

ВЛИЯНИЕ АЭРОИОННОЙ АКТИВАЦИИ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДРОЖЖЕЙ *SACCHAROMYCES CEREVISIAE*

М.В. Янко,

ст. преподаватель каф. практической подготовки студентов БГАТУ

А.Н. Кудинович,

аспирант каф. энергетики БГАТУ

Е.М. Заяц,

профессор каф. энергетики БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В статье описано влияние аэроионной активации на продуктивность и качественные показатели хлебопекарных дрожжей. Показано, что обработка аэроионами увеличивает их концентрацию, подъемную силу, прирост биомассы и продуктивность. Проверено соответствие аналитической модели экспериментальным данным. Определены технологические параметры аэроионной активации дрожжей.

Ключевые слова: аэроионы, количество электричества, обработка, хлебопекарные дрожжи, продуктивность.

The article describes the effect of aeroion activation on productivity and quality parameters of baker's yeast. It is shown that treatment with aeroions increases their concentration, lifting power, biomass growth and productivity. The conformity of the analytical model to the experimental data has been verified. The technological parameters of aeroion activation of yeast have been determined.

Key words: air ions, amount of electricity, processing, baker's yeast, productivity.

Введение

Аэроионная активация технологических процессов основана на изменении химического состава, состояния, свойств обрабатываемого вещества под влиянием молекул воздуха или иного газа, заряженных в электрическом поле. Это новое направление использования электрической энергии в электротехнологических процессах.

В работе [1] теоретически описано влияние отрицательно заряженных молекул воздуха на питательную среду и хлебопекарные дрожжи. Механизм влияния основан на изменении ионного состава питательной среды, электрического заряда поверхности дрожжевой клетки, диффузии ионов через мембрану клетки, что в конечном счете увеличивает прирост дрожжей и положительно влияет на качественные показатели.

По мнению группы ученых ФГАОУ ВО «НИУ ИТМО» под руководством Мелединой Т.В. [2], электрический заряд поверхности дрожжевой клетки, характеризующий дзета-потенциалом или электрофоретической подвижностью, обусловлен строением клеточной мембраны, концентрацией поверхностного фосфора и азота, продолжительностью выращивания, кислотностью, аэрацией и внесением свободного фосфора в культуральную среду. Авторы делают вывод о том, что «путем варьирования и подбора упомянутых факторов, возможно достичь увеличения отрицательного заряда

клеточной поверхности дрожжей» и тем самым активировать их развитие.

Ученые Chen-Guang Liu, Chuang Xue, Yen-Han Lin, Feng-Wu Bai Даляньского технологического и Шанхайского университетов установили, что биореактор, оснащенный электродами, может управлять окислительно-восстановительным потенциалом (ОВП) ферментационной системы за счет потока электронов и энергии электрического тока [3]. Учеными Na Byung-Kwan, Hwang Tae-Sik, Lee Sung-Hun, Ahn Dae-Hee, Park Doo-Hyun университетов Сокён и Мён Джи исследованы различные микробные системы, в частности *Saccharomyces cerevisiae* (*S. cerevisiae*), показана возможность увеличения продуктивности дрожжей до 30 % [4].

Наши исследования [5] подтверждают влияние аэроионов на питательную среду, в том числе изменение ОВП с 146 до 162 мВ, увеличение концентрации кислорода в ней с 0,26 до 0,45 мг/л. Продуктивность дрожжей *S. cerevisiae* (штамм 200) составляет 350...370 % [6, 7], но ее можно увеличить на 13...20 % [7, 8].

Цель настоящей работы – оценить влияние аэроионов на показатели *S. cerevisiae*, определить технологические параметры аэроионной активации продуктивности хлебопекарных дрожжей и проверить соответствие аналитической модели экспериментальным данным.

Объект исследований – клетка хлебопекарных дрожжей в питательной среде, аэрированной ионами. Предмет исследований – изменение параметров характеристик дрожжей под влиянием аэроионов.

Основная часть

Материалы и методы исследований

Исследовались хлебопекарные дрожжи *S. cerevisiae* (штамм 200) чистой культуры, со сроком хранения в соответствующих условиях не более 10 дней. Согласно технологической карте ОАО «Дрожжевой комбинат» (г. Минск), дрожжи выращивали на питательной среде, состоящей из свекловичной мелассы, растворов сульфата аммония, ортофосфорной кислоты и аммиачной воды.

Изучалось влияние удельного количества электричества, напряженности электрического поля между коронирующим и осадительным электродами, времени и цикличности обработок на продуктивность, концентрацию биомассы и подъемную силу хлебопекарных дрожжей.

Исследования выполнялись на экспериментальной установке аэроионного активатора, изготовленной в Белорусском государственном аграрном техническом университете (рис. 1).

Очищенный воздух подавали в ферментер для аэрации среды и в разрядную камеру 17, где его ионизировали с помощью коронного разряда между коронирующим 16 и осадительным 12 электродами, размещенными на расстоянии l друг от друга, подключенными к источнику питания. Ионизированные молекулы воздуха 15 пропускали через камеру аэроионной активации 11, в которой они отрицательно заряжали питательную среду и дрожжи. Электрод 14 осаждал на свою поверхность положительно заряженные ионы и отталкивал отрицательные [9].

Обрабатываемую среду 7 и дрожжи подавали циркуляционным насосом из ферментера 5 по трубке 3 в оросительное устройство 8, в котором она с помощью решетки 9 преобразовывалась в капли 10, которые под действием сил гравитации пролетали расстояние b (рис. 1б) в камере аэроионной активации 11 через ионизированные молекулы воздуха 15, получали заряд и возвращались в ферментер 5 [9].

Температуру среды с дрожжами в ферментере поддерживали измеритель-регулятором в диапазоне 30,5...31,5 °С. Окислительно-восстановительный потенциал и кислотность среды контролировали Eh-метром. Питательный раствор для кормления

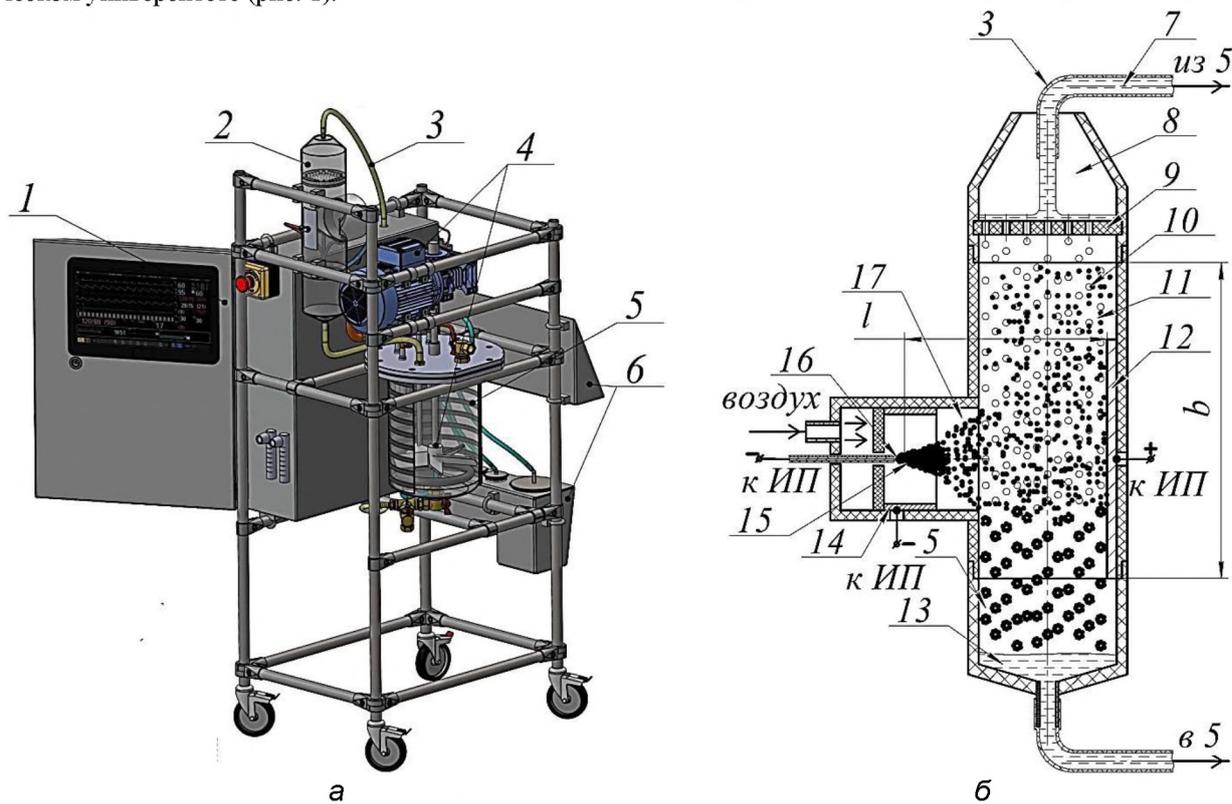


Рисунок 1. Экспериментальная установка аэроионного активатора:

а – внешний вид; б – принципиальная схема аэроионного активатора; 1 – шкаф управления; 2 – ионоактиватор (8; 11; 16); 3 – трубка для подачи обрабатываемой среды с дрожжами; 4 – мешалка с приводом; 5 – ферментер; 6 – отсек питательных растворов; 7 – обрабатываемая среда; 8 – оросительное устройство; 9 – решетка; 10 – капли среды с дрожжами; 11 – камера аэроионной активации; 12 – осадительный электрод; 13 – обработанная среда; 14 – электрод, направляющий поток аэроионов; 15 – ионизированные молекулы воздуха; 16 – коронирующий электрод; 17 – разрядная камера; ИП – источник питания ионоактиватора

дрожжей подавали насос-дозатором в соответствии с технологической картой, разработанной ОАО «Дрожжевой комбинат» (г. Минск). Обработывали 1 л питательной среды с дрожжами. Объем среды при ферментации практически не изменялся. Дрожжи выращивали в течение 14,4...14,6 ч. Среду с дрожжами не обрабатывали в первые 1,5 часа и в последний час ферментации.

Продуктивность рассчитывали делением выращенной биомассы на исходную массу в начале ферментации. Прирост биомассы – разница масс дрожжей, выращенных без активации и с активацией. Концентрация дрожжей – отношение массы дрожжей к объему питательной среды с дрожжами. Хлебопекарные дрожжи отделяли от питательной среды в воронке Бюхнера вакуумной установки и взвешивали на лабораторных весах ВК-600.

Качество дрожжей определяли по подъемной силе в соответствии с ГОСТ 171-2015 методом всплывания шарика. Подъемная сила – это время, за которое дрожжи в результате воздействия углекислого газа и сбраживания сахаров увеличивают объем теста в два раза. Коэффициент подъема теста – величина, обратная подъемной силе. В работе удельные величины показаны на м³ среды с дрожжами.

Параметры электрической обработки приведены в табл. 1. Удельное количество электричества (отношение протекающего количества электричества к объему среды, м³) регулировали силой тока в цепи коронирующего электрода от 8,1 до 10,7 мкА. Напряженность электрического поля изменяли расстоянием *l* между осадительным и коронирующим электродами от 0,13 до 0,22 м (рис. 1б). Время нахождения дрожжей в поле коронного разряда регулировали высотой *b* камеры аэроионной активации от 0,1 до 0,3 м (рис. 1б). Частоту обработки – скоростью циркуляции среды от 2,5 до 7,5 л/ч. Продолжительность электрообработки составляла 11,9...12,1 ч.

Исследования влияния факторов аэроионной активации на продуктивность хлебопекарных дрожжей выполнялись по ортогональному центральному композиционному плану (ОЦКП) [10] с повторностью *n* = 5.

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов аэроионной активации продуктивности хлебопекарных дрожжей

Наименование фактора	Натуральное обозначение	Нормированное обозначение	Интервалы варьирования	Уровни варьирования		
				-1	0	+1
Удельное количество электричества, Кл/м ³	Q_V	x_1	58	346	404	462
Напряженность электрического поля между коронирующим и осадительным электродами, кВ/м	E	x_2	10	30	40	50
Время нахождения дрожжей в поле коронного разряда, с	τ_k	x_3	0,36	5,13	5,49	5,85
Цикличность обработок, 1/ч	$\nu_{об}$	x_4	1,67	1,67	3,34	5,01
Формулы взаимосвязи нормированных и натуральных значений факторов	$X_1 = \frac{x_1 - 404}{58}; \quad X_2 = \frac{x_2 - 40}{10}; \quad X_3 = \frac{x_3 - 5,49}{0,36}; \quad X_4 = \frac{x_4 - 3,34}{1,67};$ $x_1 = 404 + 58X_1; \quad x_2 = 40 + 10X_2; \quad x_3 = 5,49 + 0,36X_3; \quad x_4 = 3,34 + 1,67X_4.$					

Уровни варьирования факторов определялись поисковыми опытами (табл. 1).

Результаты проверены на промах по критерию Смирнова – Граббса, на принадлежность нормальному закону распределения – по критерию среднего абсолютного отклонения (САО). Дисперсии опытов проверены на однородность по критерию Кохрена [10].

Влияние аэроионной активации на показатели дрожжей

Влияние удельного количества электричества на подъемную силу и коэффициент подъема теста показано на рисунках 2, 3. Обработка количеством электричества 380...410 Кл/м³ увеличивает подъемную силу хлебопекарных дрожжей до 32...34 мин. (рис. 2) и коэффициент подъема теста до 0,029...0,031. Это на 48...59 % больше в сравнении с дрожжами без аэроионной активации.

Изменение концентрации биомассы хлебопекарных дрожжей в среде показано на рисунке 4. Обработка количеством электричества 400...410 Кл/м³ повышает концентрацию дрожжей на 13...16 % и увеличивает биомассу на 15...20 %.

Оптимальные параметры аэроионной активации продуктивности хлебопекарных дрожжей

Влияние факторов аэроионной активации на продуктивность дрожжей в общем виде описывает уравнение регрессии второго порядка:

$$\mu = b_0 + \sum_{r=1}^{N_k} b_r X_r + \sum_{r=1}^{N_k} b_{rs} X_r X_s + \sum_{r=1}^{N_k} b_{rr} (X_r^2 - \lambda_k), \quad (1)$$

где μ – продуктивность хлебопекарных дрожжей, %;
 b_0 – свободный член уравнения;
 b_r, b_{rs}, b_{rr} – коэффициенты уравнения регрессии при линейных, бинарных и квадратичных членах;
 X_r, X_s – нормированное значение *r*-го и *s*-го факторов, $r < s, r = 1, \dots, k-1, s = 2, \dots, k$;
 N_k – количество опытов;
 k – количество факторов, $k = 4$ (табл. 1);

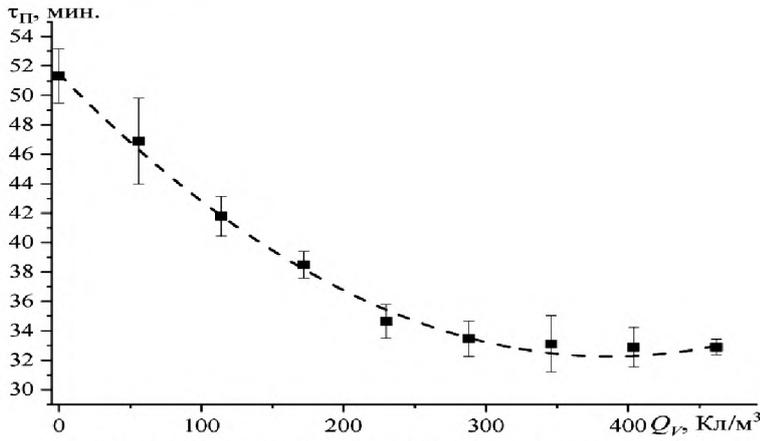


Рисунок 2. Зависимость подъемной силы теста от удельного количества электричества

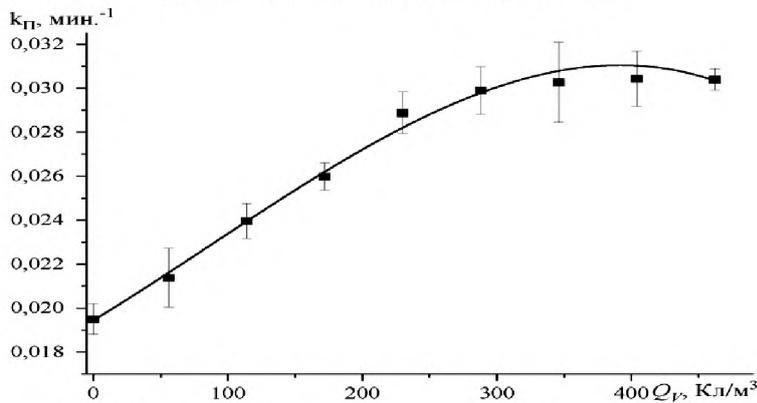


Рисунок 3. Зависимость коэффициента подъема теста от удельного количества электричества

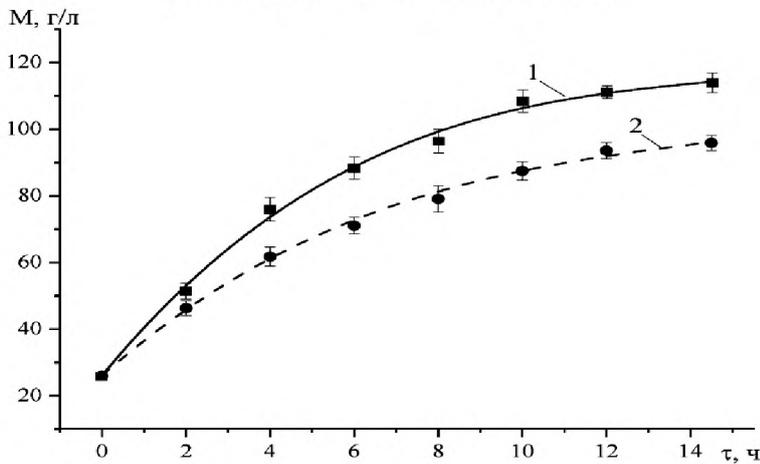


Рисунок 4. Изменение концентрации дрожжей в среде при ферментации: 1 – с активацией ($Q=400 \dots 410 \text{ Кл/м}^3$); 2 – без активации

λ_k – ортогонализирующий коэффициент квадратичного члена.

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{2^k}{N_k}} = \sqrt{\frac{2^4}{25}} = \sqrt{\frac{16}{25}} = 0,8.$$

Согласно проведенным экспериментальным исследованиям установлено, что при аэроионной активации на продуктивность хлебопекарных дрожжей влияют:

- удельное количество электричества;
- напряженность электрического поля между коронирующим и осадительным электродами;
- время нахождения дрожжей в поле коронного разряда;
- цикличность обработок.

Матрица планирования экспериментов, построенная на основе ОЦКП [10], приведена в табл. 2.

Результаты исследований не имеют промахов и подчинены нормальному закону распределения (табл. 2). Дисперсии опытов однородны [10]:

$$G_{\text{э}} = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^{N_k} S_j^2} = \frac{69,7}{705} = 0,099 <$$

$$< G_{4;25;0,95} = 0,160,$$

где $G_{\text{э}}$ – экспериментальное значение критерия Кохрена;

$G_{4;25;0,95}$ – критическое значение критерия Кохрена при числе степеней свободы максимальной дисперсии $f_1 = n - 1$, $f_2 = N_k$ и доверительной вероятности $p = 0,95$;

S_j^2 – дисперсия j -го опыта;

n – количество повторов опыта, $n = 5$.

Дисперсия воспроизводимости $S_{\text{воспр}}^2$ и ее число степеней свободы $f_{\text{воспр}}$ [10]:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} S_j^2}{N_k} = \frac{705}{25} = 28,2;$$

$$f_{\text{воспр}} = N_k (n - 1) = 100.$$

Регрессионный анализ выполняли по методике, предложенной в работе [10]. Коэффициенты уравнения регрессии при линейных членах:

$$b_r = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} X_{rj} \mu_{cpj}}{\sum_{j=1}^{N_k} X_{rj}^2}; \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{83,62}{20} = 4,18; \quad b_2 = \frac{-17}{20} = -0,9;$$

$$b_3 = \frac{31,61}{20} = 1,6; \quad b_4 = \frac{-54,4}{20} = -2,7.$$

Коэффициенты уравнения регрессии при бинарных членах [10]:

$$b_{rs} = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} X_{rj} X_{sj} \mu_{epj}}{\sum_{j=1}^{N_k} (X_{rj} X_{sj})^2}; \quad (3)$$

$$b_{12} = \frac{50,6}{16} = 3,2; \quad b_{13} = \frac{34,2}{16} = 2,1;$$

$$b_{14} = \frac{5,8}{16} = 0,4; \quad b_{23} = \frac{0,2}{16} = 0,01;$$

$$b_{24} = \frac{-3,4}{16} = -0,2; \quad b_{34} = \frac{-27}{16} = -1,7.$$

Коэффициенты уравнения регрессии при квадратичных членах [10]:

$$b_{rr} = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} (X_r^2 - \lambda_k) \mu_{epj}}{\sum_{j=1}^{N_k} (X_r^2 - \lambda_k)^2}; \quad (4)$$

$$b_{11} = \frac{-21,88}{8} = -2,7; \quad b_{22} = \frac{-31,48}{8} = -3,9;$$

$$b_{33} = \frac{-13,48}{8} = -1,7; \quad b_{44} = \frac{-36,7}{8} = -4,6.$$

Свободный член уравнения [10]:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} X_{0j} \mu_{epj}}{\sum_{j=1}^{N_k} X_{0j}^2} - \lambda_k \sum_{r=1}^k b_{rr} =$$

$$= \frac{10339}{25} - 0,8 \cdot (-16,83) = 423,9$$

Дисперсии значимости коэффициентов регрессии [10]:

$$S^2(b_r) = \frac{S_{воспр}^2}{n \sum_{j=1}^{N_k} X_{rj}^2} = \frac{28,2}{5 \cdot 20} = 0,28;$$

$$S^2(b_{rs}) = \frac{S_{воспр}^2}{n \sum_{j=1}^{N_k} (X_{rj} X_{sj})^2} = \frac{28,2}{5 \cdot 16} = 0,35;$$

$$S^2(b_{rr}) = \frac{S_{воспр}^2}{n \sum_{j=1}^{N_k} (X_r^2 - \lambda_k)^2} = \frac{28,2}{5 \cdot 8} = 0,71;$$

$$S^2(b_0) = \frac{S_{воспр}^2}{n \sum_{j=1}^{N_k} X_{0j}^2} + \frac{\lambda_k^2 k S_{воспр}^2}{n \sum_{j=1}^{N_k} (X_r^2 - \lambda_k)^2} =$$

$$= \frac{28,2}{5 \cdot 25} + \frac{0,8^2 \cdot 4 \cdot 28,2}{5 \cdot 8} = 2,03.$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии [10]:

$$\Delta b = t_{N_k(n-1);p} \cdot \sqrt{S^2(b)}, \quad (5)$$

где $t_{N_k(n-1);p}$ – критическое значение коэффициента Стьюдента, $t_{100;0,95} = 1,984$ [10].

$$\Delta b_r = 1,984 \cdot \sqrt{0,28} = 1,05;$$

$$\Delta b_{rs} = 1,984 \cdot \sqrt{0,35} = 1,18;$$

$$\Delta b_{rr} = 1,984 \cdot \sqrt{0,71} = 1,67;$$

$$\Delta b_0 = 1,984 \cdot \sqrt{2,03} = 2,83.$$

Коэффициент уравнения регрессии b значим, если выполняется неравенство $\Delta b < |b|$ [10]. Коэффициенты $b_2, b_{14}, b_{23}, b_{24}$ статистически незначимы. Уравнение регрессии (1) со значимыми коэффициентами:

$$\mu = b_0 + b_1 X_1 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 +$$

$$+ b_{34} X_3 X_4 + b_{11} (X_1^2 - 0,8) + b_{22} (X_2^2 - 0,8) +$$

$$+ b_{33} (X_3^2 - 0,8) + b_{44} (X_4^2 - 0,8). \quad (6)$$

Коэффициенты уравнения регрессии (6) рассчитывали методом наименьших квадратов. В результате получили:

$$\mu = 413,5 + 3,1 \cdot X_1 + 1,49 \cdot X_3 - 3,21 \cdot X_4 +$$

$$+ 2,81 \cdot X_1 X_2 + 2,07 \cdot X_1 X_3 - 2,29 X_3 X_4 -$$

$$- 4,05 \cdot (X_1^2 - 0,8) - 3,53 \cdot (X_2^2 - 0,8) -$$

$$- 2,91 \cdot (X_3^2 - 0,8) - 4,54 \cdot (X_4^2 - 0,8). \quad (7)$$

По уравнению (7) рассчитана продуктивность хлебопекарных дрожжей (табл. 2). Дисперсия адекватности $S_{ад}^2$ и ее число степеней свободы $f_{ад}$ [10]:

$$S_{ад}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^{N_k} (\mu_{jcp} - \mu_{jрасч})^2}{N_k - B} = \frac{5 \cdot 129,7}{25 - 11} = 46,3;$$

$$f_{ад} = N_k - B = 14,$$

где B – количество значащих факторов в уравнении (7), $B = 11$.

Экспериментальное значение критерия Фишера:

$$F_{\ominus} = \frac{\max(S_{ад}^2, S_{воспр}^2)}{\min(S_{ад}^2, S_{воспр}^2)} = \frac{46,3}{28,2} = 1,642$$

Критическое значение критерия Фишера [10]:

$$F_{f_{ад}; f_{воспр}; p} = F_{14; 100; 0,95} = 1,792.$$

Уравнение регрессии (7) адекватно описывает результаты экспериментальных исследований, так как $F_{\ominus} = 1,642 < F_{14; 100; 0,95} = 1,792$.

Оптимальные технологические параметры обработки получены через определение частных производных

Таблица 2. Матрица моделирования и результаты обработки данных

j	X _{0j}	X _{1j}	X _{2j}	X _{3j}	X _{4j}	μ _{ср}	S _j ²	τ _{эj}	τ _{3;0,95}	θ _{эj}	θ _{3;0,95}	μ _{расч}	(μ _{ср} - μ _{расч}) ²
1	1	1	1	1	1	416,0	21,5	1,294	1,869	0,022	0,179	414,5	2,3778
2	1	-1	1	1	1	396,2	34,7	1,324	1,869	0,024	0,179	398,5	5,3731
3	1	1	-1	1	1	412,6	14,8	1,456	1,869	0,049	0,179	408,9	14,003
4	1	-1	-1	1	1	406,6	50,8	1,487	1,869	0,057	0,179	404,1	6,1603
5	1	1	1	-1	1	413,6	26,8	1,661	1,869	0,087	0,179	411,9	2,7622
6	1	-1	1	-1	1	402,8	36,2	1,296	1,869	0,027	0,179	404,3	2,1845
7	1	1	-1	-1	1	409,2	23,2	1,204	1,869	0,001	0,179	406,3	8,191
8	1	-1	-1	-1	1	410	12	1,443	1,869	0,010	0,179	409,9	0,0149
9	1	1	1	1	-1	424,4	18,3	1,309	1,869	0,031	0,179	425,5	1,1194
10	1	-1	1	1	-1	408,6	36,3	1,560	1,869	0,014	0,179	409,5	0,8427
11	1	1	-1	1	-1	421,2	35,7	1,640	1,869	0,088	0,179	419,9	1,801
12	1	-1	-1	1	-1	412,8	69,7	1,701	1,869	0,108	0,179	415,1	5,3731
13	1	1	1	-1	-1	415,6	27,3	1,608	1,869	0,124	0,179	413,7	3,467
14	1	-1	1	-1	-1	403,8	23,2	1,702	1,869	0,100	0,179	406,1	5,1893
15	1	1	-1	-1	-1	409,4	12,8	1,509	1,869	0,038	0,179	408,1	1,5926
16	1	-1	-1	-1	-1	415,4	22,8	1,382	1,869	0,027	0,179	411,7	13,853
17	1	√2	0	0	0	424	25	1,400	1,869	0,158	0,179	421,8	4,875
18	1	-√2	0	0	0	411,4	21,8	1,414	1,869	0,010	0,179	413	2,6372
19	1	0	√2	0	0	415	14,5	1,313	1,869	0,063	0,179	418,5	12,027
20	1	0	-√2	0	0	415,6	26,8	1,623	1,869	0,118	0,179	418,5	8,2254
21	1	0	0	√2	0	424,4	22,8	1,592	1,869	0,111	0,179	421,8	6,6813
22	1	0	0	-√2	0	415,2	38,7	1,318	1,869	0,001	0,179	417,6	5,7639
23	1	0	0	0	√2	410,4	26,8	1,468	1,869	0,087	0,179	411,9	2,2576
24	1	0	0	0	-√2	417,6	35,3	1,414	1,869	0,044	0,179	421	11,246
25	1	0	0	0	0	426,8	27,2	1,381	1,869	0,000	0,179	425,5	1,6693
						Сумма	705						129,7

X_{1j}...X_{4j} – нормированное значение соответствующего фактора в (7); μ_{ср} – средняя продуктивность хлебопекарных дрожжей в j-м опыте, %; S_j² – выборочная дисперсия продуктивности; τ_{эj} – экспериментальное значение критерия Смирнова – Граббса; τ_{3;0,95} – критическое значение критерия Смирнова – Граббса с числом степеней свободы 3 и доверительной вероятности 0,95; θ_{эj} – экспериментальное значение критерия САО; θ_{3;0,95} – критическое значение критерия САО; μ_{расч} – расчетная продуктивность хлебопекарных дрожжей. Полученные данные не имеют промаха (τ_{эj} < τ_{3;0,95}), значения подчинены нормальному закону распределения (θ_{эj} < θ_{3;0,95}).

от уравнения (7) по соответствующим неизвестным, приравниванием их к нулю и последующим решением полученной системы алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} (\bar{\mu})'_{X_1} = 3,1 + 2,81 \cdot X_2 + 2,07 \cdot X_3 - \\ \quad - 8,1 \cdot X_1 = 0; \\ (\bar{\mu})'_{X_2} = 2,81 \cdot X_1 - 7,06 \cdot X_2 = 0; \\ (\bar{\mu})'_{X_3} = 1,49 + 2,07 \cdot X_1 - 2,29 X_4 - \\ \quad - 5,82 \cdot X_3 = 0; \\ (\bar{\mu})'_{X_4} = -3,21 - 2,29 X_3 - 9,08 \cdot X_4 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Максимальная продуктивность дрожжей (7) μ = 427,9 % достигнута при X_{1опт} = 0,65; X_{2опт} = 0,26; X_{3опт} = 0,7; X_{4опт} = -0,53.

Оптимальные технологические параметры аэрионной активации рассчитаны по формулам, приведенным в таблице 1. Удельное количество электричества Q_V = 441,8 Кл/м³, напряженность электрического поля между коронирующим и осадительным электродами E = 42,6 кВ/м, время нахождения дрожжей в поле коронного разряда τ_к = 5,74 с, цикличность обработок ν_{об} = 2,46 1/ч. При этих параметрах обработ-

ки хлебопекарные дрожжи увеличивают продуктивность на 15...20 %, концентрацию – на 13...16 %, подъемную силу и коэффициент подъема теста – на 48...59 % по сравнению с дрожжами, выращенными без аэрионной обработки.

Проверка адекватности аналитической модели экспериментальным данным

Аналитически получена зависимость прироста биомассы дрожжей от удельного количества электричества (рис. 5, кривая 1). Она адекватно описывает результаты экспериментальных исследований (рис. 5, кривая 2), так как расхождение значений не превышает 5 % (Δ=0,6 кг/м³).

Обработка удельным количеством электричества 420...450 Кл/м³ увеличивает прирост биомассы до 14,7...15,1 кг/м³.

Заклучение

1. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают влияние аэрионной активации на продуктивность хлебопекарных дрожжей. Аналитическая модель процесса, полученная авторами в источнике [8], адекватна результатам экспериментов.

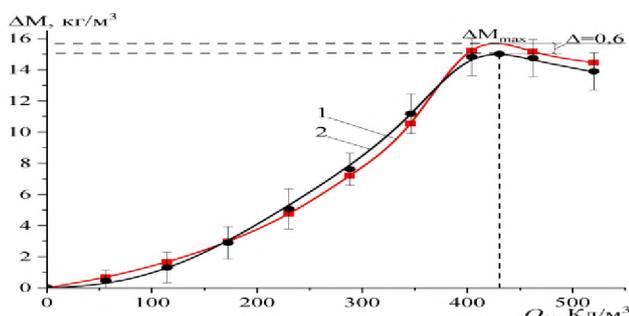


Рисунок 5. Зависимость прироста биомассы хлебопекарных дрожжей от удельного количества электричества аэроионной обработки: 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

2. Оптимальные технологические параметры аэроионной активации продуктивности хлебопекарных дрожжей:

- удельное количество электричества – 441,8 Кл/м³;
- напряженность электрического поля между коронирующим и осадительным электродами – 42,6 кВ/м;
- время нахождения дрожжей в поле коронного разряда – 5,74 с;
- цикличность обработок – 2,46 1/ч.

3. Обработка аэроионами увеличивает подъемную силу и коэффициент подъема теста на 48...59 %, концентрацию хлебопекарных дрожжей – на 13...16 %, продуктивность – на 15...20 %, прирост биомассы – до 14,7...15,1 кг/м³ по сравнению с дрожжами, выращенными без аэроионной обработки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yanko, M.V. Study of Influence of Air Ions on the Growth rate of Yeast *Saccharomyces Cerevisiae* using formulated analytical growth model / M.V. Yanko, A.D. Chorny, E.M. Zayats // *Asian Journal of Applied Chemistry Research*. – 2023. – № 13 (3). – P. 31-38. <https://doi.org/10.9734/ajacr/2023/v13i3246>.

2. Факторы, влияющие на электрический заряд дрожжевых клеток *Saccharomyces cerevisiae* /

Т.В. Меледина [и др.] // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2020. – № 2. – С. 73-84.

3. Redox potential control and applications in micro-aerobic and anaerobic fermentations / C.G. Liu [et al.] // *Biotechnology advances*. – 2013. – № 2. – Т. 31. – С. 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.11.005>.

4. Na, B.K. Effect of electrochemical redox reaction on growth and metabolism of *Saccharomyces cerevisiae* as an environmental factor / B.K. Na // *Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2007. – № 3. – Т. 17. – С. 445-453.

5. Заяц, Е.М. Влияние отрицательно заряженных аэроионов на среду выращивания *Saccharomyces cerevisiae* / Е.М. Заяц, М.В. Янко // *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. – 2022. – № 3 (101) – С. 62-68.

6. Меледина, Т.В. Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*. Морфология, химический состав, метаболизм: учеб. пособие / Т.В. Меледина, С.Г. Давыденко. – Санкт-Петербург: Университет ИТ-МО, 2015. – 88 с.

7. Янко, М.В. Анализ способов активации продуктивности хлебопекарных дрожжей. Обзор / М.В. Янко, Е.М. Заяц // *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. – 2022. – № 2 (100) – С. 171-176.

8. Янко, М.В. Математическая модель влияния аэроионов на продуктивность дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* / М.В. Янко, Е.М. Заяц // *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. – 2023. – № 3 (105) – С. 92-101.

9. Способ культивирования хлебопекарных дрожжей: пат. 23635 Респ. Беларусь, МПК С 12N 1/18, С 12N 13/00 (2006.01) / Е.М. Заяц, М.В. Янко, А.Д. Чорный; заяв. Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20190290; заявл. 10.11.19; опубл. 28.02.22 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. – 2022. – № 1. – С. 57.

10. Леонов, А.Н. Основы моделирования: учеб.-методич. пособие / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис; под ред. А.Н. Леонова. – Минск: БГАТУ, 2020. – 160 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 25.03.2024

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842. Стоимость подписки на 2-е полугодие 2024 года: для индивидуальных подписчиков - 45,45 руб., ведомственная подписка - 47,85 руб.