

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

**В. Н. Кондратьев**, доктор технических наук, профессор

**Т. Г. Свиридович**, кандидат технических наук

РУП «Институт мелиорации»

г. Минск, Беларусь

**Я. В. Панков**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Воронежская государственная лесотехническая академия

г. Воронеж, Россия

**Ключевые слова:** методика, перемешивание торфяной смеси, оптимизация, равномерность, матрица планирования, модель, адекватность, зависимость.

При изучении сложных явлений или процессов, в ходе которых участвует большое число факторов, возникает необходимость в проведении численных экспериментов. Чтобы обеспечить требуемое качество исследования, эксперимент следует предварительно планировать. При этом цели и критерии качества исследований необходимо выявлять, оценивая затраты, важность ожидаемых результатов, последствия недостаточной точности и ошибочных решений. Для определения показателей качества исследовательского процесса необходимо уметь правильно строить модель эксперимента и убеждаться в ее надежности.

Математическая модель является математическим описанием наиболее существенных сторон процесса. Основой теории эксперимента является математическая статистика. Статистические модели получаются в результате статистической обработки экспериментальных данных, собранных на исследуемом объекте. Структура статистической модели может выбираться относительно произвольно. Общий ход построения и последующего использования математической модели сводится к следующему:

- проводится предварительное исследование объекта;
- выявляются действующие факторы, осуществляется выбор экспериментальных точек и структура модели;
- производится оценивание параметров модели и проверяется ее адекватность;
- осуществляется использование модели в ходе разработки практических рекомендаций по оптимизации изучаемого процесса, т.е. обоснованию технологических режимов или конструктивных параметров перемешивающего устройства смесителя [4, 5].

За объект исследования нами выбран смеситель МИК-500-1 (рис.1) для приготовления торфяных смесей, используемых при ремонте земляных откосов, засыпки дренаж-

ных траншей; для озеленения территорий (газонов) в жилищном и городском строительстве, спортивных площадок, стадионов, борьбы с эрозией почвы на склонах естественных и искусственных возвышений, крепления откосов дамб и других инженерных земляных сооружений [1, 2, 3, 6].

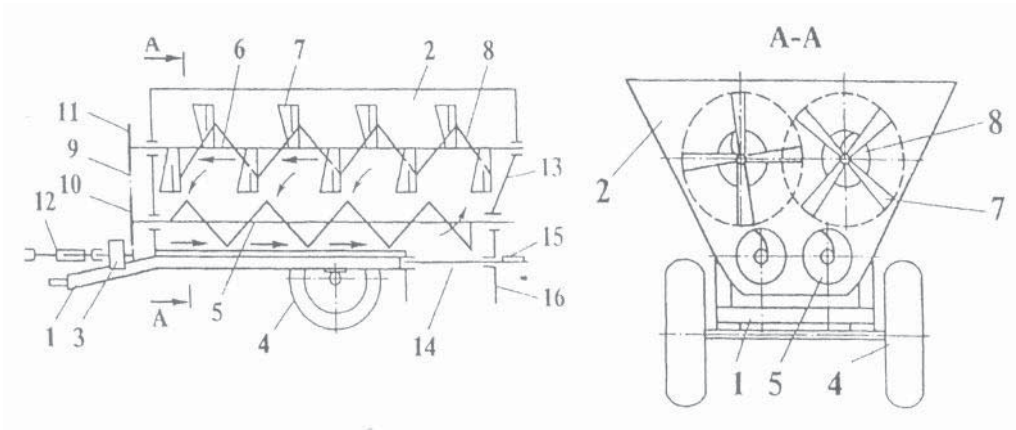


Рисунок 1 — Конструктивная схема смесителя МИК-500-1 для приготовления торфосмеси [6]

#### Техническая характеристика смесителя МИК 500-1

Базовый трактор	МТЗ-80/82
Тип машины	полуприцепная
Вместимость бункера, м <sup>3</sup>	3,5
Производительность за час основного времени, м <sup>3</sup>	до 4,0
Габаритные размеры, мм	
длина	3700
ширина	2400
высота	1845
Конструктивная масса, кг	2000
Обслуживающий персонал, чел	
при нанесении биомассы на откос, засыпке траншей	1
при изготовлении биоковров	3

Смеситель состоит из рамы 1, на которой установлен бункер 2, редуктор 3. Рама опирается на колесный ход 4. В бункере 2 параллельно расположены шнеки 5 и мешалки 6. Витки шнеков ориентированы для перемещения массы к выходу из бункера.

На валах мешалок 6 закреплены по винтовой линии лопасти 7 и между ними витки 8 таким образом, чтобы при вращении масса перемещалась в обратном направлении шнекам. Вращение на шнеки 5 передается от редуктора 3 цепной передачей 9 через звездочки 10, а на мешалки 6 через звездочки 11. Привод редуктора обеспечивается через карданный вал 12 от вала отбора мощности трактора.

Тыльная стенка 13 бункера между валами мешалок и шнеков выполнена с наклоном наружу. Снизу, у тыльной стенки, бункер имеет разгрузочное окно 14, закрываемое заслонкой 15 и раструбы 16.

Смеситель для приготовления смеси для укрепления откосов земляных сооруже-

ний при агрегатировании с трактором работает следующим образом. В бункер 2 загружают компоненты смеси, например торфокрошку, семена, удобрения и другие материалы. Окно 14 закрывают заслонкой 15. Включают вал отбора мощности трактора. Шнеки 5 и мешалки 6 приводятся во вращение через карданный вал 12, редуктор 3, цепную передачу 9, звездочки 10, 11. Содержимое бункера 2 шнеками и мешалками перемещается вдоль и поперек бункера с различными относительными смещениями. Шнеки 5 перемещают массу вдоль дна бункера 2 к разгрузочному окну 14. Когда разгрузочное окно закрыто заслонкой 15, масса вдоль наклоненной назад поверхности тыльной стенки 13 и частично радиально от шнеков смещается в сторону мешалок 6. В данном случае пресования смеси не происходит.

Мешалки 6 лопастями и витками 8 захватывают массу и перемещают в продольном, обратном шнекам 5, и поперечном направлениях. Витки 8 в основном обеспечивают продольное, а лопасти 7 — продольное и поперечное направления подачи массы.

Интенсивность перемешивания компонентов смеси обеспечивается во всем объеме бункера 2. Этому способствует изменение скоростей перемещения массы в продольном направлении. Ближе к валу шнека и мешалки скорость потока снижается, а следовательно, происходит относительное смещение разнородных компонентов смеси в слоях движения. В поперечном направлении перемещение компонентов смеси создают лопасти 7, охватывая весь объем в слоях за счет перекрытия траекторий своих наружных кромок у смежных мешалок, а также определенного радиального смещения от витков 8 мешалок 6 и шнеков 5. После перемешивания выдвиганием заслонки 15 открывают разгрузочное окно 14 для выгрузки содержимого бункера 2. При работе шнеков 5 и мешалок 6 разгрузку обеспечивают шнеки 5. В верхней части бункера лопасти 7 и витки 8 продолжают перемещать массу в начало шнеков 5 с затуханием по мере опорожнения бункера. В результате такого взаимодействия лопастей и витков мешалки со шнеками повышается равномерность перемешивания.

В зависимости от назначения смеси разгрузку обеспечивают в специальные рукава, тару, на откос канала, траншею и т.д. При создании тюфяков специальные рукава (чулки) нанизывают на раструбы 16 и заполняют до нужных объемов для доставки на объект.

Если смесь необходимо вносить на поверхность объекта, смеситель для приготовления смеси для укрепления откосов земляных сооружений, рама 1 которого расположена на колесном ходу 4, доставляют буксировкой, выдвигают заслонку и на ходу обеспечивают разгрузку. При нанесении смеси на откос канала или в траншею вместо раструбов 16 устанавливают наклонный лоток для отсыпки массы в сторону.

Производительность повышается, если перемешивание компонентов выполняется при буксировании смесителя для приготовления смеси для укрепления откосов земляных сооружений к месту выгрузки.

### Планирование и оптимизация эксперимента для равномерности перемешивания торфяной смеси

При изучении процесса перемешивания торфяной смеси на этапе предварительных исследований было установлено, что на качество перемешивания влияют три основных фактора (табл. 1):

- $x_1$  — частота вращения;
- $x_2$  — число лопастей;
- $x_3$  — радиус лопастей.

**Таблица 1 — Интервалы варьирования факторов**

Показатель	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Основной уровень ( $x = 0$ )	70	6	0,4
Интервал варьирования	25	2	0,1
Нижний уровень ( $x = -1$ )	45	4	0,3
Верхний уровень ( $x = 1$ )	95	8	0,5

В табл. 1 представлены интервалы варьирования указанных факторов.

Областью возможных значений варьируемых переменных (факторов: является гиперкуб, т.е. в нормированном (приведенном) масштабе изменения переменных выполняется условие

$$-1 \leq x_i \leq 1 \quad (1)$$

В этом выражении предельные (максимальные и минимальные) значения варьируемых факторов обозначены через +1 и -1. Переход к обычному масштабу может быть осуществлен следующим образом

$$x = \frac{2x_i - x_{\max} + x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

Требуется экспериментальным путем найти описание зависимости процесса перемешивания торфяной смеси от перечисленных факторов. Анализ механизма перемешивания показал, что для описания процесса целесообразно использовать полную квадратичную модель.

Ввиду того, что варьируемые переменные могут принимать только целочисленные значения, в план эксперимента включены центральные точки, т.е. точки с координатами  $x = 0$ , что в обычном масштабе соответствует значениям

$$x_o = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \quad (3)$$

Базируясь на этих соображениях, был спланирован и реализован эксперимент, план которого представлен в табл. 2.

Необходимо отметить, что столбцы матрицы планирования, соответствующие

Таблица 2 — Матрица планирования

Планирование				Расчет					
$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$
1	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0
1	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0
1	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0
1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
1	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1
1	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1
1	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
1	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1
1	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1
1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1
1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

членам, которые отражают взаимодействие факторов, равно как и квадратичные эффекты, образованы поэлементными произведениями столбцов ядра плана, т.е. столбцов, соответствующих линейным членам. Модель изучаемого процесса запишем в виде

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_1 x_2 + a_5 x_1 x_3 + a_6 x_2 x_3 + a_7 x_1^2 + a_8 x_2^2 + a_9 x_3^2 \quad (4)$$

Чтобы иметь возможность оценить значимость коэффициентов и адекватность модели, эксперимент проводился с трехкратной повторностью. Результаты полученных опытов представлены в табл. 3.

Таблица 3 — Выходные значения экспериментальных данных

$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y$
61,22	57,50	59,80	59,507
74,90	74,02	72,24	73,720
70,92	67,82	71,20	69,930
83,34	80,42	84,16	82,640
58,84	62,22	57,86	59,473
73,78	67,89	71,92	71,197
75,94	70,66	74,20	73,600
80,62	82,90	81,78	81,767
63,58	61,94	65,40	63,640
73,78	68,04	71,92	71,247
87,12	81,86	85,16	84,713
89,14	93,30	88,98	90,473
83,76	84,76	82,60	83,707

Последний столбец приведенной таблицы содержит осредненные значения по трем повторениям.

Введем обозначения  $N$  — число опытов в эксперименте;  $\nu$  — число повторностей;  $K + 1$  — количество оцениваемых параметров.

Тогда для рассматриваемой задачи

$$N = 13, \nu = 3, K + 1 = 10.$$

Оценки коэффициентов модели (П.4.4) находим по методу наименьших квадратов (МНК).

Согласно МНК, коэффициенты модели находятся по формуле

$$A = C \cdot F' \cdot Y, \quad (5)$$

где  $A = (a_0, a_1..a_x)$  — вектор коэффициентов;

$F$  — матрица планирования;

$F'$  — транспонированная матрица;

$C$  — матрица размера  $(K + 1) \times (K + 1)$ , обратная матрице  $F' * F$ , называемая дисперсионной матрицей

$$C = F' * F^{-1} \quad (6)$$

$Y$  — вектор выходных значений эксперимента.

Сообразно изложенному, последовательно находим:

$F'F=$	13	0	0	0	0	0	0	8	8	8
	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	8	4	4
	8	0	0	0	0	0	0	4	8	4
	8	0	0	0	0	0	0	4	4	8

$C=$	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,5	-0,5	-0,5
	0,0	0,13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,25	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,25	0,0	0,0	0,0
	-0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,44	0,19	0,19
	-0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,19	0,44	0,19
	-0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,19	0,19	0,44

$C F'=$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	-0,13	0,13	-0,13	0,13	-0,13	0,13	-0,13
	0,13	0	0	0	0	0	-0,13	-0,13	0,13	0,13
	0	0	0	0	-0,13	0,13	-0,13	0,13	0	0
	0	0	0	-0,13	-0,13	0,13	0,13	-0,13	-0,13	0,13
	0,13	0	0,25	-0,25	-0,25	0,25	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25
	-0,25	-0,25	0,25	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0,25	-0,25	-0,25	0,25
	0	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	-0,13

$$A = \begin{matrix} a & 83,707 \\ a & 5,845 \\ a & 4,095 \\ a & 8,125 \\ a & -0,388 \\ a & -0,889 \\ a & -0,462 \\ a & -9,127 \\ a & -3,118 \\ a & -3,070 \end{matrix} = CF \bar{Y} =$$

Таким образом

$$Y = 83,707 + 5,845x_1 + 4,095x_2 + 8,125x_3 - 0,388x_1x_2 - 0,889x_1x_3 - 0,462x_2x_3 - 9,127x_1^2 - 3,118x_2^2 - 3,07x_3^2 \quad (7)$$

и расчетные величины принимают значения

$$Y = (61,133; 73,6; 70,1; 81,014; 56,65; 70,119; 74,677; 84,59; 64,837; 73,95; 82,01; 89,276; 83,707) \quad (8)$$

#### Проверка гипотезы адекватности модели

Для проверки гипотезы об адекватности модели необходимо сопоставить достигнутую точность модели с величиной, характеризующую точность наблюдений. Расчет основывается на сравнении двух сумм квадратов:

1) сумму квадратов, характеризующую неадекватность (дефект) модели

$$SD = \sum_{i=1}^N y_i - \bar{y} \quad (9)$$

Эта сумма зависит от разности между рассчитанными по модели (7) и наблюдаемыми значениями переменной;

2) сумму квадратов, характеризующую ошибки наблюдений

$$SD = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_{ij} - \bar{y}_i \quad (10)$$

Сумма  $SD$  состоит из  $N$  слагаемых, между которыми имеет место  $(K + 1)$  линейных связей. Поэтому с  $SD$  связано

$$\varphi_1 = N - (K + 1) \quad (11)$$

степеней свободы.

Сумма  $SE$  состоит из  $v \cdot N$  слагаемых, между которыми существует  $N$  линейных связей. При этом  $SE$  имеет

$$\varphi_2 = N \cdot \nu - N = N \cdot (\nu - 1) \quad (12)$$

Оценка  $s^2$  дисперсии ошибок наблюдений получается с помощью величины  $SD$  на основании формулы

$$s^2 = \frac{SE}{\nu \phi_2} \quad (13)$$

Оценка значимости коэффициентов модели осуществляется по формулам

$$s_i = c_{ij} \cdot s, \quad (14)$$

$$\alpha_i < s_{it}, \quad (15)$$

где  $c_{ij}$  — диагональный элемент дисперсионной матрицы  $C$ ;  $t$  — значение критерия Стьюдента ( $t$ -критерий), соответствующее заданной вероятности  $F$  (обычно  $F = 0,95$ ) и числу степеней свободы  $\varphi_2$ .

Если неравенство (П.4.15) выполняется, то коэффициент  $a$  считается незначимым и может быть исключен из уравнения.

Для проверки адекватности модели используется  $F$ -критерий, значение которого находится по формуле

$$F = \frac{SD / \phi_1}{SE / \phi_2} \quad (16)$$

В случае, если модель адекватна, эта величина является случайной, подчиненной  $F$ -распределению с числами степеней свободы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . При этом можно определить значение  $F_{кр}$ , соответствующее условию

$$P(F > F_{кр}) = 1 - P = \alpha, \quad (17)$$

где  $\alpha$  — заданный уровень значимости проверки гипотезы об адекватности. Задавшись надежностью  $P = P(F < F_{кр})$  (обычно  $P$  выбирают равной 0,95), значение  $F_{кр}$  можно найти с помощью таблиц  $F$ -распределения.

Используя формулу (П.4.9), находим сумму квадратов  $SD$ :

$$SD = 41,069$$

с числом степеней свободы  $\varphi_2 = N - (K + 1) = 13 - 10 = 3$ .

По формуле (10) находим сумму квадратов  $SE$ :

$$SE = 123,742$$



с числом степеней свободы  $\phi_2 = N * (v - 1) = 13 * 2 = 26$ .

По Формуле (13) рассчитываем

$$S^2 = \frac{SE}{v\phi_2} = \frac{123,742}{3 \cdot 26} = 1,586$$

Для дисперсий оценок коэффициентов модели, согласно (14), получаем

$$\begin{aligned} s_0^2 &= c_{11} \cdot s^2 = (1) \cdot 1,586 = 1,586, \\ s_1^2 &= c_{22} \cdot s^2 = (0,13) \cdot 1,586 = 0,1983, \\ s_2^2 &= c_{33} \cdot s^2 = (0,13) \cdot 1,586 = 0,1983, \\ s_3^2 &= c_{44} \cdot s^2 = (0,13) \cdot 1,586 = 0,1983, \\ s_4^2 &= c_{55} \cdot s^2 = (0,25) \cdot 1,586 = 0,3966, \\ s_5^2 &= c_{66} \cdot s^2 = (0,25) \cdot 1,586 = 0,3966, \\ s_6^2 &= c_{77} \cdot s^2 = (0,25) \cdot 1,586 = 0,3966, \\ s_7^2 &= c_{88} \cdot s^2 = (0,44) \cdot 1,586 = 0,6941, \\ s_8^2 &= c_{99} \cdot s^2 = (0,44) \cdot 1,586 = 0,6941, \\ s_9^2 &= c_{1010} \cdot s^2 = (0,44) \cdot 1,586 = 0,6941. \end{aligned}$$

Выберем 95 % надежность для обоих критериев. При этом соответствующие значения  $t$  и  $F$  оказываются равными  $t = 2,056$ ,  $F = 2,98$ .

В силу (15) имеем оценки коэффициентов

$$\begin{aligned} a_0 &= 83,707 > 2,056 \cdot \sqrt{1,5860} = 2,5896 \\ a_1 &= 5,845 > 2,056 \cdot \sqrt{0,1983} = 0,9156 \\ a_2 &= 4,095 > 2,056 \cdot \sqrt{0,1983} = 0,9156 \\ a_3 &= 8,125 > 2,056 \cdot \sqrt{0,1983} = 0,9156 \\ a_4 &= 0,388 > 2,056 \cdot \sqrt{0,3966} = 1,2948 \\ a_5 &= 0,889 > 2,056 \cdot \sqrt{0,3966} = 1,2948 \\ a_6 &= 0,462 > 2,056 \cdot \sqrt{0,3966} = 1,2948 \\ a_7 &= 9,127 > 2,056 \cdot \sqrt{0,6941} = 1,7129 \\ a_8 &= 3,118 > 2,056 \cdot \sqrt{0,6941} = 1,7129 \\ a_9 &= 3,070 > 2,056 \cdot \sqrt{0,6941} = 1,7129 \end{aligned}$$

Коэффициенты  $a_4, a_5, a_6$  незначимы. На основании (16) имеем

$$F = \frac{41,069 / 3}{123,742 / (3 \cdot 26)} = 2,876 < 2,98$$

Таким образом, результаты не противоречат предположению об адекватности модели.

После отбрасывания незначимых коэффициентов уравнение модели имеет вид

$$y = 83,707 + 5,845x_1 + 4,095x_2 + 8,125x_3 - 9,127x_{12} - 3,118x_{22} - 3,07x_{32} \quad (18)$$

Фактические и расчетные значения выхода

59,507	61,521
73,720	73,212
69,930	69,711
82,640	81,402
59,473	57,539
71,197	69,230
73,600	73,788
81,767	85,479
63,640	65,299
71,247	73,489
84,713	81,548
90,473	89,738
83,707	83,707

#### Определение оптимальных значений факторов

Для удобства дальнейших вычислений зависимость (18) представим следующим образом:

$$y = 83,707 + 2 * b' * x + x' * B * x, \quad (19)$$

где  $x'$  — вектор-строка переменных,

$b' = (2,982, 2,042, 4,062)$  — вектор-строка линейных коэффициентов;

$B$  — симметричная матрица порядка 3.

В нашем случае

$$B = \begin{pmatrix} 9,127 & 0 & 0 \\ 0 & -3,118 & 0 \\ 0 & 0 & -3,07 \end{pmatrix} \quad (20)$$

Координаты экстремальной точки можно получить из (19), приравняв нулю первую производную  $y$  по  $x$ :

$$\frac{dy}{dx} = 2e + 2Bx' = 0 \quad (21)$$

И, решая полученную систему линейных уравнений, находим

$$x' = -B^{-1} \cdot e \quad (22)$$

На основании вышеприведенных зависимостей находим оптимальные решения факторов (в приведенном масштабе)

$$x_1 = 0,248; x_2 = 0,549; x_3 = 1,246 \quad (23)$$

и значение функции  $y = 91$ .

59,507	61,521
73,720	73,212
69,980	69,711
82,640	81,402
59,473	57,539
71,197	69,230
73,600	73,788
81,767	85,479
63,640	65,299
71,247	73,489
84,713	81,548
90,473	89,738
83,707	83,707

Фактические и расчетные значения выхода

#### Планирование и оптимизация эксперимента для удельных энергозатрат при перемешивании торфяной смеси

В рассматриваемом эксперименте изучалось влияние тех же факторов на удельные энергозатраты. Интервалы варьирования этих факторов приведены в табл. 1. Матрица плана приведена в табл. 2. Результаты опытов представлены в табл. 4.

Для описания процесса в качестве математической модели использовалась полная квадратичная зависимость (4).

Последний столбец приведенной таблицы содержит осредненные значения по трем повторениям.

Поскольку матрица планирования осталась без изменений, то результаты, приведенные ранее, применимы и для рассматриваемого случая.

Таблица 4 — Выходные значения экспериментальных данных

$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y$
0,350	0,450	0,270	0,357
4,770	4,550	4,810	4,710
2,890	3,030	2,900	2,940
7,710	7,390	7,410	7,500
0,670	0,720	0,760	0,717
1,100	1,340	0,940	1,127
3,270	3,820	3,880	3,657
11,730	12,980	13,210	12,640
0,680	0,780	0,650	0,703
1,470	1,430	1,620	1,507
6,310	5,470	4,990	5,590
8,760	9,890	9,720	9,457
2,830	3,560	3,890	3,427

$$A = \begin{matrix} a_0 & 3,427 \\ a_1 & 2,228 \\ a_2 & 1,225 \\ a_3 & 3,411 \\ a_4 & 0,052 \\ a_5 & 2,143 \\ a_6 & 0,776 \\ a_7 & 0,335 \\ a_8 & 0,115 \\ a_9 & 0,773 \end{matrix} = CF \bar{Y} =$$

На основании формулы (8) получим

$$Y = 3,427 + 2,228x_1 + 1,225x_2 + 3,411x_3 + 0,052x_1x_2 + 2,143x_1x_3 + 0,776x_2x_3 + 0,335x_1^2 + 0,115x_2^2 + 0,773x_3^2 \quad (24)$$

Таким образом

И расчетные величины принимают значения

$$Y = (0,385; 4,858; 2,792; 7,742; 0,979; 1,269; 3,515; 12,378; 0,413; 1,393; 5,704; 9,747; 3,427)$$

По формулам (9, 10) находим

$$SD = 0,417; SE = 3,967$$

$$S^2 = \frac{SE}{v_{\phi_2}} = \frac{3,967}{3 \cdot 26} = 0,051$$

По формуле (13) рассчитываем

$$s_0^2 = c_{11} \cdot s^2 = (1) \cdot 0,051 = 5,086E - 02,$$

$$s_1^2 = c_{22} \cdot s^2 = (0,13) \cdot 0,051 = 6,358E^{-03},$$

$$s_2^2 = c_{33} \cdot s^2 = (0,13) \cdot 0,051 = 6,358E^{-03},$$

$$s_3^2 = c_{44} \cdot s^2 = (0,13) \cdot 0,051 = 6,358E^{-03},$$

$$s_4^2 = c_{55} \cdot s^2 = (0,25) \cdot 0,051 = 1,272E^{-02},$$

$$s_5^2 = c_{66} \cdot s^2 = (0,25) \cdot 0,051 = 1,272E^{-02},$$

$$s_6^2 = c_{77} \cdot s^2 = (0,25) \cdot 0,051 = 1,272E^{-02},$$

$$s_7^2 = c_{88} \cdot s^2 = (0,44) \cdot 0,051 = 2,225E^{-02},$$

$$s_8^2 = c_{99} \cdot s^2 = (0,44) \cdot 0,051 = 2,225E^{-02},$$

$$s_9^2 = c_{1010} \cdot s^2 = (0,44) \cdot 0,051 = 2,225E^{-02}.$$

Для дисперсий оценок коэффициентов модели, согласно (14), получаем

Выберем, как и ранее, 95 % надежность для обоих критериев. При этом соответствующие значения  $t$  и  $F$  оказываются равными  $t = 2,056$ ,  $F = 2,98$ .

В силу (15) имеем оценки коэффициентов

$$a_0 = 3,427 > 2,056 \cdot \sqrt{0,050860} = 0,4637$$

$$a_1 = 2,228 > 2,056 \cdot \sqrt{0,006358} = 0,1639$$

$$a_2 = 1,225 > 2,056 \cdot \sqrt{0,006358} = 0,1639$$

$$a_3 = 3,411 > 2,056 \cdot \sqrt{0,006358} = 0,1639$$

$$a_4 = 0,052 > 2,056 \cdot \sqrt{0,012720} = 0,2318$$

$$a_5 = 2,143 > 2,056 \cdot \sqrt{0,012720} = 0,2318$$

$$a_6 = 0,776 > 2,056 \cdot \sqrt{0,012720} = 0,2318$$

$$a_7 = 0,335 > 2,056 \cdot \sqrt{0,022250} = 0,3067$$

$$a_8 = 0,115 > 2,056 \cdot \sqrt{0,022250} = 0,3067$$

$$a_9 = 0,773 > 2,056 \cdot \sqrt{0,022250} = 0,3067$$

Коэффициенты  $a_4$  и  $a_8$  незначимы. На основании (16) имеем

$$F = \frac{0,417/3}{3,967/(3 \cdot 26)} = 0,912 < 2,98$$

Таким образом, результаты не противоречат предложению об адекватности модели.

После отбрасывания незначимых коэффициентов уравнение модели примет вид

$$Y = 3,427 + 2,228x_1 + 1,225x_2 + 3,411x_3 + 2,143x_1x_3 + 0,776x_2x_3 + 0,335x_1^2 + 0,773x_3^2 \quad (25)$$

Фактические и расчетные значения выхода

0,357	0,385
4,710	4,858
2,940	2,792
7,500	7,472
0,717	0,979
1,127	1,269
3,657	3,515
12,640	12,378
0,703	0,413
1,507	1,393
5,590	5,704
9,457	9,747
3,427	3,427

#### Определение оптимальных значений факторов

Как и ранее, для удобства дальнейших вычислений зависимость (25) представим следующим образом

$$y = 3,427 + 2 * b' * x + x' * B * x, \quad (26)$$

где  $x'$  — вектор-строка переменных,

$b' = (1,114, 0,612, 1,706)$  — вектор-строка линейных коэффициентов;

$B$  — симметричная матрица порядка 3.

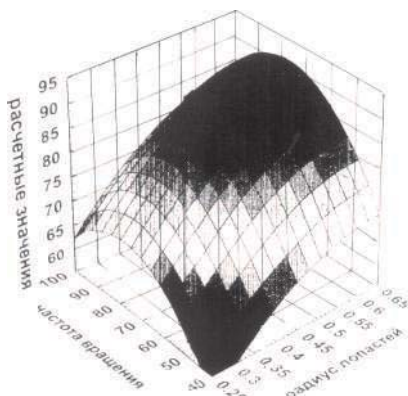
В нашем случае

$$B = \begin{pmatrix} 0,335 & 0 & 2,143 \\ 0 & 0 & 0,776 \\ 2,143 & 0,776 & 0,773 \end{pmatrix} \quad (27)$$

На основании зависимостей (21, 22) находим оптимальные значения факторов (в приведенном масштабе)

$$x_1 = -0,107; x_2 = -2,173; x_3 = -0,982 \quad (28)$$

и значение функции  $y = 0,266$ .



**Рисунок 2 — Сечение поверхности откликов, характеризующих показатель равномерности распределения семян в торфосмеси**

### Выводы

1. Исследованиями и испытаниями установлено, что компоненты смеси после перемешивания равномерно распределяются во всем объеме бункера (рис. 2).
2. Результаты исследований рекомендуем использовать для приготовления торфяных смесей при посадке кустарниковых и цветочных растений, ремонте локальных повреждений на откосах земляных сооружений.
3. Оптимизированные значения факторов можно применить при обосновании технологических режимов и конструктивных параметров перемешивающих устройств для бункеров емкостью до 4,5 м<sup>3</sup>.
4. Методика, приведенная в статье, может быть использована аспирантами и магистрантами при проведении аналогичных исследований.

### Библиографический список

1. Кондратьев, В.Н., Свиридович, Т.Г. Механизированная технология укрепления откосов каналов непроросшими коврами. / ЦБНТИ Минводхоза СССР. — 1986. — 2 с.
2. Кондратьев, В.Н., Свиридович, Т.Г. Перемешивание многокомпонентной смеси при изготовлении травяных ковров.// Научн. конф. молодых ученых и специалистов ЦНИИКИВР и БелНИИМВХ «Проблемы комплексного использования и охраны водных ресурсов Беларуси и Украины». 16—17 апреля 1987: тез. докл. — Мн., 1987 — С.3.
3. Кондратьев, В.Н., Свиридович, Т.Г. Технология укрепления откосов непроросшими травяными коврами при реконструкции каналов. / Перечень законченных научных разработок для внедрения в мелиоративное и водохозяйственное строительство: НПО БелНИИМВХ. — Мн., 1990. — С.5.
4. Кондратьев, В.Н., Писецкий Г.А., Свиридович Т.Г. Обоснование технологических режимов и конструкторских параметров путем построения моделей многофакторного эксперимента на примере приготовления биосмесей.// сб. научн. работ Мелиорация переувлажненных земель. Т. XLIV. — Мн., НПО БелНИИМВХ, 1997. — С. 222—239.
5. Патент №12353 «Смеситель для приготовления смеси для укрепления откосов земляных сооружений». В.Н.Кондратьев, Н.Г. Райкевич, И.В. Кирилленков, заявка №а 20051054 от 02.11.2005 г., опубл. 30.08.2009 НЦИС РБ.
6. Рекомендации по укреплению откосов земляных сооружений на объектах Волго-Донского канала посадками кустарниковой облепихи / В.Н.Кондратьев, В.С.Алтунин, Я.В. Панков [и др.]. — Москва, 1987.

### Summary

**V. Kondratyev, T. Sviridovich, Ja. Pankov**

#### **JUSTIFICATION OF TECHNOLOGICAL MODES AND DESIGN DATA OF THE MIXING DEVICE**

Results of tests and researches of the mixing device (MIK-500-1 machine). It is established that it evenly distributes on all volume of the bunker components of peat mix for landing of shrubby and flower plants. Values of its key design data for bunkers up to 4,5 m<sup>3</sup> are optimized. The technique of optimization of technological modes and design data is given.

Поступила 20.02..14