ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

УДК 664.1:66.067.1
DOI https://doi.org/10.37734/2518-7171-2026-2-11

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕЖИМІВ БЕЗПЕРЕРВНОГО ТА ПЕРЕРИВЧАСТОГО РОЗБАВЛЕННЯ ПІД ЧАС ДІАФІЛЬТРАЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ БУРЯКОВОГО ЕКСТРАКТУ САХАРОЗИ

Ю. Г. ЗМІЄВСЬКИЙ, доктор технічних наук, старший науковий співробітник
ORCID ID: 0009-0007-5383-5967

А. І. МАРИНІН, кандидат географічних наук, старший дослідник, доцент
ORCID ID: 0000-0001-6692-7472

Р. С. СВЯТНЕНКО, кандидат географічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник
ORCID ID: 0000-0003-0895-6982

Д. В. ГАРМАШ, доктор філософії, старший науковий співробітник
ORCID ID: 0000-0002-9591-9364

О. В. БОРТНІЧУК, кандидат технічних наук, доцент
ORCID ID: 0000-0003-4566-8306
(Національного університету харчових технологій)

Анотація. *Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ресурсоефективності очищення бурякових екстрактів і зменшення втрат сахарози на мембранних стадіях виробництва. Ультрафільтрація дає змогу видаляти високомолекулярні нецукри за помірних температур, однак частина цільового компонента залишається в концентраті та втрачається разом із ним. Застосування діафільтрації створює передумови для додаткового вилучення сахарози, проте ефективність процесу істотно залежить від режиму подавання води, частки відібраного пермеату та кількості ступенів розбавлення. Тому порівняння безперервного і переривчастого режимів діафільтрації та встановлення раціональних параметрів їх проведення є актуальним науково-практичним завданням для розроблення енерго- та ресурсоефективних технологій цукрового виробництва.*

В роботі використано експериментальні дані ультрафільтрації інвертованого бурякового екстракту на мембранах з відсікаючою здатністю по молекулярній масі (Cut-off) 10 та 50 кДа. у лабораторній установці непроточного типу. Ефективна площа мембран становила $1{,}38 \cdot 10^{-3}$ і $3{,}42 \cdot 10^{-3}$ м². Нові мембрани ущільнювали фільтруванням дистильованої води протягом 2 год за тиску 0,8 МПа. Діафільтрацію оцінювали за матеріальними балансами цільового компонента для постійного об'єму та ступінчастого концентрування. Фактор проникності мембрани за сахарозою визначено експериментально-розрахунковим методом; для мембрани 10 кДа він становив 0,55.

Встановлено, що на першому ступені частка відібраного пермеату не повинна перевищувати 0,50 початкового об'єму через накопичення сухих речовин у концентраті. Після кожного наступного розведення допустимий відбір може бути підвищений до 0,80, а на завершальному ступені – до 0,90. За сумарного співвідношення $V_p/V_0 = 3{,}0$ розрахункові втрати сахарози з концентратом становили 1,9% для чотириступінчастого переривчастого режиму та 19,2% для безперервного режиму. Безперервне розбавлення потенційно забезпечує вищу питому продуктивність через нижчу концентрацію розчинених речовин, але утворює більш розбавлений пермеат і потребує більших енерговитрат на подальше концентрування.

Переривчасте чотириступінчасте розбавлення є раціональним режимом вилучення сахарози з концентрату мембраною (Cut-off) 10 кДа. Наукова новизна полягає у встановленні кількісної залежності залишкових втрат сахарози від режиму подавання діафільтраційної води та ступеня відбору пермеату. Запропонований режим може бути використаний під час проєктування ресурсоефективної технології очищення бурякових екстрактів.

Ключові слова: *ультрафільтрація, діафільтрація, буряковий екстракт, сахароза, мембрана (Cut-off) 10 кДа, переривчасте розбавлення, безперервне розбавлення.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Баромембранні процеси в цукровій промисловості досі застосовуються обмежено – здебільшого через великі обсяги виробництва та брак систематичних досліджень. У попередній роботі авторів [1] було експериментально досліджено ультрафільтраційне очищення інвертованого бурякового екстракту в установках непроточного типу застосовуючи мембрани із cut-off 10 та 50 кДа: показано залежність питомої продуктивності та селективності мембран від тиску й температури, і зроблено висновок про перевагу мембрани 10 кДа за селективністю. Водночас у цій публікації було зазначено, що жодна з двох мембран не забезпечує повного очищення розчину від баластних сполук, а вирішенням проблеми залишкової сахарози в концентраті може бути застосування діафільтрації – процесу, який у роботі [1] лише згадувався як напрям подальших досліджень і не супроводжувався даними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Активне впровадження мембранних процесів в харчову промисловість пов'язано з можливістю розділяти розчини на молекулярному рівні, зберігаючи при цьому нативний стан цінних компонентів. Найбільш поширені баромембранні процеси: мікро-, ультрафіль трація, зворотній осмос, рушійною силою яких є різниця тиску. У цукровій промисловості ці технології практично не застосовуються, що пов'язано з великими обсягами виробництва та недостатньою кількістю наукових досліджень у цій області. Однак, відомі роботи, в яких описано, як ультрафільтрацією очищали від нецукрів дифузійні соки, отримані, як з тростини [1, 2], так і цукрового буряка [3–5]. Це дозволило знизити кольоровість і каламутність розчинів до 60 і 78% відповідно [1, 3, 4], при цьому спостерігалася низька селективність мембран по сахарозі – від 6,74 до 17,68% [2], що робило втрати цільового компонента з концентратом помірними. Для отримання високого ступеня очищення такого соку, необхідно його обробляти не тільки ультрафільтрацією, але і доочищувати адсорбентами або іонообмінними смолами [1].

Подальші дослідження підтвердили, що ефективність мембранного очищення залежить не лише від розміру пор мембрани, але й від її матеріалу, попереднього оброблення сировини та гідродинамічних умов процесу. Z. Zhu і H. Mhemdi досліджували тупикову ультрафільтрацію бурякового соку, одержаного з попередньо обробленої імпульсним електричним полем сировини [6].

Перспективність промислового застосування керамічних мембран підтверджено під час пілотних досліджень ультрафільтрації тростинного соку продуктивністю 5,5 м³/год [7]. Використання мембран із розміром пор 0,05 мкм забезпечило середній потік пермеату 119,13–142,43 дм³/(м²·год), зниження каламутності на 99,96% та кольоровості на 10,42%. Чистота очищеного соку підвищилася більш ніж на 1,2 одиниці.

J. Luo зі співавторами запропонували інтегровану схему мембранного очищення тростинного соку з використанням полімерних мембран за підвищеної температури [8]. Установлено, що температурний режим суттєво впливає на в'язкість соку, проникність мембрани, інтенсивність концентраційної поляризації та формування шару забруднень.

Перспективним напрямом є також очищення побічних продуктів цукрового виробництва. M. Sjölin зі співавторами дослідили керамічні ультра- та нанофільтраційні мембрани для очищення сахарози в буряковій мелясі [9]. Ультрафільтрація забезпечувала видалення переважно високомолекулярних і завислих домішок, тоді як нанофільтрація характеризувалася вищою селективністю щодо нецукрів і давала можливість ефективніше підвищувати чистоту сахарозного розчину.

Узагальнення сучасних досліджень, виконане H. Zhang зі співавторами, показало, що мембранні процеси дають змогу скоротити використання вапна, діоксиду сірки та інших реагентів, зменшити утворення осадів і одержувати цукрові розчини підвищеної якості [10].

Формування цілей статті. Метою дослідження є порівняння безперервного та переривчастого режимів розбавлення концентрату під час діафільтраційного очищення бурякового екстракту сахарози.

Матеріали і методи. Вихідний буряковий екстракт мав параметри, наведені в таблиці. 1.

Дослідження проводили на баромембранній лабораторній установці непроточного типу з ефективною площею мембран $1{,}38 \cdot 10^{-3}$ і $3{,}42 \cdot 10^{-3}$ м², на мембранах (Cut-off) 10 кДа та 50 кДа. Нові мембрани попередньо відпресовували протягом 2 год фільтруванням дистильованої води при тиску 0,8 МПа. Питому продуктивність і селективність визначали за стандартними для баромембранних процесів співвідношеннями об'єму пермеату до площі мембрани й часу відбору проби та відносної різниці концентрацій компонента в пермеаті й концентраті.

Таблиця 1

Параметри бурякового екстракту перед ультрафільтрацією [11]

Сухі речовин, %	Чистота, %	Концентрація сахарози, %	pH	Кольоровість, од. опт. густ.	Концентрація білків, %
14,5	88,5	13,3	4,7	2922	0,454

Для порівняння режимів розбавлення застосовували балансові рівняння діафільтраційного розділення двокомпонентних розчинів, що пов'язують концентрацію пермеату C_p і концентрату C_r з вихідною концентрацією C_0, об'ємом вихідного розчину V_0, об'ємом одержаного пермеату V_p і фактором проникності мембрани по цільовому компоненту P_c (0…1). Ці співвідношення дозволяють прогнозувати концентрацію сахарози в пермеаті й концентраті окремо для двох режимів ведення процесу:

Коефіцієнт відбору пермеату (відношення V_p/V_0) визначає, яку частку вихідного розчину можна пропустити крізь мембрану до моменту, коли вміст розчинених речовин у концентраті досягне 20% і вище – рівня, за яким питома продуктивність мембрани різко знижується. Величину P_c для мембрани 10 кДа розраховували на підставі експериментальних даних з попередніх досліджень [11].

Виклад основного матеріалу дослідження. Встановлено [11], що при тиску 0,3 МПа питома продуктивність мембрани 50 кДа досягала максимуму 12,2 дм³/(м²·год), тоді як продуктивність 10 кДа практично не залежала від тиску і трималася на рівні 6,7 дм³/(м²·год) у всьому дослідженому діапазоні. Селективність обох мембран за сухими речовинами, сахарозою і білками зростала при 0,5 МПа, що пояснюється ущільненням динамічного шару на поверхні мембрани. При підвищенні температури розчину від 30 до 85 °С селективність по білках зростала з 63,22 до 66,96%, а зниження кольоровості дещо послаблювалося – з 98,62 до 97,02%, при цьому селективність по сухих речовинах і сахарозі (37,93 і 43,61% відповідно) від температури не залежала. Оскільки нагрівання вище 60 °С додатково сприяє руйнуванню молекул сахарози, температурою 60 °С було визнано раціональну верхню межу процесу. Ці висновки визначили вихідні умови (мембрана 10 кДа, температура 60 °С), за яких надалі виконувалося порівняння режимів розбавлення.

Отримані дані [11] є підґрунтям для проведення експериментальних та теоретичних досліджень процесу діафільтрації. У таблиці 2 наведені результати попередніх експериментів, коли вихідний сік був розбавлений дистильованою водою в 2 і 10 разів. В обох випадках в пермеаті спостерігається низький вміст сахарози, що вимагає значних енерговитрат на її концентрування.

Також були проведені обчислення за допомогою розрахункових залежностей для визначення більш ефективного способу розділення бурякового екстракту з метою мінімальних втрат сахарози. Кількість розчинених речовин в концентраті, одержуваному при ультрафільтрації, як правило, не перевищує 20–24%, що пов'язано з різким зниженням питомої продуктивності мембран. Тому, якщо не застосовувати діафільтрацію [11], то втрати сахарози будуть значними [11].

Спочатку було визначено коефіцієнт відбору пермеату, який характеризує співвідношення об'єму пермеату Vp і початкового об'єму Vo розчину. Він показує, яку частину рідини можна пропустити крізь мембрану, до моменту, коли кількість розчинених речовин в концентраті досягне значень 20% і більше. Отримані дані зображені на рис. 1. Розрахунки були проведені за концентрацією сахарози за відповідними розрахунковими залежностями, значення P_c розраховане за експериментально-розрахунковим методом на підставі експериментальних даних. Для мембрани 10 кДа P_c = 0,55. З огляду на те, що крім сахарози в концентраті присутні й інші речовини, зроблено висновок, що відбір пермеату на першому етапі концентрування не повинен перевищувати 50%.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень процесу діафільтрації (Р = 0,1 МПа, мембрана 10 кДа, температура 20 ° С)

Степінь розбавлення	Тип розчину	Сухі речовини, %	Концентрація сахарози, %	Кольоровість
у 2 рази	концентрат	7,2	6,1	46,6
	пермеат	6,3	~ 1,5	46,4
у 10 разів	концентрат	3,2	< 1,5	24,2
	пермеат	2,8	< 1,5	22,6

Таблиця 3

Ефективність вилучення сахарози (на 1 м³ вихідного розчину) [22]

Переривчате розбавлення					Постійне розбавлення			
етап	V_p/V_o	$\overline{C}$, %	V_p, м³	Втрати сахарози з концентратом, %	V_p/V_o	$\overline{C}$, %	V_p, дм³	Втрати сахарози з концентратом, %
1	0,5	8,43	0,5	68,3	0,5	6,37	0,5	76,1
2	1,3	7,42	1,3	27,5	1,3	5,25	1,3	48,7
3	2,1	5,66	2,1	10,6	2,1	4,34	2,1	31,5
4	3	4,35	3,0	1,9	3	3,58	3,0	19,2

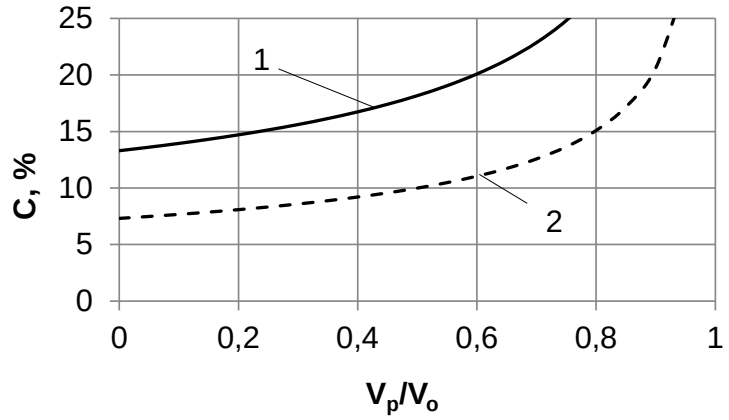


Рис. 1. Зміна концентрації сахарози в концентраті (1) і пермеаті (2) в залежності від кількості пермеата, що відбирається. Мембрана 10 кДа

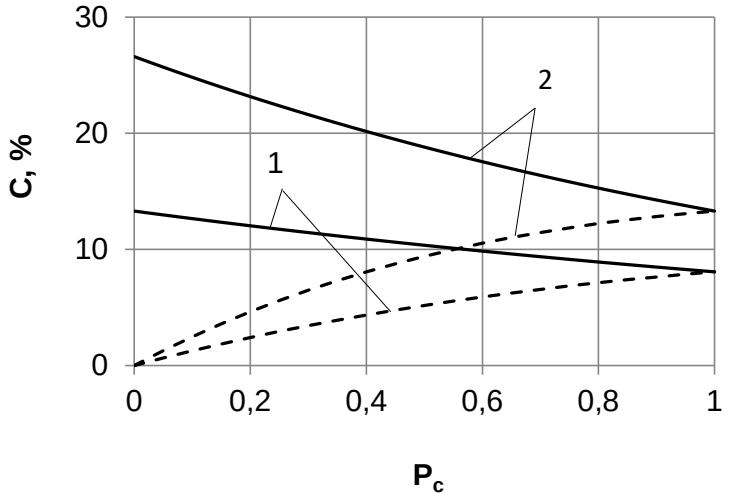


Рис. 2. Залежність концентрації сахарози в концентраті (суцільні лінії) і пермеаті (пунктирні лінії) в процесі постійного (1) та переривчатого (2) розбавлення від фактору проникності розчиненої речовини. При розрахунку брали V_p / V_o = 0,5

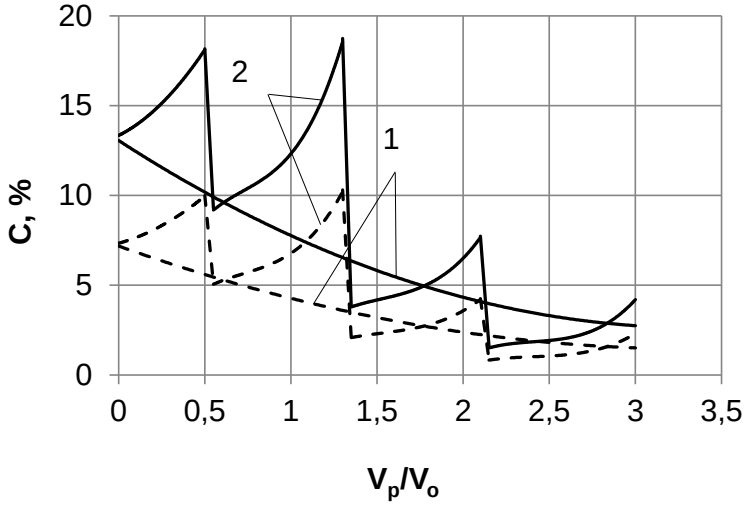


Рис. 3. Розрахункові значення зміни концентрації сахарози в концентраті (суцільні лінії) і пермеаті (пунктирні лінії) в процесі постійного (1) та переривчатого (2) розбавлення. Мембрана 10 кДа

На рис. 2 показано, як впливає P_c на концентрацію сахарози. При розрахунках приймалося співвідношення $V_p/V_o = 0,5$. Видно, що зменшення величини Pc негативно впливає на процес проникнення крізь мембрану сахарози, підвищуючи при цьому її втрати з концентратом. Однак, необхідно враховувати, що це покращує якість очищення від нецукрів. З експериментальних даних, можна зробити висновок, що для мембран зі значенням $P_c < 0,55$ (по сахарозі) ступінь очищення бурякового екстракту буде задовільним.

Було також спрогнозовано (рис. 3) процес постійного та переривчатого розбавлення (чотирьох ступінчастого). Розрахункові точки були апроксимовані відповідними рівняннями, з яких були отримані середні значення (за формулою (1)) концентрації сахарози на кожному етапі.

$$\bar{C} = \frac{1}{x - x_o} \cdot \int_{x_o}^{x} C(x) \cdot dx \qquad (1)$$

де – середня концентрація сахарози, %; x_o, x – початкове та кінцеве значення відрізку, на якому визначається середня величина ($x=V_p/V_o$); C(x) – функція зміни концентрації сахарози від величини x, отримана шляхом апроксимації розрахункових точок.

Розрахунки показали, що на другому і наступних етапах концентрування (при переривчастому розбавленні) відбір пермеату можна збільшити до 80%, а на останньому взагалі до 90%. Аналіз рис. 3 показує, що питома продуктивність мембран 10 кДа, швидше за все буде більше при постійному розбавленні, тому що кількість розчинених речовин протягом всього процесу буде менше. У таблиці 3 наведені дані щодо ефективності вилучення сахарози для обох випадків.

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Встановлено:

1. Для ультрафільтраційного очищення інвертованого бурякового екстракту підтверджено доцільність використання мембрани 10 кДа; фактор її проникності за сахарозою становить Pc = 0,55.

2. На першому ступені концентрування відбір пермеату доцільно обмежувати значенням $V_p/V_o = 0,50$. Після розведення допустимий відбір можна підвищувати до 0,80, а на завершальному ступені – до 0,90.

3. За сумарного $V_p/V_o = 3,0$ розрахункові втрати сахарози з концентратом становлять 1,9% для чотириступінчастого переривчастого та 19,2% для безперервного режиму. Отже, за критерієм вилучення сахарози переривчасте розбавлення є ефективнішим.

4. Безперервний режим може забезпечувати вищу питому продуктивність мембрани завдяки нижчому вмісту розчинених речовин, але потребує більших витрат на подальше концентрування розбавленого пермеату.

Таким чином, для розділення бурякового екстракту раціонально використовувати мембрану 10 кДа, тому що у порівнянні з мембраною 50 КДА вона має вищу селективність за сухими речовинами на 29–34% та за білком на 5,5–6,4%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hamachi M., Gupta B. B., Ben Aim R. Ultrafiltration: a means for decolorization of cane sugar solution. *Separation and Purification Technology*. 2003. Vol. 30. P. 229–239.

2. Bhattacharya P. K., Agarwal S., De S., Rama Gopal U. V. S. Ultrafiltration of sugar cane juice for recovery of sugar: analysis of flux and retention. *Separation and Purification Technology*. 2001. Vol. 21. P. 247–259.

3. Seres Z., Gyura J., Eszterle M., Djuric M. Separation of non-sucrose compounds from syrup as a part of the sugar-beet production process by ultrafiltration with ceramic membranes. *European Food Research and Technology*. 2006. Vol. 223, No. 6. P. 829–835.

4. Hakimzadeh V., Razavi S. M. A., Piroozifard Mir Kh., Shahidi M. The potential of microfiltration and ultrafiltration process in purification of raw sugar beet juice. *Desalination*. 2006. Vol. 200. P. 520–522.

5. Loginov M., Loginova K., Lebovka N., Vorobiev E. Comparison of dead-end ultrafiltration behaviour and filtrate quality of sugar beet juices obtained by conventional and "cold" PEF-assisted diffusion. *Journal of Membrane Science*. 2011. Vol. 377. P. 273–283.

6. Zhu Z., Mhemdi H. Dead end ultra-filtration of sugar beet juice expressed from cold electrically pre-treated slices: effect of membrane polymer on fouling mechanism and permeate quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2016. Vol. 36. P. 75–82. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.016.

7. Li W., Ling G.-Q., Shi C.-R., Li H. Pilot demonstration of ceramic membrane ultrafiltration of sugarcane juice for raw sugar production. *Sugar Tech*. 2017. Vol. 19. P. 83–88. DOI: https://doi.org/10.1007/s12355-016-0434-1.

8. Luo J., Hang X., Zhai W., Qi B., Song W., Chen X., Wan Y. Refining sugarcane juice by an integrated membrane process: filtration behavior of polymeric membrane at high temperature. *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 509. P. 105–115. DOI: https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.053.

9. Sjölin M., Thuvander J., Wallberg O., Lipnizki F. Purification of sucrose in sugar beet molasses by utilizing ceramic nanofiltration and ultrafiltration membranes. *Membranes*. 2020. Vol. 10, No. 1. Article 5. DOI: https://doi.org/10.3390/membranes10010005.

10. Zhang H., Luo J., Liu L., Chen X., Wan Y. Green production of sugar by membrane technology: how far is it from industrialization? *Green Chemical Engineering*. 2021. Vol. 2, No. 1. P. 27–43. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gce.2020.11.006.

11. Сизоненко О. І., Змієвський Ю. Г., Крапивницька І. О., Мирончук В. Г. Дослідження процесу ультрафільтраційного очищення інвертованого бурякового екстракту. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2015. Vol. III(6), Issue 54. С. 67–69.

REFERENCES

1. Hamachi, M., Gupta, B. B., & Ben Aim, R. (2003). Ultrafiltration: A means for decolorization of cane sugar solution. *Separation and Purification Technology*, 30, 229–239. https://doi.org/10.1016/S1383-5866(02)00145-4

2. Bhattacharya, P. K., Agarwal, S., De, S., & Rama Gopal, U. V. S. (2001). Ultrafiltration of sugar cane juice for recovery of sugar: Analysis of flux and retention. *Separation and Purification Technology*, 21, 247–259. https://doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00209-4

3. Šereš, Z., Gyura, J., Eszterle, M., & Djurić, M. (2006). Separation of non-sucrose compounds from syrup as a part of the sugar-beet production process by ultrafiltration with ceramic membranes. *European Food Research and Technology,* 223(6), 829–835. https://doi.org/10.1007/s00217-006-0276-2

4. Hakimzadeh, V., Razavi, S. M. A., Piroozifard, M. K., & Shahidi, M. (2006). The potential of microfiltration and ultrafiltration process in purification of raw sugar beet juice. *Desalination*, 200, 520–522.

5. Loginov, M., Loginova, K., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2011). Comparison of dead-end ultrafiltration behaviour and filtrate quality of sugar beet juices obtained by conventional and cold PEF-assisted diffusion. *Journal of Membrane Science,* 377, 273–283.

6. Zhu, Z., & Mhemdi, H. (2016). Dead end ultra-filtration of sugar beet juice expressed from cold electrically pretreated slices: Effect of membrane polymer on fouling mechanism and permeate quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies,* 36, 75–82. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.016

7. Li, W., Ling, G.-Q., Shi, C.-R., & Li, H. (2017). Pilot demonstration of ceramic membrane ultrafiltration of sugarcane juice for raw sugar production. *Sugar Tech*, 19, 83–88. https://doi.org/10.1007/s12355-016-0434-1

8. Luo, J., Hang, X., Zhai, W., Qi, B., Song, W., Chen, X., & Wan, Y. (2016). Refining sugarcane juice by an integrated membrane process: Filtration behavior of polymeric membrane at high temperature. *Journal of Membrane Science*, 509, 105–115. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.053

9. Sjölin, M., Thuvander, J., Wallberg, O., & Lipnizki, F. (2020). Purification of sucrose in sugar beet molasses by utilizing ceramic nanofiltration and ultrafiltration membranes. *Membranes*, 10, 5. https://doi.org/10.3390/membranes10010005

10. Zhang, H., Luo, J., Liu, L., Chen, X., & Wan, Y. (2021). Green production of sugar by membrane technology: How far is it from industrialization? *Green Chemical Engineering*, 2(1), 27–43. https://doi.org/10.1016/j.gce.2020.11.006

11. Syzonenko, O. I., Zmiievskyi, Yu. H., Krapyvnytska, I. O., & Myronchuk, V. H. (2015). Doslidzhennia protsesu ultrafiltratsiinoho ochyshchennia invertovanoho buriakovoho ekstraktu [Investigation of ultrafiltration purification of inverted beet extract]. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences,* III(6), 54, 67–69 [in Ukrainian].

Yu. Zmiievskyi*, DSc, Senior Researcher;* ***A. Marynin****, PhD, Senior Researcher, Associate Professor;* ***R. Sviatnenko****, PhD, Senior Researcher;* ***D. Harmash****, PhD, Senior Researcher;* ***O. Bortnichuk****, PhD, Associate Professor (National University of Food Technologies).* ***Comparative analysis of continuous and discontinuous dilution modes in the diafiltration purification of sucrose-containing beet extract***

Abstract. *The relevance of this study stems from the need to improve the resource efficiency of beet extract purification and reduce sucrose losses during membrane processing. Ultrafiltration enables the removal of high-molecular-weight non-sugars at moderate temperatures; however, a portion of the target component remains in the retentate and is consequently lost with it. The application of diafiltration creates opportunities for additional sucrose recovery, although process efficiency depends substantially on the mode of water addition, the fraction of permeate withdrawn, and the number of dilution stages. Therefore, comparing continuous and discontinuous diafiltration modes and determining rational operating parameters constitute a relevant scientific and practical objective in the development of energy– and resource-efficient sugar-production technologies.*

The study used experimental data obtained from the ultrafiltration of inverted beet extract through membranes with molecular weight cut-offs (MWCOs) of 10 and 50 kDa in a laboratory-scale dead-end filtration unit. The effective membrane areas were 1.38 × 10⁻³ and 3.42 × 10⁻³ m², respectively. Before use, the new membranes were compacted by filtering distilled water for 2 h at a pressure of 0.8 MPa. Diafiltration performance was evaluated using mass balances of the target component under constant-volume and stepwise concentration conditions. The membrane transmission coefficient for sucrose was determined using a combined experimental and calculation-based method; for the 10 kDa membrane, its value was 0.55.

It was established that, during the first stage, the fraction of permeate withdrawn should not exceed 0.50 of the initial feed volume because of the accumulation of total solids in the retentate. After each subsequent dilution, the permissible permeate withdrawal may be increased to 0.80, and up to 0.90 during the final stage. At an overall permeate-to-initial-feed volume ratio of (V_p/V_0 = 3.0), the calculated sucrose losses with the retentate were 1.9% for the four-stage discontinuous diafiltration mode and 19.2% for the continuous mode. Continuous dilution can potentially provide higher specific productivity owing to the lower concentration of dissolved solids; however, it produces a more dilute permeate and requires greater energy input for subsequent concentration.

Four-stage discontinuous dilution was found to be a rational operating mode for recovering sucrose from the retentate using a membrane with an MWCO of 10 kDa. The scientific novelty of the study lies in establishing a

quantitative relationship between residual sucrose losses, the mode of diafiltration-water addition, and the extent of permeate withdrawal. The proposed operating mode can be applied in the design of a resource-efficient technology for beet extract purification.

Keywords: *ultrafiltration, diafiltration, beet extract, sucrose, 10 kDa MWCO membrane, discontinuous dilution, continuous dilution.*

Інформація про використання штучного інтелекту. Під час підготовки статті інструменти штучного інтелекту використовувалися виключно для мовного редагування, перевірки граматики, перекладу або інших допоміжних завдань, без використання згенерованих ними об'єктів як результатів академічної діяльності.

Дата першого надходження статті до видання: 14.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.11.2026