствии с вычисленным оптимальным временем процесса составляет 150°C/ч .

При максимальной температуре обжига керамические стеновые материалы рекомендуется выдержать с целью выравнивания температуры по толщине и равномерного распределения минимального необходимого количества жидкой фазы для образования связки между дегидратированными, декарбонезированными частицами и зёрнами кварца.

3.6. Испытания блоков керамических поризованных пустотелых с использованием МВТ и ВТЭР

На МЗСМ были проведены испытания по замене древесных опилок фрезерным торфом низинного типа, степень разложения 30%, влажность 45%, зольность 25% по выпуску опытных партий блоков керамических поризованных пустотелых 2,12 НФ с использованием глины месторождения «Лукомль-1» Минского района с последующим определением качественных показателей.

Для проведения испытаний были использованы следующие составы шихты:

Состав 1:

- глина месторождения «Лукомль-1» - 88%;
- торф фрезерный – 6%;
- песок аглопоритовый – 6%.

Параметры формования: давление прессования – 1,75-1,95 МПа, глубина вакуума – 0,092 МПа.

Состав 2:

- глина месторождения «Лукомль-1» - 84%;
- торф фрезерный – 10%;
- песок аглопоритовый – 6%.

Параметры формования: давление прессования – 1,76-1,88 МПа, глубина вакуума – 0,092 МПа.

По результатам испытаний в табл. 3.32 приведены технические характеристики керамического кирпича (состав шихты 1):

Таблица 3.32

Технические характеристики керамического кирпича
(состав шихты 1)

Размеры блока-сырца, мм	Масса блока-сырца, кг	Размеры обожженного изделия, мм	Масса обожженного изделия, кг	Средняя плотность изделия, кг/м ³
270×129×143	5,42	252×120×137	3,91	944
270×129×145	5,55	253×121×138	3,93	930
270×130×143	5,44	251×120×137	3,91	948
270×130×145	5,52	252×120×138	3,92	939

По результатам испытаний в табл. 3.33 приведены технические характеристики керамического кирпича (состав шихты 2):

Таблица 3.33

Технические характеристики керамического кирпича
(состав шихты 2)

Размеры блока-сырца, мм	Масса блока-сырца, кг	Размеры обожженного изделия, мм	Масса обожженного изделия, кг	Средняя плотность изделия, кг/м ³
270×131×143	5,39	246×117×135	3,635	935
270×131×144	5,50	246×119×137	3,66	913
270×130×142	5,39	244×117×135	3,625	940
270×130×145	5,50	245×117×139	3,500	878

Следует отметить, что полученные изделия по основным техническим характеристикам, что полученные изделия по основным техническим характеристикам (плотность, прочность, масса, морозостойкость) соответствует требованиям стандарта [1С].

По режиму обжига керамических поризованных пустотелых блоков получена математическая модель, определяющая зависимость температуры обжига (T , °C) от времени нахождения образцов в туннельной печи (τ):

$$T=735 \cdot \ln(\tau) - 1300 \quad (R^2=0,97). \quad (3.86)$$

По данной технологии произведен расчет ожидаемого экономического эффекта. Исследования по использованию МВТ и ВТЭР в производстве ПСМ на МЗСМ были проведены согласно заключенных договоров и поставку товарной продукции с ОАО «ТБЗ Усяж», ОАО «ТБЗ Старобинский», МЗСМ, ОАО «Лунинецлес» и ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси» на лабораторном и технологическом оборудовании вышеуказанных предприятий.

3.7. Влияние источников пылевыведения на экологические факторы на МЗСМ

Оценка воздействия на окружающую среду является законодательно закрепленной стадией реализации любых проектов, она проводится как после завершения работ по проектированию, так и на всех этапах разработки проекта. При оценке воздействия на окружающую среду рассматриваются все стадии жизненного цикла объекта. Целью оценки воздействия на окружающую среду является предотвращение деградации природных территориальных комплексов, а также восстановление и улучшение природной среды в районах со сложной экологической обстановкой.

Технологический процесс производства аглопорита связан с применением и переработкой порошкообразных материалов, что сопровождается интенсивным пылевыведением с потерей компонентов массы, с загрязнением воздуха окружающей среды и в рабочих помещениях.

Основными источниками пыли являются приемное и шихтоприготовительное отделения, где производятся транспортировка, дробление, помол, просев и смешивание сырьевых материалов. При производстве аглопорита наиболее интенсивное пылевыведение характерно для помольного оборудования, работающего по сухому способу, таким оборудованием является: глинорыхлительная машина, роторная, валково-зубчатая и валковые дробилки, используемые для переработки глины и аглопорита.

Агломерационная машина также является источником выбросов загрязняющих веществ. Газообразные выбросы состоят из продуктов сгорания природного газа, торфа и угля.

В связи с этим необходимо решать вопросы санитарной охраны воздушной и водной среды населенных мест, расположенных вблизи предприятия, чтобы защитить людей, животных и растительный мир от влияния вредных выбросов.

Одним из основных направлений уменьшения пылевыделений является максимальная герметизация применяемого оборудования и использования наиболее эффективных, современных и экономичных средств очистки воздуха от пыли перед выбросом их непосредственно в атмосферу, так как исключить полностью запыленность воздуха не представляется возможным. Годовой баланс отходов производства рассчитывается исходя из нормативных потерь, результаты расчета сведены в табл.3.35.

Таблица 3.35

Годовой баланс отходов производства

Наименование отходов	Единица измерения	Количество в год	Место использования
Недожог аглопорита	т	28847,85	100% возвращается в производство

3.7.1 Расчет количеств пыли от работы технологического оборудования

Производственные пыли — это тонкодисперсные частицы, образующиеся при различных производственных процессах и способные длительное время находится в воздухе во взвешенном состоянии.

В табл. 3.36 указаны те процессы, которые сопровождаются пылевыделением, а обеспыливающее оборудование, которое позволяет снизить запылённость воздуха до предельно допустимых концентраций.

Таблица 3.36

Параметры аспирационного воздуха и рекомендуемая система очистки

Наименование оборудования	Количество агрегатов, шт.	Коэффициент загрузки	Параметры аспирационного воздуха		Рекомендуемая система очистки
			концентрация пыли, г/м ³	объем запыленного воздуха, м ³ /ч	
Бункер	4	0,8	2,0	500	Циклон ЦН-15
Глинорыхлительная машина	2	0,5	0,5	800	Циклон ЦН-15
Конвейер ленточный	12	0,5	0,15	500	Циклон ЦН-15
Камневыделительные вальцы	2	0,5	0,5	1500	Циклон ЦН-15
Агломерационная машина	2	0,9	1,2	1700	Циклон ЦН-15
Роторная дробилка	2	0,5	5	2000	Циклон ЦН-15, фильтры рукавные
Питатель ленточный	10	0,5	0,5	500	Циклон ЦН-15
Вальцы дробления	4	0,75	1,5	1500	Циклон ЦН-15, фильтры рукавные
Коржеломатель	2	0,8	10	1500	Циклон ЦН-15, фильтры рукавные
Силоса	8	0,8	4,5	1000	Циклон ЦН-15, фильтры рукавные

При мокром способе пылеулавливания часть пыли осаждается и возвращается в производство в виде суспензии, а при сухом способе улавливания в производство поступает в виде порошка.

ПДК для производственных помещений установлены из условия, что при ежедневной работе в пределах 8 часов в течение всего рабочего стажа такая концентрация не может вызвать у работающих, заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, непосредственно в процессе работы или отдаленные сроки. Величина ПДК для населенных мест в 10 и более раз ниже, чем для производственных помещений.

В качестве ПДК для приземного слоя атмосферы над территорией предприятия принято считать 30% от ПДК для производственных помещений.

ПДК неорганической пыли в воздухе рабочей зоны производственных помещений не должно превышать 2 мг/м^3 для всех видов пыли, содержащей свыше 10% SiO_2 и до 10 мг/м^2 для всех остальных видов пыли.

Таблица 3.37

Результаты расчётов источников пылевыделения

Наименование пылящего оборудования	Количество загрязняемого воздуха P , кг/ч	Годовой выброс загрязняющего вещества P_z , т/год	Количество пыли поступающей в атмосферу P_0 , кг/ч
1	2	3	4
Бункер	3,2	16,27	16
Глинорыхлитель	0,4	0,4	0,8
Конвейер ленточный	0,38	1,536	0,094
Камневыделительные вальцы	0,75	3,07	0,15
Агломерационная машина	3,67	4,08	0,17
Роторная дробилка	10	40,96	2

1	2	3	4
Питатель ленточный	0,75	3,07	0,15
Вальцы среднего дробления	6,75	27,65	1,35
Коржеломатель	24	98,3	4,8
Силоса	28,8	117,96	5,76

3.8 Разработка рекомендаций по промышленному внедрению проведенных исследований

Перспективный метод утилизации отходов различных отраслей промышленности – их использование в производстве строительных материалов способствует расширению сырьевой базы, экономии материальных ресурсов, сокращению затрат на их транспортировку и складирование.

Одновременно предотвращается загрязнение окружающей среды и отпадает необходимость в отчуждении значительных территорий, под накопителей, склады и отвалы.

Рациональное применение отходов в промышленности строительных материалов позволит полностью использовать резервы производства и даст значительный экономический эффект.

В результате утилизации и использования отходов промышленности в народном хозяйстве страны достигается экономия капитальных вложений и снижение расходов производства как в отраслях, выпускающих материалы и изделия из отходов, так и в промышленности, располагающие утильным сырьем.

Была разработана комплексная малоотходная технология добычи и переработки нерудных строительных материалов, где вскрышная порода (суглинки) при добыче силикатного песка на карьере «Фаниполь» Минского района могут использоваться в технологии получения некоторых ПСМ на основе аглопорита и керамического кирпича на ОАО «Минский завод строительных материалов» (г. Минск) (рис. 3.11). Также в качестве импортозамещающих материалов 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.

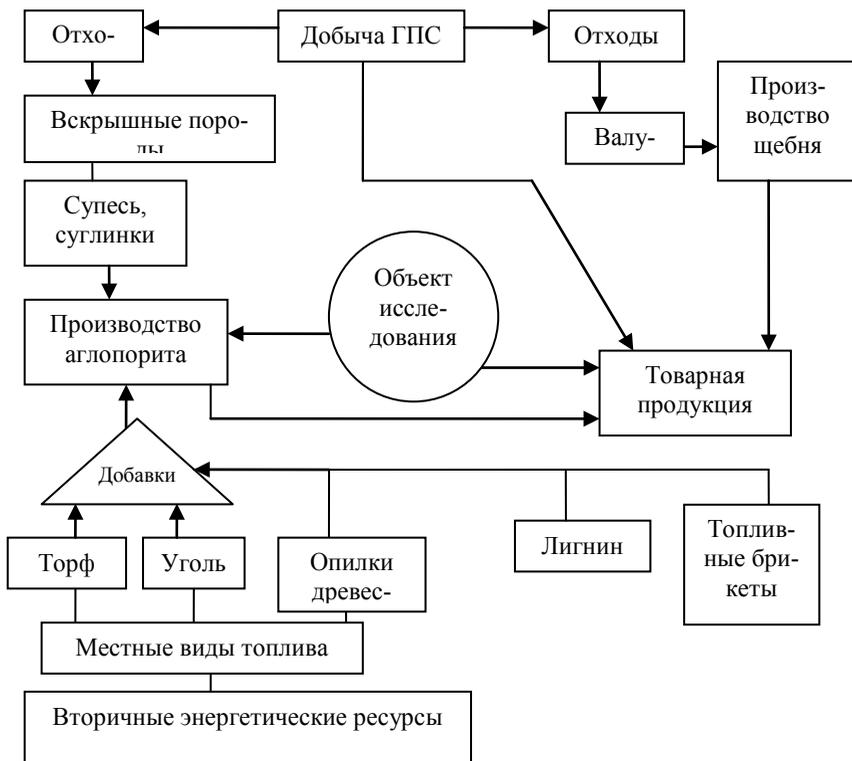


Рис. 3.11. Комплексная малоотходная ресурсосберегающая технология добычи и переработки НСМ на основе вовлечения в разработку крупных каменных включений

Одним из важных направлений решения комплексной проблемы повышения эффективности и качества разработки месторождений ГПС должно стать широкое ресурсо- и энергосбережение. При этом на экономию одной тонны сырья при добыче, переработке и транспортировании ГПС затрачивается меньше средств. Эту программу можно осуществить путем реализации комплекса организационно-экономических, технологических и технических

направлений, обеспечивающих наибольшую экономию ресурсов и их эффективное использование в горной промышленности.

Эколого-экономическая оценка рационального эффективного использования природных ресурсов позволяет сравнить ценность различных природных ресурсов и на основании этого установить последовательность их вовлечения в хозяйственный оборот. Она позволяет рассчитать природно-ресурсный потенциал регионов любого ранга республики, что важно для сопоставления ресурсообеспеченности и прогнозирования их экономического развития.

Вскрышные горные породы по своим свойствам используются для производства строительных материалов, где в качестве добавок, как показали исследования, могут применяться местные виды топлива и отходы промышленности (торф, топливные брикеты, древесные опилки, лигнин и др.). ГПС можно перерабатывать по двум вариантам:

- а) сырье доставляется автотранспортом на ДСЗ;
- б) переработка осуществляется в карьере в одну или две стадии с обезвоживанием.

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, сапрпель и др.). Следует сказать, что сапрпелевые коллоидные отложения содержатся во многих пресноводных водоемах Беларуси и содержат до 93% органических веществ. Сейчас их добыча носит промышленный характер и применение сапрпелей возможно не только в сельском хозяйстве, но и в производстве легких заполнителей для аглопорита.

По результатам обзора и анализа предыдущих исследований [19-24, 35, 37] были разработаны возможные оптимальные составы сырьевых смесей в производстве аглопорита, уровни факторов и

интервалы их варьирования для получения оптимальных физико-механических свойств аглопорита по параметрам оптимизации (прочность и плотность аглопорита) (табл. 3.38-3.40).

Таблица 3.38

Уровни факторов и интервалы их варьирования

	Факторы	Суглинки-С		Торф-Т		Лигнин-Л		Опилки-О	
		$x_1, \%$	x_1	$x_2, \%$	x_2	$x_3, \%$	x_3	$x_4, \%$	x_4
1	Основной уровень $X=0$	78,5	0	3,5	0	10,5	0	7,5	0
2	Интервал варьирования	8,5		2,5		3,5		2,5	
3	Верхний уровень $X= +1$	87	+1	6	+1	14	+1	10	+1
4	Нижний уровень $X= -1$	70	-1	1	-1	7	-1	5	-1

Таблица 3.39

Уровни факторов и интервалы их варьирования

	Факторы	Суглинки-С		Лом брикетов-ЛБ		Уголь бурый -УБ		Опилки-О	
		$x_1, \%$	x_1	$x_2, \%$	x_2	$x_3, \%$	x_3	$x_4, \%$	x_4
1	Основной уровень $X=0$	78	0	4,0	0	10,5	0	7,5	0
2	Интервал варьирования	8		2,5		3,5		2,5	
3	Верхний уровень $X= +1$	86	+1	6,5	+1	14	+1	10	+1
4	Нижний уровень $X= -1$	70	-1	3,5	-1	7	-1	5	-1

Таблица 3.40

Уровни факторов и интервалы их варьирования

	Факторы	Суглинки-С		Сапропель-СА		Антрацит-А		Опилки-О	
		$x_1, \%$	x_1	$x_2, \%$	x_2	$x_3, \%$	x_3	$x_4, \%$	x_4
1	Основной уровень $X=0$	74,5	0	7,5	0	10,5	0	7,5	0
2	Интервал варьирования	8,5		2,5		3,5		2,5	
3	Верхний уровень $X= +1$	83	+1	10	+1	14	+1	10	+1
4	Нижний уровень $X= -1$	66	-1	5	-1	7	-1	5	-1

Для дробления спекшегося конгломерата на крупные куски у разгрузочного конца агломерационной машины устанавливают раскалывающее устройство – коржеломатель размеры кусков не более 500 мм. Установлена решетка наклонная для отделения не спекшихся частиц шихты, ширина щели в решетке 20 мм.

Процесс дробления служит для разрушения спекшегося коржа и делится на 4 ступени:

- I ступень: дробилка роторная СМ-962 размеры выходящих кусков 120-150 мм. Пластинчатым наклонным конвейером В - 1200 дробленый корж подается на вторую ступень дробления.

- II ступень: дробилка валково-зубчатая величина кусков 40-60 мм.

- III ступень: дробилка валковая СМ-1096 величина кусков 15-40 мм. Транспортировка дробленого аглопорита пластинчатым конвейером В-500 на предварительный рассев на сито с ячейками 20x20. Отделение фракции более 20 мм и подача ее на IV ступень дробления.

- IV ступень: дробилка валковая зазор между валками 10-15 мм (может быть увеличен в зависимости от потребности фракции 20-40 мм).

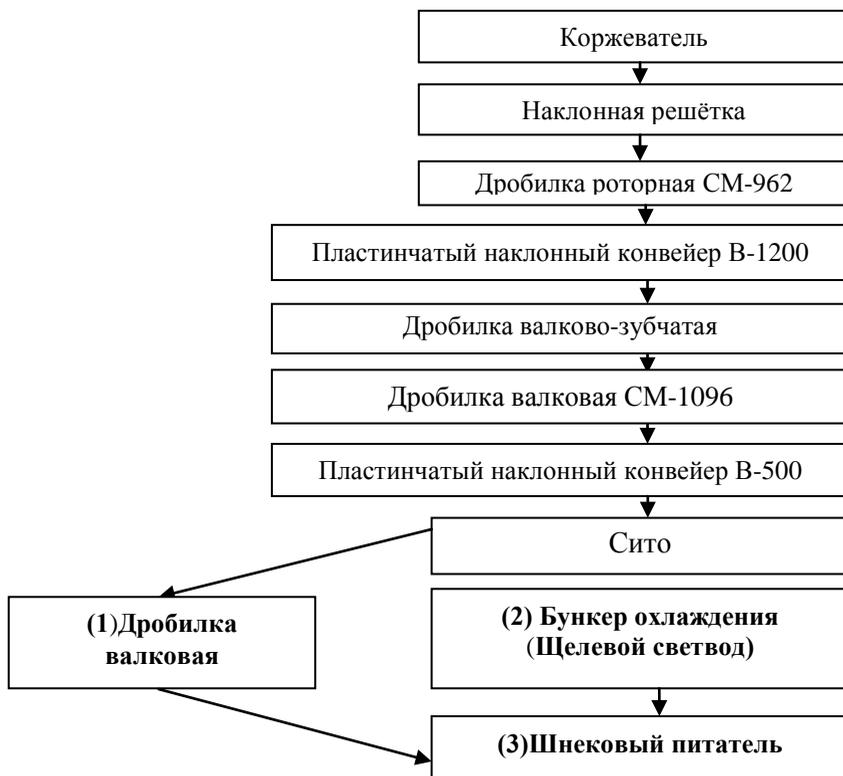


Рис. 3.12. Линия дробления обожженного коржа аглопорита

Прим. П.п. 1-3. Предложенный нами вариант использования полученных патентов в технологической цепи производства аглопорита.

Одновременно с дроблением осуществляют охлаждение аглопорита водой, которое предназначено для более быстрого перехода его из пиропластического состояния в твердое, что значительно облегчает работу дробильного оборудования, одновременно способствует разрушению (растрескиванию) конгломерата. Вода для охлаждения подается в следующих точках: в роторную дробилку, на пластинчатые конвейера, сито и на конвейер ленточный подачи аглопорита на фракционный рассев с целью охлаждения транспортной ленты. Бункер охлаждения предназначен для временного хранения и охлаждения аглопорита до 120°C. При проектировании

поточно-механизированной линии дробления обожженного коржа аглопорита необходимо в первую очередь учитывать физические свойства измельчаемого материала, а также размеры фракции, которую необходимо получить на выходе. В современных условиях дробилки должны быть экономичными, безопасными.

На основании проведенных исследований установлено, что замена древесных опилок на фрезерный торф возможна при использовании торфа как верхового типа, низкой степени разложения (до 15%), влажностью 46-49%, зольностью до 20%, так и низинного типа (степень разложения до 30%), влажность 50-52%, зольность до 25%), что обусловлено волокнистой структурой торфа, которая формирует состав глины в смеси с суглинками. Это повышает ее сопротивление разрыву и уменьшает образование трещин на полуфабрикате на стадии сушки. При подготовке выгорающей добавки (фрезерного торфа) установлено, что фракционный состав торфа не должен превышать 5-10 мм, а также отсутствие комков и древесных включений. Представляет практический интерес использовать в технологии гранулированный торф и дробленный торфяной брикет, что позволит увеличить пористость керамических изделий.

При максимальной температуре обжига керамические стеновые материалы рекомендуется выдерживать с целью выравнивания температуры по толщине и равномерного распределения минимального необходимого количества жидкой фазы для образования связки между дегидратированными, декарбонезированными частицами и зёрнами кварца.

Предложено в состав линии обожженного коржа аглопорита ввести валковую дробилку и шнековый питатель (патент №8224 «Шнек»), которые позволяют на 5-7% уменьшить энергозатраты за счёт эффективной переработки и одновременного перемещения материала. При контроле качества технологического процесса можно использовать щелевой световод (рис. 3.12).

Проведенные опыты в целом позволяют уменьшить себестоимость продукции за счёт разницы цены 1 тонны фрезерного торфа (7-8 у.е.), древесных опилок (25-30 у.е.) и антрацита (250-300 у.е.), с учётом транспортных расходов при соблюдении нормативных показателей аглопорита и керамического кирпича по прочности, плотности и водопоглощению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных лабораторных и промышленных испытаний местных видов топлива (фрезерный торф, топливные брикеты) и вторичных энергоресурсов (древесные опилки) при получении некоторых пористых строительных материалов (аглопоритовый песок, щебень, керамический кирпич, блоки пустотелые поризованные) определены их основные физико-механические свойства (прочность на изгиб, на сжатие, плотность, морозостойкость, водопоглощение и др.), которые отвечают республиканским стандартам.

Использование полученных результатов в производстве пористых строительных материалов позволит уменьшить энергозатраты и тем самым снизить себестоимость при производстве единицы продукции (за счёт разницы цены 1 тонны фрезерного торфа (7-8 у.е.), древесных опилок (25-30 у.е.) и антрацита (250-300 у.е.), с учётом транспортных расходов при соблюдении нормативных показателей аглопорита и керамического кирпича по прочности, плотности и водопоглощению), улучшить показатели рациональности, комплексности, безотходности. Результаты научно-исследовательской работы прошли промышленную апробацию на ОАО «Минский завод строительных материалов».

В настоящее время стоимость составляющих компонентов сырьевых смесей для производства пористых строительных материалов в несколько раз превышает стоимость фрезерного торфа и переработанных топливных брикетов, поэтому их замена носит актуальный характер и позволит в будущем использовать результаты исследования при импортозамещении (уголь+антрацит). Результаты исследования могут использоваться в строительной промышленности для производства пористых строительных материалов на основе аглопорита и керамических изделий с использованием местных видов топлива и вторичных энергоресурсов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авдохин, Б.М. Основы обогащения полезных ископаемых: в 2-х томах.- М.: изд. МГУ «Горная книга», 2008. – Том 1– 417 с.
2. Авдохин, Б.М. Основы обогащения полезных ископаемых: в 2-х томах.- М.: изд. МГУ «Горная книга», 2008. – Том 2. – 310 с.
3. Березовский, Н.И. Обезвоживание полезных ископаемых: идеи и практика энергосбережения / Н.И.Березовский, Б.А.Богатов.– Минск: Технопринт, 2000. – 170 с.
4. Лиштван, И.И. Физико-химические основы технологии торфяного производства.– Минск: Наука и техника, 1983. – 282 с.
5. Березовский, Н.И. Добыча и переработка горных пород. Осадочные горные породы / Н.И.Березовский, Б.А.Богатов. – Минск: БНТУ, 2005. – 138 с.
6. Березовский, Н.И. Разработка инновационных технологий: монография/ Н.И. Березовский, С.Н. Березовский, Б.В. Лесун. – Минск: БИП, 2013. – 84 с.
7. Белосельский, Б.С. Твердое энергетическое топливо / Б.С. Белосельский, В.К. Соляков. – М.: МЭИ, 1978. – 119 с.
8. Васильев, С.Б. Исследование способов усреднения качества угля на добывающем предприятии:автореферат диссерт. на соиск. уч. степени канд. техн. наук./ С.Б.Васильев – Иркутск, 2009. – 32 с.
9. Бамбалов, Н.Н. Краткий исторический очерк становления и развития химии и торфа Беларуси / БамбаловН.Н. // Природопользование. – 2012.– Выпуск 22. – С.24-47
10. Березовский, Н.И. Природные ресурсы и их использование / Н.И.Березовский, Е.К. Костюкевич. – Минск: БНТУ, 2005. – 188 с.
11. Березовский, Н.И. Разработка энергоэффективных технологий / Н.И.Березовский. – Минск: БИП-С Плюс, 2006. – 219 с.
12. Карабанов, А.К. Институту природопользования национальной академии наук Беларуси – 80 лет: основные направления и важнейшие результаты научно-исследовательской деятельности за последнее десятилетие / А.К. Карабанов, Г.А Камышенко // Природопользование. – 2012.– Выпуск 22. – С.5-17.
13. Лиштван, И.И. Коллоидная химия, физико-химическая механика торфа: история развития и современные направления иссле-

дования / И.И. Лиштван// Природопользование. – 2012. – Выпуск 22. – С.47-57.

14. Лиштван, И.И. Государственная научно-техническая программа: «Природные ресурсы и окружающая среда»: первые результаты / И.И. Лиштван, А.В. Высоченко, В.Э. Пахомчик, И.Л. Якимович // Природопользование. – 2012. – Выпуск 22. – С.188-195.

15. Лиштван, И.И. Физические свойства торфа и торфяных залежей / Е.Т. Базин., В.И. Косов – Минск: Наука и техника, 1985, – 240 с.

16. Лиштван, И.И. Становление и развитие Института торфа – Института природопользования, Национальной академии наук Беларуси / И.И. Лиштван// Природопользование. –2012. – Выпуск 22. – С.17-24.

17. Радзевич, Л.Ф. Торфяной фонд Белорусской ССР и основные направления его охраны и рационального использования: серия 87.51.15 / Л.Ф. Радевич. –Минск, 1991.

18. Торф – государственная программа на 2008-2011 годы и на период до 2020 года. – Минск, 2008. – 140 с.

19. Исследование и разработка технологии производства аглопорита с использованием низкосортных видов топлива, отходов промышленности; разработка исходных данных и типовых проектов цехов аглопорита мощностью 100 и 200 тыс.м³ в год : научно-технический отчет, 1982. – 39 с.

20. Использование мелкодисперсных отходов в производстве аглопорита: отчет по НИР НИИСМИ. – Минск, 1983. – 76 с.

21. Наназашвили, И.Х. Строительные материалы и изделия / И.Х. Наназашвили, И.Ф. Бунькин, Наназашвили В.И. – М.:Аделант, 2006. - 479 с

22. Основин, В.Н. Строительные материалы и изделия / Основин В.Н., Шуляков Л.В. - Минск: Вышэйшая школа, 2008. - 224 с.

23. Разработать технологические параметры производства аглопорита, обеспечивающие сокращения расхода угля-антрацита: отчет по теме № 92-067.–Минск: НИИСМИ, 1992. – 36 с.

24. Разработать технологические параметры производства аглопорита, направленная на интенсификацию процесса агломерации и экономии энергозатрат: отчет НИИСМИ № ГР 810 7 1792. – Минск, 1980. – 160 с.

25. Указания по испытанию сырья для производства аглопорита У-03-63 / Академия строительства и архитектуры СССР, НИИНСМ. – М.:Стройиздат, 1963. – 22 с.
26. Березовский, Н.И. Основы энергосбережения. Местные виды топлива / Н.И.Березовский, С.Н.Березовский, Н.В.Воронова. – Минск: БИП-С Плюс, 2011. – 65 с.
27. Богатов, Б.А. Экологическая и энергетическая безопасность / Б.А. Богатов, В.С. Войтенко, А.Е. Кимаев // Идеи и практика скважинной добычи полезных ископаемых и утилизация отходов. – Минск: Юнипак, 2005. – 216 с.
28. Березовский, Н.И. Энергоэффективные производственные технологии / Н.И.Березовский, С.Н.Березовский. – Минск: БИП-С Плюс, 2010. – 204 с.
29. Копаница, Н.О. Эффективные строительные материалы на основе модифицированных торфов / Н.О. Копаница, Ю.С.Саркисов, А.Б.Рыжиков // Строительные материалы. –2002. – № 7. – С. 12–14.
30. Коротаяев, Э.И. Производство строительных материалов из древесных отходов: изд. 2-е, перераб. и доп./ Коротаяев Э.И., Клименко М.И. -Москва: Лесная промышленность, 1977. - 165 с.
31. Мисников, О. Пустотелый наполнитель для легкого бетона на основе торфа и минерального сырья / О.Мисников, С.Гамаюнов // Строительные материалы. – 2004. – №5. – С. 22–24.
32. Об утверждении плана мероприятий по использованию в республике местных топливно-энергетических ресурсов: постановление Совета Министров Республики Беларусь, от 26 декабря 2006 г., № 1726.
33. Новые задачи по использованию торфяных ресурсов Республики Беларусь на ближайшие годы / Л.С.Лис, В.Б.Кунцевич, А.В.Осипов, Н.И.Березовский // Процессы и средства добычи и переработки полезных ископаемых : сб. трудов междуна. научн.-технич. конф. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 57–63.
34. Березовский, Н.И. Основы экологии и энергосбережения / Н.И.Березовский, С.Н.Березовский, А.И.Лира. – Минск: БИП-С Плюс, 2011. – 64 с.
35. Атаев, С.С. Технология строительного производства / Атаев С.С. [и др.].– М.:Стройиздат, 1975. –С. 519.

36. Смирнов, Н.А. Технология и организация строительного производства / Смирнов Н.А. [и др.]. – М.:Стройиздат, 1975. – С. 528.
37. Данилов, Н.Н. Технология строительного производства/ Под общ. ред. Н.Н. Данилова [и др.]. – М.: Стройиздат, 1977. –С. 440.
38. Модифицированный безобжиговый зернистый материал на основе низинного торфа / А.И. Кудяков [и др.] // Известия вузов. Строительство. – 1997. – № 11. – С. 37–40.
39. Новиков, Ю.В. Экология, окружающая среда и человек / Новиков Ю.В. – М.: Фааир-пресс, 2000. - 317 с.
40. Строительные материалы / А.С. Болдырев, П.П. Золотов [и др.]. – М: Стройиздат, 1989. – 567 с.
41. Стаценко, Л.Г. Обоснование рациональных параметров внутрикарьерных складов при управлении рудопотоком азбестового комбината: автореферат диссертации на соискание уч. степени кандидата технических наук.– г. Алматы, 2008. – 31 с.
42. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики / А.В. Лыков. – Минск: изд-во АН БССР, 1961. – 519 с.
43. Воронова, Н.П. Математическое моделирование энергосберегающих режимов нагрева, сушки и термообработки: монография / Н.П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2006. – 86 с.
44. Воронова, Н.П. Математическое моделирование и управление теплотехнологиями промышленных производств: монография / Н.П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2009. – 260 с.
45. Методы лабораторного исследования и компьютерного моделирования процессов тепло- и массопереноса, формирования напряженно-деформированного состояния в природных дисперсных средах / Г.П.Бровка [и др.] // Природопользование. – 2012. – Вып.22.– С. 97–108.
46. Болтянский, В.Г. Математические методы оптимального управления / В.Г. Болтянский.– М.: Наука, 1966.- 208 с.
47. Бутковский, А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975. – 568 с.
48. Гетвуд, Б.Е. Температурные напряжения / Б.Е. Гетвуд. – М.: Наука, 1969. – 288 с.
49. Араманович, И.Г. Уравнение математической физики / И.Г. Араманович, В.И. Левин. – М.: Наука, 1989. – 288 с.

50. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Граковский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

51. Амосов, А.А. Вычислительные методы для инженеров / А.А. Амосов, Ю.А. Дубинский. – М.: Высш. школа, 1994. – 544 с.

52. Богатов, Б.А. Математические методы и модели в горном деле / Б.А. Богатов. – Минск: УП «Технопринт», 2003 г. – 115 с.

Научное издание

БЕРЕЗОВСКИЙ Николай Иванович
ВОРОНОВА Наталья Петровна
ГРИБКОВА Светлана Михайловна
ЛЕСУН Борис Владимирович

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕСТНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА
И ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ
В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОРИСТЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Технический редактор *О. В. Песенько*

Подписано в печать 28.11.2014. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 7,50. Уч.-изд. л. 5,86. Тираж 100. Заказ 973.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.