

## ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Е. А. Котугин

*В статье рассматриваются вопросы экспериментальной проверки воздействия магнитного поля на скорость водопоглощения, в зависимости от времени воздействия, степени поляризации и модуля напряженности магнитного поля. Приводится план и методика проведения активного эксперимента и анализ полученных результатов. Предложены численные значения для влияющих факторов, при которых скорость водопоглощения максимальна.*

*Ключевые слова: магнитное поле, степень поляризации, напряженность магнитного поля, скорость водопоглощения, электротехнология, предпосевная обработка семян.*

Интенсивное развитие агропромышленного комплекса на сегодняшний день является неотъемлемой и важной составляющей стратегического развития государства. К основным направлениям развития АПК регионов, и в частности Сибири, относятся улучшение производственного обеспечения сельскохозяйственной отрасли; внедрение новых наукоемких технологий в аграрное производство с использованием для этого имеющихся возможностей аграрной науки и другие. Одно из важнейших мест в комплексе мероприятий по повышению урожайности возделываемых культур занимает работа с семенами, поскольку они являются носителями биологических и хозяйственных качеств растений и в значительной мере определяют качество и количество собираемого в итоге урожая [1, 2].

Все большее распространение получают воздействия на семена физическими факторами с целью их стимуляции – ускорения роста. Особое место в ряду исследуемых физических воздействий занимают электрофизические факторы.

Воздействие на семена с целью предпосевной обработки может осуществляться в частности низкочастотным магнитным полем. Биологическое действие магнитного поля на зерно зависит от его параметров: напряженности поля  $H$ , коэффициента поляризации  $\Phi$ , времени воздействия  $T$ , так что эффект  $\mathcal{E}$  является сложной функцией перечисленных факторов  $\mathcal{E} = F(E, T, \Phi)$  [3, 4].

Для определения экспериментальных зависимостей водопоглощения от этих параметров была поставлена серия опытов.

Исследование стохастических связей между влияющими факторами и откликом

может проводиться корреляционным, регрессионным или дисперсионным анализом.

Целью активного эксперимента является получение уравнения регрессии для изучения отдельных факторов на влагопоглощение и определение значений факторов, при котором влагопоглощение достигает максимального значения. Для решения поставленной цели будем использовать план второго порядка, поскольку теоретическую зависимость можно приблизительно описать параболой, кроме этого он позволят определить оптимальные условия эксперимента.

Планы второго порядка позволяют провести эксперимент для отыскания уравнения регрессии, содержащего вторые степени факторов

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,l=1 \\ i \neq l}}^n b_{il} x_{il} . \quad (1)$$

Нахождение уравнения регрессии методом планирования экспериментов состоит из следующих этапов:

- выбор основных факторов и их уровней;
- планирование и проведение эксперимента;
- определение коэффициентов регрессии;
- статистический анализ результатов эксперимента.

Чтобы получить квадратичную зависимость необходимо, чтобы каждый фактор принимал хотя бы три разных значения. Для отдельной оценки всех коэффициентов полинома второго порядка применяют центральное композиционное планирование (ЦКП). ЦКП включает в себя композицию полного факторного эксперимента (ПФЭ) или дробного факторного эксперимента (ДФЭ) и

## ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

некоторое число дополнительных опытов, зависящее от числа факторов.

Известно [5], что если целью эксперимента является поиск оптимальных условий, то наиболее часто применяются ротатбельные планы, с помощью которых коэффициенты уравнения регрессии определяются с одинаковой дисперсией.

При ротатбельном ЦКП (РЦКП) эксперимент планируется таким образом, чтобы дисперсия функции отклика не зависела от направления в факторном пространстве, а зависела только от расстояния до центра плана, т. е. на одинаковых расстояниях от центра плана была постоянна.

Число опытов РЦКП определяется по формуле

$$N = N_{я} + 2n + N_0, \quad (2)$$

где  $N_{я}$  – число опытов в ядре плане;

$n$  – число факторов;

$2n$  – число опытов в «звездных точках»;

$N_0$  – число опытов в центре плана.

Для того, чтобы построить ротатбельный композиционный план увеличивают число точек в центре плана, в зависимости от числа факторов, а величина «звездного плеча»  $\alpha$  выбирается из условия,

$$\alpha = 2^{n/4} \text{ при } n < 5; \quad \alpha = 2^{n-1/4} \text{ при } n > 5 \quad (3)$$

Составим РЦКП для трех факторов ( $n=3$ ), и трех серий опытов ( $m=3$ ) при интервалах варьирования для напряженности 500 А/м, коэффициента поляризации – 0,5, времени обработки 30 секунд. Характеристики РЦКП рассчитанные по формулам (2–3) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики РЦКП

Число факторов, $n$	Число опытов в ядре плана, $N_{я}$	Величина «звездного плеча», $\alpha$	Число опытов в «звездных точках», $2n$	Число опытов в центре плана, $N_0$	Общее число опытов, $N$
3	$2^3$ (ПФЭ)	1,682	6	6	20

Для удобства расчетов и анализа результатов переходим к нормированному масштабу факторов, для  $i$ -го фактора

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{0i}}{l}, \quad (4)$$

где  $x_i$  – нормированное значение;

$\tilde{x}_i$  – натуральное значение;

$\tilde{x}_{0i}$  – основной уровень;

$l$  – интервал варьирования.

Для стандартизации масштабов факторов условия проведения опытов сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Условия проведения эксперимента

Обозначение факторов	Стандартный масштаб	Натуральный масштаб		
		X1, А/м Напряженность	X2, Коеф. поляризации	X3, с Время воздействия
Основной уровень	0	1000	0,5	45
Верхний уровень	+1	1500	0,75	25
Нижний уровень	-1	500	0,25	65
Интервал варьирования	–	500	0,25	20
Звездные точки	+1,682	1841	0,92	11,4
	-1,682	159	0,08	78,6

В таблице 3 представлена матрица плана эксперимента. Для исключения влияния систематических ошибок, с помощью таблицы случайных чисел [6] была произведена

рандомизация опытов (случайная последовательность при постановке опытов, запланированных матрицей).

Таблица 3 - Матрица плана эксперимента и расчет РЦКП

$j$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$y(j_1)$	$y(j_2)$	$y(j_3)$	$\bar{y}(j)$	$s_y^2(j)$	$\hat{y}(j)$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1,32	1,26	1,35	1,31	0,002	1,279
2	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	4,05	4	3,91	3,99	0,005	3,795
3	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	2,02	2,28	2,29	2,2	0,023	1,991
4	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	4,15	4,54	4,72	4,47	0,085	4,507
5	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	2,35	2,11	1,85	2,1	0,063	2,023
6	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	2,74	3,24	3	2,99	0,063	2,939
7	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	2,02	1,71	1,68	1,8	0,035	1,735
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2,49	2,71	2,79	2,66	0,024	2,651
9	1	-1,68	0	0	2,82	0	0	0	0	0	1,33	1,3	1,12	1,25	0,013	1,416
10	1	1,68	0	0	2,82	0	0	0	0	0	4,07	4,25	4,38	4,23	0,024	4,299
11	1	0	-1,68	0	0	2,82	0	0	0	0	1,51	1,86	2,05	1,81	0,075	1,87
12	1	0	1,68	0	0	2,82	0	0	0	0	2,04	2,48	2,18	2,23	0,051	2,226
13	1	0	0	-1,68	0	0	2,82	0	0	0	2,91	3,22	3,25	3,13	0,035	3,305
14	1	0	0	1,68	0	0	2,82	0	0	0	2,13	2,4	2,39	2,31	0,023	2,371
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,12	2,1	2,01	2,08	0,003	2,048
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,18	2,04	2,01	2,08	0,008	2,048
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,15	2,07	1,84	2,02	0,026	2,048
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,97	2,13	1,87	1,99	0,017	2,048
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,98	2,05	1,92	1,98	0,004	2,048
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,99	1,97	1,94	1,97	0,001	2,048
$\sum_{j=1}^{20} x_i x_j(j)$	48,6	11,706	1,446	-3,798	36,974	32,913	36,861	-0,44	-3,2	-2	Критерий Стьюдента при $\alpha = 0,05$					
$b_{ix}$	2,017	0,858	0,106	-0,278	0,289	0,035	0,282	-0,055	-0,401	-0,251	С числом степеней свободы 45 $t_{\text{кр}} = 2,015$ ,					
$t_{\text{р}}$	30,35	19,47	2,41	6,31	6,74	0,82	6,58	0,95	6,95	4,35	Козф.-ты. незначимы - пересчитать коэф.-ты.					
Вывод	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	Критерий Фишера при $\alpha = 0,05$					
$b_{iy}$	2,048	0,858	0,106	-0,278	0,287	0	0,28	0	-0,4	-0,25	С числом степеней свободы для числителя 13 и					
$t_{\text{р}}$	35,69	19,47	2,41	6,31	6,74	-	6,58	-	6,95	4,35	знаменателя 45 $F_{\text{кр}13/45} = 1,95$ , расчетный $F_{\text{рас}} = 1,6$					
Вывод	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	зн	Математическая модель адекватна					

## ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Порядок проведения опыта

1. Среднее арифметическое  $\bar{y}(j)$  равно сумме всех  $m$  отдельных результатов, деленной на количество параллельных опытов  $m$

$$\bar{y}(j) = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^m y(j_q), \quad (5)$$

где  $y(j_q)$  – значение зависимой переменной в  $j$ -ой точке плана, при  $q$ -ом параллельном опыте;

$m$  – число параллельных опытов.

2. Вычисляем среднее значение квадрата отклонений величины от ее среднего значения – дисперсию

$$s_y^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{q=1}^m (y(j_q) - \bar{y}(j))^2, \quad (6)$$

где  $y(j_q)$  – значение зависимой переменной в  $j$ -ой точке плана, при  $q$ -ом параллельном опыте;

$\bar{y}(j)$  – среднее арифметическое;

$m$  – число параллельных опытов.

3. Проверяем гипотезу о воспроизводимости опытов с помощью критерия Кохрена  $G_p$ ; его расчетное значение

$$G_p = \frac{\max s_{yj}^2}{\sum_{j=1}^N s_{yj}^2}, \quad (7)$$

где  $\max s_{yj}^2$  – максимальная дисперсия из  $N$  экспериментов;

$\sum_{j=1}^N s_{yj}^2$  – общая дисперсия результатов всех  $N$  экспериментов.

$$G_p = \frac{0,085}{0,58} = 0,146552.$$

Критическое значение критерия Кохрена  $G_{kp}$  определяем по таблице распределения Кохрена по числу степеней свободы  $f_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$ ,  $f_2 = N = 20$  и уровню значимости  $\alpha = 0,05$ .  $G_{kp} = 0,27$ .

Поскольку условие  $G_p < G_{kp}$  выполняется, то гипотеза об однородности дисперсий принимается.

4. Расчет оценок коэффициентов полинома. Вспомогательные величины

$$A = \frac{1}{2B((n+2)B-n)} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 0,857((3+2) \cdot 0,857-3)} = 0,454;$$

$$B = \frac{nN}{(n+2)(N-N_0)} = \frac{3 \cdot 20}{(3+2)(20-6)} = 0,857;$$

$$C = \frac{N}{N-N_0} = \frac{20}{20-6} = 1,428.$$

Вспомогательные суммы

$$S_0 = \sum_{j=1}^N \bar{y}(j); \quad S_i = \sum_{j=1}^N x_{0j} \bar{y}(j);$$

$$S_{il} = \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{il} \bar{y}(j); \quad S_{ii} = \sum_{j=1}^N x_{ji}^2 \bar{y}(j) \quad (8)$$

Значения этих сумм сводим в таблицу 3. Коэффициенты регрессии определяются

как:

$$b_0 = \frac{2AB}{N} \left( S_0 B(n-2) - C \sum_{i=1}^n S_{ii} \right); \quad (9)$$

$$b_i = \frac{CS_i}{N}; \quad (10)$$

$$b_{il} = \frac{C^2 S_{il}}{BN}; \quad (11)$$

$$b_{ii} = \frac{CA}{N} \times \left( S_{ii} C((n+2)B-n) + C(1-B) \sum_{i=1}^n S_{ii} - 2BS_0 \right). \quad (12)$$

Рассчитанные значения также заносим в таблицу 3.

5. Проверка значимости коэффициентов регрессии. Оценку проводим по критическому значению критерию Стьюдента  $t_{kp}$ . Его значение принимаем равным 2,015 для степеней свободы

$$q_H = (N_{\text{я}} + 2n)(m-1) + mN_0 - 1 = \\ = (8+6)(3-1) + 3 \cdot 6 - 1 = 45$$

и уровню значимости  $\alpha = 0,05$ .

Коэффициент значим, если выполняется условие

$$\frac{|b_0|}{S_{b0}} = t_p \geq t_{kp}; \quad \frac{|b_i|}{S_{bi}} = t_p \geq t_{kp}; \\ \frac{|b_{il}|}{S_{bil}} = t_p \geq t_{kp}; \quad \frac{|b_{ii}|}{S_{bii}} = t_p \geq t_{kp}, \quad (13)$$

где  $S_{b_0}$ ,  $S_{b_i}$ ,  $S_{0il}$ ,  $S_{b_{ii}}$  – оценки дисперсий коэффициентов регрессии.

Если эксперимент повторяется  $m$  раз в каждой точке плана, то оценку дисперсии ошибок наблюдения  $S_n^2$  можно найти по формуле

$$S_n^2 = \frac{1}{q_H} \left[ \sum_{j=1}^{N_{\mathcal{J}+2n}} \sum_{q=1}^m (\bar{y}(j) - y(j_q))^2 + \sum_{j=N_{\mathcal{J}+2n+1}}^N \sum_{q=1}^m (\bar{y}(0) - y(j_q))^2 \right] \quad (14)$$

где  $\bar{y}(0) = \frac{1}{mN_0} \sum_{j=N_{\mathcal{J}+2n+1}}^N \sum_{q=1}^m y(j_q)$  –

среднее значение в центральной точке плана;

$y(j_q)$  – значение зависимой переменной в  $j$ -ой точке плана при  $q$ -ом параллельном опыте;

$\bar{y}(j)$  – среднее арифметическое;

$m$  – число параллельных опытов.

Дисперсия ошибки наблюдений составила  $S_n^2 = 0,026611$ .

Для оценки дисперсий оценок коэффициентов регрессии можно использовать соотношения

- для  $b_0$ :

$$S_{b_0}^2 = S_n^2 c_0 = 0,026611 \cdot 0,166 = 0,004417; \quad (15)$$

- для  $b_i$ :

$$S_{b_i}^2 = S_n^2 c_1 = 0,026611 \cdot 0,073 = 0,001943; \quad (16)$$

- для  $b_{ii}$ :

$$S_{b_{ii}}^2 = S_n^2 c_2 = 0,026611 \cdot 0,069 = 0,001836; \quad (17)$$

- для  $b_{il}$ :

$$S_{b_{il}}^2 = S_n^2 c_3 = 0,026611 \cdot 0,125 = 0,003326; \quad (18)$$

где  $c_0$  – диагональный элемент дисперсионной матрицы, соответствующий свободному члену матрице плана эксперимента;

$c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  – диагональные элементы дисперсионной матрицы, соответствующие соответственно линейным членам, квадратичным членам и взаимодействиям математической модели. Заносим расчетное значение коэффициента Стьюдента в таблицу 3.

Как видно из таблицы 3, коэффициенты при линейном члене  $b_2$  и взаимодействии

$b_{23}$  являются незначимыми, поэтому их необходимо исключить из математической модели. После этого пересчитываем коэффициенты математической модели и уточняем расчетный коэффициент Стьюдента, для новых диагональных элементов дисперсионной матрицы  $c_0 = 0,12$ ,  $c_1 = 0,073$ ,  $c_2 = 0,069$ ,  $c_3 = 0,125$ , заносим результаты в таблицу 3.

После определения новых оценок коэффициентов математической модели и проверки их на значимость регрессионная модель имеет вид

$$\hat{y} = 2,048 + 0,858x_1 + 0,106x_2 - 0,278x_3 + 0,287x_1^2 + 0,28x_3^2 - 0,4x_1x_3 - 0,25x_2x_3.$$

6. Проверяем на адекватность по критерию Фишера. Расчетное значение критерия Фишера

$$F_{pac} = \frac{S_{ad}^2}{S_n^2}, \quad (19)$$

где  $S_n^2$  – дисперсии ошибок наблюдения;

$S_{ad}^2$  – дисперсия неадекватности.

Оценка дисперсии неадекватности определяется

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{q_a} \left[ m \sum_{j=1}^{N_{\mathcal{J}+2n}} (\bar{y}(j) - \hat{y}(j))^2 + mN_0 (\bar{y}(0) - \hat{y}(N_{\mathcal{J}+2n+1}))^2 \right], \quad (20)$$

где  $q_a = N_{\mathcal{J}} - \frac{n(n-1)}{2} + w$  – число степеней свободы;

$w$  – число незначимых коэффициентов регрессии.

$$q_a = 8 - \frac{3(3-1)}{2} + 2 = 13.$$

Оценка дисперсии ошибки неадекватности составила  $S_{ad}^2 = 0,042385$ .

Так как

$$F_{pac} = \frac{0,042385}{0,026611} = 1,592771 < F_{кр13/45} = 1,95,$$

то модель считается адекватной.

Для нахождения оптимальных условий решим систему уравнений

## ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{y}(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} = 0; \\ \frac{\partial \hat{y}(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} = 0. \end{cases} \quad (21)$$

В результате чего получим значение факторов, при которых скорость водопоглощения достигает максимума. Их нормированные и фактические значения приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения факторов, при которых скорость водопоглощения максимальна

Обозначение факторов	Стандартный масштаб	Натуральный масштаб
X1, А/м, модуль напряженности	-0,199	900
X2, коэффициент поляризации	1,754	0,94
X3, с, время воздействия	0,424	53,5

### ВЫВОДЫ:

1. Анализируя все полученные данные можно заключить, что все факторы оказывают воздействие на изменение водопоглощения зерен.

2. Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими предположениями, и могут быть взяты за основу при дополнении разработанной математической модели с целью ее уточнения.

3. Определены рациональные, с точки зрения обеспечения максимальной скорости водопоглощения, параметры: время воздействия – 54 с; коэффициент поляризации маг-

нитного поля – 0,94; модуль напряженности магнитного поля – 900 А/м.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белицын, И. В. Анализ факторов влияющих на урожайность зерновых культур [Текст] / И. В. Белицын, Е. А. Котугин, Р. С. Старухин // Экология и ресурсо- и энергосберегающие технологии на предприятиях народного хозяйства : X Международная научно-практическая конференция. – Пенза, 2010. – С. 160–164.

2. Белицын, И. В. Поведение зерна пшеницы в электромагнитном поле [Текст] / И. В. Белицын, Е. А. Котугин, Р. С. Старухин // Экология и ресурсо- и энергосберегающие технологии на предприятиях народного хозяйства : X Международная научно-практическая конференция. – Пенза, 2010. – С. 164–168.

3. Белицын, И. В. Установка и метод обработки зерна в электрическом поле [Текст] / И. В. Белицын, Е. А. Котугин, Р. С. Старухин // Инновации в России: успехи, проблемы и перспективы : III Всероссийская научно-практическая конференция. – Пенза, 2010. – С. 80–84.

4. Белицын, И. В. Результаты применения технологии обработки посевного материала в электрическом поле [Текст] / И. В. Белицын, Е. А. Котугин, Р. С. Старухин // Инновации в России: успехи, проблемы и перспективы : III Всероссийская научно-практическая конференция. – Пенза, 2010. – С. 84–88.

5. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных : учебное пособие [Текст] / Н. И. Сидняев. — М. : Издательство Юрайт, 2011. – 399 с.

6. Плескунин, В. И. Теоретические основы организации и анализа выборочных данных в эксперименте [Текст] / В. И. Плескунин, Е. Д. Воронина. – Л. : Издательство Ленинградского университета, 1979. – 232 с.

**Котугин Е. А.,** соискатель, E-mail: [kotygin2@mail.ru](mailto:kotygin2@mail.ru), Россия, Алтайский край, г. Барнаул, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий».