УДК 621.565

С.Г. Потапов, асп.
М.М. Масліков, канд. техн. наук Національний університет харчових технологій

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИХАННЯ ЯБЛУК З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІКИ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЕТИЛЕНУ

Запропонована модель зміни концентрацій кисню, двоокису вуглецю та етилену під час дихання яблук у герметичному контейнері. Вимірювання концентрації газів проводилося на модернізованій дослідній установці. Вірогідність математичної моделі підтверджена дослідами.

Ключові слова: інтенсивність дихання, зберігання плодів, математичне моделювання дихання, модифіковане газове середовище.

We propose a concentration change model of oxygen, carbon dioxide arid ethylene during apples breathing in the hermetic container. Gas concentration measurement was taken on the modernized investigation unit. Mathematical model confidence was confirmed by research.

Key words: breathing intensity, fruit storage, mathematical modeling of breathing, modified atmosphere.

Продукти рослинництва, або продукти рослинного походження (ПРП), є обов’язковою складовою харчування людини. Виробництво цих продуктів носить сезонний характер. Ця обставина є економічним обґрунтуванням зберігання ПРП для рівномірного їх споживання протягом року.

З іншого боку, підвищення стандартів якості ПРП стимулює розвиток та вдосконалення технологій виробництва, транспортування та зберігання ПРП.

Технологія зберігання ПРП насамперед передбачає використання низьких температур. Інші заходи задля покращення результатів зберігання є додатковими.

До них відноситься створення та підтримання газового середовища, склад якого відмінний від повітря. Одною з технологій, що використовує додатково до низьких температур зміну складу газового середовища, є МГС — так звана технологія модифікованого газового середовища.

Додатковим впливом на ПРП при використанні МГС є гальмування процесу дихання, як основного процесу метаболізму, за рахунок зміни концентрації газів, що приймають участь у реакції дихання.

Проте реакція дихання проходить під впливом багатьох чинників: зовнішні тепловий, механічний та хімічний впливи, дія власних ферментних речовин плоду. Впливати на ці чинники слід різними факторами, отже на кожен різновид природного регулювального впливу на реакцію дихання слід розробляти окремі технологічні заходи.

Одним з чинників, що впливає на швидкість процесів метаболізму, є концентрація етилену.

Заходи, які використовують в сучасних технологіях зберігання ПРП у газових середовищах, спрямовані на максимальне поглинання етилену без контролю та регулювання його концентрації в газовому середовищі камери. У випадках використання звичайного холодильного зберігання камери вентилюються, при цьому етилен видаляється.

Подібні неконтрольовані заходи недостатньо ефективні. Отже, виникає потреба у дослідженні цілеспрямованої зміни концентрації етилену в газовому середовищі при зберіганні ПРП для створення оптимальних та ефективних засобів та заходів зі зменшення негативного впливу концентрації етилену.

У сучасних дослідженнях взаємодії яблук та етилену зазначається, що наявність етилену впливає на швидкість зменшення тургору тканин, а наднизька концентрація прискорює процес перетворення крохмалю в моновуглеводи. Таким чином, підкреслюється вплив етилену на плоди. Отже не можна знижувати природну концентрацію етилену, однак також треба не допускати його накопичення [5].

© С.Г. Потапов, М.М. Масліков

Інші дослідження стверджують, що етилен відіграє головну роль у виникненні температурного опіку шкірки плоду під час зберігання при температурі 0 °*С* та подальшому переносу до приміщення з температурою +20 °*С*. Особлива увага приділяється яблукам зі шкірою зеленого кольору, оскільки плоди більшості сортів при технічній ступені стиглості мають зелений колір, а генерування етилену у них більше, ніж у плодів з жовтим кольором [6].

Встановлено, що етилен синтезується плодами, а змінена концентрація етилену у газовому середовищі має регульований вплив на широкий спектр фізіологічних процесів, В процесі біосинтезу етилену беруть участь амінокислоти, кисень та зовнішні фактори: стрес, поранення, патогенні мікроорганізми та безпосередньо концентрація етилену. Побічними продуктами синтезу є утворення мурашиної кислоти, аміаку та двоокису вуглецю. Отже, можна вважати, що: інтенсивність виділення етилену має пряму залежність від концентрації кисню та зворотну від концентрації двоокису вуглецю [1].

З іншого боку, вплив концентрації етилену у газовому середовищі, відбувається шляхом зв'язування етилену з рецепторами клітин плодів та передачею отриманих сполук до клітин, де вони обумовлюють інтенсивність процесів метаболізму. Інакше кажучи, плоди поглинають етилен за допомогою рецепторів. Оскільки робота рецепторів ґрунтується на механізмах взаємодії ферментів, яка регулюється генами і є несправедливою до зовнішніх факторів (за винятком температури), справедливим є твердження про пряму залежність між кількістю етилену, що поглинається та концентрацією етилену у газовому середовищі.

Як підсумок необхідно зазначити, що зміна концентрації етилену в контейнері з ПРП за умови сталої температури буде змінюватися за рівнянням:

$$\frac{dC_2H_4}{d\tau} = \frac{m \cdot 100}{V}\left(R_0^{C_2H_4} \cdot e^{n_1 \cdot \Delta CO_2 + n_2 \cdot \Delta O_2 + n_3 \cdot \Delta C_2H_4} - R_1^{C_2H_4} \cdot e^{n_4 \cdot \Delta C_2H_4}\right), \text{ млCO}_2/\text{кг}\cdot\text{год}; \quad (1)$$

де R_0^{C2H4} — інтенсивність біогенерації етилену за умов, що плід знаходиться у повітрі, млCO_2/кг·год; ΔCO, ΔC_2H_4 _ відмінність концентрацій відповідно двоокису вуглецю та етилену у повітрі та газовому середовищі контейнера, %; ΔO_2 — відмінність концентрації кисню у газовому середовищі контейнера та повітрі, %; ΔC_2H_4 — інтенсивність поглинання етилену рецепторами плодів за умов, що плід знаходиться у повітрі, млCO_2/кг·год; n_1 n_2, n_3, n_4 — чисельні коефіцієнти, що визначають ступінь впливовості зміни концентрації відповідних газів на відповідну реакцію; m — маса плодів у контейнері, кг; V — об'єм газового середовища контейнера, л.

Для вимірювання та реєстрації концентрації етилену, кисню та двоокису вуглецю запропоновано використовувати дослідну установку [2], яка була модернізована давачем етилену [4].

За результатами проведеного досліду з яблуками сорту «Джонаред» було побудовано криві зміни концентрацій складових газового середовища герметичного контейнера (рис. 1).

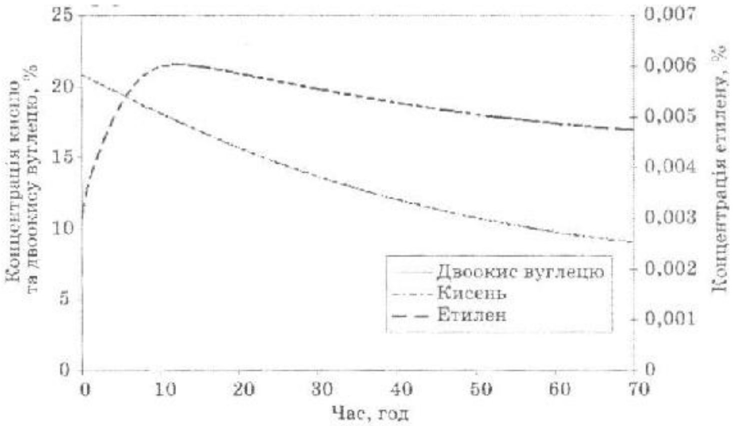

Рис 1. Зміни концентрацій складових газового середовища

За основу моделі дихання було прийнято модель [3] яка розглядає зміну концентрацій кисню та двоокису вуглецю. Було враховано, що зміна концентрації етилену впливає на інтенсивність як аеробного, так і анаеробного дихання:

$$\frac{dCO_2}{d\tau} = \begin{cases} \frac{m \cdot 100}{V} \cdot R_{CO_2} \cdot e^{k_1 \cdot \Delta CO_2 + k_2 \Delta O_2 + k_3 \Delta C_2H_4}, \text{ при } CO_2 \le A_{CO_2}; \\ \frac{m \cdot 100}{V} \cdot \left(R_0^{CO_2} \cdot e^{k_1 \cdot \Delta CO_2 + k_2 \cdot \Delta O_2 + k_3 \Delta C_2H_4} + R_1^{CO_2} \cdot e^{k_4 \cdot \Delta CO_2 + k_5 \Delta C_2H_4}\right), \text{ при } CO_2 > A_{CO_2}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{dCO_2^{aer}}{d\tau} = \frac{m \cdot 100}{V} R_0^{CO_2} \cdot e^{k_1 \cdot \Delta CO_2^{aer} + k_2 \Delta O_2 + k_3 \Delta C_2H_4};$$

$$\frac{dO_2}{dt} = \frac{m \cdot 100}{V} R_0^{O_2} \cdot e^{k_1 \cdot \Delta CO_2^{aer} + k_2 \Delta O_2 + k_3 \Delta C_2H_4}, \text{ при } O_2 < A_{O_2};$$

$$\frac{dC_2H_4}{d\tau} = \frac{m \cdot 100}{V} \left(R_0^{C_2H_4} \cdot e^{n_1 \cdot \Delta CO_2 - n_2 \cdot \Delta O_2 + n_3 \cdot \Delta C_2H_4} - R_1^{C_2H_4} \cdot e^{n_4 \cdot \Delta C_2H_4}\right).$$

де A^, AQ, — концентрації двоокису вуглецю та кисню, що відповідають точці ІАД [3].

Приведені рівняння визначають швидкість зміни виділення двоокису вуглецю та етилену і поглинання кисню. Система рівнянь, що характеризує виділення двоокису вуглецю складено відповідно до гіпотези про інтенсифікацію анаеробного дихання [3].

Враховуючи, що головний фактор впливу на ПРП при зберіганні є зниження температури, математична модель зміни швидкості інтенсивності дихання буде мати загальний вигляд:

$$R = R_0 \cdot e^{b \cdot t} \quad (3)$$

де b — коефіцієнт, що враховує вплив температури на інтенсивність дихання. Отже, пропонується вважати, що взаємозв’язок^між різними факторами які змінюють інтенсивність дихання, математично може бути представлений як сума показників степені експоненти:

$$R = R_0 \cdot e^{m_1 + m_2 + \ldots + m_n} \quad (4)$$

де ці,, тг, ... тп — чинники, що впливають на інтенсивність дихання.

В запропонованому математичному формулюванні (2) показано взаємозв’язок впливу зміни складу газового середовища без врахування впливу температури.

Проведено аналіз кореляції результатів розрахунків на базі запропонованої моделі газообміну з даними досліду, отриманими під час дихання яблук у герметичному контейнері. Графічні залежності наведені на рис. 2, 3, 4.

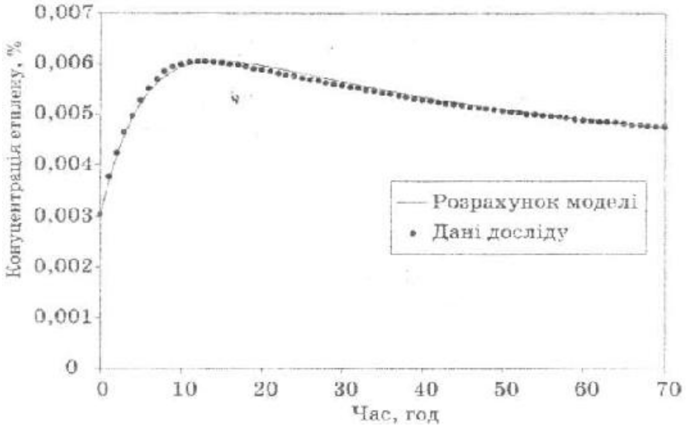

Рис 2. Зміна концентрації етилену

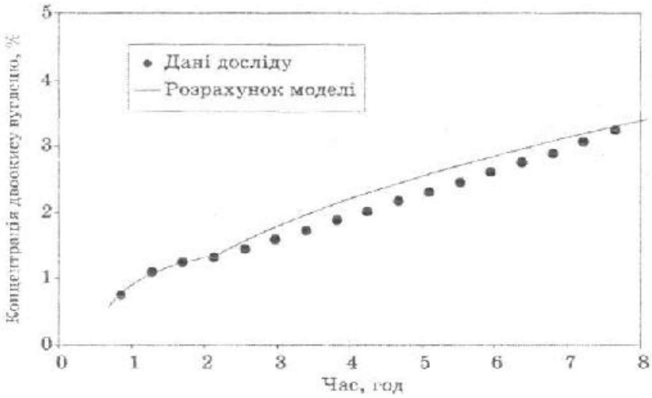

Рис 3. Зміна концентрації двоокису вуглецю

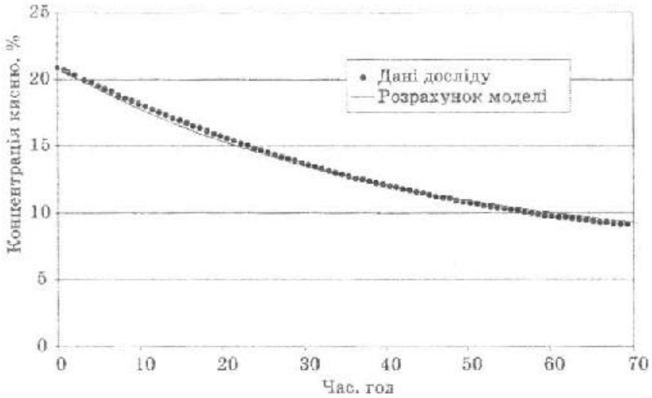

Рис 4. Зміна концентрації кисню