

УДК 681.5

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-05

Вовк М. А., Гуменюк П. О.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ БРОДІННЯ ВІНОМАТЕРІАЛУ

Розроблена динамічна модель процесу бродіння виноматеріалу дозволяє точно відтворювати процеси, що відбуваються під час бродіння, і забезпечує гнучкість у контролі змінних, які впливають на кінцеву якість продукту. Модель враховує випадкові збурення температури і рівня цукру, що наближає симуляцію до реальних умов виробництва, де зовнішні фактори можуть змінюватися. Використання даної моделі на практиці може сприяти підвищенню ефективності виробництва та стабільності характеристик виноматеріалу.

Ключові слова: виноматеріал, керування, модель, технологічні параметри, мікроконтролер ADAM-5000.

Постановка проблеми. Одним із найважливіших етапів у виноробстві є бродіння виноматеріалу, оскільки воно визначає кінцевий характер вина, включаючи вміст алкоголю, смак, аромат і текстуру вина. На цій стадії виноградний сік перетворюється на вино. Бродіння може бути природним, тобто обумовленим дією диких дріжджів, присутніх на шкірці винограду та культивованим, коли у сусло додаються певні штами культивованих дріжджів.

У середньому для посіву культурних дріжджів винороби додають 20-30 грамів сухих дріжджів на 100 літрів сусла, тобто приблизно 200-300 грамів на 1000 літрів сусла або виноматеріалу залежно від сорту винограду та рівня цукру сусла. Дріжджі можна регідратувати в теплій воді (приблизно 35-40 °C) перед додаванням у сусло, що забезпечить кращу активацію та розподіл дріжджів у суслі.

Дріжджі переробляють виноградний цукор на спирт і вуглекислий газ з виділенням тепла. При виробництві виноматеріалу і звичайних тихих вин вуглекислий газ іде в атмосферу.

Контроль температури важливий для кінцевого профілю смаку вина. Червоні вина зазвичай ферментують при вищих температурах (типово від 22 °C до 30 °C), для отримання яскравішого кольору, насиченості, аромату і терпкості смаку з виноградної шкірки. Нижчі температури (близько 22 °C) дозволяють отримати м'якші смаки вин, тоді як вищі температури (близько до 30 °C) збільшують терпкість та насиченість вина. Білі вина ферментують при нижчих температурах (12-18 °C) для збереження ніжних ароматів.

Тривалість бродіння залежить від температури, вмісту цукру та штаму дріжджів. Для червоних вин первинне бродіння зазвичай триває 5-10 днів. Однак, залежно від того, яке вино бажане на виході, з якою кількістю танінів і насиченістю кольору, бродіння може тривати і до 2-3 тижнів.

Бродіння триває, доки більша частина цукру не буде спожита дріжджами, утворюючи сухе вино з дуже невеликою кількістю залишкового цукру. При виробництві сухих вин весь або майже весь цукор перетворюється на алкоголь, залишаючи вино без помітної солодкості. При виробництві напівсолодких або солодких вин бродіння припиняють раніше, шляхом охолодження сусла або додавання діоксиду сірки, щоб залишилося трохи цукру. Після завершення бродіння дріжджі гинуть і осідають на дні ємності у вигляді осаду.

Для забезпечення точності, послідовності та ефективності виноробного процесу важливе значення має моделювання процесу виробництва виноматеріалу.

Мета роботи. Метою роботи є розробка динамічної моделі ферментації виноматеріалу, яка дозволить відтворювати процеси, що відбуваються під час бродіння, і забезпечить гнучкість у контролі змінних, які впливають на кінцеву якість продукту.

Викладення основного матеріалу. Завдяки використанню моделей, що описують змінні ферментації, такі як концентрація дріжджів, вміст цукру, температура та рівень алкоголю, винороби отримують прогностичну інформацію для підтримання оптимальних умов [1-2]. Це дозволяє досягати незмінної якості продукції, незалежно від змін сировини чи умов навколишнього середовища, а також оптимізувати використання ресурсів, що знижує витрати та кількість відходів.

Для процесів, де присутні невизначеності, корисним є стохастичне моделювання, оскільки воно враховує випадкові величини, наприклад, коливання температури чи активності дріжджів. У виноробстві це допомагає передбачити фактори, що впливають на ферментацію, зокрема під

час виробництва виноматеріалу. Використання стохастичних моделей надає можливість змоделювати процес ферментації, забезпечуючи стабільну якість продукту навіть при коливаннях зовнішніх факторів [3-4].

Моделювання основних параметрів ферментації у виробництві виноматеріалу є бажаним для забезпечення стабільності, якості та консистенції кінцевого продукту [5].

Для оптимізації ферментації доцільним є використання моделі Міхаеліса-Ментен [6-7]. Ця модель дозволяє описувати кінетику ферментації шляхом встановлення залежностей між концентрацією субстрату (цукру) і швидкістю утворення алкоголю. Параметри моделі, такі як максимальна швидкість реакції (V_{max}) і спорідненість дріжджів до субстрату (K_m), допомагають передбачити розвиток процесу ферментації і уникнути його передчасної зупинки.

Основною метою алгоритму моделювання процесу ферментації є розрахунок кінетики утворення алкоголю в процесі ферментації, використовуючи модель Міхаеліса-Ментен.

Алгоритм моделювання процесу ферментації враховує змінні, що впливають на утворення алкоголю, а саме:

- концентрацію дріжджів,
- рівень цукру,
- температуру,
- коливання зовнішніх умов.

Концентрація дріжджів – цей параметр визначає швидкість та ефективність ферментації, оскільки саме дріжджі перетворюють цукри на спирт і вуглекислий газ. Неправильна концентрація дріжджів може спричинити надмірне утворення піни, неповне бродіння або надмірне накопичення побічних продуктів. Врахування концентрації дріжджів дає змогу передбачити їхню поведінку в умовах процесу, коригувати рівень активності та підтримувати оптимальний баланс, що особливо важливо для стабільного перебігу ферментації.

Рівень цукру – цукор служить головним джерелом живлення для дріжджів, і його концентрація визначає як кінцевий рівень алкоголю, так і загальний ароматичний профіль вина. Врахування вмісту цукру дозволяє точно відстежувати процес його споживання дріжджами та регулювати швидкість ферментації. При зниженні рівня цукру дріжджі можуть знижувати свою активність, що може призвести до «застрягання» процесу ферментації.

Температура – цей параметр має вирішальний вплив на активність і метаболізм дріжджів. Температура ферментації безпосередньо впливає на швидкість процесу, а також на виділення певних ароматичних та смакових компонентів. Наприклад, занадто висока температура може спричинити загибель дріжджів або розвиток небажаних смакових дефектів, а надто низька – значно уповільнити процес.

Рівень алкоголю – важливий параметр, який потребує ретельного контролю. Зі збільшенням концентрації алкоголю дріжджі можуть ставати менш активними або навіть загинути, оскільки високий рівень спирту є токсичним для них. Це особливо важливо для досягнення стабільності вмісту алкоголю, що відповідає стандартам продукту та гарантує консистенцію смакових характеристик.

Моделювання дозволяє передбачити цей момент і вчасно втрутитися для підтримання процесу, зменшуючи ризик втрати продуктивності. Це забезпечує стабільність і дозволяє виноробам виробляти виноматеріал заданої якості та характеристик

Параметри моделі (температура бродіння, початкова кількість дріжджів, константи швидкості, максимальний рівень алкоголю) ініціалізуються відповідно до стандартів та цільових показників якості. Також задаються параметри моделі Міхаеліса-Ментен, такі як максимальна швидкість утворення алкоголю (V_{max}), константа Міхаеліса (K_m), токсичний поріг для дріжджів (A_{tox}), а також величина збурення, що моделює випадкові коливання температури, алкоголю та цукру.

При моделюванні випадкових змінних враховується випадкове коливання температури, що змінюється на основі середньої температури бродіння (T_{brod}) та випадкових збурень. Це дозволяє наблизити модель до реальних умов ферментації, де температура та інші фактори змінюються.

Вміст алкоголю розраховується на основі моделі Міхаеліса-Ментен, яка враховує концентрацію цукру, температуру та концентрацію дріжджів. Алкоголь збільшується поступово, поки не досягне токсичного рівня (A_{tox}).

Концентрація цукру зменшується з часом залежно від швидкості споживання дріжджами, враховуються випадкові коливання для реалістичності.

Кількість дріжджів змінюється залежно від рівня алкоголю – якщо вміст алкоголю перевищує токсичний рівень, дріжджі починають гинути. Цей показник обчислюється для оцінки поточної ефективності ферментації.

В результаті моделювання створюються графіки для відображення кінетики цукру, концентрації дріжджів, рівня алкоголю та швидкості його утворення протягом усього процесу.

Програмна реалізація процесу бродіння використовує бібліотеки NumPy та Matplotlib. Спочатку задаються параметри моделі, такі як середня температура бродіння (T_{brod}), коливання температури (σ_T), початкова кількість дріжджів (N_{drizh}), швидкість споживання цукру (k_2), а також збурення для алкоголю (σ_1) і цукру (σ_2). Далі визначаються параметри для моделі Міхаеліса-Ментен, зокрема максимальна швидкість утворення алкоголю (V_{max}), константа Міхаеліса (K_m), максимальна концентрація алкоголю (A_{max}) та токсичний рівень алкоголю для дріжджів (A_{tox}).

Початкові умови задаються у вигляді масивів: вміст алкоголю (A), що ініціалізується нулями, початковий рівень цукру (S), кількість дріжджів (N), температура (T) та швидкість утворення алкоголю (V), яка також ініціалізується нулями.

У циклі, що імітує час (30 днів), генеруються випадкові значення, які представляють збурення для алкоголю (dW_1), цукру (dW_2) та температури (dW_T). Потім обчислюється поточна температура бродіння (T_{current}), яка оновлюється в масиві температур. На основі цієї температури та інших параметрів обчислюються зміни вмісту алкоголю (dA) та рівня цукру (dS), які відповідно оновлюються в масивах A та S .

Змінюється кількість дріжджів, якщо вміст алкоголю не перевищує токсичний рівень (A_{tox}), обчислюється приріст кількості дріжджів (dN); якщо ж токсичний рівень перевищено, відбувається зменшення кількості дріжджів через токсичність. Ці значення оновлюються в масиві N , при цьому запобігається виникненню негативних значень. Також обчислюється швидкість утворення алкоголю (V), яка залежить від поточних значень цукру, температури та кількості дріжджів.

На завершення, вміст алкоголю в грамах на літр перетворюється на градуси, що відображається у масиві A_{degrees} , який представляє вміст алкоголю у відсотках за обсягом. Для візуалізації результатів будуються графіки, які ілюструють динаміку зміни вмісту цукру, кількості дріжджів, вмісту алкоголю та швидкості утворення алкоголю.

Для проведення моделювання задаємо наступні вхідні дані:

- $T_{\text{brod}} = 20$ – середня температура бродіння в градусах Цельсія;
- $\sigma_T = 1,0$ – коливання температури;
- $N_{\text{drizh}} = 0,3$ – початкова кількість дріжджів;
- $k_2 = 0,05$ – швидкість споживання цукру;
- $\sigma_1 = 0,05$ – збурення для алкоголю;
- $\sigma_2 = 0,05$ – збурення для цукру;
- $dt = 0,1$ – крок часу;
- $\text{time} = \text{np.arange}(0, 30, dt)$ – вектор часу (від 0 до 30 днів з кроком dt);
- $V_{\text{max}} = 0,3$ – максимальна швидкість утворення алкоголю;
- $K_m = 2,0$ – константа Міхаеліса;
- $A_{\text{max}} = 20$ – максимальна концентрація алкоголю;
- $A_{\text{tox}} = 10$ – токсичний рівень алкоголю для дріжджів.

Результати моделювання представлені на наступних графіках.

На рисунку 1 показана зміна концентрації цукру у виноматеріалі.

Отримані дані демонструють загальне зниження рівня цукру протягом часу, що типово для процесу бродіння. Спочатку концентрація цукру становить біля 75 г/л і поступово зменшується приблизно до 53 г/л на 30-й день. Це відповідає типовому процесу перетворення цукру дріжджами на етанол та вуглекислий газ.

На ранніх етапах (до 5-7 днів) вміст цукру знижується особливо швидко через інтенсивну активність дріжджів у сприятливих умовах. Протягом наступних 7-10 днів процес дещо уповільнюється, що, пов'язано зі зменшенням концентрації цукру, зміною рН середовища, накопиченням етанолу або зниженням активності дріжджів.

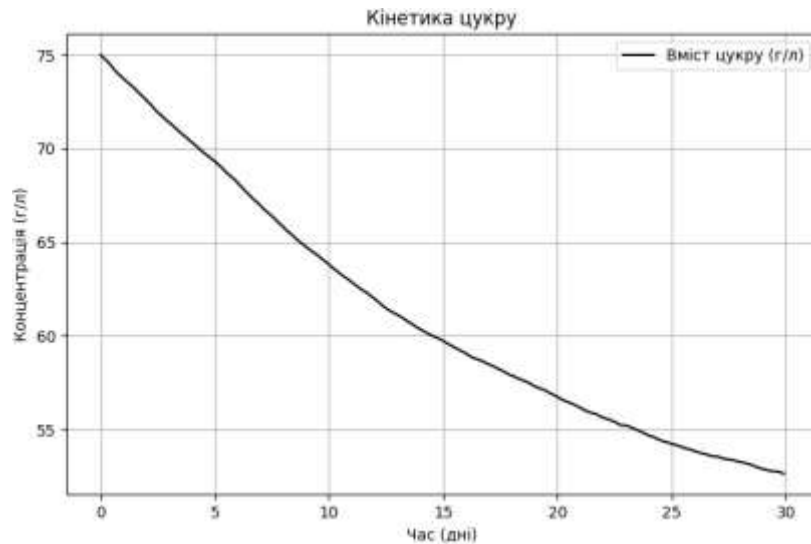


Рисунок 1 – Зміна концентрації цукру у виноматеріалі

З часом швидкість зменшення рівня цукру уповільнюється, наближаючись до асимптотичного значення. Після 30 днів вміст цукру стабілізується на рівні близько 53-54 г/л, що вказує на наявність залишкового цукру, який дріжджі вже не можуть переробити через фізіологічні обмеження або умови середовища.

На рисунку 2 показано зміну концентрації дріжджів у виноматеріалі.

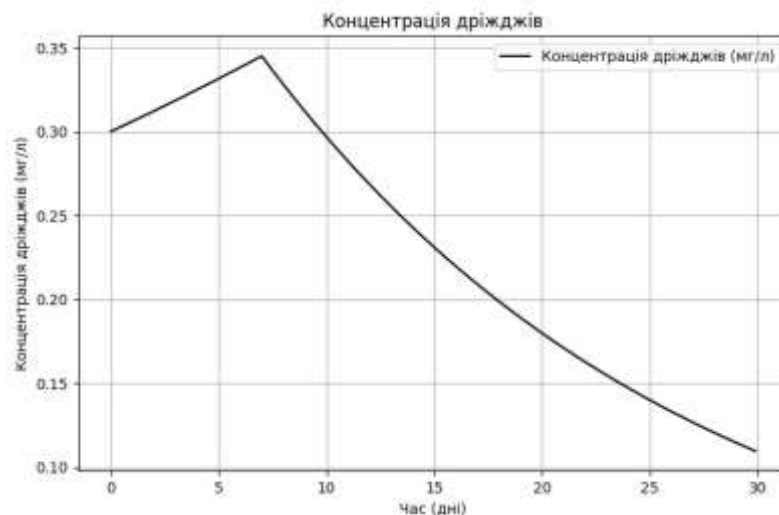


Рисунок 2 – Зміна концентрації дріжджів у виноматеріалі

На початковому етапі ферментації концентрація дріжджів поступово зростає, досягаючи піку на 6-7-й день, після чого знижується. Спочатку концентрація складає приблизно 0,3 мг/л, згодом зростає до максимального значення, після чого спадає. Це початкове розмноження, максимальна активність дріжджів і подальше уповільнення через обмеження ресурсів.

У перші 6-7 днів відбувається активне зростання концентрації дріжджів завдяки оптимальним умовам і наявності великої кількості поживних речовин. На 6-7 день концентрація досягає піку, що вказує на найвищий рівень активності ферментації. Після цього активність дріжджів знижується через виснаження запасів цукру та накопичення етанолу.

Після досягнення піку концентрація дріжджів поступово знижується, наближаючись до асимптотичного рівня до кінця 30-денного періоду, коли дріжджі втрачають здатність до розмноження через обмеження середовища.

На рисунку 3 показано швидкість утворення алкоголю у виноматеріалі.

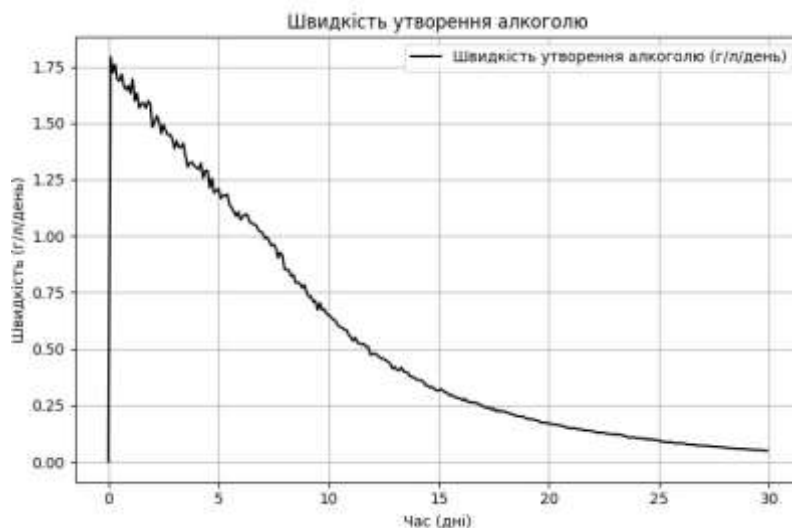


Рисунок 3 – Швидкість утворення алкоголю у виноматеріалі

Швидкість утворення алкоголю на початкових етапах бродіння (перші 5-7 днів) є високою завдяки активному метаболізму дріжджів, що спричиняє значне зростання концентрації алкоголю. Після 7-10 днів швидкість знижується через зменшення кількості цукру, накопичення етанолу та зміни в умовах середовища (рН, температура), що уповільнює активність дріжджів.

Залишковий цукор також впливає на кінцевий вміст алкоголю. При зниженні вмісту цукру до певного рівня (близько 53 г/л) дріжджі можуть не мати змоги переробити весь цукор на алкоголь через фізіологічні обмеження або несприятливі умови.

На рисунку 4 показано динаміку збільшення алкоголю у виноматеріалі.

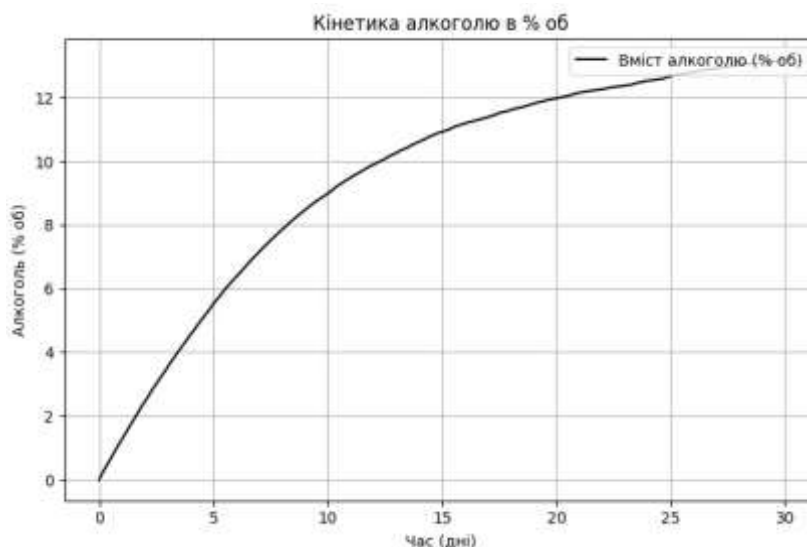


Рисунок 4 – Динаміка збільшення алкоголю

Під час бродіння спостерігається загальна тенденція до зростання вмісту алкоголю. Наприклад, якщо початковий вміст алкоголю становить 0 %, то за 30 днів він може досягти 13 %, що свідчить про ефективний процес перетворення дріжджами цукрів на етанол.

На початку (перші 5-7 днів) вміст алкоголю зростає швидко завдяки високій активності дріжджів. На цьому етапі він може досягати 1-2 %. Проте зі зростанням концентрації етанолу підвищується осмотичний тиск, що може сповільнювати процес бродіння.

Після 7-10 днів темпи зростання алкоголю знижуються. На 15-й день рівень алкоголю може досягати 8 %, а на 30-й – близько 13 %, що пояснюється зменшенням активності дріжджів через накопичення етанолу.

Наприкінці бродіння вміст алкоголю наближається до максимального значення, яке можуть витримати дріжджі, зазвичай близько 14-16 %. У даному прикладі він стабілізується на рівні 12-13 % до 30-го дня, що свідчить про завершення процесу.

Висновки. Розроблена динамічна модель ферментації виноматеріалу дозволяє точно відтворювати процеси, що відбуваються під час бродіння, і забезпечує гнучкість у контролі змінних, які впливають на кінцеву якість продукту. Застосування моделі Міхаеліса-Ментен у процесі ферментації дозволило деталізувати взаємозв'язок між субстратом (цукром) та швидкістю утворення етанолу, що сприяло прогнозуванню кінетики процесу. Крім того, використання стохастичних методів для моделювання випадкових змін умов бродіння, таких як коливання температури та активності дріжджів, дозволяє адаптувати модель до реальних умов виробництва, забезпечуючи контроль якості продукту. На основі моделювання показано, що початкова фаза бродіння супроводжується швидким зростанням концентрації алкоголю, поки вміст цукру залишається високим і температура сприяє оптимальній активності дріжджів. З часом, зі зменшенням цукру та накопиченням етанолу, спостерігається зниження активності дріжджів та уповільнення процесу. Модель враховує випадкові збурення температури і рівня цукру, що наближає симуляцію до реальних умов виробництва, де зовнішні фактори можуть змінюватися. Таким чином, використання даної моделі на практиці може сприяти підвищенню ефективності виробництва та стабільності характеристик виноматеріалу.

Інформаційні джерела

1. Miller K. V., Block D. E. A review of wine fermentation process modeling. *Journal of Food Engineering*, 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877419304273> (дата звернення: 11.10.2024).
2. Sablayrolles J.-M. Kinetics and control of alcoholic fermentation during wine production. URL: https://www.researchgate.net/publication/335847668_Kinetics_and_Control_of_Alcoholic_Fermentation_During_Wine_Production (дата звернення: 11.10.2024).
3. Remedios M., López-Gómez A., Esnoz A. Wine making: Control and Modeling. URL: https://www.researchgate.net/publication/354630276_Wine_making_Control_and_Modeling (дата звернення: 11.10.2024).
4. Colucci R., López-de-la-Cruz J. Dynamics of fermentation models for the production of dry and sweet wine. *Communications on Pure and Applied Analysis*, 2020, № 19(4), pp. 2015-2034. URL: <https://www.aims sciences.org/article/doi/10.3934/cpaa.2020089> (дата звернення: 11.10.2024).
5. Nelson J., Boulton R. Models for Wine Fermentation and Their Suitability for Commercial Applications. *Fermentation* 2024. № 10(6), p. 269. URL: <https://doi.org/10.3390/fermentation10060269> (дата звернення: 11.10.2024).
6. Gunawardena J. Some lessons about models from Michaelis and Menten. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3279381/> (дата звернення: 11.10.2024).
7. Michaelis-Menten models. URL: <https://onlinehelp.certara.com/phoenix/8.3/topics/mmmmodelcalc.htm> (дата звернення: 11.10.2024)

Vovk M., Humeniuk P.

Lutsk national technical university, Lutsk, Ukraine

DYNAMIC MODEL OF THE WINE MATERIAL FERMENTATION PROCESS

The developed dynamic model of the wine material fermentation process allows you to accurately reproduce the processes that occur during fermentation and provides flexibility in controlling the variables that affect the final quality of the product. The model takes into account random disturbances in temperature and sugar levels, which brings the simulation closer to real production conditions where external factors can change. The use of this model in practice can help to improve production efficiency and the stability of wine material characteristics.

Keywords: wine material, control, model, technological parameters, microcontroller ADAM-5000.