

УДК 621.3; 537.8; 631.234

А. В. ВУЖИЦКИЙ, Д. Н. КОВАЛЬ  
Ю. Н. КУЦЕНКО, Д. Н. НЕСТЕРЧУК, В. Ф. ЯКОВЛЕВ

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КАЛИЯ В ПОЧВЕ

**Ключевые слова:** калий, потенциал, почва, эксперимент, электрическое поле.

**Аннотация.** В статье приводится методика планирования и проведения полнофакторного эксперимента по определению количества калия в почве с учетом потенциалов электрического поля электродной системы. Показано, что наиболее значимым фактором является концентрация калия, результаты опытов являются достоверными и повторяемыми.

Поскольку в начале исследования вид аппроксимирующей функции неизвестен, то рекомендуется применять планы первого порядка. В планах первого порядка значения переменных варьируются, изменяются на двух уровнях, то есть каждая переменная может принимать только два значения. Верхний уровень обозначается +1, а нижний –1. Такая процедура представления переменных известна, как кодирование факторов. Всевозможные взаимодействия уровней факторов, при которых реализуются исследования, являются планом полнофакторного эксперимента (ПФЭ). [1, с. 10; 2, с.162; 3, с. 254; 4, с. 38].

Построение планов ПФЭ, как и всех других, начинается с выбора основного уровня и интервалов варьирования (интервалов изменения переменных). Основной уровень – это точка в факторном пространстве, окружение которой подлежит экспериментальному исследованию.

На величину разности потенциалов  $\Delta U_{\text{вим}}$  между измерительным электродом, который находится в геометрическом центре электродной системы, и соединенными параллельно электродами, которые создают постоянное электрическое потенциальное поле и находятся под знаком «-», оказывают влияние следующие факторы:

- величина напряжения  $U$ , подводимого к системе электродов, создающих электрическое поле внутри почвенного образца;

---

© Вужицкий А. В., Коваль Д. Н., Куценко Ю. Н., Нестерчук Д. Н., Яковлев В. Ф., 2013

- концентрация вносимого калийного удобрения в почвенном образце  $C$ ;
- относительная влажность почвы  $W$ , оказывающая существенное влияние на удельное сопротивление почвенного образца;
- расстояние между электродами  $b$ .

Другие параметры остаются неизменными. Во-первых, необходимо задаться основным уровнем по каждой независимой переменной: по величине напряжения  $U$ , по концентрации внесенного калийного удобрения  $C$ , при относительной влажности грунта  $W$  и по расстоянию между электродами  $b$ . Значение основного уровня обозначим как «0». После этого необходимо задаться интервалами варьирования  $\Delta U$ ,  $\Delta \theta$ ,  $\Delta W$ ,  $\Delta b$  соответственно. Тогда верхний уровень факторов будет равняться: для величины напряжения  $U_0 + \Delta U$ ; для концентрации удобрения  $C_0 + \Delta C$ ; для относительной влажности почвы  $W_0 + \Delta W$ ; для расстояния между электродами  $b_0 + \Delta b$ . Нижний уровень этих факторов (–)соответственно будет определяться как  $U_0 - \Delta U$ ,  $\theta_0 - \Delta \theta$ ,  $W_0 - W$  и  $b_0 - \Delta b$ . Также введем числовые значения для всех описанных выше величин и представим эту информацию в таблице 1.

Таблица 1 – Значения факторов эксперимента и интервал варьирования

Фактор	Числовое значение фактора и интервал варьирования			
	-1	0	+1	$\Delta$
$x_1$ – величина напряжения, В	20	25	30	$\Delta U=5$
$x_2$ – концентрация калийного удобрения, о.е.	0,5	1	1,5	$\Delta C=0,5$
$x_3$ – относительная влажность почвы, %	14	20	26	$\Delta W=6$
$x_4$ – расстояние между электродами, см	10	12	14	$\Delta b=2$

Все возможные взаимодействия уровней факторов в кодированных и натуральных величинах представлены в таблице 2. Каждая строка таблицы 2 определяет условия проведения опытов. Так, например, первый опыт проведем при поданном напряжении 20 В, концентрации калийного удобрения 0,5 о.е., при относительной влажности почвы 14%, при расстоянии между электродами 10 см. Следующий опыт – при поданном напряжении 30 В, при концентрации калийного удобрения 0,5 о.е., при относительной влажности почвы 14%, при расстоянии между электродами 10 см. Для двух факторов для  $k = 4$  коли-

чество опытов в полнофакторном эксперименте будет составлять  $2^4 = 16$ .

Таблица 2 – Взаимодействия уровней факторов в кодированных и натуральных величинах

Номер опыта	Напряже- ние		Концентрация калийного удобрения		Относи- тельная влажность почвы		Расстояние между электродами	
	U, В	$x_1$	C, о.е.	$x_2$	W, %	$x_3$	b, см	$x_4$
1	20	-	0,5	-	14	-	10	-
2	30	+	0,5	-	14	-	10	-
3	20	-	1,5	+	14	-	10	-
4	30	+	1,5	+	14	-	10	-
5	20	-	0,5	-	26	+	10	-
6	30	+	0,5	-	26	+	10	-
7	20	-	1,5	+	26	+	10	-
8	30	+	1,5	+	26	+	10	-
9	20	-	0,5	-	14	-	14	+
10	30	+	0,5	-	14	-	14	+
11	20	-	1,5	+	14	-	14	+
12	30	+	1,5	+	14	-	14	+
13	20	-	0,5	-	26	+	14	+
14	30	+	0,5	-	26	+	14	+
15	20	-	1,5	+	26	+	14	+
16	30	+	1,5	+	26	+	14	+

В дальнейшем будем обозначать факторы, взятые в кодированных переменных, через  $x_1$ ,  $x_2$  и т.д. Составив таким образом таблицу для данного числа факторов, мы механически нашли все возможные взаимодействия уровней факторов. Если представить значение факторов только в кодированной форме, то получим матрицу планирования, в которой условия проведения опытов обозначены взаимодействием плюсов и минусов по строкам [4, с. 41].

Математическая модель (уравнение регрессии) рассчитана на основе результатов, полученных при реализации плана ПФЭ для  $k = 4$ ,

будет иметь следующий вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4, \quad (1)$$

где  $b_1, b_2, b_3, b_4$  – коэффициенты при линейных членах регрессии;  
 $b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$  – коэффициенты, которые характеризуют взаимодействие первого порядка.

Такая модель является моделью неполного второго порядка. Перед расчетами коэффициентов составим расчетную матрицу для  $k = 4$ , которая представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Расчетная матрица для определения коэффициентов

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$
1	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-
3	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-
4	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+
5	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-
6	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+
8	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
9	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-
10	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+
11	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+
12	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-
13	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+
14	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-
15	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Основной расчетной матрицы является матрица планирования. Столбики при  $x_1, x_2, x_3, x_4$  представляют собой матрицу планирования для  $k = 4$ . Столбики при  $x_1x_2, x_1x_3, x_1x_4, x_2x_3, x_2x_4, x_3x_4$  и  $x_1x_2x_3x_4$ , полученные умножением соответствующих кодированных значений факторов в строках матрицы. Ни одна из строк не повторяется, а количество

верхних и нижних уровней факторов (т.е. плюсов и минусов в строках) всегда одинаково.

Приведенные признаки являются необходимыми условиями ортогональности расчетных матриц, поэтому сам план является ортогональным. Использование ортогональных планов имеет целью упрощение последующих вычислений и получение коэффициентов, которые не зависят друг от друга, т.е. ковариации между коэффициентами в планах ПФЭ равны нулю. Это означает, что замена нулем любого коэффициента в уравнении модели не меняет значений других коэффициентов.

Расчет планов ПФЭ заключается в определении коэффициентов в уравнении регрессии и в определении значимости этих коэффициентов, а также в решении вопроса, адекватно ли полученное эмпирическое уравнение описывает опытные данные. Для этого необходимо воспользоваться матрицей планирования и условиями проведения опытов. При реализации опытов были получены результаты, характеризующие выходной параметр (разницу потенциалов между измерительным электродом и электродами системы, которые создают электрическое поле), которые приведены в таблице 4.

Значение  $y_1$ ,  $y_2$  – это экспериментальные данные параллельных опытов (в планах ПФЭ опыты принято дублировать). Значение  $y$  является среднеарифметическим параллельных опытов. Дублирование опытов необходимо для определения дисперсии воспроизводимости. В дополнение к матрице таблицы 3 в таблице 4 приведены результаты опыта в центре плана (т.е. в условиях нулевого уровня). Следует отметить, что в большинстве случаев проведение такого опыта является необходимым.

После реализации плана, в первую очередь, необходимо оценить экспериментальные данные на воспроизводимость. Прежде всего, рассчитывается порядковая дисперсия  $S_n^2$  по выражению:

$$S_n^2 = \sum_{l=1}^l (y_{ln} - \bar{y}_n)^2, \quad (2)$$

где  $l$  – номер параллельного опыта.

Для первой строки в таблице:

$$S_n^2 = (11,9 - 11,75)^2 - (11,6 - 11,75)^2 = 0,045.$$

Для других строк расчет производится аналогично.

После вычисления порядковых дисперсий определяется сумма квадратов ошибок  $S_{\Sigma}$ .

$$S_{\Sigma} = \sum_{n=1}^n S_n^2 . \quad (3)$$

Дисперсия воспроизводимости (дисперсия ошибок наблюдений) вычисляется отношением суммы квадратов ошибок  $S_{\Sigma}$  на количество степеней свободы  $f_2$  и на количество параллельных опытов  $\gamma$ , т.е.:

$$S^2 = \frac{S_{\Sigma}}{f_2 \cdot \gamma} . \quad (4)$$

Таблица 4 – Таблица расчета планов ПФЭ

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_1$	$y_2$	$\bar{y}$	$S_n^2$
1	-	-	-	-	11,9	11,6	11,75	0,045
2	+	-	-	-	15	14,6	14,8	0,08
3	-	+	-	-	12,5	12,6	12,55	0,005
4	+	+	-	-	12,1	11,6	11,85	0,125
5	-	-	+	-	11,6	12,7	12,15	0,605
6	+	-	+	-	14,6	15,7	15,15	0,605
7	-	+	+	-	12,6	10,4	11,5	2,42
8	+	+	+	-	11	10,1	10,55	0,405
9	-	-	-	+	12,3	12,3	12,3	0
10	+	-	-	+	15,5	15,6	15,55	0,005
11	-	+	-	+	10,5	10,4	10,45	0,005
12	+	+	-	+	9,9	9,5	9,7	0,08
13	-	-	+	+	12,2	11,7	11,95	0,125
14	+	-	+	+	13,5	13,4	13,45	0,005
15	-	+	+	+	11,5	11,5	11,5	0
16	+	+	+	+	13	12,8	12,9	0,02
17	0	0	0	0	12,3	11,9	12,1	-
$S_{\Sigma}=4,53$								

Количество степеней свободы дисперсии воспроизводимости в плане ПФЭ при дублировании опытов в строках плана одинаковое число раз всегда рассчитывается следующим образом:

$$f_2 = N(\gamma - 1), \quad (5)$$

где  $N$  – количество строк матрицы, для данного опыта  $N=16$ .

$$f_2 = 16(2 - 1) = 16 ,$$

$$S^2 = \frac{4,53}{16 \cdot 2} = 0,142 ,$$

Зная порядковые дисперсии и их сумму  $S_{\Sigma}$ , можно дать оценку воспроизводимости опытов. При планировании эксперимента по плану ПФЭ, в котором опыты дублировались одинаковое количество раз, проверка воспроизводимости осуществляется обычно с использованием критерия Кохрена [2,с. 137]:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{S_{\Sigma}} \leq G_{\alpha}(\gamma-1, N) , \quad (6)$$

где  $G_{\alpha}(\gamma-1, N)$  – табличное значение критерия Кохрена при уровне значимости  $\alpha$  (принимается  $\alpha=0,05$ ), для данного случая  $G_{0,05} = 0,68$  [2, с. 258], тогда:  $G = \frac{2,42}{4,53} = 0,534 < 0,68$ .

Поскольку значение критерия Кохрена по опытным данным не превышает его критического значения, полученного из таблиц, можно сделать вывод, что опыты достаточно хорошо воспроизводимы. В противном случае пришлось бы исключить из рассмотрения опыт с максимальной дисперсией. Выяснив, что опыты в точках плана воспроизводятся довольно хорошо, т.е. ряд порядковых дисперсий однородный, рассчитывают коэффициенты уравнения регрессии. Для облегчения процедуры вычислений коэффициентов используется матрица плана ПФЭ (табл. 3). Столбики таблицы заполняются значениями произведений  $i$ , где индексом  $n$  обозначается номер опыта – таблица 5. Каждая из строк таблицы 5 заполнен одними теми же числами, однако знаки при этих числах разные, они меняются в соответствии с правилом чередования знаков расчетных матриц. После составления расчетной матрицы числа в столбцах суммируются с учетом знаков и заполняют строку для сумм. Для расчета коэффициентов уравнения регрессии в плане ПФЭ достаточно разделить суммы соответствующих столбцов на количество опытов  $N = 16$ . Тогда значение коэффициента  $b_0$  определяется как частное от деления суммы чисел столбца  $\bar{y}$  на 16, т.е.:

$$b_0 = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}_n}{N} , b_0 = \frac{198,1}{16} = 12,381 . \quad (7)$$

Таблица 5 – Расчет коэффициентов уравнения регрессии

№ опыта	$x_1\bar{y}$	$x_2\bar{y}$	$x_3\bar{y}$	$x_4\bar{y}$	$x_1x_2\bar{y}$	$x_1x_3\bar{y}$	$x_1x_4\bar{y}$	$x_2x_3\bar{y}$	$x_2x_4\bar{y}$	$x_3x_4\bar{y}$	$\bar{y}$
1	-11,75	-11,75	-11,75	-11,75	+11,75	+11,75	+11,75	+11,75	+11,75	+11,75	11,75
2	+14,8	-14,8	-14,8	-14,8	-14,8	-14,8	-14,8	+14,8	+14,8	+14,8	14,8
3	-12,55	+12,55	-12,55	-12,55	-12,55	+12,55	+12,55	-12,55	-12,55	+12,55	12,55
4	+11,85	+11,85	-11,85	-11,85	+11,85	-11,85	-11,85	-11,85	-11,85	+11,85	11,85
5	-12,15	-12,15	+12,15	-12,15	+12,15	-12,15	+12,15	-12,15	+12,15	-12,15	12,15
6	+15,15	-15,15	+15,15	-15,15	-15,15	+15,15	-15,15	-15,15	+15,15	-15,15	15,15
7	-11,5	+11,5	+11,5	-11,5	-11,5	-11,5	+11,5	+11,5	-11,5	-11,5	11,5
8	+10,55	+10,55	+10,55	-10,55	+10,55	+10,55	-10,55	+10,55	-10,55	-10,55	10,55
9	-12,3	-12,3	-12,3	+12,3	+12,3	+12,3	-12,3	+12,3	-12,3	-12,3	12,3
10	+15,55	-15,55	-15,55	+15,55	-15,55	-15,55	+15,55	+15,55	-15,55	-15,55	15,55



Продолжение таблицы 5

11	-10,45	+10,45	-10,45	+10,45	-10,45	+10,45	-10,45	+10,45	-10,45	+10,45
12	+9,7	+9,7	-9,7	+9,7	+9,7	-9,7	+9,7	-9,7	+9,7	9,7
13	-11,5	-11,5	+11,95	+11,95	+11,95	-11,5	-11,5	-11,5	+11,95	11,95
14	+13,45	-13,45	+13,45	+13,45	-13,45	+13,45	+13,45	-13,45	+13,45	13,45
15	-11,5	+11,5	+11,5	+11,5	-11,5	-11,5	+11,5	+11,5	+11,5	11,5
16	+12,9	+12,9	+12,9	+12,9	+12,9	+12,9	+12,9	+12,9	+12,9	12,9
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
$\sum_{i=1}^N$	9,8	-16,1	0,2	-2,5	-11,8	0,1	1	3,6	-1,3	198
$b_{ij}$	0,613	-1,006	0,012	-0,156	-0,738	0,006	0,062	0,225	-0,081	0,213
										12,381

Аналогично определяются коэффициенты  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$ . В общем виде для вычисления их в плане ПФЭ используются следующие расчетные формулы:

$$b_i = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} \bar{y}_n}{N}, b_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} \bar{y}_n}{N}. \quad (8)$$

Уравнение регрессии с рассчитанными коэффициентами будет выглядеть таким образом:

$$y = 12,381 + 0,613 \cdot x_1 - 1,006 \cdot x_2 + 0,012 \cdot x_3 - 0,156 \cdot x_4 - 0,738 \cdot x_1 x_2 + 0,006 \cdot x_1 x_3 + 0,062 \cdot x_1 x_4 + 0,225 \cdot x_2 x_3 - 0,081 \cdot x_2 x_4 + 0,213 \cdot x_3 x_4 \quad (9)$$

По абсолютной величине коэффициентов можно в дальнейшем судить о силе влияния различных факторов на протекание процессов. По полученным уравнениям было установлено, что наибольшее влияние на разность потенциалов осуществляет концентрация калийного удобрения в почвенном образце, причем при увеличении концентрации разность потенциалов будет уменьшаться, поскольку знак при  $x_2$  отрицательный. Вместе с тем значимость воздействия при двойном взаимодействии напряжения и относительной влажности почвы можно поставить под сомнение, поскольку коэффициент при  $x_1 x_3$  имеет существенно меньшее значение.

Значимость коэффициентов определяется по величине дисперсий  $S_i^2$ ,  $S_j^2$ .

$$S_i^2 = S_j^2 = \frac{S^2}{N}, \quad (10)$$

где  $S^2$  – дисперсия воспроизводимости выходного параметра.

Тогда:

$$S_i^2 = S_j^2 = \frac{0,142}{16} = 0,0089.$$

В планах ПФЭ дисперсии коэффициентов при линейных членах и тех, что характеризуют взаимодействие различных порядков, равны между собой.

Коэффициенты  $b_i$ ;  $b_{ij}$  считаются значимыми, если:

$$|b_i; b_{ij}| \geq t_{кр} \sqrt{S_i^2}, \quad (11)$$

где  $t_{кр}$  – критическое значение распределения критерия Стьюдента для заданного уровня значимости  $\alpha$  и  $f_2$  степеней свободы,

$$t_{кр} = 2,12 \text{ [4, с. 115]}.$$

Тогда:

$$t_{кр} \sqrt{S_i^2} = 2,12 \sqrt{0,0089} = 0,2.$$

Все коэффициенты уравнения (9), которые превышают это значение, являются значимыми и они остаются для проверки полученной модели на адекватность. Те коэффициенты, которые меньше, счи-

таются такими, которые могут быть сравнены с ошибкой опыта, поэтому они исключаются из уравнения.

С учетом значимости коэффициентов уравнение регрессии принимает такой вид:

$$y = 12,381 + 0,613 \cdot x_1 - 1,006 \cdot x_2 - 0,738 \cdot x_1 x_2 + 0,225 \cdot x_2 x_3 + 0,213 \cdot x_3 x_4. \quad (12)$$

Проверка уравнения на адекватность осуществляется при помощи критерия Фишера [2, с. 170]:

$$F = \frac{S_D : f_1}{S_{\Sigma} : f_2} = \frac{S_{ad}^2}{S_{\text{вдмв}}^2}, \quad (13)$$

где  $S_{ad}^2$  – дисперсия адекватности;  $S_{\text{вдмв}}^2$  – дисперсия воспроизводимости (опыта).

При вычислениях используется расчетная матрица при условии исключения столбиков для  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_1 x_3$ ,  $x_1 x_4$ ,  $x_2 x_4$ . Столбики  $x_1$ ,  $x_2$  и т.д. в расчетной матрице заполняются произведениями кодированных значений факторов и их взаимодействий на соответствующие значения коэффициентов при них – таблица 6.

Таблица 6 – Расчетная матрица проверки математической модели на адекватность

Номер опыта	$b_0 x_0$	$b_1 x_1$	$b_2 x_2$	$b_{12} x_1 x_2$	$b_{23} x_2 x_3$	$b_{34} x_3 x_4$	$\hat{y}_n$	$\bar{y}_n$	$(\hat{y}_n - \bar{y}_n)^2$
1	12,381	-0,613	+1,006	-0,738	+0,225	+0,213	12,474	11,75	0,524
2	12,381	+0,613	+1,006	+0,738	+0,225	+0,213	15,176	14,8	0,141
3	12,381	-0,613	-1,006	+0,738	-0,225	+0,213	11,488	12,55	1,128



Продолжение таблицы 6

14	12,381	+0,613	+1,006	+0,738	-0,225	+0,213	14,726	13,45	1,628
15	12,381	-0,613	-1,006	+0,738	+0,225	+0,213	11,938	11,5	0,192
16	12,381	+0,613	-1,006	-0,738	+0,225	+0,213	11,688	12,9	1,469
$S_{\Sigma}=9,3111$									

Количество степеней свободы  $f_1$ , необходимое для расчета дисперсии адекватности, определяется как:

$$f_1 = N - q, \quad (14)$$

где  $N$  – количество опытов,  $q$  – количество значимых коэффициентов с учетом свободного члена  $b_0$ .

$$f_1 = 16 - 6 = 10 .$$

Тогда значение критерия Фишера равно:

$$F = \frac{9,3111:10}{4,53:16} = 3,31 .$$

Критическое значение  $F_{кр}$  для данного уровня значимости ( $\alpha = 0,05$ ,  $f_1=10$ ,  $f_2=16$ ) равняется 2,49. Расчетное значение критерия Фишера превышает табличное значение для принятого уровня значимости.

Необходимо выполнить проверку на значимость квадратичных эффектов. Для этого используется соотношение:

$$|\bar{y}_0 - b_0| \leq t_{кр} S \sqrt{\frac{n_0 + \lambda N}{n_0 N}}, \quad (14)$$

где  $\bar{y}_0$  – среднее арифметическое значение выходного параметра в центре плана, полученное по экспериментальным данным;  $b_0$  – значение свободного члена в уравнении регрессии;  $t_{кр}$  – критическое значение

ние распределения Стьюдента, при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и количестве степеней свободы  $f_2 = 16$   $t_{кр} = 2,12$ ;  $S = \sqrt{S^2} = \sqrt{4,53} = 2,13$  – среднеквадратическая ошибка наблюдений;  $n_0$  – количество опытов в центре плана;  $\gamma$  – количество параллельных опытов в точках плана;  $N$  – количество опытов плана, кроме центральных.

$$|12,1 - 12,381| = 0,281 < 2,12 \cdot 2,13 \sqrt{\frac{2 + 2 \cdot 16}{2 \cdot 16}} = 4,65.$$

Таким образом, разница  $|\bar{y}_0 - b_0|$  незначительно отличается от нуля и квадратичные члены в модель можно не включать. Полученное уравнение регрессии можно использовать для описания процесса.

### **Выводы**

1. На величину разности потенциалов  $\Delta U_{\text{вим}}$  между измерительным электродом, который находится в геометрическом центре электродной системы, и соединенными параллельно электродами, которые создают постоянное электрическое потенциальное поле и находятся под знаком «-», оказывают влияние следующие факторы: величина напряжения  $U$ , подводимого к системе электродов, создающих электрическое поле внутри почвенного образца; концентрация вносимого калийного удобрения в почвенном образце  $C$ ; относительная влажность почвы  $W$ , оказывающая существенное влияние на удельное сопротивление почвенного образца; расстояние между электродами  $b$ .

2. На основании этих данных составлен план полнофакторного эксперимента.

3. Поскольку наибольший коэффициент регрессии (1,006) стоит при факторе, которым закодирована концентрация калийного удобрения, то этот фактор является наиболее значимым.

4. Опыты достаточно хорошо воспроизводимы, поскольку:

$$G = \frac{2,42}{4,53} = 0,534 < 0,68.$$

5. Проверка по критерию Фишера показала, что расчетное значение критерия Фишера (3,31) превышает табличное значение для принятого уровня значимости (2,49), однако эта разница незначительно отличается от нуля и квадратичные члены в модель можно не включать. Полученное уравнение регрессии можно применять для описания процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ДСТУ 4290:2004 Якість ґрунту. Метод визначення валового фосфору і валового калію в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н Соколовського. К.: Держспоживстандарт України, 2005. III, 10 с.

2. Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента/В.В. Лавров, Н.А. Спиринов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУУПИ, 2004. 257 с.

3. Лапач С. Н. Статистика в науке и биологии /С.Н. Лапач, А. В. Чубенко, П.Н. Бабич П. Н. /К.: МОРИОН, 2002. 640 с.

4. Мухачев В.А. Планирование и обработка результатов эксперимента. Учебное пособие/В.А. Лапач. Томск: Томский государственный университет управления и радиоэлектроники, 2007. 118 с.

## PLANNING EXPERIMENTS TO DETERMINE SOIL POTASSIUM

*Keywords: experiment, potassium, electric field, potential, soil*

*Abstract. The article provides a method of planning and carrying out full factorial experiment to determine the amount of a potassium in the soil given the potential of the electric field electrode system. It is shown that the most important factor is the concentration of potassium; the results of the experiments are of reliable and repeatable.*

---

**ВУЖИЦКИЙ АНАТОЛИЙ ВИКТОРОВИЧ** – инженер-энергетик, ассистент кафедры электроснабжения сельского хозяйства, Таврический государственный агротехнологический университет, Украина, Мелитополь, (vuzhitsku@gmail.com).

**VUZHITSKY ANATOLIY VIKTOROVICH** – electrical engineer, assistant, Tavria State Agrotechnical University, Ukraine, Melitopol, (vuzhitsku@gmail.com).

**КОВАЛЬ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ** – инженер-энергетик, ассистент кафедры электроснабжения сельского хозяйства, Таврический государственный агротехнологический университет, Украина, Мелитополь, (kvldmitry@rambler.ru).

**KOVAL DMITRI NIKOLAEVICH** – electrical engineer, assistant, Tavria State Agrotechnical University, Ukraine, Melitopol, (kvldmitry@rambler.ru).

**КУЦЕНКО ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры автоматизированного электропривода, Таврический государственный агротехнологический университет, Украина, Мелитополь, (kucenko2010@gmail.com).

**KUTSENKO YURIY NIKOLAEVICH** – candidate of technical sciences, lecturer, Head of Department of automated electric, Tavria State Agrotechnical University, Ukraine, Melitopol, (kucenko2010@gmail.com).

**НЕСТЕРЧУК ДИНА НИКОЛАЕВНА** – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники, Таврический государственный агротехнологический университет, Украина, Мелитополь, (dina-nesterchuk@mail.ru).

**NESTERCHUK DINA NIKOLAEVNA** – candidate of technical sciences, lecturer of Theoretical and general electrical engineering, Tavria State Agrotechnical University, Ukraine, Melitopol, (dina-nesterchuk@mail.ru).

**ЯКОВЛЕВ ВАЛЕРИЙ ФЁДОРОВИЧ** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедры электротехнических систем в АПК и физики, Сумской национальный аграрный университет, Украина, Сумы, (dekanatiff@ukr.net).

**YAKOVLEV VALERY FEDOROVICH** – candidate of technical sciences, professor, head of the department of electrical systems in agriculture and physics, Sumy National Agrarian University, the Ukraine, Sumy, (dekanatiff@ukr.net).

---