

УДК 691.2:622.271(476)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕСТНОГО СЫРЬЯ И ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Березовский С.Н. (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь),
Воронова Н.П. (Институт интегрированных форм обучения и мониторинга образова-
ния, г. Минск, Беларусь)

В статье рассмотрены вопросы ресурсо- и энергосбережения при производстве строительных материалов. Для производства строительных материалов необходимы дешевые материалы и изделия из местного сырья. Поскольку для получения высококачественных, прочных и надежных строительных материалов необходимо подбирать и тщательно анализировать исходные компоненты с точки зрения рентабельности и ресурсосбережения, для получения аглопоритового щебня предлагается использовать вместо дорогостоящего привозного угля вскрышные породы месторождений (суглинки) и отходы торфяного производства. Методом математического планирования нами оптимизирован процесс получения аглопоритового щебня с вскрышными породами месторождений нашей страны и получена модель, связывающая прочность аглопоритового щебня с предлагаемым составом сырьевой смеси.

Введение

Разработка и применение ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов при добыче и переработке гравийно-песчаных пород возможны на базе анализе комплексного использования сырья, а именно:

- наиболее полного, экономически оправданного и многовариантного использования всех компонентов сырья;
- вовлечения в производство местных сырьевых ресурсов для полной или частичной замены привозного сырья;
- расширения интервала пригодности сырья, например, изменением стандарта;
- использования многоуровневых технологических процессов для повышения безотходности;
- снижения энергозатрат на производство (температура обжига, длительность технологического процесса);
- использования добавок для расширения интервала функциональных свойств;
- оптимизации свойств и расширения номенклатуры выпускаемой продукции.

Большое количество отходов и потерь на горно-перерабатывающих предприятиях предопределяет необходимость решения проблемы: рационального использования минеральных ресурсов. Нами показана возможность расширения интервала пригодности сырья и его использования для получения 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, которое может создавать необходимую теплоту (до 4200 ккал/кг) сгорания в зоне агломерационной машины на основе торфа, лома топливных брикетов, древесных опилок и лигнина, которые являются от-

ходами в топливной, деревообрабатывающей и гидролизной промышленности. Отходами при добыче являются крупные валуны, которые могут использоваться для производства щебня, а вскрышные породы (суглинки) – для получения аглопорита. Товарной продукцией является аглопоритовый щебень с различным фракционным составом от 5 до 70 мм [1, 2].

Основным параметром оптимизации получаемой готовой продукции является прочность аглопорита, а также эффективность дробления и температурные параметры агломерации, которые имеют большое значение при рыночном спросе на продукцию. Утилизация горных пород, образующихся при разработке гравийно-песчаной смеси (ГПС) и переработке полезных ископаемых, является важной экономической и экологической задачей. При этом должны учитываться ограничения, связанные со свойствами нерудно-строительных материалов (НСМ). Аглопоритовый щебень и песок – искусственные пористые материалы, полученные дроблением спеков, образующихся в результате термической обработки гранулированных шихт из алюмосиликатных и силикатных материалов природного происхождения или отходов промышленности методом агломерации. Применяют их в качестве заполнителя при изготовлении конструкционно-теплоизоляционных и конструкционных легких бетонов, а также в качестве утепляющих засыпок. Структурно-механические свойства сырьевых материалов определяют соответствующие методы их подготовки к термической обработке. Основная технологическая операция при производстве аглопорита – это спекание шихты на решетке агломерационной машины непрерывного действия, где теплота сгорания топлива должна быть выше 4000 ккал/кг. Спеканию подвергаются малопластичные глинистые породы, которые при обжиге не вспучиваются. Некоторые вскрышные породы горных предприятий РБ, где добывают ГПС, отвечают этим требованиям. За счет горения угля, который вводится в шихту, развивается температура до 1300 К. Это приводит к спеканию шихты в виде пористой остеклованной массы. Следует отметить, что протекающие процессы тепломассопереноса не заканчиваются в зонах сушки и нагрева, а накладываются друг на друга и в большей части по всей длине ленты развиваются параллельно [3].

Математическое планирование эксперимента

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 (легкие и силикатные), а также теплоизоляционных засыпок. 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. Для исследований нами применялись суглинки месторождения песка и песчано-гравийной смеси «Ольшанка» Минского района со следующими химико-физическими данными, %: SiO_2 – 77,0-80,8; $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ – 9,1-9,6; Fe_2O_3 – 2,4-2,8; $\text{MgO} + \text{CaO}$ – 1,5-4,4; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ – 3,5-3,8; потери при прокаливании – ~1,0-3,9.

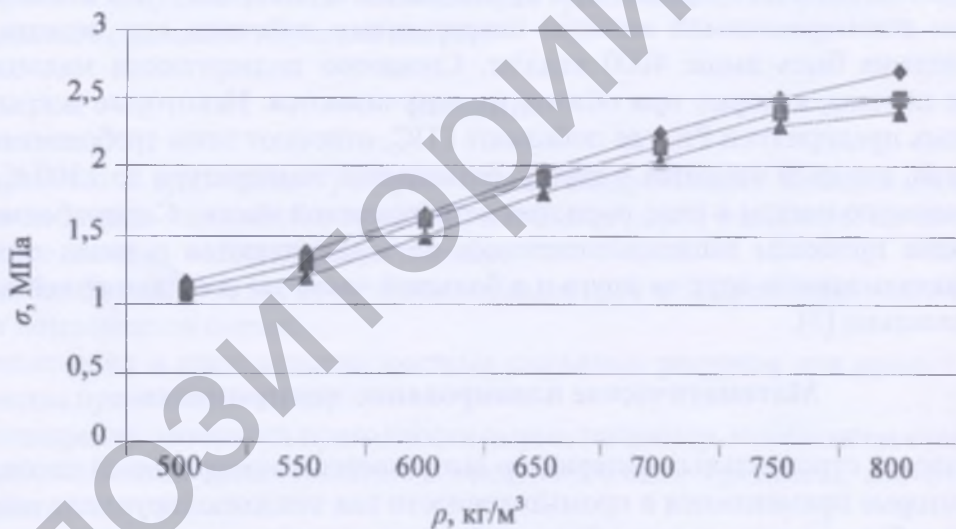
На основании предварительных опытов и данных НИИСМ (г. Минск) нами были выбраны уровни факторов и интервалы их варьирования (таблица 1). Опилки – 5-10 %, торфяная крошка – 5-10 %, лигнин – 7-14 %, суглинки – 66-83 %. Математическое планирование эксперимента проводилось по методике, где однородность дисперсии определялась по критерию Кохрена [4, 5].

Таблица 1 – Уровни факторов и интервалы их варьирования

№	Факторы	Суглинки (С)		Топливные брикеты (Т)		Лигнин (Л)		Опилки (О)	
		$X_1, \%$	x_1	$X_2, \%$	x_2	$X_3, \%$	x_3	$X_4, \%$	x_4
1	Основной уровень $X=0$	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

В таблице 1 указаны x_1, x_2, x_3, x_4 – математические значения факторов; X_1, X_2, X_3, X_4 – физическое значение факторов (соответствует С, Т, Л, О).

Введение в шихту прессованной торфяной крошки ($T=10\%$ – max), суглинки ($C=66-83\%$) показало, что прочность полученного аглопоритового щебня и его плотность соответствуют требованиям ГОСТ 9757-90 «Гравий, щебень и песок искусственные пористые». Зависимость прочности аглопоритового щебня от его плотности при добавлении отходов торфяного производства и вскрышных пород показана на рисунке 1. Результаты серии опытов по определению прочности аглопоритового щебня приведены в таблице 2.



◆ – с добавкой брикетов и суглинков; ■ – с добавкой торфа и суглинков;
▲ – заводской

Рисунок 1 – Зависимость прочности аглопоритового щебня от его плотности при добавлении отходов торфяного производства и вскрышных пород

Полный факторный эксперимент для четырех факторов состоит из 16 опытов, то есть:

$$N = 2^n,$$

где N – число опытов;
 n – число факторов.

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

нерирующие соотношение $X_4 = -X_3X_2X_1$ и определяющий контраст $I = -X_1X_2X_3X_4$. В такой схеме линейные коэффициенты в уравнении регрессии смешаны с коэффициентами тройного взаимодействия, то есть:

$$b_0 \rightarrow \beta_0 - \beta_{1234}; b_1 \rightarrow \beta_1 - \beta_{234}; b_2 \rightarrow \beta_2 - \beta_{134}; b_3 \rightarrow \beta_3 - \beta_{124}; \\ b_4 \rightarrow \beta_4 - \beta_{123}; b_{12} \rightarrow \beta_{12} - \beta_{34}; b_{13} \rightarrow \beta_{13} - \beta_{24}; b_{14} \rightarrow \beta_{14} - \beta_{23}.$$

Предполагается, что коэффициенты $\beta_{234}, \beta_{134}, \beta_{124}, \beta_{123}$ малы и несущественно исказят линейные коэффициенты b_1, b_2, b_3, b_4 .

Таблица 2 – Результаты серии опытов по определению прочности аглопоритового щебня

Серии опытов	Уровни факторов				Параметр оптимизации (опыты), МПа			Расчетный параметр оптимизации, МПа
	X_1	X_2	X_3	X_4	Π_1	Π_2	Π_3	Π_p
1	-	-	-	+	0,64	0,63	0,68	0,6
2	+	+	-	+	0,97	0,99	0,98	1,08
3	-	+	-	-	0,85	0,84	0,84	0,85
4	+	-	-	-	0,96	0,95	0,97	0,99
5	-	-	+	-	0,88	0,89	0,82	0,85
6	+	-	+	+	0,81	0,77	0,83	0,81
7	-	+	+	+	0,76	0,78	0,73	0,77
8	+	+	+	-	0,99	0,96	0,97	1,03

Для исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними условиями, проводилась рандомизация, то есть по таблице случайных чисел выбиралась последовательность опытов.

Однородность дисперсий определялась по критерию Кохрена:

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}, \quad (1)$$

где G_p – расчетное значение критерия Кохрена.

Если выполняется условие:

$$G_p \leq G_T,$$

где G_T – табличное значение критерия Кохрена, то опыты воспроизводимы, а оценки дисперсий – однородные.

Если же $G_p > G_T$, то выявляют и устраняют источник нестабильности экспериментов или используют более точный метод и средства измерения.

Дисперсия воспроизводимости рассчитывалась по формуле:

$$S_b^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n (y_{jk} - y_j)^2}{N(n'-1)}, \quad (2)$$

где n' – число параллельных опытов.

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

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j}{N}, \quad (3)$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j \cdot x_{ji}}{N}, \quad (4)$$

$$b_{lm} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ji} \cdot x_{jm} \cdot \bar{y}_j}{N}, (l \neq m), \quad (5)$$

где j – номер опыта;

i, l, m – номера факторов.

Значимость этих коэффициентов определяется следующим образом:

$$\Delta b = \pm t_{N(n-1)} \cdot S_j, \quad (6)$$

где $t_{N(n-1)}$ – значение критерия Стьюдента;

S_j – дисперсия коэффициентов.

$$S_j^2 = \frac{S_b^2}{N \cdot n}. \quad (7)$$

При полном факторном эксперименте все коэффициенты определялись с одинаковой погрешностью. Если

$$|b| \geq S_j \cdot t,$$

то коэффициент регрессии значим. Если условие не выполняется, то коэффициент исключается из уравнения. После получения уравнения регрессии его проверяют по критерию Фишера на адекватность, то есть способность достаточно хорошо описывать поверхность отклика:

$$S_{og}^2 = \frac{n \sum (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - k}, \quad (8)$$

где \bar{y}_j , \hat{y}_j – среднее экспериментальное и расчетное значение параметра оптимизации j -ом опыте;

k – число рассчитанных коэффициентов в уравнении регрессии, включая и свободный член.

$$F_p = \frac{S_{ag}^2}{S_b^2}, \quad (9)$$

где F_p – расчетное значение критерия Фишера.

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 неадекватна, так как $F_p > F_T$. Здесь мы находимся или в стационарной зоне, или велики коэффициенты смещения. Линейные коэффициенты регрессии одного порядка и характер их влияния на параметр оптимизации одинаков. Это говорит о правильности выбора интервалов варьирования. Несмотря на то, что модель неадекватна, можно сделать следующий вывод: выход воска из торфа становится больше с увеличением всех четырех факторов и большее влияние на этот процесс оказывает температура растворителя. Это согласуется с литературными данными, а выход воска из торфа, полученный в экспериментах, близок к ним. Результаты восьмого опыта лежат в оптимальной области. Так как полученная линейная модель неадекватна, то процесс должен описываться уравнением второго порядка. Поэтому достраиваем полуреплику до полного факторного эксперимента.

Полный факторный эксперимент

Матрица планирования и результаты факторного эксперимента приведены в таблице. Основной уровень, интервалы варьирования, верхний и нижний уровни для второй серии опытов выбраны те же, что и в первом. Во второй серии реализована полуреплика до полного факторного эксперимента 2^4 с генерирующим отношением $X_4 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$ и двумя параллельными опытами.

Модель нелинейна, так как $F_p > F_T$ при $k = 5$ и при $k = 10$ и, значит, описать ее можно только уравнением второго порядка, для чего необходимо сделать еще восемь опытов в звездных точках.

Опыты в звездных точках. Каноническая форма уравнения регрессии

Для адекватности математического описания стационарной зоны требуется многочлен более высокой степени, например отрезок ряда Тейлора, содержащий члены с квадратами переменных

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \beta_{(n-1)n} x_{n-1} x_n + (\beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \dots + \beta_{nn} x_n^2 + \dots),$$

где $\beta_0 = y(0, \dots, 0)$ – значение функции отклика в начале координат.

Наиболее распространенные на практике планы второго порядка для четырех факторов: ортогональные, ротабельные и другие. Они содержат от 24 до 31 опытов. «Ядро» таких планов составляет полный факторный эксперимент 2^4 . Поэтому было использовано центральное композиционное планирование эксперимента (ЦКП), а именно, ортогональное. Количество опытов при ОЦКП определяется:

$$N = 2^n + 2n + 1, \quad (10)$$

где 2^n – количество опытов, образующих полный факторный эксперимент;

$2n$ – число звездных точек в факторном пространстве, имеющих координаты $(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0); (0, \pm\alpha, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm\alpha)$;

α – величина звездного плеча.

Для четырех факторов $\alpha = \pm 1,414$. Значения α выбраны из условия ортогональности матрицы планирования.

Уравнение регрессии при ортогональном ЦКП ищем в следующем виде:

$$y = b_0^* + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n + b_{12} x_1 x_2 + \dots + b_{(n-1)n} x_{n-1} x_n + b_{11} x_1^2 + \dots + b_{nn} x_n^2.$$

$$X_{ji}^* = x_{ji}^2 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ji}^2.$$

Величина X_{ji}^* – введена для того, чтобы матрица планирования была ортогональна и коэффициенты регрессии определялись независимо друг от друга по результатам опытов.

Чтобы получить уравнение регрессии в общей форме:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n + b_{12} x_1 x_2 + \dots + b_{(n-1)n} x_{n-1} x_n + b_{11} x_1^2 + \dots + b_{nn} x_n^2,$$

необходимо найти

$$b_0 = b_0^* - \frac{b_{11}}{N} \sum_{j=1}^N x_{j1}^2 - \dots - \frac{b_{nn}}{N} \sum_{j=1}^N x_{jn}^2,$$

где $\sum_{j=1}^N x_{ji}^2 = 20$.

Коэффициенты регрессии при ортогональном ЦКП рассчитывались по следующим формулам:

$$b_0^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j;$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ji} y_j}{\sum_{j=1}^N (x_{ji})^2}, i \neq 0;$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ji} x_{jk} y_j}{\sum_{j=1}^N (x_{ji} x_{jk})^2}, i \neq k,$$

где $\sum_{j=1}^N (x_{ji} x_{jk})^2 = 16$;

$$b_{ii} = \frac{\sum_{j=1}^N (x_{ji}^* \bar{y}_i)}{\sum_{j=1}^N (x_{ji}^*)^2},$$

где $\sum (x_{ji}^*)^2 = 0,4 \cdot 16 + 7 \cdot 0,64 + 2 \cdot 1,44 = 8$.

Значение факторов в звездных точках определяется по формуле:

$$x'_i = a + ab, \quad (11)$$

где a – основной уровень для данного фактора;

b – интервал варьирования.

Уравнение регрессии, полученное с помощью ортогонального ЦКП, позволяет не только предсказать значение функции отклика для заданных условий проведения эксперимента, но и информацию о форме поверхности отклика. Исследование этой поверхности необходимо для выбора оптимального режима процесса выхода битумов из угля (или других заменяющих ресурсов) при воздействии ультразвуковых колебаний. Для изучения конфигурации поверхности отклика уравнение регрессии приводилось к канонической форме.

Расчетные значения критерия Кохрена (0,25) после проведения опытов оказались меньше теоретического (0,68). Уравнение регрессии проверялось по критерию Фишера на адекватность. Расчетное значение критерия Фишера равно $F_p = 3,55$, табличное значение – $F_m = 4,07$, что соответствует адекватности модели.

Значения коэффициентов регрессии: $b_0 = 0,33$; $b_1 = 0,38$; $b_2 = 0,19$; $b_3 = 0,11$; $b_4 = 0,10$.

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

$$Kn = 0,33 + 0,38x_1 + 0,19x_2 + 0,11x_3 + 0,10x_4, \quad (12)$$

где Kn – прочность аглопоритового щебня).

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 использо-

ванием обычной шихты. Представляет также практический интерес в технологии получения аглопорита – 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.

Далее нами выполнен инженерный расчет режимов агломерации. Сейчас в республике идет развитие исследований по экономии технологического топлива и замене его дефицитных и дорогостоящих 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 вскрышных пород в агломерации, замена импортных видов топлива на местные является 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. Анализ проведенных исследований показывает, что по мере уменьшения крупности топливных частиц повышается восстановительный потенциал продуктов горения и снижается высота окислительной зоны, что связано с уменьшением степени использования углерода, а также с увеличением абсолютной температуры в зоне горения, что приводит к снижению температурного уровня процесса. Следует отметить, что степень углефикации топлива влияет на возможную скорость спекания шихты, что влияет на скорость горения топлива. 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 имеются 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. Опыт показывает, что неудачное конструктивное решение или неправильный режим охлаждения шихты приводит к низкому качеству полученного спекшегося прочного пористого конгломерата. Особое значение приобретает теплофизическое обоснование рациональных режимов охлаждения. В связи с этим актуальной задачей является исследование распределения поля температур внутри шихты в зависимости от различных скоростей движения ленты агломерационной машины, а следовательно, от времени охлаждения.

Математическая модель процессов охлаждения с движущейся лентой в общем случае должна содержать сопряженные системы уравнений, описывающие различные физические процессы: затвердевание шихты; оплавление поверхности; перераспределение примесей, газов и др. Недостаточная изученность ряда физических явлений, сложность системы дифференциальных уравнений вынуждают упростить математическую формулировку задачи, описывающую охлаждение шихты. В последнее время наблюдается тенденция изучения динамики затвердевания с помощью численных методов решения краевых задач для уравнения теплопроводности. Этот подход связан со значительными затратами времени на составление и отладку программ. Однако во многих случаях реальных тепло-технологических процессов не требуется та высокая сте-

пень точности, которую дают аналитические либо численные методы моделирования. В таких случаях можно воспользоваться упрощенными, так называемыми инженерными способами расчетов, позволяющими проектировщику или технологу с достаточной для практических целей степенью точности определить технологически важные параметры процесса. При исследовании процесса охлаждения шихты после расплава и сгорания вкраплений, необходимо знать, как перемещается в расплаве фронт затвердевания, как распределяются температуры T в сечении твердой корки и знать время τ окончания затвердевания.

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

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

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

3. Воспламенение топлива, находящегося в шихте (в этот период при температуре 800-1600 °С железные окислы восстанавливаются до закисного состояния и способствуют образованию жидкой фазы, происходит спекание зерен внутри отдельных частиц и контактное спекание их между собой, в результате сыпучий слой превращается в спекшийся пористый конгломерат).

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

Весь процесс агломерации происходит при определенном аэродинамическом режиме. Разряжение 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:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0, \quad (13)$$

$$T|_{r=r_c} = T_c, \quad T|_{r=l} = T_n, \quad (14)$$

где x, y – координаты на плоскости;

$$r = \sqrt{x^2 + y^2};$$

r_c – текущее значение радиуса-вектора r ;

l – размер объекта;

T_c, T_n – 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:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0, \quad (15)$$

$$T|_{r=r_\tau} = T_\tau, \quad T|_{r=l} = T_n. \quad (16)$$

Учитывая симметрию задачи, слагаемым, зависящим от φ , в уравнении (13) можно пренебречь.

Тогда имеем обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка, допускающее понижение порядка

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0, \quad (17)$$

которое решается с помощью замены:

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

В результате замены уравнение (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:

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

возвращаемся к исходным переменным:

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

Общее решение уравнения (13) имеет вид:

$$T = C_1 \ln r + C_2.$$

С учетом граничных условий (14) получим:

$$\begin{cases} C_1 \ln r_\tau + C_2 = T_\tau, \\ C_1 \ln l + C_2 = T_n. \end{cases} \quad (18)$$

Вычитая из первого уравнения системы (18) второе, имеем:

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

следовательно

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

Подставляем значение C_1 в первое уравнение системы:

$$\frac{T_r - T_n}{\ln \frac{r_r}{l}} \ln r_r + C_2 = T_r.$$

Находим значение C_2 и подставляем в общее решение уравнения (13). Тогда после преобразований получим для каждого фиксированного значения времени:

$$T_{(r,r)} = T_r + \frac{T_r - T_n}{\ln \frac{r_r}{l}} \cdot \ln \frac{r}{r_r}.$$

Рассмотрим уравнение теплового баланса с учетом фазового перехода в виде:

$$\int_0^l \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{n=0} dl = \rho \left(L + c(T_r - \bar{T}) \right) \frac{dS}{d\tau}, \quad (19)$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

ρ – плотность;

c – коэффициент теплоемкости;

$\bar{T}(\tau) = \frac{1}{S} \int_S T(x, y, \tau) dx dy$ – среднемассовая температура твердой корки к моменту τ ,

$S(\tau)$ – площадь сечения твердой корки,

L – удельная теплота кристаллизации.

Левая часть формулы (19) 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_r до $\bar{T}(\tau)$.

Используя решение краевой задачи (13-14), с помощью уравнения теплового баланса (19) можно установить закон изменения во времени объема твердой корки шихты.

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

$$\begin{aligned} x &= l(\alpha_1 r \cos \varphi + \alpha_2 r^5 \cos 5\varphi), \\ y &= l(\alpha_1 r \sin \varphi + \alpha_2 r^5 \sin 5\varphi). \end{aligned} \quad (20)$$

Тогда можно записать:

$$M = \frac{2K\Theta_n \tau}{2 + K\Theta_n} = \frac{1}{4} \left[\alpha_1^2 (1 - (1 - 2 \ln r_r) r_r^2) + \alpha_2^2 (1 - (1 - 10 \ln r_r) r_r^{10}) \right], \quad (21)$$

где

$$K = \frac{c(T_r - T_n)}{L}; \quad \Theta_n = \frac{T_r - T_n}{T_r - T_c}, \quad (22)$$

где T_c – температура внешней среды при спекании шихты.

Из формулы (19) можно найти величину безразмерного времени τ^0 и времени τ :

$$\tau^0 = \frac{M(2 + K\Theta_{II})}{2K\Theta_{II}}; \quad \tau = \frac{\rho c}{\lambda} l^2 \tau^0. \quad (23)$$

В момент окончания затвердения $r_r = 0$, 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 палете размерами $0,7 \text{ м} \times 0,7 \text{ м}$ ($l = 0,35 \text{ м}$); $T_r = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{II} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_c = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$. Известно, что: $\lambda = 0,437 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$; $\rho = 1200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $c = 0,53 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; $\frac{r_0}{l} = 0,5$ – отношение радиуса закругления к половине стороны квадрата; $\alpha_1 = 1,073$, $\alpha_2 = -0,095$ – коэффициенты, соответствующие значению $\frac{r_0}{l}$; h_1 – 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 $\alpha^i = 1,1 \cdot 3,8(T_{II} + T_c)$; $i = 1, 2, \dots, \frac{1}{h_1} - 1$; $r_{r_0} = 1$ – положение фронта затвердения при $\tau = 0$, h_2 – шаг по толщине твердой корки для фронта:

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

Вычисляем значения M_i по формуле (19) для значений r_r с учетом шага h_1 , затем находим K , Θ_{II} по формулам (22), время τ_i^0 и τ_i по формулам (23). Для каждого значения τ_i распределение температуры с учетом шага h_2 ищем по формуле:

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

В момент окончания затвердения $r_r = 0$, тогда имеем:

$$M_0 = (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) = 0,29; \quad \tau^0 = \frac{M_0(2 + K\Theta_{II})}{2K\Theta_{II}} = 0,4 \cdot 10^{-4}; \quad \tau = \frac{\rho c}{\lambda} l^2 \tau^0 = 27, \text{ мин.}$$

На основании вышеизложенного можно вычислить рекомендуемую скорость движения палет в агломерационной машине, которая составляет $1,1 \text{ м/мин}$. Это значение входит в рамки технологически заложенных скоростей движения от $0,415$ до $1,25 \text{ м/мин}$ и является оптимальным для полного затвердевания шихты [6, 7].

Выводы

Таким образом, методом математического планирования эксперимента нами оптимизирован процесс получения аглопоритового щебня с использованием вскрышных пород месторождений нерудных строительных материалов нашей страны и получена модель, связывающая прочность аглопоритового щебня с предлагаемым составом сырьевой смеси. По сравнению с импортными привозными добавками (уголь) это позволит уменьшить ресурсозатраты на производство единицы выпускаемой продукции и ее себестоимость. В качестве добавок можно также использовать отходы топливных брикетов, которые по энергетическим свойствам не уступают закупаемым дорогостоящим добавкам (уголь). Произведен инженерный расчет режимов агломерации шихты, путем решения краевой задачи найдено распределение температуры в сечении твердой корки шихты и вычислена оптимальная скорость движения палет в агломерационной машине.

Список использованных источников

1. Полезные ископаемые Беларуси / П.З. Хомич [и др.]. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2002. – 528 с.
2. Технология открытой разработки месторождений полезных ископаемых: учебник для вузов / М.Г. Новожилов [и др.]. – М.: Недра, 1971. – 512 с.
3. Промежуточный отчет по теме № 92-067 «Исследовать и разработать технологические параметры производства аглопорита». – Минск: МНИИСМ, 1992. – 36 с.
4. **Богатов, Б.А.** Математические методы и модели в горном деле / Б.А. Богатов. – Минск: УП «Технопринт», 2003 г. – 115 с.
5. **Адлер, Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Граковский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
6. **Воронова, Н.П.** Математическое моделирование и управление теплотехнологиями промышленных производств: монография / Н.П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2009. – 260 с.
7. **Воронова, Н.П.** Математическое моделирование энергосберегающих режимов нагрева, сушки и термообработки / Н.П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2006. – 86 с.

Berezovsky S.N., Voronova N.P.

Use of domestic raw materials and overburden rocks for manufacture of construction materials

The issues of resource- and energy saving by manufacture of construction materials were reviewed in the article. Cheap materials and products are necessary for manufacture of construction materials from domestic raw materials. Due to production of high-quality, strong and reliable construction materials, it is necessary to select and carefully analyze primary components in relation to profitability and resource saving we suggest to use overburden rocks of deposits (loams) and wastes of peat manufacture instead of expensive imported coal for production of agloporite road metal. Using mathematical planning method we optimized production process of agloporite road metal with overburden rocks from our country deposits and obtained the model connecting strength of agloporite road metal with the offered composition of raw mixture.

Поступила в редакцию 17.01.2013 г.