

ЗБЕРІГАННЯ ТА ПЕРЕРОБКА С.-Г. ПРОДУКЦІЇ

УДК 631.17:633.16
© 2016

А.І. ХАРИТОНОВА,
аспірант

В.О. ОЛЕКСІЄНКО,
кандидат технічних наук

Таврійський державний
агротехнологічний університет,
Україна
E-mail: kharitonova-anutka@mail.ru
м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОРОЩУВАННЯ ЗЕРНА ЯЧМЕНЮ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПИВА

Розглядається моделювання процесу пророщування ячменю, побудоване на основі повного факторного експерименту другого порядку, що дозволяє визначити раціональні параметри, які впливають на збільшення довжини паростків. Для проведення експерименту взято найбільш впливові фактори – доза випромінювання іонізації повітря, товщина шару зерна та вологість солоду.

Ключові слова: доза, якість, товщина шару, вологість солоду, повний факторний експеримент, критерій.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку пивоварної промисловості існує необхідність в інтенсифікації процесу солодування. Відомо чимало способів, за допомогою яких можна стимулювати пророщування зерен. Для пояснення явищ стимуляції створюються нові теорії щодо зменшення часу та витрат на пророщування, зокрема обробка насіння ультразвуковим, лазерним випромінюванням, некогерентним червоним світлом тощо [4, 6, 7].

За даними досліджень, найбільш перспективними серед способів пророщування зерна є використання:

- ультразвуку, який здатний стимулювати життєві сили, закладені природою в кожну сільськогосподарську культуру;
- лазерного опромінення різної інтенсивності;
- некогерентного червоного світла.

Ці способи докладно розроблені в дослідженнях Г.К. Давидова, В.І. Букагого, В.П. Карманчикова, І.С. Ноздрина та ін.

Ефективним вважають і вплив негативно зарядженого іонізуючого повітря на

зерно [9]. Іонізація покращує схожість насіння, поліпшує зростання та врожайність рослин.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень моделювання процесу пророщування ячменю для виробництва пива наведені в роботах учених О.М. Береки, І.Ф. Бородіна, А.В. Ареф'єва, В.В. Кириченко, В.К. Андрійчука та ін.

Мета нашого дослідження полягає в моделюванні криволінійної моделі другого порядку для прогнозу довжини паростків ячменю залежно від дози іонізації повітря, товщини шару зерна і вологості солоду, що дає можливість знайти оптимальні значення факторів.

У процесі дослідження використано критерії Кохрена, Стьюдента і Фішера.

Результати дослідження та їх обговорення. Опис поверхні відгуку поліномами першого порядку часто виявляється недостатнім. У багатьох випадках задовільна апроксимація може бути досягнута, якщо скористатися поліномом другого порядку (1), а також для визначення оптимального

ЗБЕРІГАННЯ ТА ПЕРЕРОБКА С.-Г. ПРОДУКЦІЇ

Моделювання процесу пророщування зерна ячменю
при виробництві пива

значення збільшення довжини паростків ячменя (y).

Розглянемо поліном виду

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j,i=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

Під час проведення експерименту аналізували фактори:

- дозу випромінювання іонізації повітря;
- товщину шару зерна;
- вологість солоду.

Повний факторний експеримент впливу факторів на збільшення довжини паростків ячменю (y) полягав у варіюванні трьох факторів на верхньому (+) і нижньому (-) рівнях, визначенні математичної моделі другого порядку, виходячи з технологічних міркувань (таблиця).

У результаті досліджень отримана криволінійна модель другого порядку:

$$y_i = B_0 + B_1 z_1 + B_2 z_2 + B_3 z_3 + B_{12} z_1 z_2 + B_{23} z_2 z_3 + B_{31} z_1 z_3 + B_{11} z_1^2 + B_{22} z_2^2 + B_{33} z_3^2 \quad (2)$$

На основі стандартної матриці складаємо план відсіювання експерименту [10]. Для усунення випадкової помилки експерименту виміри по кожному досліді проводили тричі.

Для зазначених факторів перевіряли та аналізували [2, 3]:

а) критерій Кохрена – перевірка дисперсії на однорідність, тим самим усунення дослідів, заміри в яких значно відрізнялися від інших для результируючої ознаки;

б) критерій Стюдента – перевірка коефіцієнтів на значність;

в) критерій Фішера – перевірка моделі на адекватність або придатність.

Вихідна розширена матриця x , а також матриця відгуків y мають такий вигляд:

$$x := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1,215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,476 & 0 & 0 \\ 1 & 1,215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,476 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1,215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,476 & 0 \\ 1 & 0 & 1,215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,476 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1,215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,476 \\ 1 & 0 & 0 & 1,215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,476 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} 2,00 & 2,05 & 1,98 \\ 2,08 & 2,12 & 2,14 \\ 2,16 & 2,14 & 2,18 \\ 1,97 & 2,01 & 2,00 \\ 2,08 & 2,09 & 2,07 \\ 2,07 & 2,1 & 2,15 \\ 2,26 & 2,28 & 2,24 \\ 2,27 & 2,28 & 2,26 \\ 2,11 & 2,17 & 2,2 \\ 2,20 & 2,16 & 2,18 \\ 1,86 & 1,9 & 1,92 \\ 2,12 & 2,14 & 2,1 \\ 1,94 & 1,92 & 2,01 \\ 2,02 & 1,98 & 2,01 \\ 2,12 & 2,14 & 2 \end{pmatrix}$$

Розрахункове й табличне значення за критерієм Кохрена відповідно однакові:

Рівні факторів та інтервали варіювання для планування експерименту

Рівень варіювання	Фактор					
	доза випромінювання іонізації повітря, іонів/см ³	код	товщина шару зерна, см	код	вологість солоду, %	код
Кодове позначення	x_1		x_2		x_3	
Нульовий	$5,05 \cdot 10^4$	0	2,5	0	45	0
Нижній	10^3	-	2	-	43	-
Верхній	10^5	+	3	+	47	+
Інтервал варіювання	$4,95 \cdot 10^4$		0,5		2	

ЗБЕРІГАННЯ ТА ПЕРЕРОБКА С.-Г. ПРОДУКЦІЇ

*Моделювання процесу пророщування зерна ячменю
при виробництві пива*

$G_p = 0,261 < 0,7341$; (G_m ($\alpha = 0,05$; $2,16$) = $0,7341$), тобто відтворюваність дослідів висока, дисперсії однорідні ($S^2 = 0,000058$).

За критерієм Стьюдента коефіцієнти поліноміальної регресії мають вигляд:

	0
0	2,028
1	$2,161 \cdot 10^{-4}$
2	-0,059
3	-0,045
4	-0,036
5	0,013
6	0,039
7	0,11
8	$-1,057 \cdot 10^{-3}$
9	-0,019

	0
0	266,408
1	0,028
2	-7,782
3	-5,959
4	-4,708
5	1,642
6	5,146
7	14,399
8	-0,139
9	-2,512

Якщо $|tb| < t_{kp}$ ($t_{kp} = 1,697$), то коефіцієнти моделі незначущі й у рівнянні моделі відсутні. Для обчислених значень коефіцієнти b_{11} , b_{13} незначимі й у моделі не присутні.

Модель другого порядку має вигляд:

$$y_i = 2,028 - 0,059x_2 - 0,045x_3 - 0,036x_1x_2 + 0,039x_2x_3 + 0,11x_1^2 - 0,0011x_2^2 - 0,019x_3^2. \quad (3)$$

За критерієм Фішера $F_p < F_{kp}$ ($0,00313 < 2,334$) – модель адекватна дослідним даним.

Середні значення експериментальних даних і теоретичні значення відгуку представлені матрицями:

	0
0	2,031
1	2,077
2	2,143
3	2,045
4	2,017
5	2,115
6	2,285
7	2,239
8	2,19
9	2,19
10	1,956
11	2,1
12	1,945
13	2,055
14	2,028

	0
0	2,01
1	2,113
2	2,16
3	1,193
4	2,08
5	2,107
6	2,26
7	2,27
8	2,16
9	2,18
10	1,893
11	2,12
12	1,957
13	2,003
14	2,087

Розкоровану лінійну модель збільшення довжини паростків ячменю можна записати як:

$$y_i = 2,028 - 0,059x_2 - 0,045x_3 - 0,036x_1x_2 + 0,039x_2x_3 + 0,11x_1^2 - 0,0011x_2^2 - 0,019x_3^2.$$

Таким чином, на підставі проведеного експерименту отримані моделі першого й другого порядків, що дозволяють прогнозувати швидкість збільшення паростків ячменю:

1-й порядок, лінійна залежність	$y_i = 11,457 - 0,000068x_1 - 3,2397x_2 - 0,20635x_3 + 0,000027 + 0,0000016x_1x_3 + 0,0715x_2x_3 - 6,404 \times 10^{-7}x_1x_2x_3$
2-й порядок, нелінійна залежність	$y_i = 2,028 - 0,059x_2 - 0,045x_3 - 0,036x_1x_2 + 0,039x_2x_3 + 0,11x_1^2 - 0,0011x_2^2 - 0,019x_3^2$

Використання рівняння регресії другого порядку дозволяє визначити координати точки оптимуму функції відгуку [5]. Для визначення координат точок екстремуму проводять обчислення першої похідної по кожному зі значень факторів. Корені отриманої системи рівнянь являють собою координати точок екстремуму досліджуваної функції:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = 8,9787 \cdot 10^{-11}x_1 - 0,0000015x_2 - 8,9787 \cdot 10^{-7} = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = -0,0000015x_1 - 0,0088x_2 + 0,039x_3 - 1,7775 = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} = 0,039x_2 - 0,0095x_3 + 0,3075 = 0. \end{cases}$$

Отримане рішення вказує, що при значеннях:

$x_1 = 76880$ гем – доза іонізації повітря, іонів/см³;

$x_2 = 3$ см – товщина шару зерна (S);

$x_3 = 43$ % – вологість солоду (F); мінімальна довжина збільшення паростків ячменю складатиме 1,98, тобто для нашого експерименту це неприпустиме поєднання чинників.

Для побудови графіків значення одного з факторів фіксується на нульовому рівні.

При $z_1 = 0$ довжина збільшення паростків ячменю залежить від товщини шару зерна і вологості солоду:

ЗБЕРІГАННЯ ТА ПЕРЕРОБКА С.-Г. ПРОДУКЦІЇ

*Моделювання процесу пророщування зерна ячменю
при виробництві пива*

$$y_i = -1,85x_2 + 0,308x_3 - 0,004x_2^2 - 0,00475x_3^2 + 0,039x_2x_3 - 1,923.$$

Для побудованої поверхні і ліній рівнів можна відзначити, що найбільше значення припадає на значення: $x_2 = 2$ см – товщина

шару зерна (S); $x_3 = 43$ – вологість солоду (рис. 1, 2).

Найбільше значення функції маємо при значеннях факторів:

$x_1 = 100000$ гет – доза іонізації повітря, іонів/см³; $x_2 = 2$ см – товщина шару зерна; $x_3 = 43$ – вологість солоду.

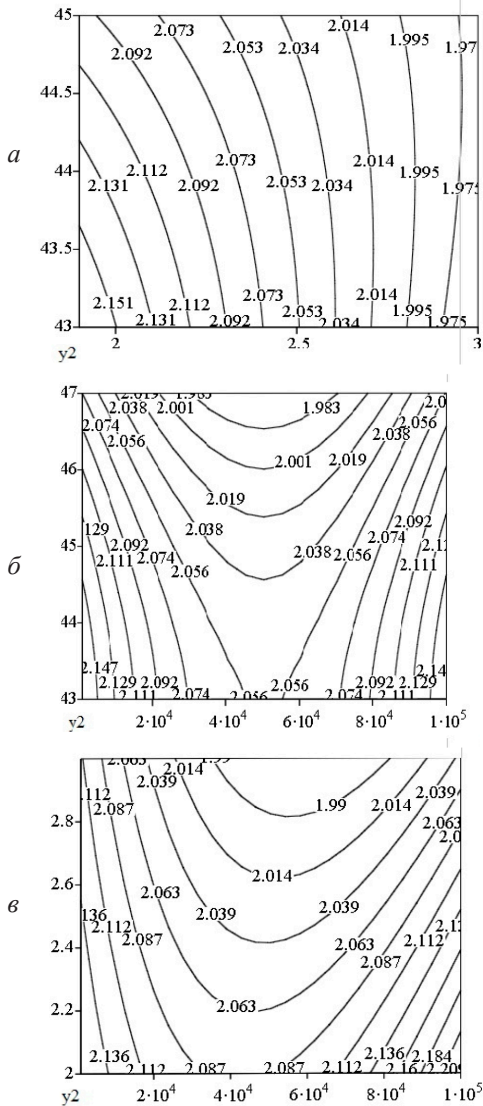


Рис. 1. Лінії рівнів функції відгуків за фіксованого:
а) $x_3 = 0$; б) $x_2 = 2,5$; в) $x_3 = 43$

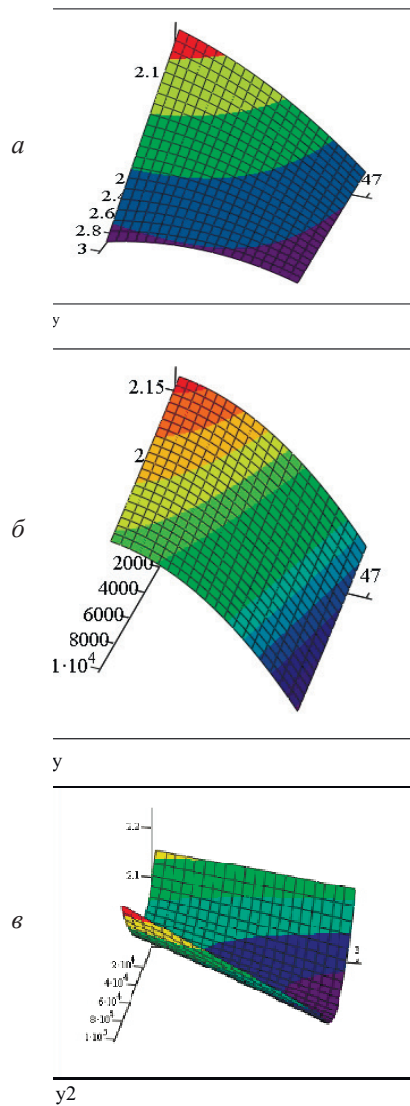


Рис. 2. Поверхня функції відгуків за фіксованого:
а) $x_1 = 50500$; б) $x_2 = 2,5$; в) $x_3 = 43$

ЗБЕРІГАННЯ ТА ПЕРЕРобКА С.-Г. ПРОДУКЦІЇ

Моделювання процесу пророщування зерна ячменю при виробництві пива

Для $z_2 = 0$ довжина збільшення паростків ячменю (y) залежить від факторів: x_1 – доза іонізації повітря; X_3 – вологість солоду:

$$y_i = -0,0000045x_1 + 0,405x_3 + 4,489 \cdot 10^{-11}x_1^2 - 0,00475x_3^2 - 6,464.$$

Підкреслимо, що дійсно найбільше значення досягається в крайніх точках і $y(100000, 2, 43) = 2,298$. Результати відрізняються незначно один від одного: $y(1000, 2, 43) = 2,225$.

У разі залежності довжини збільшення паростків ячменю від факторів x_1 – доза випромінювання іонізації повітря і x_2 – товщина шару зерна має вигляд:

$$y_i = -8,979 \cdot 10^{-7}x_1 - 0,0225x_2 - 0,145 \times 10^{-5}x_1x_2 + 4,4893 \cdot 10^{-11}x_1^2 - 0,0044x_2^2 + 2,226.$$

Як видно за графіком ліній рівнів, перевага віддається значенню $y(100000, 2, 43) = 2,298$.

На підставі отриманого полінома другого порядку можна представити графіки залежності по кожному з факторів.

Залежність збільшення довжини паростків ячменю від дози іонізації повітря запишемо як

$$y(x_1) = 4,4893 \cdot 10^{-11} \cdot x_1^2 - 0,4523 \times 10^{-6}x_1 + 2,1426.$$

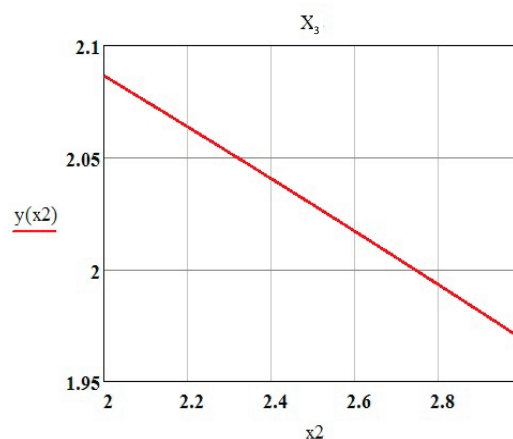
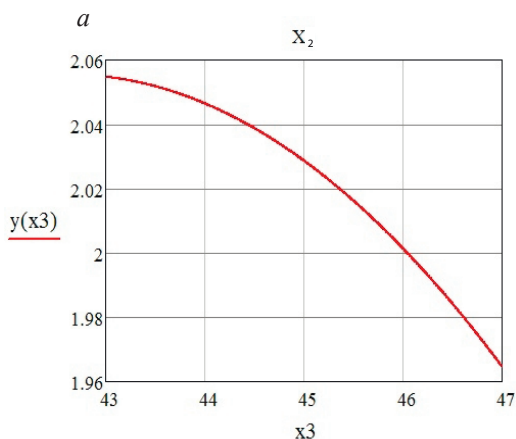
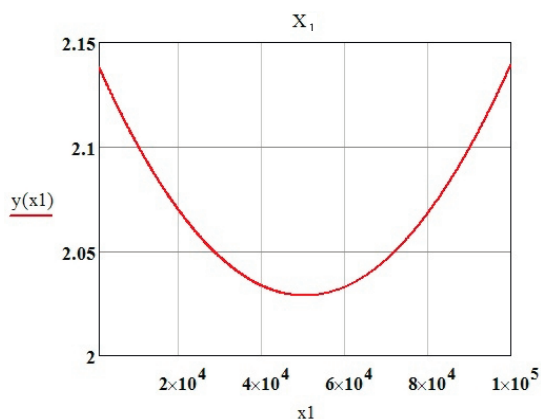


Рис. 3.
Графік залежності збільшення довжини паростків ячменю:
a – від дози іонізації повітря;
б – від товщини шару зерна та від вологості солоду

На рис. 3,а бачимо, як впливає доза іонізації повітря на збільшення довжини паростків ячменю. Найбільші значення припадають на крайні значення (мінімальне при $x_1 = 76880$):

$$\begin{aligned}y(1000, 3, 43) &= 2,101; \\y(1000, 3, 47) &= 2,089; \\y(100000, 3, 47) &= 2,018; \\y(100000, 3, 43) &= 2,03.\end{aligned}$$

Отримана найбільша довжина збільшення паростків ячменю при значеннях:

$$x_1 = 100000; x_2 = 2; x_3 = 43; y = 2,298;$$

$$y(x_2) = -0,0044 \cdot x_2^2 - 0,0957x_2 + 2,2956.$$

Графік залежності збільшення довжини паростків ячменю від товщини шару зерна доводить припущення, що найбільші значення припадають на $x_2 = 2$ (рис. 3,б).

Залежність збільшення довжини паростків ячменю від товщини вологості солоду запишемо рівнянням

$$y(x_3) = -0,0048 \cdot x_3^2 + 0,405x_3 - 6,5776.$$

Графік залежності збільшення довжини паростків ячменю від величини вологості солоду підтверджує, що найбільші значення припадають на $x_3 = 43$ (максимально при $x_2 = 47$).

Таким чином, на основі розробленої моделі другого порядку, побудованої в результаті виконання повного факторного експерименту, встановлено раціональні значення основних параметрів процесу пророщування ячменю з використанням іонізованого середовища. Рекомендовані значення для факторів:

$x_1 = 100000$ гет – доза іонізації, іонів/см³ повітря;

$x_2 = 2$ см – товщина шару зерна;

$x_3 = 43$ % – вологість солоду; збільшення довжини паростків ячменю становить 2,198.

Бібліографія

1. Бондарь А.Г. Планирование эксперимента в химической технологии / Бондарь А.Г., Статюха Г.А. – К.: Вища школа, 1976. – 180 с.
2. Доспехов В.А., Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Доспехов В.А., Веденяпин Г.В. – М.: Колос, 1973. – 199 с.
3. Налимов В.В. Логические основания планирования эксперимента / В.В. Налимов, Т.И. Голикова. – М.: Металлургия, 1976. – 128 с.
4. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
5. Хемди А. Введение в исследование операций / А. Хемди. – М.; К., 2005. – 901 с.
6. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Ч. Хикс. – М.: Мир, 1976. – 406 с.
7. Бадретдинов Б.Ф. Электротехнология и урожайность сельскохозяйственных культур / Б.Ф. Бадретдинов, А.А. Тюр, Я.М. Каюмов // Электрификация сельского хозяйства. – 2000. – Вып. 2. – С. 90–92.
8. Вітчизняний та світові досвід України у виробництві пива / В.А. Домарецький, А.М. Куц, М.В. Карпуніна, І.В. Мельник // Харчова промисловість. – К.: НУХТ, 2012. – С. 6–9.
9. Харитонов А.І. Лінійна модель процесу пророщування зерен ячменю / А.І. Харитонов, В.О. Олексієнко, І.О. Лісовий // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016. – Вип. 16, т. 1. – С. 45–50.
10. Харитонов А.І. Розробка технологій прискореного дозрівання солоду / А.І. Харитонов, В.О. Олексієнко // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – Вінниця: ВНАУ, 2015. – С. 73–75.
11. Шеффе Г. Дисперсионный анализ / Г. Шеффе. – М.: Наука, 1980. – 512 с.

Рецензенти – доктори технічних наук, професори
С.С. Тищенко, Ю.О. Чурсінов