

# МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПИВОВАРЕННОГО ЯЧМЕНЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСТРАКТИВНОСТИ СОЛОДА ПЕРЕМЕННЫМ НЕОДНОРОДНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

В. А. Пашинский<sup>1)</sup>, О. В. Бондарчук<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь, pashynski@mail.ru

<sup>2)</sup> Белорусский государственный аграрный университет, пр-т Независимости, 99, 220012, г. Минск, Беларусь, guloks82@mail.ru

Представлены результаты оценки обработки пивоваренного ячменя неоднородным электрическим полем высокой напряженности, которая существенным образом влияют на экстрактивность солода.

**Ключевые слова:** пивоваренный ячмень; напряженность электрического поля; солод; влагопоглощение; сушка; энергоемкость сушки; экстракт солода.

## MODEL OF MALTING BARLEY TREATMENT PROCESS TO INCREASE MALT EXTRACTIVITY BY AN ALTERNATING INHOMOGENEOUS ELECTRIC FIELD

Vasil Pashynski<sup>1)</sup>, Oksana Bondarchuk<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Dolgobrodskaya str., 23/1, 220070, Minsk, Belarus, Pashynski@mail.ru

<sup>2)</sup> Belarus State Agrarian University, Independence Avenue, 220012, Minsk, Belarus, guloks82@mail.ru

The results of evaluation of malting barley treatment with an inhomogeneous electric field of high intensity, which significantly affect the extractivity of malt, are presented.

**Keywords:** malting barley; electric field strength; malt; moisture absorption; drying; drying energy intensity; malt extract.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-2-181-186>

Результаты оценки размера пор пивоваренного ячменя не обработанного и обработанного неоднородным электрическим полем высокой напряженности, которые существенным образом влияют на количество влаги впитываемой в процессе его замачивания и, в конечном счете, влияют на расход энергоресурсов при его сушке и повышение экстрактивности при получении солода доложены на Сахаровских чтениях 2024 года [1].

Для установления взаимного влияния определяющих факторов, получения математической модели процесса обработки пивоваренного ячменя переменным неоднородным электрическим полем для повышения экстрактивности солода разработана методика многофакторного эксперимента, представленная в литературе [2].

При проведении экспериментальных исследований было определено влияние ряда влияющих факторов на содержание массовой доли экстракта в сухом веществе солода. Из группы влияющих факторов, после ранжирования, для проведения опытов выбраны следующие параметры: X1 – напряженность электрического поля, МВ/м, В; X2 – время обработки, с; X3 – число обработок, шт. Напряженность электрического поля определяет скорость ввода электромагнитной энергии в обрабатываемый материал и в значительной степени влияет на степень преобразования вещества зерна (расщепление крахмала).

Функцией отклика является содержание массовой доли экстракта в сухом веществе солода.

Принятые в исследованиях уровни и интервалы варьирования воздействующих факторов, на основе априорного ранжирования, указаны в табл. 1.

Для получения математической модели процесса в виде полинома второй степени был реализован некомпозиционный план второго порядка Бокса и Бенкина. Этот план представляет собой выборки строк из полного многофакторного эксперимента. План полного многофакторного эксперимента с дополнительным опытом в центре рассчитывается по формуле

$$N_k = N_{k0} + 1 = 2^k + 1 + 2k, \quad (1)$$

где  $k$  – число факторов.

При построении плана полный перебор всех возможных комбинаций уровней достигается следующим образом: для первого фактора уровни варьирования чередуются; для второго фактора чередуются пары одинаковых уровней; для третьего чередуются четыре одинаковых уровня и т.д. Кроме того, добавляется еще один опыт в центре, в котором значения факторов равны 0.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования воздействующих факторов

Факторы	Единицы измерения	Обозначение		Интервалы варьирования	Натуральные уровни факторов		
		Натуральное	Кодированное		Нижний -1	Основной 0	Верхний +1
Напряженность	МВ/м	Е	X1	0,3	0,9	1,2	1,5
Время обработки	с	t	X2	2	1	3	5
Число обработок	шт	n	X3	1	1	2	3

По результатам опытов, согласно, представленного плана получена математическая модель, характеризующая зависимость  $y$  (функция отклика – массовая доля экстракта в сухом веществе солода) от исследуемых факторов процесса. Эта модель представлена в виде полинома второй степени:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2, \quad (2)$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$  – коэффициенты регрессии, определяющие степень влияния фактора или их сочетаний на величину функции отклика;

$x_1, x_2, x_3$  – кодированные факторы.

Кодированные значения факторов связаны с натуральными следующими зависимостями:

$$X_r = \frac{x_r - x_0}{\Delta x_r}, \quad x_r = x_{r0} + \Delta x_r X_r; \quad (3)$$

$$x_{r0} = \frac{x_{r\max} + x_{r\min}}{2}, \quad \Delta x_r = \frac{x_{r\max} - x_{r\min}}{2}. \quad (4)$$

Согласно матрице планирования табл. 2, была проведена серия опытов. Для уменьшения влияния неуправляемых факторов эксперимент проводим в лабораторных условиях в минисолодовне. Так как общее число опытов  $N_2 = 15$  и дублей  $n = 4$ , подготовили 60 партий пивоваренного ячменя навеской 1000 г. Каждую партию обрабатывали в переменном неоднородном электрическом поле высокой напряженности согласно матрице планирования. Все остальные факторы (частота тока, влажность пивоваренного ячменя, время отлежки между электрообработкой и проращиванием, температура) поддерживали на одинаковых уровнях, обусловленных показателями качества пивоваренного ячменя и технологией производства солода.

Звездные точки определяются выражением [3]:

$$\alpha = \sqrt{\left(\sqrt{N_{k0} \cdot N_k} - \frac{N_{k0}}{2}\right)} = 1,2154; \quad (5)$$

$$\lambda_3 = \sqrt{\frac{N_{k0}}{N_k}} = 0,73. \quad (6)$$

Следовательно:

$$\alpha^2 - \lambda = 0,7469. \quad (7)$$

Формулы для расчета коэффициента уравнения регрессии и их дисперсий имеют вид [3]:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} X_{0j} \bar{Y}_j}{\sum_{j=1}^{N_k} X_{0j}^2}; \quad (8)$$

$$b_r = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} X_{rj} \bar{Y}_j}{\sum_{j=1}^{N_k} X_{rj}^2}; \quad r=1, \dots, k; \quad (9)$$

$$b_{rs} = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} (X_{rj} X_{sj}) \bar{Y}_j}{\sum_{j=1}^{N_k} (X_{rj} X_{sj})^2}; \quad r>s; \quad r,s=1, \dots, k; \quad (10)$$

$$b_{rr} = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} (X_{rj}^2 - \lambda_k) \bar{Y}_j}{\sum_{j=1}^{N_k} (X_{rj}^2 - \lambda_k)^2}; \quad r=1, \dots, k. \quad (11)$$

Предварительная обработка экспериментальных данных представлены в табл. 4.

Выборочные параметры:

– выборочное среднее в каждом опыте

$$\bar{Y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{ji}}{n} \quad j=1, \dots, N_k; \quad (12)$$

$$\bar{Y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^4 Y_{1i}}{4} = \frac{77,4 + 77,0 + 76,71 + 76,9}{4} = 77,0.$$

– выборочную дисперсию в каждом опыте

$$S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ji} - \bar{Y}_j)^2}{n-1}; \quad j=1, \dots, N_k; \quad (13)$$

$$S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^4 (Y_{1i} - \bar{Y}_1)^2}{4-1} = \frac{(77,4 - 77,0)^2 + (77,0 - 77,0)^2 + (76,71 - 77,0)^2 + (76,9 - 77,0)^2}{3} = 0,085.$$

Таблица 2

**Матрица планирования для построения трехфакторного ортогонального уравнения регрессии второго порядка**

Место плана	№ опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1^2 - \lambda_2$	$X_2^2 - \lambda_2$	$X_3^2 - \lambda_2$	$Y$
Ядро плана	1	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	77,0
	2	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	78,6
	3	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	77,7
	4	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	79,0
	5	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	79,0
	6	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	79,3
	7	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	78,1
	8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	77,7
Звездочки плана	9	+	-1,215	0	0	0	0	0	0,7469	0	0	78,7
	10	+	+1,215	0	0	0	0	0	0,7469	0	0	79,1
	11	+	0	-1,215	0	0	0	0	0	0,7469	0	79,2
	12	+	0	+1,215	0	0	0	0	0	0,7469	0	79,1
	13	+	0	0	-1,215	0	0	0	0	0	0,7469	79,0
	14	+	0	0	+1,215	0	0	0	0	0	0,7469	79,2
Центр плана	15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79,85

Расчетные данные представим в табл. 3.

Произведена проверка выборочных дисперсий на однородность по критерию Кохрена. Все выборочные дисперсии однородны, так как выполняется условие:

$$G_s = 0,185 < 0,276 = G_{3;15;0,95} \quad (14)$$

Проверка коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента показала их значимость. Проверка многофакторного ортогонального уравнения регрессии на адекватность производили по критерию Фишера. При построении уравнения регрессии определяли дисперсию воспроизводимости, дисперсию адекватности и их числа степеней свободы. Установлено, что трехфакторное ортогональное уравнение регрессии второго порядка адекватно.

Таблица 3

Результаты расчетов предварительной обработки экспериментальных данных

N	$Y_{j1}$	$Y_{j2}$	$Y_{j3}$	$Y_{j4}$	$Y_{cpj}$	$S^2_j$
1	77,4	77	76,71	76,90	77,00	0,085
2	78,5	78,8	78,3	78,8	78,60	0,060
3	77,5	77,3	77,6	78,4	77,70	0,233
4	78,6	79,1	79,1	79,2	79,00	0,073
5	78,7	79,1	79	79,2	79,00	0,047
6	78,8	79,5	79,3	79,6	79,30	0,127
7	77,5	78,18	78,4	78,3	78,10	0,165
8	77,5	77,3	77,6	78,4	77,70	0,233
9	79,7	79,9	79,1	80,68	79,85	0,425
10	78,1	77,9	78,7	78,5	78,30	0,133
11	78,7	79,3	79,4	79,2	79,15	0,097
12	78,6	79,3	79,3	79,2	79,10	0,113
13	78,7	79,3	79,2	79,2	79,10	0,073
14	78,7	79,1	78,6	79,6	79,00	0,207
15	78,5	79,3	79,4	79,6	79,20	0,233
					$\Sigma S^2_j$	2,31

Находим оптимальные значения факторов  $X_{ionm}$ . При котором параметр оптимизации достигает  $Y_{max}$  и рассчитаем абсолютную погрешность его прогнозирования  $\Delta Y_{max}$

Оптимальное значение нормированных факторов или результаты оптимизации:

$$X_{1onm} = -\frac{b_1}{2 \cdot b_{11}} = -\frac{0,3}{2 \cdot (-0,5342)} = 0,2808 \quad ; \quad x_{1onm} = x_{10} + X_{1onm} \cdot \Delta x_1 = 1,284 MB / M ;$$

$$X_{2onm} = -\frac{b_2}{2 \cdot b_{22}} = -\frac{-0,1389}{2 \cdot (-0,3649)} = -0,19 \quad ; \quad x_{2onm} = x_{20} + X_{2onm} \cdot \Delta x_2 = 2,62 \approx 3c ;$$

$$X_{3onm} = -\frac{b_3}{2 \cdot b_{33}} = -\frac{0,1865}{2 \cdot (-0,3988)} = 0,2339 \quad ; \quad x_{3onm} = x_{30} + X_{3onm} \cdot \Delta x_3 = 2,6 \approx 3 ;$$

$$Y_{max} = 78,7 + 0,3 \cdot X_{1onm} - 0,1389 \cdot X_{2onm} + 0,1865 \cdot X_{3onm} - 0,375 \cdot X_{1onm} \cdot X_{3onm} - 0,45 \cdot X_{2onm} \cdot X_{3onm} - 0,5342 \cdot (X_{1onm}^2 - 2/3) - 0,3649 \cdot (X_{2onm}^2 - 2/3) - 0,3988 \cdot (X_{3onm}^2 - 2/3) = 79,64\%.$$

Полученное уравнение регрессии адекватно и его можно использовать как интерполяционную формулу для вычисления экстрактивности солода при различных сочетаниях и значениях в указанных пределах определяющих факторов.

Предельная абсолютная погрешность  $\Delta Y(X_1, \dots, X_k)$  прогнозирования параметра  $Y(X_1, \dots, X_k)$  рассчитанного по адекватному трехфакторному ортогональному уравнению регрессии второго порядка, при условии ортогональности факторов:

$$\Delta Y(X_1, \dots, X_k) = t_{f,p} \sqrt{S^2(b_0) + S^2(b_1) \sum_{r=1}^k X_r^2 + S^2(b_{12}) \sum_{r=1}^k (X_r X_s)^2 + S^2(b_{11}) \sum_{r=1}^k (X_r^2 - \lambda_k)^2}, \quad (16)$$

где  $t_{f,p}$  – табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы  $(n-1) = 45$  и доверительной вероятности 0,95 [3].

$$\Delta Y = 2,014 \cdot \sqrt{(0,0506)^2 + 0,0592^2 \cdot (0,2808^2 + (-0,19)^2 + 0,2339^2) + 0,0693^2 \cdot ((-0,17 \cdot 0,2339)^2 + 0,2339 \cdot 0,2808^2) + 0,0938^2 \cdot ((0,2808^2 - 2/3)^2 + ((-0,19)^2 - 2/3)^2 + (0,2339^2 - 2/3)^2)} = \pm 0,1.$$

Математическая обработка и анализ многофакторного эксперимента позволили выявить факторы, влияющие на экстрактивность солода, а также получить их математические выражения в зависимости от значений характеристик технологических факторов.

Максимальная экстрактивность солода  $Y_{\max} = 79,64 \pm 0,1$  % может быть достигнута при напряженности электрического поля  $X1_{\text{опт}} \approx 1,284$  МВ/м, экспозиции  $X2_{\text{опт}} \approx 3$  с и кратности обработки  $X3_{\text{опт}} \approx 3$  раза.

### Библиографические ссылки

1. *Пашинский, В. А.* Повышение качества солода обработкой пивоваренного ячменя в неоднородном электрическом поле / В. А. Пашинский, О. В. Бондарчук. Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века: материалы 24-й международной научной конференции, 23–24 мая 2024 г., г. Минск, Республика Беларусь : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та; редкол. : А. Н. Батян [и др.] ; под ред. д-ра б. н., доцента О. И. Родькина, к. т. н., доцента М. Г. Герменчук. Минск : ИВЦ Минфина, 2024. Ч. 2. 208–211 с.
2. *Спиридонов А. А.* Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов / А. А. Спиридонов, Н. Г. Васильев. Свердловск : УПИ им. Кирова, 1975. 140 с.
3. *Леонов, А. Н.* Основы научных исследований в примерах и задачах : учебно-методическое пособие / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис; под ред. А. Н. Леонова. Минск : БГАТУ, 2013. 136с.