

А.І. Соколенко, д.т.н., проф.
А.О. Чагайда, к.т.н., доц.,
К.В. Васильківський, к.т.н., доц.
Національний університет харчових технологій

Взаємодія енергоматеріальних потоків у газорідних середовищах

Стаття стосується особливостей перебігу енергоматеріальних трансформацій у цукровмісних середовищах анаеробного зброджування. Ендогенні процеси – синтез діоксиду вуглецю, синтез етилового спирту та виділення теплової енергії – оцінюються як первинні з відповідним забезпеченням на основі хімічної енергії цукрів. Ці три процеси супроводжуються вторинними енергоматеріальними проявами в такому переліку: масопередача між дріжджовими клітинами і середовищем; теплопередача між середовищем і поверхнею охолодження; створення локальних охолоджених зон середовища з конвективним циркуляційним контуром; синтез диспергованої газової фази з відповідною складовою циркуляційного контуру; створення концентраційного градієнта на основі CO₂ по гідростатичному тиску; створення рушійного фактора у формі Архімедових сил в дії на дисперговану газову фазу і, відповідно, на рідинну фазу; вертикальне перемішування середовища в супроводі з процесами його сатурації і десатурації в локальних зонах на рівні самопливних процесів.

Запропоновано математичні формалізації стосовно названих вторинних енергоматеріальних процесів з пропозиціями щодо удосконалення і організації їх перебігу.

В основу феноменологічного аналізу фізичної сутності формування та існування вторинних енергоматеріальних потоків покладено закони термодинаміки, механіки, гідромеханіки, розчинності газів в їх перебігу в гравітаційному полі в умовах змінних тисків. Показано, що природний перебіг перехідних процесів доцільно підсилювати додатковими організованими впливами.

Ключові слова: енергоматеріальні потоки; масопередача; теплопередача; анаеробне зброджування; ендогенні процеси.

Актуальність теми. Перебіг енергомасообмінних процесів у газорідних середовищах потребує наявності вхідного енергетичного потоку, який відповідно до природних закономірностей трансформується в потенціал основного цільового перетворення, але в супроводі певної кількості вторинних процесів і потоків. Поглиблене вивчення останніх з оцінкою їх енергетичної значущості і можливості підпорядкування інтересам основного процесу авторами статті оцінено на рівні актуального і перспективного дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Створення будь-якої новітньої технології пов'язується з оцінкою перспектив взаємодій в ній енергоматеріальних потоків та їх кінцевих наслідків. Останнє є особливо важливим, оскільки саме вони майже завжди дискредитують усі зусилля забезпечити відповідність і стабільність природним колообігам, вихід за межі яких приводить до все більш чутливих впливів на довкілля. Саме тому виявлення і використання екологічних принципів у прискореному режимі стає все більш важливим для збереження біосфери, у тому числі і життя самих людей. У перебігу різних явищ і процесів сполучаються причинно-наслідкові зв'язки, рушійні фактори і фактори опору у формі самопливних змін або за наявності певних компенсацій. Все більше заглиблення у спроби наукового відображення перебігу процесів мікро- і макросвіттів та явищ приводить до висновку про важливість у них ролі математики у формі багаторівневої розрахунково-аналітичної моделі, побудованої на законах системної логіки [1, 2]. При цьому передумовою створення математичних формалізацій є детальний аналіз фізичних, хімічних або інших явищ.

Важливим висновком з останнього є формулювання особливостей перебігу перехідних енергетичних процесів і потоків та відповідних трансформацій потоків мас і середовищ, у тому числі на рівнях фазових переходів, колообігів і, нарешті, на рівнях відносно стабільних загальних параметрів систем в ustalених режимах [3, 4].

Енергетичний потік вводиться в систему як зовнішній з певними параметрами і забезпечує роль рушійних факторів. Матеріальні потоки в них є інтегрально стабілізованими, а енергетичні потоки – безперервно поновлюваними. Енергоматеріальні трансформації супроводжуються створенням внутрішніх енергетичних потенціалів у формі теплової енергії, потенціальної енергії стиснутих газових

або парогазових сумішей, кінетичної енергії циркуляційних контурів газорідних середовищ, контурів конвективного перемішування в процесах нагрівання-охолодження, потенціалів розчинених газів.

Разом з тим можливою є зміна ролей і створення технічних систем, в яких стабілізованими мають бути енергетичні потоки, а матеріальні потоки формуються, як прохідні. Така переорієнтація забезпечує додаткові можливості використання вторинних енергетичних ресурсів.

Створення і використання вторинних енергетичних потоків можливе за рахунок їх рекуперації і регенерації з відновленням термодинамічних параметрів до рівнів параметрів первинних потоків [5–11]. Інший варіант стосується змін термодинамічних параметрів фазових переходів середовищ, наприклад, за рахунок їх вакуумування. В основу рекуперації і регенерації енергетичних параметрів газових, парових або парогазових потоків покладено процеси механічної або термокомпресії, зниження тисків у середовищах або організовані теплообмінні процеси з використанням теплових труб або теплових насосів.

В обох останніх випадках роль енергоносія виконує парова фаза теплового агента з потужністю, що відповідає його теплоті пароутворення.

Мета дослідження сформульована як узагальнення термодинамічних можливостей щодо рекуперації і регенерації вторинних енергетичних ресурсів у технологіях харчових виробництв.

Матеріали і методи дослідження стосуються феноменологічного аналізу і математичних формалізацій на основі положень термодинаміки з використанням відповідних матеріальних і енергетичних балансів і принципів щодо функціонування хімічних, енергетичних та механічних процесів на певних етапах виробництв у відповідних підсистемах.

Викладення основного матеріалу. Особливістю і наслідком систем для трансформацій матеріальних сировинних потоків під дією енергетичних впливів є утворення сукупностей у формі внутрішніх енергоматеріальних потоків зі своїми рушійними факторами і факторами опору.

Оцінка таких вторинних явищ має за мету визначення їх впливів на основні процеси і перетворення на кількісному і якісному рівнях [1–3]. На підтвердження останнього для прикладу звернемося до особливостей процесів анаеробного зброджування цукровмісних середовищ. Привнесений до них потенціал хімічної енергії оцінюється за Гей-Люссаком матеріальним і тепловим балансами:

$$\begin{aligned} C_6H_{12}O_6 &= 2C_2H_5OH + 2CO_2 \uparrow + 169 \text{ кДж}; \\ 2870 &= 2640 + 169 + 61, \text{ кДж}, \end{aligned} \quad (1)$$

де 61 кДж – енергія внутрішніх біохімічних перетворень.

З умови (1) витікає, що наслідком перебігу бродіння є не лише біохімічні трансформації з утворенням спирту і CO_2 , а й вторинні процеси виділення теплової енергії та на певному етапі утворення диспергованої газової фази. Це означає, що за організованого тепловідведення на поверхні теплопередачі в середовищі виникає конвективне перемішування, яке в синхронній взаємодії з синтезованою дисперсною газовою фазою CO_2 утворює потужний циркуляційний контур. Очевидно, що динаміка їх перебігу абсолютно пов'язана з швидкістю основного процесу бродіння і визначає гідродинамічний режим газорідного середовища, впливаючи на первинний процес у напрямку його прискорення. До енергетичного балансу входить тепла енергія в кількості 169 кДж/моль глюкози і енергія синтезу диспергованої газової фази. Перерахунки названих потенціалів на масові питомі показники виконаємо за початкової маси розчиненого цукру 160 кг/м^3 середовища, з якої синтезується 88 кг CO_2 . Якщо вважати, що в розчиненому стані на завершення процесу його залишиться 4 кг/м^3 , то загальна кількість діоксиду вуглецю, що пройшла через утворення диспергованої газової фази, складе 84 кг/м^3 з енергетичним потенціалом

$$E = m_{CO_2} RT = 84 \cdot 189 \cdot 303 = 48104 \text{ кДж / м}^3,$$

де $R = 189 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ – універсальна газова стала; $T = 303 \text{ К}$ – абсолютна температура середовища.

Загальний потенціал теплової енергії визначаємо із співвідношення, за яким з 0.18 кг глюкози за бродіння її утворюється 169 кДж/моль . Тоді

$$Q = \frac{m_i R}{0,18} = \frac{160 \cdot 169}{0,18} = 150222 \text{ кДж / м}^3,$$

де $m_i = 160 \text{ кг}$ – маса цукру.

Потужність теплового потоку в середньому обчисленні за умови 72 год. бродіння складає:

$$N = \frac{Q}{3600t} = \frac{150222}{3600 \cdot 72} = 0,58 \text{ кВт / м}^3.$$

Порівняння енергетичних потенціалів E та Q вказує на значну перевагу останнього, однак варто врахувати, що значення E стосується лише енергетичної вартості утворення диспергованої газової фази, яке має продовження у формі рушійного фактора на основі закону Архімеда і розширення газової фази під час спливання у зв'язку зі зменшенням гідростатичного тиску.

Оскільки утворення диспергованої газової фази відбувається у формі самопливного процесу у всьому об'ємі середовища, то це означає, що для повного масиву газових бульбашок діапазон змін гідростатичного тиску буде різним. У зв'язку з цим, на першому етапі моделювання скористаємося припущенням, яким діапазон змін цих тисків будемо вважати середньою величиною з наступною перевіркою цього положення, а умови перебігу процесу – ізотермічними. Загальний об'єм синтезованої газової фази за прийнятого значення середнього гідростатичного тиску ρgh , де ρ – питома маса рідинної фази, кг/м^3 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; h – середня висота рідинного шару, визначаємо залежністю:

$$V_1 = \frac{m_{\text{CO}_2} RT}{\rho gh + p_0}$$

Якщо прийняти значення $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $h = 5 \text{ м}$, а тиск в газовій фазі $0,1 \text{ МПа}$, то

$$V_1 = \frac{84 \cdot 189 \cdot 303}{1000 \cdot 9,81 + 100000} = 32,27 \text{ м}^3.$$

Після розширення об'єм V_2 газової фази становитиме

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{149050 \cdot 32,27}{100000} = 48,1 \text{ м}^3.$$

Роботу розширення CO_2 визначаємо залежністю

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 149050 \cdot 32,27 \ln \frac{48,1}{32,27} = 1919,13 \text{ кДж / м}^3.$$

Зазначемо, що в ізотермічному процесі ентальпія і внутрішня енергія ідеального газу не змінюються, оскільки $di = 0$ і $du = 0$.

Робота розширення газової фази L визначена за відомою термодинамічною залежністю, при цьому спливання газових бульбашок пов'язано з подоланням опору середовища. Оскільки відомо [4], що швидкість такого спливання практично стабілізована, то це означає, що рушійні Архімедові сили зрівноважені силами опору середовища. Це дозволяє визначати через газоутримувальну здатність рушійний фактор гідродинамічного стану середовища, а за відомих об'ємів газової фази, пропущеної через середовище, і переміщення точок прикладання рушійних сил – енергетичних потенціал взаємодії газової і рідинної фаз. Оскільки середній об'єм газової фази складає значення

$$V_{\text{сеп}} = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{48,1 + 32,27}{2} = 40,185 \text{ м}^3,$$

то сукупне значення Архімедової сили становить:

$$P_{\text{Ар}} = V_{\text{сеп}} \rho g = 40,185 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 3942149 \text{ Н},$$

що на середньому переміщенні 5 м відповідає енергетичному потенціалу

$$E_z = P_{\text{Ар}} h = 3942149 \cdot 5 = 197107425 \text{ Дж / м}^3. \quad (2)$$

Для порівняння звернемо увагу на значення роботи розширення газової фази $L = 1919,13 \text{ кДж/м}^3$. Одержане наближення результатів за двома методиками свідчить на користь правомірності прийнятих припущень. Разом з тим одержаний за умовою (2) результат є питомим, оскільки він стосується кількості диспергованої газової фази в одному кубічному метрі середовища у перерахунку на рідинну фазу. Однак її енергетичний прояв має місце під час спливання по всій висоті газорідинного шару. Висота, на якій відбувається ця енергоматеріальна взаємодія, може бути обчислена за визначеної координати центра формування відповідного масиву диспергованої газової фази. Якщо відлік здійснювати стосовно газової фази, диспергованої в одному кубічному метрі на заглибленні 10 м , то це означає її десятикратний прояв. Відповідно для масивів, сформованих на заглибленні $9, 8, 7, \dots \text{ м}$ маємо дев'яти-, восьми-, семикратну взаємодію тощо. Така особливість стосується середовищ анаеробного бродіння, в яких синтез CO_2 має місце в кожній без винятку локальній зоні середовища. Наслідком при цьому є зростаючі газоутримувальна здатність, активований гідродинамічний режим і рушійний фактор у формі Архімедової сили.

Наведені міркування вказують на важливість вторинних процесів та їх взаємодію з первинним біохімічним процесом, в якому, окрім рушійних факторів, створюється перспектива його повного припинення у формі бактеріостатичного ефекту через зростання осмотичного тиску, створюваного розчиненням в середовищі етиловим спиртом і діоксидом вуглецю. Обмежена величина розчинності CO_2 приводить синхронно і до обмеження його складової в загальному значенні осмотичного тиску, однак фізичне обмеження розчинності приводить до бар'єру масопередачі на межі поділу фаз дріжджових клітин і середовища. Скоріше за все такий бар'єр мав би зупинити процес бродіння суттєво раніше, ніж це відбувається під дією осмотичного тиску в рідинній фазі. Однак присутність конвективної циркуляції, доповненої дисперговою газовою фазою, приводить до створення локальних зон з наявністю в них процесів сатурації і десатурації. Опукний рух в ділянках циркуляційного контуру, що прилягають до

поверхні охолодження, супроводжується двома факторами впливу на збільшення розчинності CO_2 . До них, відповідно до закону Генрі, належать температура середовища, що знижується, і гідростатичний тиск, що зростає [5]. Це природне супроводження двох самопливних процесів взагалі забезпечує можливість процесів анаеробного бродіння в рамках відомих обмежень. Роль компенсаційного процесу при цьому належить трансформації потоку цукрів з відповідним енергетичним супроводженням і утворенням діоксиду вуглецю з наступним синтезом диспергованої газової фази. Однак під час фази доброджування енергоматеріальний вплив компенсаційного процесу неухильно зменшується з обмеженням енергетичного потенціалу циркуляційного контуру і припиненням його існування. Це означає відсутність процесу десатурації і повне досягнення насичення рідинної фази на CO_2 . Наслідком такої ситуації поруч з осмотичним тиском розчинених речовин є наближення до прояву бактеріостатичного припинення життєдіяльності дріжджових клітин. При цьому важливо, що середовище продовжує мати в собі тепер уже статичний енергетичний потенціал розчиненого діоксиду вуглецю, який можливо використати на обмеження негативної ситуації.

Так патент України 124158 [5] стосується способу зброджування цукровмісних середовищ з такою формулою винаходу: "Спосіб зброджування цукровмісних середовищ, що включає підготовку розчинів цукру і внесення в розчин дріжджів-цукроміцетів, який відрізняється тим, що після завершення лаг-фази і повного насичення середовища діоксидом вуглецю тиски в об'ємі газової надрідинної фази CO_2 примусово підтримують швидкоплинно змінними в межах від 0,13 до 0,10 МПа і знову до 0,13 МПа з паузами затримки на нижньому рівні на 5 хв. і на верхньому рівні на 15 хв".

Ефективність прояву способу ґрунтується на тому, що зниження тиску приводить систему до режиму десатурації, а наступне підвищення тиску – до режиму, в якому середовище стає ненасиченим з можливістю поновлення ендogenous синтезу CO_2 .

Реалізація такого способу можлива за використання різних апаратурних схем, у тому числі і за здвоєних бродильних апаратів [6]. На рисунку 1 відображено схему системи для зброджування суслу (патент України на корисну модель 129124), яка складається з дробарки 1, змішувача 2 помелу і води, апарата 3 термоферментативної обробки, оцукрювача 4, насоса 5, бродильних апаратів 6 і 7 з сорочками термостабілізації 8 і 9, трубопроводів 10, газового компресора 11, засувок 12, 13, 14 і 15, контролера 16 і датчиків тиску 17.

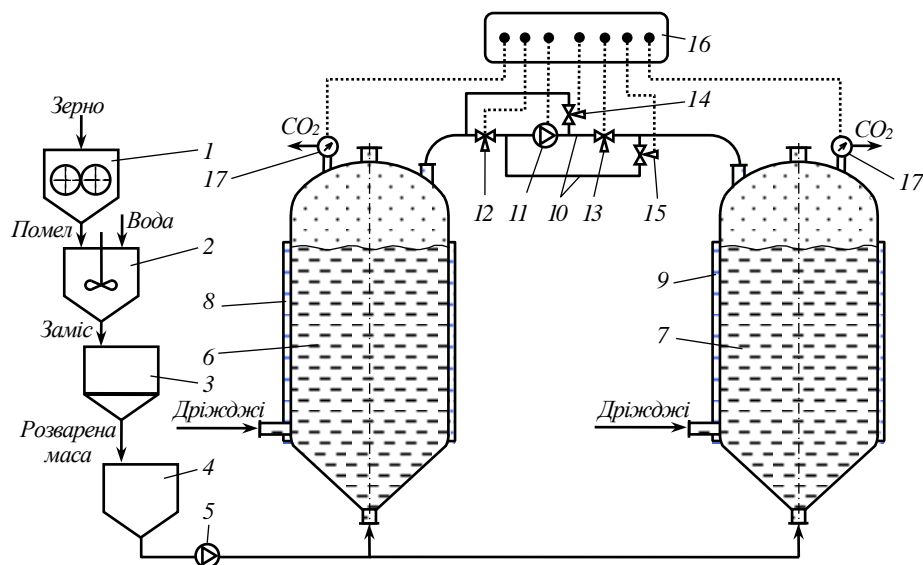


Рис. 1. Система зброджування суслу у виробництві етанолу (патент України на корисну модель 129124)

Оснащення двох спарених бродильних апаратів з синхронізованими в часі циклами бродіння системою поєднання їх газових об'ємів у складі трубопроводів, газового компресора, засувок, контролера і датчиками тиску дає можливість регуляторними змінами тисків у газових надрідинних об'ємах (збільшення в першому і одночасне зменшення в другому) забезпечувати переходи газонасичених середовищ до ненасичених станів по CO_2 з режимами сатурації і активованого масообміну та перенасичених з режимами десатурації.

Технічний результат полягає в можливості обмежувати рівні насичення рідинної фази на CO_2 та перебування рідинної фази в стані постійного ненасичення за рахунок регуляторних можливостей і забезпечувати активізацію процесів бродіння.

Забезпечення автономних і більш диференційованих режимів змін тисків пропонується в патенті України на корисну модель 124159 [7] (рис. 2), за яким устаткування системи в частині надрідинного газового об'єму бродильного апарата замкнутим контуром змінних регульованих тисків у складі контролера, компресора, ресивера, датчика тиску, трубопроводів та запірної арматури дозволяє дискретно переривати стан насичення культурального середовища діоксидом вуглецю, прискорити ендогенні процеси синтезу CO_2 і етилового спирту, інтенсифікувати масообмінні процеси між дріжджовими клітинами та середовищем, підвищити зброджувальну активність дріжджів та продуктивність бродильного апарата і системи.

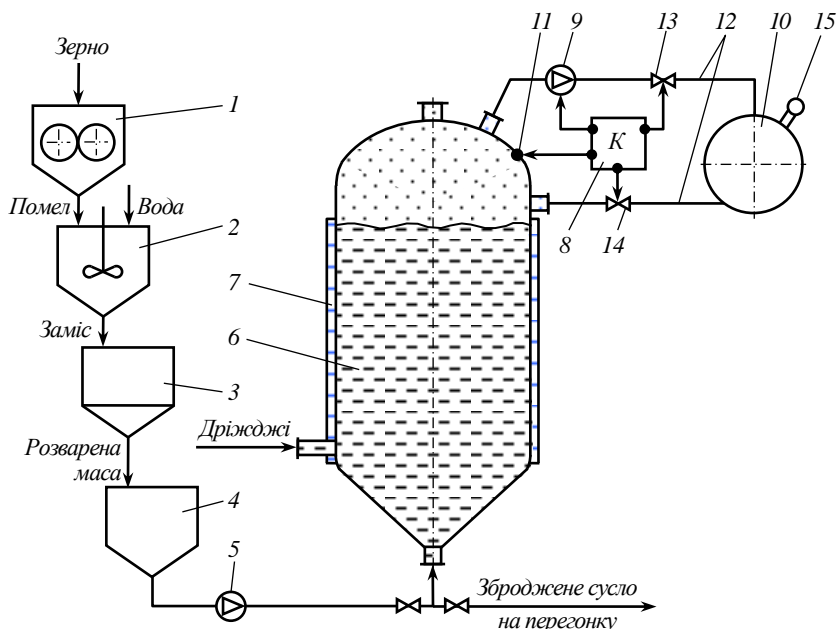


Рис. 2. Система збродження сусла у виробництві етанолу (патент України на корисну модель 124159: 1 – дробарка; 2 – змішувач помелу і води; 3 – апарат термоферментативної обробки; 4 – оцукрювач; 5 – насос; 6 – бродильний апарат; 7 – сорочка термостабілізації бродильного апарата; 8 – контролер; 9 – компресор; 10 – ресивер; 11 – датчик тиску; 12 – трубопроводи; 13, 14 – запірні клапани; 15 – запобіжний клапан

Висновки та перспективи подальших досліджень. Анаеробні процеси бродіння, в яких здійснюється синтез спирту і діоксиду вуглецю, виділення теплової енергії варто оцінювати як первинні з роллю компенсаційних, що супроводжуються вторинними енергоматеріальними процесами в такому переліку:

- процеси масопередачі між дріжджовими клітинами і середовищем;
- процес теплопередачі між середовищем і поверхнею охолодження, створення локальних зон охолодження середовища з конвективним циркуляційним контуром;
- синтез диспергованої газової фази з відповідною складовою циркуляційного контуру в супроводі зі створенням концентраційного градієнта CO_2 по гідростатичному тиску;
- створення рушійного фактора у формі Архімедових сил в дії на дисперговану газову фазу, вертикальне перемішування середовища в супроводі з процесами його десатурації і сатурації;
- самопливні процеси сатурації і десатурації рідинної фази середовища.

Подальші дослідження доцільно присвятити оцінкам потенціалів конвективного перемішування газорідних середовищ у зв'язку з відведенням біологічної теплоти збродження середовищ і у зв'язку з геометрією бродильних апаратів. Використання таких даних дозволить досягти наближення до режимів інтенсивного масообміну з обмеженнями концентрацій розчиненого діоксиду вуглецю з виведенням середовищ за межі станів насичення і підвищити граничний рівень накопичень етилового спирту.

Список використаної літератури:

1. Соколенко А.І. Енергоматеріальні трансформації в харчових технологіях на основі замкнутих контурів : монографія / А.І. Соколенко, В.А. Піддубний, А.О. Чагайда. – Київ : Кондор, 2015. – 300 с.
2. Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях : монографія / А.І. Соколенко, А.А. Мазаракі, В.А. Піддубний, О.Ю. Шевченко та ін. – Київ : Фенікс, 2012. – 484 с.
3. Енергоматеріальні потоки харчових і мікробіологічних виробництв : монографія / А.І. Соколенко, В.А. Піддубний, К.В. Васильківський, І.Ф. Максименко та ін. – Київ : Кондор, 2016. – 326 с.

4. Інтенсифікація енерго-масообмінних процесів в культуральних середовищах бродильних і мікробіологічних виробництв : монографія / А.І. Соколенко, О.Ю. Шевченко, К.В. Васильківський, О.І. Степанець та ін. – Київ : Кондор, 2018. – 212 с.
5. Пат. 124158 Україна, МПК С12G 3/02 (2006.01), С12F 3/08 (2006.01). Спосіб зброджування цукровмісних середовищ / Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Максименко І.Ф., Степанець О.І., Вінніченко І.М. ; власник НУХТ. № u201709858 ; заявл. 11.10.2017 ; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6.
6. Пат. 129124 Україна: МПК С12G 3/10 (2006.01), В01D 3/10 (2006.01). Система зброджування суслу у виробництві етанолу / Шевченко О.Ю., Соколенко А.І., Васильківський К.В. та ін. ; власник НУХТ. № u201803255 ; заявл. 28.03.2018 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20.
7. Пат. 124159 Україна: МПК С12P 7/06 (2006.01), С12G 3/10 (2006.01). Система зброджування суслу у виробництві етанолу / Шевченко О.Ю., Соколенко А.І., Степанець О.І., Максименко І.Ф. ; власник НУХТ. № u201709860 ; заявл. 11.10.2017 ; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6.
8. Коваль О.В. Удосконалення процесів і модернізація обладнання бродильних виробництв : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / О.В. Коваль. – К. : НУХТ, 2016. – 194 с.
9. Піддубний В.А. Наукові основи і апаратне оформлення перехідних процесів харчових і мікробіологічних виробництв ; автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12 / В.А. Піддубний. – К. : НУХТ, 2008. – 47 с.
10. Особливості трансформацій матеріальних і енергетичних потоків у бродильних середовищах / О.Ю. Шевченко, І.М. Вінніченко, О.І. Степанець, О.О. Бойко // Наукові праці НУХТ. – Київ : НУХТ, 2017. – Т. 23. – № 4. – С. 89–98.
11. Лензійон С.В. Розвиток методів розрахунку і обладнання транспортно-технологічних систем у виробництві шампанських вин : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / С.В. Лензійон. – К. : НУХТ, 2011. – 139 с.

References:

1. Sokolenko, A.I., Pidubnyy, V.A. and Chahayda, A.O. (2015), *Enerhomaterial'ni transformatsiyi v kharchovykh tekhnolohiyakh na osnovi zamknytykh konturiv*, monohrafiya, Kondor, Kyiv, 300 p.
2. Sokolenko, A.I., Mazaraki, A.A., Pidubnyy, V.A., Shevchenko, O.YU. and other (2012), *Enerhetychni transformatsiyi i enerhozberezhennya v kharchovykh tekhnolohiyakh*, monohrafiya, Feniks, Kyiv, 484 p.
3. Sokolenko, A.I., Pidubnyy, V.A., Vasyk'kivs'kyu, K.V., Maksymenko, I.F. and other (2016), *Enerhomaterial'ni potoky kharchovykh i mikrobiolohichnykh vyrobnytstv*, monohrafiya, Kondor, Kyiv, 326 p.
4. Sokolenko, A.I., Shevchenko, O.YU., Vasyk'kivs'kyu, K.V., Stepanets', O.I. and other (2018), *Intensyfikatsiya enerho- masoobminnykh protsesiv v kul'tural'nykh seredovyschch brodylnykh i mikrobiolohichnykh vyrobnytstv*, monohrafiya, Kondor, Kyiv, 212 p.
5. Sokolenko, A.I., Shevchenko, O.YU., Maksymenko, I.F., Stepanets', O.I. and other (2018), *Sposib zbrodzhuvannya tsukrovmysnykh seredovyschch*, Pat. № 124158.
6. Shevchenko, O.YU., Sokolenko, A.I., Vasyk'kivs'kyu, K.V. and Maksymenko I.F. (2018), *Systema zbrodzhuvannya susla u vyrobnytstvi etanolu*, Ukraïna, Pat. № 129124.
7. Shevchenko, O.YU., Sokolenko, A.I., Stepanets', O.I. and Maksymenko I.F. (2018), *Systema zbrodzhuvannya susla u vyrobnytstvi etanolu*, Ukraïna, Pat. № 124159.
8. Koval', O.V. (2016), *Udoskonalennya protsesiv i modernizatsiya obladnannya brodylnykh vyrobnytstv*, Diss. of kand. tehn. nauk, spec. 05.18.12, Kyiv, 194 p.
9. Pidubnyy, V.A. (2008), *Naukovi osnovy i aparaturne oformlennya perekhidnykh protsesiv kharchovykh i mikrobiolohichnykh vyrobnytstv*, Diss. of d-ra tehn. nauk, spec. 05.18.12, Kyiv, 47 p.
10. Shevchenko, O.YU., Vinnichenko, I.M., Stepanets', O.I. and Boyko, O.O. (2017), «Osoblyvosti transformatsiy material'nykh i enerhetychnykh potokiv u brodylnykh seredovyschchakh», *Naukovi pratsi NUKHT*, Vol. 23, No. 4, pp. 89–98.
11. Lenzion, S.V. (2011), *Rozvytok metodiv rozrakhunku i obladnannya transportno-tekhnolohichnykh system u vyrobnytstvi shampans'kykh vyn*, Diss. of kand. tehn. nauk, spec. 05.18.12, Kyiv, 139 p.

Соколенко Анатолій Іванович – доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, завідувач кафедри мехатроніки та пакувальної техніки Національного університету харчових технологій.

Наукові інтереси:

- динаміка перехідних процесів в харчових технологіях;
- енерго- та ресурсозбереження в харчових технологіях.

E-mail: mif63@i.ua.

Чагайда Андрій Олегович – кандидат технічних наук, доцент Національного університету харчових технологій.

Наукові інтереси:

- енерго- і ресурсозбереження в харчових технологіях.

Васильківський Костянтин Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри мехатроніки та пакувальної техніки Національного університету харчових технологій.

Наукові інтереси:

- динаміка перехідних процесів в харчових технологіях.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2019.