

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 620.9.008

С. Н. Березовский, канд. техн. наук, доц.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕСТНОГО СЫРЬЯ И ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассмотрены вопросы ресурсо- и энергосбережения при производстве строительных материалов. Для этого необходимы дешевые материалы и изделия из местного сырья. Поскольку для получения высококачественных, прочных и надежных строительных материалов следует 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

В современных условиях увеличивается интерес к комплексному освоению и использованию природных ресурсов и техногенных образований. Положительным примером служат месторождения песков «Ольшанка» (РБ), «Карьер 2000» (РФ), где добывается строительный песок, а суглинок применяется в качестве сырья на кирпичных заводах [1]. Постановка и решение задач комплексного использования местного сырья особенно актуальны при разработке и внедрении ресурсо- и энергосберегающих технологий добычи и переработки сырья гравийно-песчаных месторождений. Комплексное использование – это не только использование всех компонентов сырья (полнота использования), но и реализация всех возможных вариантов (возможностей) применения. Зачастую вариантность невысокая из-за низкого качества и небольших запасов сырья [2]. Анализ состояния комплексного использования местного сырья в производстве строительных материалов показал относительно низкий уровень его применения.

Разработка и применение ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов при добыче и переработке гравийно-песчаных пород возможны на базе анализа 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 по-

теперь 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 применяться 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 отходами 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.

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, полу-

ченные 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 предопределяют 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].

Для выбора метода подготовки шихты основные исходные сырьевые материалы условно разделяют на следующие три группы: 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 газо-

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

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 (табл. 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].

В табл. 1 указаны x_1, x_2, x_3, x_4 – математические значения факторов; X_1, X_2, X_3, X_4 – физические значения факторов (соответствуют C, T, L, O).

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 рис. 1. Результаты серии опытов по определению прочности аглопоритового щебня приведены в табл. 2.

Полный факторный эксперимент для четырех факторов состоит из 16 опытов, т. е.

$$N = 2^n,$$

где N – число опытов; n – число факторов.

Табл. 1. Уровни факторов и интервалы их варьирования

Фактор	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
Основной уровень $X = 0$	74,5	0	7,5	0	10,5	0	7,5	0
Интервал варьирования	8,5		2,5		3,5		2,5	
Верхний уровень $X = +1$	83	+1	10	+1	14	+1	10	+1
Нижний уровень $X = -1$	66	-1	5	-1	7	-1	5	-1

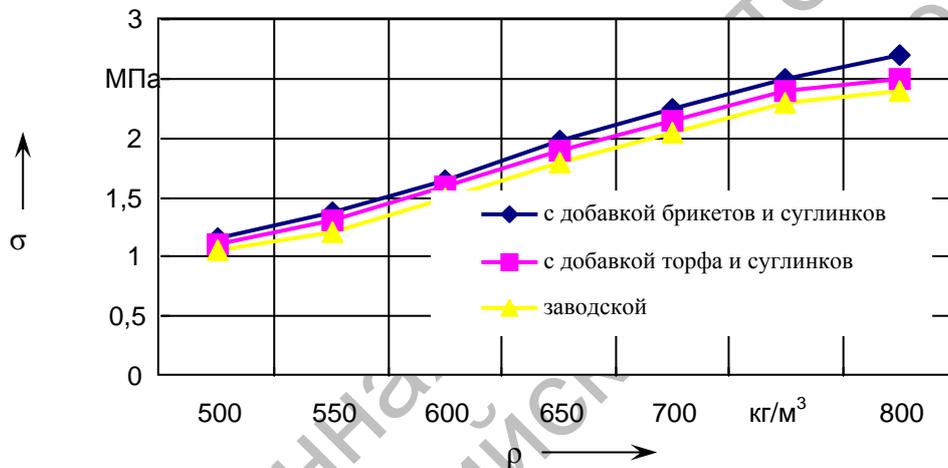


Рис. 1. Зависимость прочности аглопоритового щебня от его плотности при добавлении отходов торфяного производства и вскрышных пород

Табл. 2. Результаты серии опытов по определению прочности аглопоритового щебня

Серия опытов	Уровень фактора				Параметр оптимизации (опыты), МПа			Расчетный параметр оптимизации, МПа
	X_1	X_2	X_3	X_4	Π_1	Π_2	Π_3	
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 уменьшения количества опытов была применена полуреплика типа 2^{n-1} , которая сохраняет способность математически характеризовать изучаемый процесс, где генерирующие соотношения $X_4 = -X_3 X_2 X_1$ и определяющий контраст $I = -X_1 X_2 X_3 X_4$. В такой схеме линейные коэффициенты в уравнении регрессии смешаны с коэффициентами тройного взаимодействия, т. е.

$$b_0 \rightarrow \beta_0 - \beta_{1234}; b_1 \rightarrow \beta_1 - \beta_{234};$$

$$b_2 \rightarrow \beta_2 - \beta_{134}; b_3 \rightarrow \beta_3 - \beta_{124};$$

$$b_4 \rightarrow \beta_4 - \beta_{123}; b_{12} \rightarrow \beta_{12} - \beta_{34};$$

$$b_{13} \rightarrow \beta_{13} - \beta_{24}; b_{14} \rightarrow \beta_{14} - \beta_{23}.$$

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 .

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

$$G_p \leq G_T,$$

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:

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

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

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

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

Значимость этих коэффициентов определялась 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, т. е. способность достаточно хорошо описывать поверхность отклика:

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

где $\overline{y_j}, \hat{y}_j$ – среднее экспериментальное и расчётное значения параметра оптимизации в j -м опыте; k – число расчётных коэффициентов в уравнении регрессии, включая и свободный член.

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

где F_p – расчётное 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, т. к. $F_p > F_T$. Здесь мы находимся или в стационарной зоне, или велики коэффициенты смещения. Линейные коэффициенты регрессии одного порядка и характер их влияния на параметр оптимизации одинаковы. Это говорит о правильности выбора интервалов варьирования. Несмотря на то, что модель неадекватна, можно сделать следующий вывод: выход воска из угля становится с увеличением всех четырёх 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 приве-

дены в таблице. Основной уровень, интервалы варьирования, верхний и нижний уровни для второй серии опытов выбраны те же, что и в первой. 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, т. к. $F_p > F_T$ при $k = 5$ и при $k = 10$ и, значит, описать её можно только уравнением второго порядка, для чего необходимо сделать ещё восемь опытов в звёздных точках.

Опыты в звёздных 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 β_0 – значение функции отклика в начале координат, $\beta_0 = y(0, \dots, 0)$.

Наиболее распространённые на практике планы второго порядка для четырёх факторов: ортогональные, ротатбельные 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 как

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

где 2^n – количество опытов, образующих полный факторный эксперимент; $2n$ – число звёздных 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 звёздного плеча.

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

Уравнение регрессии при ортогональном ЦКП представим в следующем виде:

$$y = b_0^* + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{(n-1)n}x_{n-1}x_n + b_{11}x_1^* + \dots + b_{nn}x_n^*;$$

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

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

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{(n-1)n}x_{n-1}x_n + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{nn}x_n^2,$$

необходимо найти

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

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 звёздных точках определяется по формуле

$$x_i' = a + ab, \tag{11}$$

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 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:

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

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Исследовать и разработать технологические параметры производства аглопорита : промежуточный отчет / МНИИСМ ; рук. и исполн. С. Н. Березовский. – Минск, 1992. – 36 с. – № ГР 92-067.
4. **Богатов, Б. А.** Математические методы и модели в горном деле / Б. А. Богатов. – Минск : Технопринт, 2003. – 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.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 27.12.2010

S. N. Berezovsky The usage of local raw materials and overburdens for construction materials manufacturing

The scientific paper deals with the issues of resources and energy saving in the construction materials manufacturing. Cheap materials and products from local raw materials are needed to produce construction materials. To manufacture high-quality, strong and reliable construction materials it is necessary to select and thoroughly analyze initial components from the point of view of the economic efficiency and resource saving, therefore we offer the usage of deposits overburdens (loams) and peat production wastes instead of expensive imported coal to produce agglomerite crushed aggregate. Using the method of mathematical planning we optimized the process of producing agglomerite crushed aggregate with overburdens of deposits of our country and obtained the model combining the strength of agglomerite crushed aggregate with the offered composition of raw material mixture.