

УДК 622.331:662.271.4 091

В.Д. Копенкин, Л.В. Копенкина, Ю.В. Федоров

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕНИЯ МЕЛКОКУСКОВОГО ТОРФА ПОНИЖЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ ПРИ ФОРМОВАНИИ

Проверена концепция получения мелкокускового торфа пониженной влажности на основе композиции из связующего и основы – этого же фрезерного торфа, освобожденного от посторонних включений. Установлена зависимость прочности мелкокускового торфа на сжатие от факторов «процент связующего» (в расчете на сухое вещество всей пробы) и «влагосодержание при формировании».

Ключевые слова: торф, коэффициент регрессии, торфодобывание, торфяное дело, формование.

Семинар № 17

Анализ современного состояния торфяной отрасли показывает, что возрождение крупномасштабного торфяного производства с предприятиями средней (400–600 тыс. т) и большой (более 600 тыс. т) мощности маловероятно на перспективу 10–20 лет [1]. С другой стороны, накоплен основательный научный потенциал в различных разделах науки о торфе [2], что позволяет заниматься поиском технологий для небольших по мощности (5–10 тыс. т) предприятий, которые могли бы эффективно работать в современных условиях. Одно из таких направлений – понижение влажности формованного торфа.

Понижение эксплуатационной влажности при добыче экскаваторного торфа как проблема впервые основательно разрабатывалась в конце 1940-х – начале 1950-х годов в докторской диссертации С.Г. Солопова [3]. Однако созданная на основе концепции понижения влажности торфа в залежи техника послойно-поверхностного способа добычи кускового торфа оказалась неэффективной:

целостность (прочность) кускового торфа не обеспечивалась, и это направление постепенно сошло на нет.

В 1990-х годах получили развитие новые подходы к использованию самого дешевого в торфяной отрасли сырья – фрезерного торфа – для получения разнообразной торфяной продукции, в частности, кускового (мелкокускового) топливного торфа. Получение из тонкодисперсной (разрушенной самой природой) части фрезерного торфа связующего для формования кускового торфа пониженной влажности на основе сравнительно дешевого сырья (фрезерного торфа) позволит производить приемлемое по цене каминное топливо, топливо для газификации и т.п. материалы.

Этот принцип – получение на основе торфа связующего для формования теплоизоляционных блоков из соломы, опилок, стружки, льнокостры был проверен специалистами АО «Бежецкий опытно-экспериментальный завод» по предложению специалистов «Тверьгражданпроекта» для производства нового строительного теплоизоляционного материала «Геокар».

Таблица 1

Матрица планирования полного факторного эксперимента для исследования связующего на основе пущево-сфагнового торфа ($R = 35\%$, $A^c = 8,6\%$)

Факторы		Уровни			Шаг варьирования					
		-1	0	+1						
x_1 (Δp , %)		50		65		80		$\lambda_1 = 15\%$		
x_2 (W, кг/кг)		2,5		2,8		3,1		$\lambda_2 = 0,3$ кг/кг		
№ опыта	Планирование			Расчет		Отклик ($\sigma_{ск}$, МПа)				\bar{y}_N
	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	
1	+	-	-	+	1,75	2,15	2,01	1,52	1,58	1,80
2	+	+	-	-	3,54	5,22	3,95	3,49	3,30	3,90
3	+	-	+	-	3,08	2,94	2,50	2,50	2,50	2,70
4	+	+	+	+	3,17	3,10	3,97	3,25	2,97	3,29
5	Все факторы на среднем уровне				3,06	2,57	3,08	3,21	2,65	2,91

Для получения связующего просеянный на выбросите торф поступает через смеситель в роторно-инерционную мельницу, где интенсивно перетирается до пастообразного состояния. Торфяная паста является «не имеющим аналогов вяжущим веществом».

При экспериментальных поисках композиций, обеспечивающих получение формованной торфяной продукции высокого качества, представляется уместным использование методов математического планирования экспериментов, обеспечивающих получение результатов при небольших затратах сил и средств:

Одним из эффективных современных методов планирования экспериментов является полный факторный эксперимент (ПФЭ). Постановка ПФЭ сводится к выбору факторов, влияющих на конечный результат, модели уравнения регрессии, составлению плана ПФЭ (матрицы планирования), постановку опытов по запланированной схеме, расчету коэффициентов регрессии, оценке значимости этих коэффициентов, анализу уравнения регрессии.

В настоящей работе была выполнена проверка получения мелкокускового торфа на основе фрезерного

с использованием связующего – тонкодисперсной массы из выделенной из этого же торфа фракции размером менее 5 мм, переработанной в увлажненном состоянии в шнековом лабораторном механизме. Сушка кусков ($l \approx 1,5 d$), сформованных копривым методом в матрице диаметром 40 мм, производилась в конвективном режиме (температура 18–20° С) до равновесной влажности (12–15 %). Испытания на сжатие производились на тензопрессе. Результаты, полученные для пущево-сфагнового торфа ($R = 35\%$, $A^c = 8,6\%$) представлены в табл. 1.

Модель уравнения регрессии без членов высших порядков при двух факторах имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2.$$

Расчет коэффициентов регрессии выполняется по методу наименьших квадратов. Расчетные формулы для определения коэффициентов регрессии имеют вид

$$b_0 = \sum_1^N \bar{y}_N x_0 / N, \quad b_i = \sum_1^N \bar{y}_N x_i / N,$$

$$b_{ij} = \sum_1^N \bar{y}_N x_i x_j / N,$$

где N – число вариантов опыта с факторами на верхнем и нижнем уровне. Так как все значения x_i и x_j равны единице (в матрице кодированные значения факторов условно не показывают, а отмечают лишь знаки), при расчете для исследования связующего на основе пушицово-сфагнового торфа меняются лишь знаки у слагаемых y_N .

$$\begin{aligned} b_0 &= (1,80+3,90+2,70+3,29)/4 = \\ &= 2,92; \quad b_1 = 0,67; \quad b_2 = 0,07; \\ b_{12} &= -0,38. \end{aligned}$$

Таким образом, уравнение регрессии в кодированном виде может быть записано так

$$\begin{aligned} y &= 2,92 + 0,67 x_1 + 0,07 x_2 - \\ &- 0,38 x_1 x_2. \end{aligned}$$

Для оценки значимости коэффициентов регрессии выполняются следующие расчеты:

1) определяются построчные дисперсии (несмешенные оценки)

$$\begin{aligned} S^2(y_i) &= \sum_1^k (\bar{y}_N - y_i)^2 / (n-1), \\ S^2(y_i) &= \{0,074; 0,601; 0,0805; 0,244\} \end{aligned}$$

2) рассчитывается дисперсия воспроизводимости

$$S^2(\bar{y}) = \sum_1^N S^2(y_i) / N;$$

$$S^2(\bar{y}) = 0,9995 / 4 = 0,25;$$

3) вычисляется дисперсия среднего значения

$$S^2(\bar{y}) = S^2(y) / n;$$

$$S^2(\bar{y}) = 0,25 / 5 = 0,05.$$

Дисперсия коэффициентов регрессии в N раз меньше дисперсии среднего значения

$$S^2(b_i) = S^2(\bar{y}) / N;$$

$$S^2(b_i) = 0,0125.$$

Стандартная ошибка коэффициента регрессии

$$S(b_i) = \sqrt{S^2(b_i)};$$

$$S(b_i) \approx 0,112.$$

Значимость коэффициента регрессии определяется неравенством: b_i значим (в статистическом смысле), если

$$b_i > S(b_i) \cdot t(\alpha, f),$$

$$\alpha = 0,05; \quad f = N(n-1);$$

$$f = 16; \quad t(0,05, 16) \approx 2,12.$$

Таким образом, коэффициент регрессии значим, если он превышает величину $0,112 \cdot 2,12 \approx 0,237$.

Итак, уравнение регрессии может быть представлено в виде

$$y = 2,92 + 0,67 x_1 - 0,38 x_1 x_2.$$

Использование уравнения регрессии без членов высших порядков возможно, если

$$|\bar{y}_0 - b_0| \leq \sqrt{\bar{S}^2} \sqrt{(N+z)/Nz} \cdot t(\alpha, f),$$

где z – число повторностей в опыте с факторами на среднем уровне;

$$\bar{S}^2 = \frac{(N-1)S^2(b_i) + (z-1)S^2(\bar{y}_0)}{N+z-2};$$

$$S^2(\bar{y}_0) = \sum_1^k (\bar{y}_0 - y_0)^2 / (z(z-1)).$$

$$S^2(\bar{y}_0) = 0,3246 / (5 \cdot 4) = 0,0162;$$

$$\bar{S}^2 = 0,0146; \quad \sqrt{\bar{S}^2} = 0,121.$$

$$|2,91 - 2,92| = 0,01;$$

$$\begin{aligned} \sqrt{\bar{S}^2} \sqrt{(N+z)/Nz} \cdot t(\alpha, f) &= \\ &= 0,121 \cdot 0,67 \cdot 2,12 = 0,172. \end{aligned}$$

$0,01 < 0,172$, из чего следует возможность использования уравнения регрессии без членов высших порядков.

Возможность исключения парных взаимодействий определяется по критерию Фишера. Если

$$F_{\text{расч}} = S^2_{\text{ад}} / S^2(y) < F(f_1, f_2),$$

Таблица 2

Матрица планирования полного факторного эксперимента для исследования связующего на основе шейхцериево-сфагнового торфа ($R = 35\%$, $A^c = 5,8\%$)

-		Уровни			Шаг варьирования					
		-1	0	+1						
$x_1 (\Delta p, \%)$		50	65	80	$\lambda_1 = 15\%$					
$x_2 (W, \text{кг}/\text{кг})$		2,5	2,8	3,1	$\lambda_2 = 0,3 \text{ кг}/\text{кг}$					
№ опы- та	Планирование			Расчет	Отклик ($\sigma_{ck}, \text{МПа}$)					
	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	
1	+	-	-	+	3,08	2,50	3,66	3,04	3,36	3,13
2	+	+	-	-	3,75	4,56	3,62	5,34	4,65	4,38
3	+	-	+	-	4,63	3,74	3,83	4,40	4,21	4,16
4	+	+	+	+	4,82	6,18	5,02	4,02	4,12	4,83
5	Все факторы на среднем уровне				4,47	4,61	3,33	4,06	4,79	4,25

то можно использовать модель без парных взаимодействий (т.е. без членов с коэффициентом b_{12}).

Дисперсия адекватности модели вычисляется по формуле

$$S^2_{aa} = \sum_1^N (\bar{y}_N - y_b)^2 / (N + I - k - 1),$$

где y_b – значения выхода, вычисленные по уравнению регрессии без члена с коэффициентом b_{12} ; I – число исключенных ранее линейных членов уравнения регрессии; k – число факторов; $f_1 = N + I - k - 1$, $f_2 = n - 1$.

$$\sum_1^N (\bar{y}_N - y_b)^2 = 0,0211;$$

$$S^2_{aa} = 0,01055,$$

$$F_{pacy} = 0,01055 / 0,25 = 0,0422;$$

$$F(f_1 = 2, f_2 = 4) = 6,94.$$

Таким образом, уравнение регрессии можно использовать без парных взаимодействий

$$y = 2,92 + 0,67 x_1.$$

Заменив кодированное значение факторов x_i на натуральное, $x_1 = (\Delta p - \bar{\Delta p}) / \lambda_a = (\Delta p - 65) / 15$, получим выражение для прогнозирования прочности мелкокускового торфа на сжатие при рассматриваемых граничных условиях по

величине добавки связующего (тонкодисперсной массы) и влагосодержанию:

$$50 \leq \Delta p \leq 80\%; 2,5 \leq W \leq 3,1 \text{ кг}/\text{кг}.$$

$$\sigma_{ck} = 0,045 \Delta p + 0,01 \text{ МПа}.$$

Постановка аналогичных опытов на торфяном сырье с другим ботаническим составом имеет важное методологическое значение. Матрица планирования для исследования связующего на основе шейхцериево-сфагнового торфа показана в табл. 2.

Приведем основные числовые характеристики результатов анализа.

Коэффициенты регрессии оказались следующими:

$$b_0 = 4,12; b_1 = 0,48; b_2 = 0,37;$$

$$b_{12} = -0,14.$$

Уравнение регрессии имеет вид

$$y = 4,12 + 0,48 x_1 + 0,37 x_2 -$$

$$- 0,14 x_1 x_2.$$

Значимыми оказались оба коэффициента регрессии.

Установлено, что уравнение можно использовать без членов высших порядков:

$$|\bar{y}_0 - b_0| = 0,13 \leq$$

$$\leq \sqrt{S^2} \sqrt{(N + z) / Nz} \cdot t(\alpha, f) = 0,309.$$

Парными взаимодействиями здесь можно пренебречь, поскольку $F_{расч} = 0,213 < F(f_1, f_2) = 7,71$.

Таким образом, уравнение в кодированном виде окончательно может быть представлено так
 $y = 4,12 + 0,48 x_1 + 0,37 x_2$.

Переходя к натуральным характеристикам (из условий кодирования), получим

$$\sigma_{сж} = 0,032 \Delta p + 1,23 W - 1,41, \text{ МПа.}$$

Границные условия использования полученного уравнения – те же:
 $50 \leq \Delta p \leq 80\%; 2,5 \leq W \leq 3,1 \text{ кг / кг.}$

Итак, проверена концепция получения мелкокускового торфа пониженной влажности на основе композиции из связующего (интенсивно переработанной тонкодисперсной части фрезерного торфа) и основы – этого же фрезерного торфа, освобожденного от посторонних включений. В ПФЭ установлена зависимость прочности мелкокускового торфа на сжатие от факторов «процент связующего» (в расчете на сухое вещество всей пробы) и «влагосодержание при формировании».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – №5. – С. 219–222.

3. Соловьев С.Г. Основания комплексной механизации добычи торфа на топливо экскаваторным способом с понижением эксплуатационной влажности: Автореферат дисс. д-ра техн. наук. – М.:ИГД АН ССР, 1955. – 40 с. [МАС](#)

1. Копенкин В.Д., Копенкина Л.В., Самсонов Л.Н. Развитие техники добычи кускового торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 1. – С. 297–301.

2. Копенкин В.Д., Копенкина Л.В. Торфяные машины как класс горных машин

Коротко об авторах

Копенкин В.Д. – профессор кафедры Технологии и комплексной механизации разработки торфяных месторождений,

Копенкина Л.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры Торфяных машин и оборудования,

Федоров Ю.В. – магистр техники и технологии,

Тверской государственный технический университет, common@tstu.tver.ru

