



ТЕПЛОІНТЕГРОВАНА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНА ДИСТИЛЯЦІЙНА КОЛОНА (TiTeDK) ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ

HEAT-INTEGRATED THERMOELECTRIC DISTILLATION COLUMN (HiTeDiC) AS CONTROL OBJECT

¹Мазур О. В., ²Пашков С. О.

¹Mazur O.V., ²Pashkov S.O.

^{1,2}Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

^{1,2}Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0001-7104-9010>, ²<https://orcid.org/0000-0003-0202-7015>

E-mail: ¹mazur.a.v.ua@gmail.com, ²sergypashkov2001@gmail.com

Copyright © 2025 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: 10.15673/atbp.v17i2.3195

Анотація. У статті розглянуто концепцію реалізації вакуумної деалкоголізації виноматеріалу за допомогою теплоінтегрованої термоелектричної дистиляційної колони (TiTeDK). Обґрунтовано доцільність впровадження діабатичної дистиляції, яка забезпечує зменшення термодинамічної незворотності, втрат ексергії та дозволяє досягти глибшого розділення компонентів при нижчих температурах, критичних для збереження ароматичного профілю напою. Представлено структурну схему апаратурного оформлення, у якій реалізовано керувану теплопередачу між випарником, дефлегматором та конденсатором за допомогою циркулюючого теплоносія. Сформульовано вимоги до системи автоматичного керування технологічним процесом, визначено перелік контрольованих координат, параметрів теплоносія, рівнів рідин і тисків у ключових вузлах установки, з урахуванням особливостей безперервного режиму роботи. Проведено моделювання температурного профілю колони та фазових рівноваг системи етанол–вода у середовищі Matlab Simulink на основі теплового балансу по секціях. Отримано графіки, які дозволяють визначити граничні параметри для забезпечення повної деалкоголізації при збереженні якості. Особливу увагу приділено динамічному керуванню ТЕП і розглянуто підхід лінеаризуючого зворотного зв'язку на основі електричних параметрів (ЕРС, струм, напруга), що забезпечує стабільність температури без необхідності в окремих температурних датчиках. Запропонована система є перспективною для створення енергоефективних, компактних і керованих установок безперервної дії для виробництва безалкогольного вина з покращеними сенсорними характеристиками. Практичне впровадження описаної технології відкриває можливості для локалізованого виробництва з мінімальними енерговитратами та гнучким налаштуванням температурних режимів для продуктів із різною ароматичною структурою.

Abstract. The article presents the concept of implementing vacuum dealcoholization of wine using a heat-integrated thermoelectric distillation column (HiTeDiC). The feasibility of applying diabatic distillation is substantiated, as it reduces thermodynamic irreversibility and exergy losses, and enables deeper separation of components at lower temperatures – a critical factor for preserving the beverage's aromatic profile. A structural diagram of the equipment layout is proposed, in which controlled heat transfer is implemented between the evaporator, dephlegmator, and condenser via a circulating heat carrier. The requirements for the automatic control system of the technological process are formulated, and a list of controlled variables is defined, including heat carrier parameters, liquid levels, and pressures at key points of the setup, considering the specifics of continuous operation. The temperature profile of the column and the phase equilibria of the ethanol–water system were modeled in the Matlab Simulink environment based on sectional heat balance equations. Resulting graphs were obtained to determine the boundary parameters necessary for complete dealcoholization while preserving product quality. Particular attention is given to the dynamic control of TEMs, and a linearizing feedback approach based on electrical parameters (EMF, current, voltage) is proposed to ensure temperature stability without the use of dedicated temperature sensors. The proposed system is considered promising for developing energy-efficient, compact, and controllable continuous units for the production of non-alcoholic wine with enhanced



sensory characteristics. Practical implementation of the described technology opens opportunities for localized production with minimal energy consumption and flexible temperature regime adjustments for products with diverse aromatic profiles.

Ключові слова: вакуумна деалкоголізація, безалкогольне вино, дистиляція, ректифікація, теплоінтегрована дистиляційна колона, термоелектричний перетворювач, система автоматичного керування.

Keywords: vacuum dealcoholization, non-alcoholic wine, distillation, rectification, heat-integrated distillation column, thermoelectric converter, automatic control system.

Вступ

Вино – це алкогольний напій, який отримують шляхом ферментації виноградного соку. Виходячи з вмісту алкоголю, вина можна класифікувати як безалкогольні (< 0,5об.%), слабоалкогольні (від 0,5об.% до 1,2об.%), знижено-алкогольні (від 1,2об.% до 5,5об.%), низькоалкогольні (від 5,5об.% до 10,5об.%) та алкогольні вина (> 10,5об.%) [1]. Сучасна харчова промисловість зазнає істотного впливу змін у споживчих пріоритетах, зокрема підвищеного інтересу до напоїв зі зниженим або нульовим вмістом алкоголю. Безалкогольні вина, зокрема, стрімко набирають популярності. За даними Fact.MR, світовий ринок таких вин має зрости з 2,57 млрд доларів США у 2024 році до 6,94 млрд у 2034 році, демонструючи середньорічне зростання понад 10% [2]. Ця тенденція супроводжується й технологічними викликами, пов'язаними зі збереженням органолептичних характеристик продукту при зниженні вмісту спирту.

Водночас кліматичні зміни спричиняють зростання концентрації цукру в ягодах винограду, що призводить до підвищення вмісту етанолу у виноматеріалі [3]. Це особливо відчутно в регіонах з усталеними традиціями виноробства та суворими нормативами щодо алкогольної міцності [4]. У таких умовах зростає потреба в технологіях, які дозволяють знизити вміст спирту у готових винах і зберегти при цьому їх смакові та ароматичні властивості.

Методи деалкоголізації поділяються на мембранні (осмос, нанофільтрація) та немембранні, серед яких особливе місце займають процеси дистиляції в вакуумі. Саме зниження тиску дозволяє зменшити температуру кипіння етанолу й уникнути теплової деградації корисних сполук в вині [5, 6].

Аналіз літературних даних і постановка проблеми.

Реалізація процесів деалкоголізації вина здійснюється в вакуумних дистиляційних апаратах, які мають різноманітні конструктивні виконання. Найбільш поширено використання наступних технологічних схем дистиляції:

- Класичні тарілчасті або насадкові вакуумні дистиляційні колони — забезпечують багаторазовий контакт парової та рідкої фаз з метою фракційного розділення компонентів суміші. У таких апаратах відбувається поступове збагачення пари леткими компонентами (етанолом) на кожному ступені за рахунок взаємодії з флегмою [6];
- Обертові конусні колони (Spinning Cone Column) — модифікований тип колонного обладнання, в якому процес масообміну відбувається в тонкому шарі рідини, що стікає по черзі з обертових на нерухомі конуси. Завдяки протитечії газової фази та турбулізації, забезпечується ефективне вилучення летких речовин (зокрема, ароматів та етанолу) з можливістю їх роздільного повернення [7, 8, 9];
- Теплоінтегровані колони типу HIDIc (heat-integrated distillation column) реалізують діабатичну дистиляцію з рекуперацією теплоти не лише між ребойлером й конденсатором, а й на проміжних ділянках колони [10]. Конструкція такої колони дозволяє формувати певний температурний профіль, що призводить до зменшення теплових втрат та підвищення енергоефективності процесу, зокрема під час розділення водно-етанольної суміші [11]. Існують також так звані «ідеальні» конфігурації HIDIc, ключовою особливістю яких є повна відмова від зовнішнього ребойлера та конденсатора: весь тепловий градієнт між секціями формується зазвичай за рахунок конструкції колон [12].

При роботі HIDIc з слабоалкогольними сумішами, такими як вино або пиво, виникає важливе обмеження: через стискання парів у ректифікаційній секції формується підвищений тиск, що унеможливує створення достатнього розрідження для ефективного укріплення парів. В результаті чого знижується якість та енергоефективність дистиляції, оскільки частина теплоти витрачається на випаровування супутньої водяної пари. Натомість вакуумні дистиляційні системи без стискання парів дозволяють уникнути цих втрат, забезпечуючи глибоке розділення за нижчих температур.

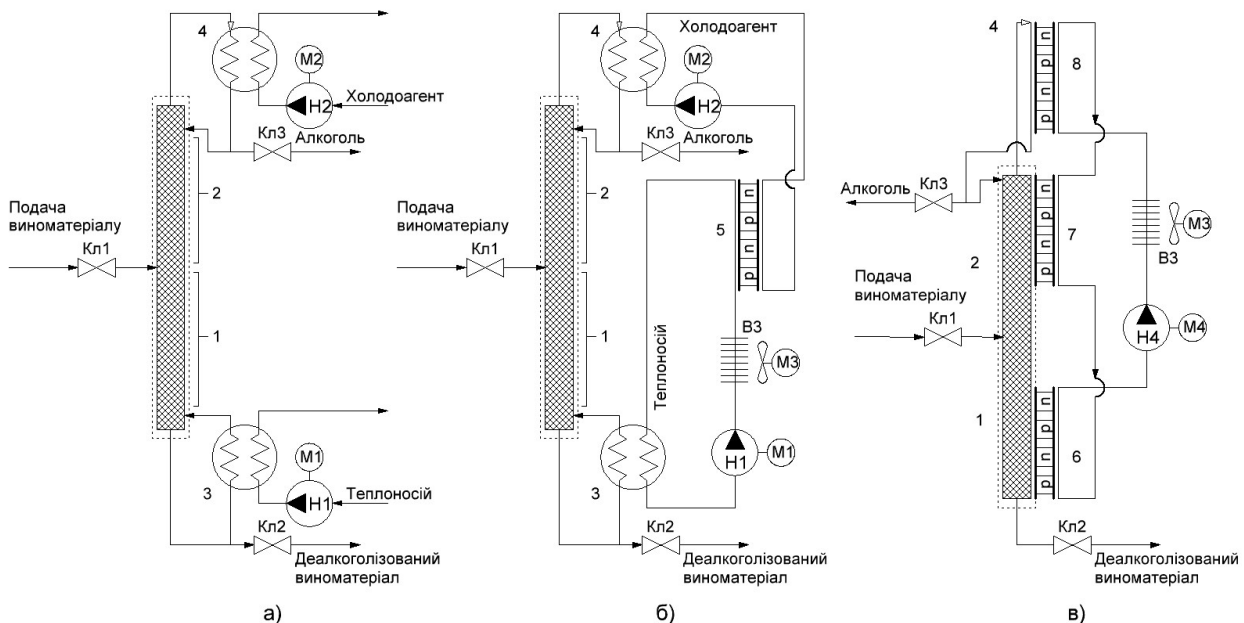
В [13] описано одну з технологій «м'якої» деалкоголізації (технологія GoLo), що реалізує багатоступеневу вакуумну дистиляцію за низьких температур. Процес побудовано на послідовному проходженні виноматеріалу через три колони (C1–C3), де на першому етапі відбувається виділення летких ароматичних сполук, далі — знеалкоголення основного об'єму рідини, а на завершальному етапі — остаточне видалення етанолу з одночасною рекуперацією ароматів. Виділені ароматичні сполуки накопичуються і цілеспрямовано повертаються в кінцевий продукт, що забезпечує збереження його смакових властивостей.

Перспективним напрямом підвищення енергоефективності випарних процесів у вакуумі, зокрема при деалкоголізації вина, є застосування термоелектричних перетворювачів (ТЕП). ТЕП у таких системах виконують функцію керування джерел тепла та холоду, а також забезпечують рекуперацію теплоти від зони конденсації до зони випаровування без потреби у класичних теплообмінниках. Компактність, точне зональне регулювання та відсутність рухомих частин роблять такі системи придатними для використання в малогабаритних установках безперервної дії [14, 15, 16].



На рисунку 1 представлено три варіанти поширених технологічних схем дистиляційних колон [4-13]. Варіант (а) представляє собою звичайну адіабатичну колону з зовнішніми ребойлером та конденсатором. Така колона має найменшу питому вартість, але низьку енергетичну ефективність, оскільки відсутня будь-яка рекуперація теплової енергії. Варіант (б) також має зовнішні ребойлер та конденсатор, але в ній реалізовано рекуперацію тепла за допомогою теплового насосу (наприклад термоелектричного), що збільшує її енергетичну ефективність. Варіант (в) це теплоінтегрована колону що забезпечує адіабатичну дистиляцію, в якій за рахунок керування профілем температур досягається вища якість продукції при менших питомих габаритах та енерговитратах.

Перехідні процеси в такій теплоінтегрованій дистиляційній колоні мають значно менші запізнення та стали часу, що дозволяє покращити енергетичну ефективність та якісні показники її роботи (глибина розділення компонентів, зменшена теплова деградація виноматеріалу). Це досягається шляхом удосконалення алгоритмів керування, насамперед через оптимізацію режимів функціонування, включаючи впровадження динамічного регулювання температурного профілю в колоні.



1 – випарна секція; 2 – ректифікаційна секція; 3 – ребойлер; 4 – конденсатор; 5, 6, 7 – термоелектричні теплові насоси; Н1, Н2, Н4 – рідинні циркуляційні насоси; В3 – радіатор повітряного охолодження; 1 – evaporation section; 2 – rectification section; 3 – reboiler; 4 – condenser; 5, 6, 7 – thermoelectric heat pumps; Н1, Н2, Н4 – liquid circulation pumps; В3 – air-cooling radiator;

Рис. 1 – технологічні схеми дистиляційних колон: а) класична адіабатична колону, б) адіабатична колону з рекуперацією тепла, в) діабатична (теплоінтегрована) дистиляційна колону (HIDiC)
Fig. 1 – Technological schemes of distillation columns: a) classic adiabatic column, b) adiabatic column with heat recovery, c) diabatic (heat-integrated) distillation column (HIDiC)

Мета і завдання дослідження.

В роботі розглядається технологічний процес вакуумної деалкоголізації вина, суть якого полягає у видаленні летких фракцій (головним чином спиртів) з виноматеріалу за зниженого тиску та температури, нижчої за 35 °С. Такий режим деалкоголізації дозволяє зберегти ароматичні та смакові характеристики напою, що є критично важливим для якості кінцевого продукту.

Технологічну схему ТiTeДК було обрано для реалізації масштабованої фізичної моделі процесу вакуумної деалкоголізації вина в потоці для дослідження з метою побудови математичної та імітаційної моделей процесу як ОК. Імітаційні моделі деалкоголізації вина в ТiTeДК будуть використані при розробці інтелектуальних алгоритмів керування такими процесами.

Методи і матеріали досліджень.

Діабатична дистиляція передбачає теплопередачу між секціями колони при незначному температурному перепаді, що знижує втрати ексергії та наближає процес до оборотного режиму. На діаграмі МакКейба–Тіле [10] це проявляється у вигляді згладженої робочої кривої (рис. 2а), яка наближається до рівноважної, на відміну від ламаної в адіабатичних колонках (рис. 2б). Такий режим дозволяє зменшити кількість теоретичних стадій або підвищити ступінь очищення без збільшення їх числа.

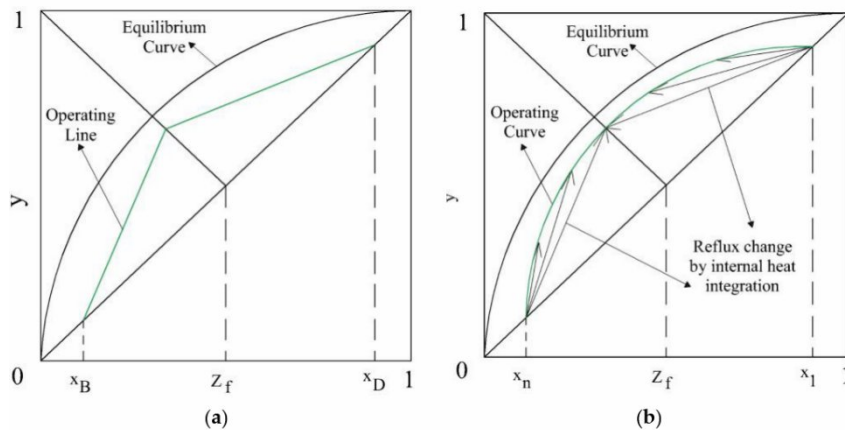


Рис. 2 – Порівняння адиабатичної та діабатичної дистиляції за схемами МакКейба-Тіле: а) класична адиабатична дистиляційна колона; б) діабатична (теплоінтегрована) дистиляційна колона з тепловою інтеграцією

Fig. 2 – Comparison of adiabatic and diabatic distillation using McCabe–Thiele diagrams: a) conventional adiabatic column; b) diabatic (heat-integrated) column with energy exchange

Поступова теплопередача породжує фазовий перехід уздовж колони, що сприяє одночасному випаровуванню й конденсації. Підтримання оптимального температурного профілю потребує точної теплової взаємодії між секціями, яку можна реалізувати за допомогою термоелектричних теплових насосів.

У попередньому дослідженні було представлено вакуумний термоелектричний дистилятор для безперервної деалкоголізації вина, ключовою особливістю якого є комірчаста фізична структура випарника [17]. Така конструкція забезпечує рівномірний розподіл тепла по всій площині випаровування, що дозволяє уникнути локального перегріву та сприяє стабільному процесу відділення летких компонентів. Додатково, застосування термоелектричних перетворювачів (ТЕП) як джерела тепла відкриває перспективу локалізованого керування тепловим потоком у кожній комірці. Це дозволяє точніше регулювати температурний профіль випарника залежно від режимів роботи, забезпечуючи м'яке та енергоефективне відділення етанолу з мінімальним впливом на якість вина.

Застосування комірчастої структури ТЕП і у випарній секції, і в секції ректифікації в перспективі дозволить забезпечити необхідний температурний профіль для діабатичної дистиляції.

Результати досліджень.

Результати моделювання фазових рівноваг водно-спиртової суміші отримані в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink представлені на рисунку 3. На рисунку 3а зображено графіки залежностей температур ребойлера та дефлегматора від тиску за умови максимально можливого (100%-го) розділення водно-спиртової суміші.

На рисунку 3в представлено залежність максимально можливої концентрації етанолу на виході дефлегматора від тиску. Для отримання дистиляту з 100%-м вмістом етилового спирту без домішок води необхідно щоб тиск на виході секції ректифікації не перевищував 30 мбар (див. рис. 3в), що відповідає температурному режиму насиченої пари спирту 9.4°C (див. рис. 3а).

Для забезпечення повного розділення водно-спиртової суміші, якою по суті є вино, необхідно дотримуватись цілеспрямованого температурного профілю вздовж висоти вакуумної дистиляційної колони [18]. На рисунках 3б і 3г показано характерний розподіл температур по термоелектричних секціях, сформований на основі моделювання фазових рівноваг у системі етанол–вода. У структурі колони передбачено 4 секції випарювання та 7 секцій дефлегмації, при цьому подача виноматеріалу здійснюється між четвертою та п'ятою секцією, тобто в точці переходу між зонами випаровування і ректифікації. Температура поступово знижується від випарної секції до верхніх ступенів ректифікації, що створює необхідний тепловий градієнт для стабільного переносу летких компонентів. Такий профіль є рекомендованим для реалізації ефективного масообміну й досягнення максимальної концентрації етанолу в дистиляті за мінімального впливу на леткі ароматичні сполуки.

Підтримання цього температурного профілю реалізується за допомогою термоелектричних перетворювачів (ТЕП), які вбудовано в кожен секцію колони. Завдяки здатності ТЕП працювати як у режимі нагріву, так і охолодження, вони забезпечують індивідуальне керування температурою на кожному рівні (секції колони), без залучення традиційних теплообмінників. Крім того, ТЕП дозволяють рекуперувати теплоту шляхом переносу енергії від зон ректифікації до зон випаровування, що сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню ефективності процесу в цілому.

На рисунку 4 представлено параметризовану технологічну схему процесу вакуумної деалкоголізації вина в потоці. Процес реалізується із використанням термоелектричних теплових насосів, які забезпечують локальне нагрівання й охолодження в межах випарника, дефлегматора та конденсатора. Функціонування установки базується на керованому переміщенні матеріальних потоків (виноматеріалу, пари, конденсату) та підтриманні енергетичних режимів (теплообмін, вакуум).

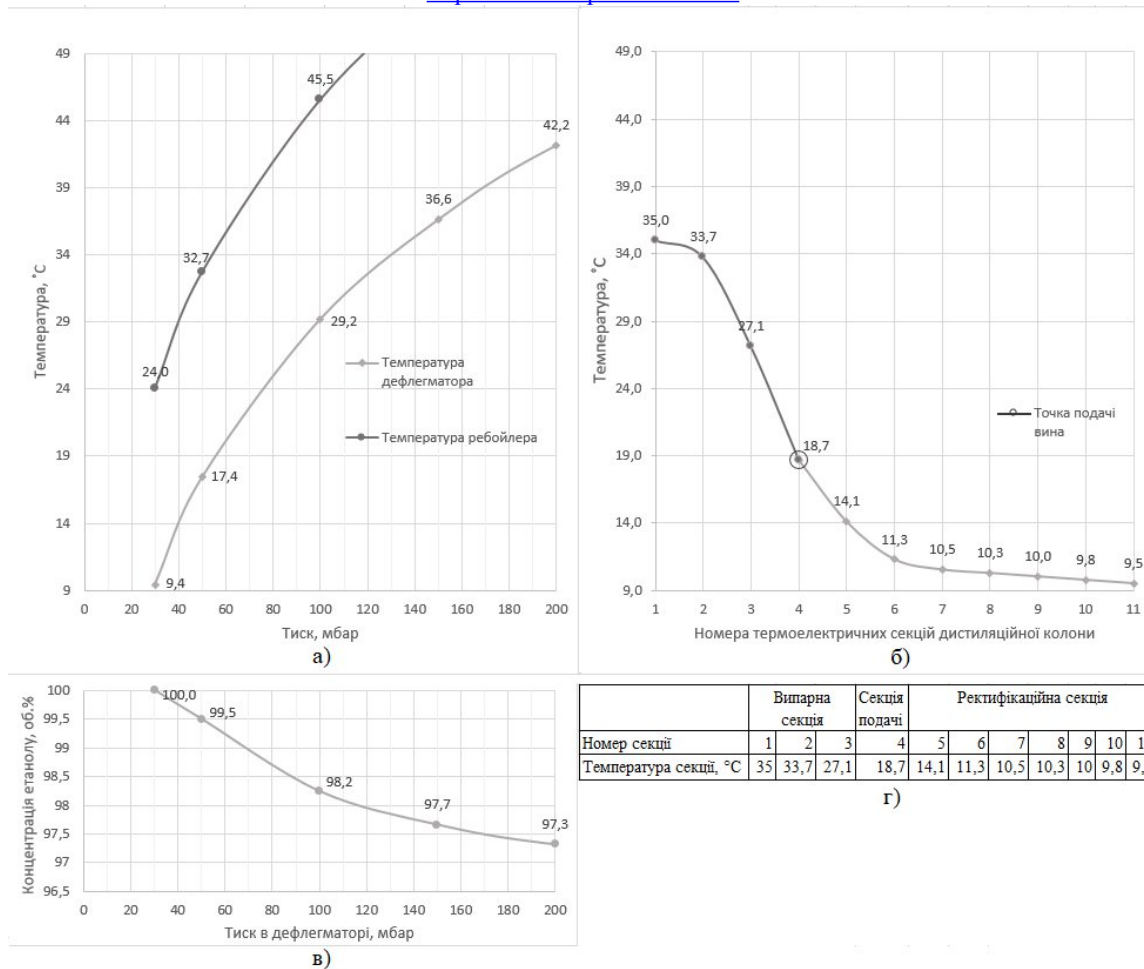


Рис. 3 – Графіки температурних і концентраційних характеристик у вакуумній дистиляційній колоні: а) залежність температури ребойлера та дефлегматора від тиску; б) розподіл температури вздовж термоелектричних секцій колонного апарата; в) залежність максимально можливої концентрації етанолу в дистиляті від тиску; г) табличне представлення температури по секціях дистиляційної колони.

Fig. – Temperature and concentration characteristics of the vacuum distillation column: a) dependence of reboiler and dephlegmator temperatures on pressure (0–200 mbar); b) temperature distribution along thermoelectric column sections; c) dependence of maximum possible ethanol concentration in the distillate on pressure; d) tabular presentation of section-wise temperature distribution.

З внутрішнього контуру вакуумної системи, який включає термоелектричний випарник (5), дефлегматор (6), конденсатор (7), ресивер (8), попередні збірники деалкоголізованого виноматеріалу (10) та спирту (11), а також з'єднувальні трубопроводи, вакуумним насосом Р4, а також насосами відкачки деалкоголізованого виноматеріалу та дистиляту (Р2, Р3), викачується повітря до тиску 20 мбар.

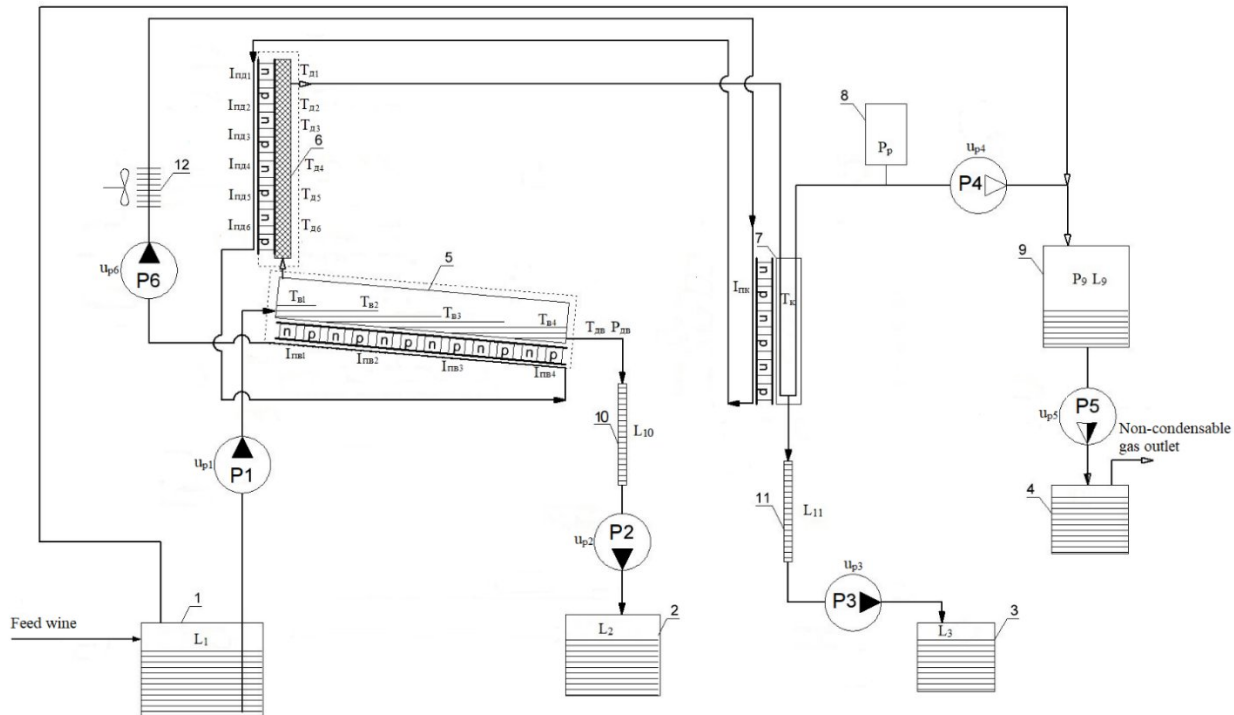
У зовнішньому контурі вакуумної системи, який складається з деаератора (1) та проміжного ресивера (9), за допомогою другого вакуумного насоса Р5 підтримується тиск, що становить середнє значення між внутрішнім тиском і атмосферним. Виноматеріал надходить у деаератор (1), де в умовах зниженого тиску з нього видаляються розчинені гази.

Далі виноматеріал насосом Р1 подається у термоелектричний випарник (5). У випарнику тепловий потік від «гарячої сторони» термоелектричних перетворювачів (ТЕП) посеційно нагріває виноматеріал до температури кипіння та спричиняє випаровування рідкої фази.

Деалкоголізований виноматеріал накопичується у попередньому збірнику (10), звідки насосом Р2 транспортується до збірника деалкоголізованого вина (2), що перебуває під атмосферним тиском.

Суміш парів з випарника (5) надходить у термоелектричний дефлегматор (6), де «холодна сторона» ТЕП посеційно охолоджує та частково конденсує пари. Отримана флегма повертається у випарник, тоді як збагачена пара, що містить переважно спирт і головну фракцію, під дією перепаду тиску прямує до термоелектричного конденсатора (7).

У конденсаторі (7) тепловий потік від «холодної сторони» ТЕП спричиняє конденсацію парів і додаткове переохолодження конденсату до температури, нижчої за температуру кипіння при тиску 20 мбар. Отриманий дистилят накопичується у попередньому збірнику (11), звідки насосом Р3 відкачується у збірник дистиляту (3) з атмосферним тиском.



1 – деаератор; 2 – збірник dealкоголізованого виноматеріалу; 3 – збірник дистилляту; 4 – збірник головної фракції; 5 – термоелектричний випарник; 6 – термоелектричний дефлегматор; 7 – термоелектричний конденсатор; 8 – ресивер; 9 – проміжний ресивер; 10 – попередній збірник dealкоголізованого виноматеріалу; 11 – попередній збірник спирту; 12 – повітряний охолоджувач теплоносія; P1 – насос подачі виноматеріалу; P2 – насос відкачки ДВ; P3 – насос відкачки дистилляту; P4 – перший вакуумний насос; P5 – другий вакуумний насос; P6 – циркуляційний насос теплоносія; $I_{n1...4}$ – струми живлення ТЕП випарника, А; $T_{e1...4}$ – температури у випарнику, °С; T_{o6} – температура dealкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника, °С; P_{o6} – тиск на виході з випарника, мбар; $I_{n01...6}$ – струми живлення ТЕП дефлегматора, А; $T_{d1...4}$ – температури у дефлегматорі, °С; I_{nk} – струм живлення ТЕП конденсатора, А; T_k – температура в конденсаторі, °С; P_p – тиск у ресивері, мбар; P_9 – тиск у проміжному ресивері, мбар; $u_{p1...6}$ – сигнал керування насосами; L_1 – рівень вина в деаераторі, м; L_2 – рівень ДВ в збірнику, м; L_3 – рівень у дистилляту в збірнику, м; L_4 – рівень у збірнику головної фракції, м; L_9 – рівень в попередньому збірнику головної фракції, м; L_{11} – рівень в попередньому збірнику спирту, м

1 – deaerator; 2 – tank for dealcoholized wine material; 3 – distillate collection tank; 4 – main fraction collection tank; 5 – thermoelectric evaporator; 6 – thermoelectric dephlegmator; 7 – thermoelectric condenser; 8 – receiver; 9 – intermediate receiver; 10 – preliminary tank for dealcoholized wine material; 11 – preliminary alcohol tank; 12 – air cooler for heat carrier; P1 – feed pump for wine material; P2 – dealcoholized wine discharge pump; P3 – distillate discharge pump; P4 – first vacuum pump; P5 – second vacuum pump; P6 – heat carrier circulation pump; $I_{n1...4}$ – power currents of evaporator thermoelectric modules, A; $T_{e1...4}$ – temperatures in the evaporator, °C; T_{o6} – temperature of dealcoholized wine at the evaporator outlet, °C; P_{o6} – pressure at the evaporator outlet, mbar; $I_{n01...6}$ – power currents of dephlegmator thermoelectric modules, A; $T_{d1...4}$ – temperatures in the dephlegmator, °C; I_{nk} – power current of condenser thermoelectric module, A; T_k – temperature in the condenser, °C; P_p – pressure in the receiver, mbar; P_9 – pressure in the intermediate receiver, mbar; $u_{p1...6}$ – control signals to pumps; L_1 – wine level in the deaerator, m; L_2 – level of dealcoholized wine in the tank, m; L_3 – distillate level in the collection tank, m; L_4 – level in the main fraction collection tank, m; L_9 – level in the preliminary main fraction tank, m; L_{11} – level in the preliminary dealcoholized wine tank, m; L_{12} – level in the preliminary alcohol tank, m

Рис. 4 – Параметризована технологічна схема процесу вакуумної dealкоголізації вина в потоці

Fig. 4 – Parametric technological scheme of the continuous vacuum dealcoholization process of wine

Пари головної фракції відводяться вакуумним насосом P4 у проміжний ресивер (9), де за вищого тиску відбувається їх конденсація. Залишкові гази та конденсат головної фракції видаляються другим вакуумним насосом P5 в атмосферу або у відповідну ємність (4).

З метою підвищення енергоефективності та стабільної роботи ТЕП, зворотні сторони модулів секцій випарника, дефлегматора і конденсатора з'єднані в єдиний рідинний контур теплоносія, що циркулює між ними. Це дозволяє реалізувати внутрішню рекуперацію тепла — надлишкове тепло, що відводиться з дефлегматора, передається до випарника. Для скидання надлишку тепла застосовується повітряний радіатор (12) з примусовим охолодженням.



Випарник та дефлегматор можуть являти собою як вертикальний, так і похилий (майже горизонтальний) теплообмінний апарат. Для підвищення ефективності теплообміну внутрішня поверхня може бути оснащена насадками, зокрема сіткою Панченкова. Термоелектричні модулі встановлюються по периметру корпусу колони, і забезпечують керування тепловими потоками між циркуляційним контуром води і секціями колони здійснюючи передачу тепла від або до виноматеріалу або парів, що перебувають під вакуумом. Апарат має теплоізоляцію та герметичне виконання, придатне для роботи в умовах розрідженого середовища.

Конденсатор призначений для остаточного конденсації парів після дефлегматора. Пари надходять у верхню частину апарата, де під дією холодної сторони термоелектричних модулів відбувається конденсація. Неконденсовані гази виводяться також у верхній частині. Нижня точка конденсатора розташована так, щоб забезпечити самопливне перетікання дистилляту в попередній збірник, звідки він відкачується насосом до основної ємності для зберігання.

У процесі вакуумної деалкоголізації виноматеріалу основним завданням системи керування є підтримання ключових технологічних і експлуатаційних параметрів у межах заданих регламентів для забезпечення стабільності, ефективності та якості процесу. До таких параметрів належать: профілі температур у випарнику і дефлегматорі, тиск на виході з випарника, температура деалкоголізованого вина, температура у конденсаторі та тиски в ресиверах, а також рівні рідин у відповідних ємностях. Їх відхилення можуть призвести до порушення балансу фазового розділення, перевитрати енергії, втрати ароматики або навіть аварійної зупинки обладнання.

Зокрема, стабілізація тиску та температури в зоні випаровування та дефлегмації дозволяє уникнути надмірного випаровування води або недосягнення потрібного ступеня деалкоголізації. Регулювання рівнів рідин забезпечує безперервність подачі та відбору продуктів, а контроль параметрів теплоносія — ефективну теплопередачу у дефлегматорі та випарнику. Крім того, параметри роботи термоелектричних модулів (напруга, температура гарячої/холодної сторони, теплові потоки) потребують динамічного керування для реалізації режимів з рекуперацією тепла та оптимальним енергоспоживанням. Усі ці завдання реалізуються через систему автоматичного регулювання, яка повинна оперативним чином виявляти та компенсувати відхилення як у межах тривалих, так і короткочасних допусків.

Для системи керування процесом деалкоголізації вина як об'єктом керування (ОК), регульованими координатами (тобто параметрами, що підлягають автоматичному регулюванню) обґрунтовано обрати:

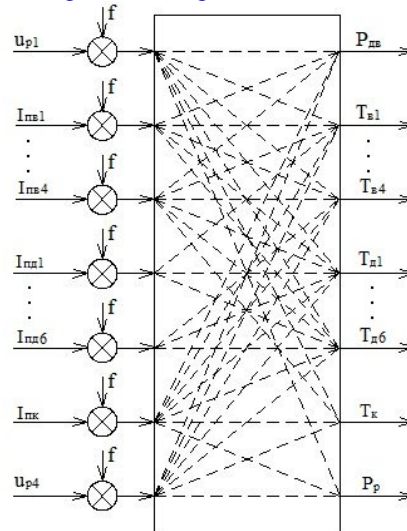
- тиск на виході з випарника — $P_{дв}$;
- температуру по секціям дистиляційної колони — $T_{в1} - T_{в4}, T_{д1} - T_{д6}$
- температуру деалкоголізованого вина на виході з випарника — $T_{дв}$;
- температуру в конденсаторі — $T_{к}$;
- тиск у проміжному ресивері — $P_{р}$.

Для забезпечення впливу на ці регульовані координати, система повинна мати відповідну кількість керуючих дій. До них належать змінні, що впливають на витрати енергетичних та матеріальних потоків, передусім — положення виконавчих механізмів і рівень електроживлення відповідного обладнання. До керуючих дій віднесемо:

- положення керуючих клапанів або сигналів до приводів насосів і ТЕП;
- $u_{р1}, u_{р4}$ — сигнали керування насосами (подача вина, головної фракції),
- $I_{пв1}, I_{пв2}, I_{пв3}, I_{пв4}, I_{пд1}, I_{пд2}, I_{пд3}, I_{пд4}, I_{пд5}, I_{пд6}, I_{пк}$ — струми живленням ТЕП секцій випарника, дефлегматора та конденсатора відповідно.

Всі інші вхідні координати, що не можуть бути безпосередньо контрольовані або керовані, вважаються збуреннями. До збурень відносять:

- фізико-хімічні властивості сировини;
- температури та тиски теплоносія, які не підлягають безпосередньому регулюванню;
- впливи з боку навколишнього середовища тощо.

<http://www.atbp.ontu.edu.ua/>

$I_{ns1...4}$ – струми живлення ТЕП випарника, А; $T_{s1...4}$ – температури у випарнику, °С; T_{os} – температура dealкогільзованого виноmaterіалу на виході з випарника, °С; P_{os} – тиск на виході з випарника, мбар; $I_{ns1...6}$ – струми живлення ТЕП дефлегматора, А; $T_{d1...4}$ – температури у дефлегматорі, °С; I_{nk} – струм живлення ТЕП конденсатора, А; T_k – температура в конденсаторі, °С; P_p – тиск у ресивері, мбар; u_{p1} – сигнал керування насосом подачі вина; u_{p4} – сигнал керування першим вакуумним насосом; f – вектори неконтрольованих збурень

$I_{ns1...4}$ – power currents of evaporator thermoelectric modules, A; $T_{s1...4}$ – temperatures in the evaporator, °C; T_{os} – temperature of dealcoholized wine at the evaporator outlet, °C; P_{os} – pressure at the evaporator outlet, mbar; $I_{ns1...6}$ – power currents of dephlegmator thermoelectric modules, A; $T_{d1...4}$ – temperatures in the dephlegmator, °C; I_{nk} – power current of condenser thermoelectric module, A; T_k – temperature in the condenser, °C; P_p – pressure in the receiver, mbar; u_{p1} – control signal for the wine feed pump; u_{p4} – control signal for the first vacuum pump; ; f – vectors of uncontrolled disturbances

Рис. 5 – структурна схема процесу dealкогільзації вина в потоці як ОК

Fig. 5 – structural diagram of the continuous wine dealcoholization process as a control object

На основі вище визначених координат і впливів побудовано структурну (координатну) схему процесу як ОК, зображену на рис. 5. Вона є концептуальним поданням процесу dealкогільзації вина у вигляді системи, що має вхідні координати (керуючі дії та збурення), внутрішні зв'язки та вихідні координати (регульовані змінні), які підлягають моніторингу та підтримці в межах регламенту.

Обговорення результатів та висновки.

Відповідно до концепції розвитку САК процесом вакуумної dealкогільзації вина в потоці на основі функціонально-структурного підходу, алгоритмічні та технічні структури САК повинні реалізовувати узгоджене керування такими координатами:

- виконання експлуатаційного регламенту: регулювання — тиску у проміжному ресивері: P_9 ; — рівня вина в деаераторі: L_1 ; — рівнів рідини в попередніх збірниках: ДВ — L_{11} , дистилляту — L_{12} , головної фракції — L_9 ; — температури теплоносія перед дефлегматором: T_{r1} ;
- виконання технологічного регламенту: підтримка профілів температур у випарнику і дефлегматорі — T_{v1} - T_{v4} , T_{d1} - T_{d6} ; регулювання — тиску на виході з випарника — P_{dv} ; — температури в конденсаторі — T_k ; — тиску в ресивері — P_p ;
- гарантування підтримання температури ДВ на виході з випарника T_{dv} , максимально близькою до температури кипіння води по тиску на виході з випарника P_{dv} ;
- гарантування підтримання температури парів на виході з дефлегматора T_{d1} , максимально близькою до температури кипіння спирту по тиску на виході з дефлегматора;
- гарантування підтримання температури в конденсаторі T_k , що забезпечує повну конденсацію алкоголю при мінімальному його переохолодженні;
- оптимізація заданого значення профілю температури в колоні з метою підвищення енергетичної ефективності та якості розділення компонентів

Особливу увагу слід приділити технічній реалізації керування **термоелектричними перетворювачами (ТЕП)**, які відіграють ключову роль у нагріванні та охолодженні в системі. Звичайне ПІД-регулювання у цьому випадку є недостатньо ефективним через:

- високу нелінійність температурної динаміки ТЕП;
- залежність ефективності від електричних параметрів (опір, ЕРС);
- взаємний тепловий вплив модулів (випарник ↔ дефлегматор ↔ конденсатор).

Для вирішення цих проблем доцільно впровадити **лінійаризуючий зворотний зв'язок**, який дозволяє реалізувати роботу ТЕП у максимально ефективному режимі.

**Список використаних джерел**

1. ДСТУ 2368:2004. Напої безалкогольні. Виробництво. Терміни та визначення понять. – [Чинний від 2004-09-20]. – К. : Держспоживстандарт України, 2005. – 18 с.
2. Non-Alcoholic Wine Market Study by Still and Sparkling in Bottles and Cans ... from 2024 to 2034 [Електронний ресурс]. – Fact.MR. – Режим доступу: <https://www.factmr.com/report/4532/non-alcoholic-wine-market> (дата звернення: 15.07.2025).
3. Santos J. A., Fraga H., Malheiro A. C., Moutinho-Pereira J., Dinis L.-T., Correia C. M. A review of the potential climate change impacts and adaptation options for European viticulture // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, No. 9. – С. 3092. – DOI: 10.3390/app10093092.
4. Molitor D., Junk J. Climate change is implicating a two-fold impact on air temperature increase ... Luxembourgish grapegrowing region // *OENO One*. – 2019. – Vol. 53, No. 3. – DOI: 10.20870/oeno-one.2019.53.3.2329.
5. Sam F. E., Medina-Meza I. G., Johnson A. J. Techniques for dealcoholization of wines: their impact ... // *Foods*. – 2021. – Vol. 10, No. 10. – С. 2498. – DOI: 10.3390/foods10102498.
6. Horácio P. S., Miranda J. C. C., Ramalhosa E. Simulation of vacuum distillation to produce alcohol-free beer // *Journal of the Institute of Brewing*. – 2020. – Vol. 126. – С. 77–82. – DOI: 10.1002/jib.591.
7. Coetzee C. Zero alcohol wine – The principle of the Spinning Cone Column [Електронний ресурс] // *Basic Wine*. – 30.05.2023. – Режим доступу: <https://sauvignonblanc.com/...> (дата звернення: 12.06.2025).
8. Flavourtech. Spinning Cone Column | Flavourtech [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://flavourtech.com/products/spinning-cone-column/> (дата звернення: 01.06.2025).
9. Flavourtech. The Spinning Cone Column [Електронний ресурс] // *WineBusiness Analytics*. – Отримано 15.04.2025. – Режим доступу: <https://winebusinessanalytics.com/...> (дата звернення: 15.04.2025).
10. Tahir N. M., Zhang J., Armstrong M. Control of heat-integrated distillation columns: review, trends, and challenges for future research // *Processes*. – 2025. – Vol. 13, No. 1. – С. 17. – DOI: 10.3390/pr13010017.
11. Ponce G. H. S. F., Alves M., Miranda J. C. C., Maciel Filho R., Wolf Maciel M. R. Using an internally heat-integrated distillation column for ethanol–water separation ... // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2015. – Vol. 95. – С. 55–63. – DOI: 10.1016/j.cherd.2015.01.002.
12. Suphanit B. Design of internally heat-integrated distillation column (HIDiC): uniform heat transfer area versus uniform heat distribution // *Energy*. – 2010. – Vol. 35, No. 3. – С. 1505–1514. – DOI: 10.1016/j.energy.2009.12.008.
13. Veiga-del-Baño J. M., Cuenca-Martínez J. J., Oliva J., Cámara M. Á., Andreo-Martínez P. Total dealcoholisation of wines by very low temperature vacuum distillation ... *GoLo // Beverages*. – 2024. – Vol. 10, No. 2. – Article 2. – DOI: 10.3390/beverages10020032.
14. Hudz S., Mazur A., Kovalchuk D. The thermoelectric vacuum crock-pot and the automated workplace for its research as a control object // *Automation of Technological and Business Processes*. – 2017. – Vol. 9, No. 2. – DOI: 10.15673/atbp.v9i2.562.
15. Мазур О. В., Грабанова К. С., Гудзь С. С. Розробка та дослідження імітаційної моделі процесу термовакуумної обробки харчових продуктів як об'єкту керування // *Automation of Technological and Business Processes*. – 2020. – Vol. 12, No. 1. – С. 75–88. – DOI: 10.15673/atbp.v12i1.1708.
16. Гудзь С. С., Мазур О. В. Малогабаритний термоелектричний вакуумний деалкоголізатор : пат. 117540 Україна, № а201704635 ; заявл. 13.05.2017 ; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15. – 4 с.
17. Pashkov S., Petrenko D., Mazur O. Automatic control of the process of continuous dealcoholization of wine in a vacuum thermoelectric distiller // *Enerhetyka i Avtomatyka*. – 2023. – No. 5. – С. 58–70. – DOI: 10.31548/energiya5(69).2023.058.
18. Ränger L. M., Halvorsen I. J., Grützner T., Skogestad S. Understanding temperature profiles of distillation columns // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2024. – Vol. 63, No. 10. – С. 4533–4546.

References

- [1] DSTU 2368:2004, Soft drinks. Production. Terms and definitions, National Standard of Ukraine, Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2005, 18 p.
- [2] Fact.MR, “Non-Alcoholic Wine Market Study by Still and Sparkling in Bottles and Cans ... from 2024 to 2034,” [Online]. Available: <https://www.factmr.com/report/4532/non-alcoholic-wine-market> [Accessed: 15-Jul-2025].
- [3] J. A. Santos, H. Fraga, A. C. Malheiro, J. Moutinho-Pereira, L.-T. Dinis, and C. M. Correia, “A review of the potential climate change impacts and adaptation options for European viticulture,” **Applied Sciences**, vol. 10, no. 9, p. 3092, 2020, doi: 10.3390/app10093092.
- [4] D. Molitor and J. Junk, “Climate change is implicating a two-fold impact on air temperature increase in the ripening period under the conditions of the Luxembourgish grapegrowing region,” **OENO One**, vol. 53, no. 3, 2019, doi: 10.20870/oeno-one.2019.53.3.2329.
- [5] F. E. Sam, I. G. Medina-Meza, and A. J. Johnson, “Techniques for dealcoholization of wines: their impact on wine phenolic composition, volatile composition, and sensory characteristics,” **Foods**, vol. 10, no. 10, p. 2498, 2021, doi: 10.3390/foods10102498.
- [6] P. S. Horácio, J. C. C. Miranda, and E. Ramalhosa, “Simulation of vacuum distillation to produce alcohol-free beer,” **J. Inst. Brew.**, vol. 126, pp. 77–82, 2020, doi: 10.1002/jib.591.



- [7] C. Coetzee, “Zero alcohol wine – The principle of the Spinning Cone Column,” **Basic Wine**, May 30, 2023. [Online]. Available: <https://sauvignonblanc.com/zero-alcohol-wine-the-principle-of-the-spinning-cone-column/> [Accessed: 12-Jun-2025].
- [8] Flavourtech, “Spinning Cone Column,” **Flavourtech**, [Online]. Available: <https://flavourtech.com/products/spinning-cone-column/> [Accessed: 01-Jun-2025].
- [9] Flavourtech, “The Spinning Cone Column,” **WineBusiness Analytics**, [Online]. Available: <https://winebusinessanalytics.com/buyersguide/viewResource.cfm?resourceId=6334> [Accessed: 15-Apr-2025].
- [10] N. M. Tahir, J. Zhang, and M. Armstrong, “Control of heat-integrated distillation columns: review, trends, and challenges for future research,” **Processes**, vol. 13, no. 1, p. 17, 2025, doi: 10.3390/pr13010017.
- [11] G. H. S. F. Ponce, M. Alves, J. C. C. Miranda, R. Maciel Filho, and M. R. Wolf Maciel, “Using an internally heat-integrated distillation column for ethanol–water separation for fuel applications,” **Chem. Eng. Res. Des.**, vol. 95, pp. 55–63, 2015, doi: 10.1016/j.cherd.2015.01.002.
- [12] B. Suphanit, “Design of internally heat-integrated distillation column (HIDiC): uniform heat transfer area versus uniform heat distribution,” **Energy**, vol. 35, no. 3, pp. 1505–1514, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.12.008.
- [13] J. M. Veiga-del-Baño et al., “Total dealcoholisation of wines by very low temperature vacuum distillation technology called GoLo,” **Beverages**, vol. 10, no. 2, Art. 2, 2024, doi: 10.3390/beverages10020032.
- [14] S. Hudz, A. Mazur, and D. Kovalchuk, “The thermoelectric vacuum crock-pot and the automated workplace for its research as a control object,” **Automation of Technological and Business Processes**, vol. 9, no. 2, 2017, doi: 10.15673/atbp.v9i2.562.
- [15] O. V. Mazur, K. Ye. Hrabanova, and S. S. Hudz, “Rozrobka ta doslidzhennia imitatsiinoi modeli protsesu termovakuumnoi obrobky...” **Automation of Technological and Business Processes**, vol. 12, no. 1, pp. 75–88, 2020, doi: 10.15673/atbp.v12i1.1708.
- [16] S. S. Hudz and O. V. Mazur, “Compact thermoelectric vacuum dealcoholizer,” Ukraine Patent 117540, Aug. 10, 2018.
- [17] S. Pashkov, D. Petrenko, and O. Mazur, “Automatic control of the process of continuous dealcoholization of wine in a vacuum thermoelectric distiller,” **Enerhetyka i Avtomatyka**, no. 5, pp. 58–70, 2023, doi: 10.31548/energiya5(69).2023.058.
- [18] L. M. Ränger, I. J. Halvorsen, T. Grützner, and S. Skogestad, “Understanding temperature profiles of distillation columns,” **Ind. Eng. Chem. Res.**, vol. 63, no. 10, pp. 4533–4546, 2024.

Отримана в редакції 03.06.2025. Прийнята до друку 10.06.2025. Received 03 June 2025. Approved 10 June 2025. Available in Internet 30 June 2025