

**Сиромятников Ю. М.,
Сиромятніков П. С.,
Харченко О. М.,
Бєлих О. В.**

Державний
біотехнологічний
університет, м. Харків,
Україна
E-mail:
Gara176@btu.kharkov.ua
Ukridu@gmail.com
bdzhoiyarukraine@gmail.com
sashafincol@gmail.com

**ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ
ДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ
ВИТОПЛЕННЯ БДЖОЛИНОГО ВОСКУ:
ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ТА ІНЖЕНЕРНІ
ПЕРСПЕКТИВИ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-45-88>

УДК 631.3:636:620.9

Сиромятников Ю.М., Сиромятніков П.С., Харченко О.М., Бєлих О.В. Огляд сучасних підходів до вдосконалення технологій витоплення бджолиного воску: технічні рішення та інженерні перспективи.

Анотація. У статті представлено систематизований огляд сучасних технологій витоплення бджолиного воску з акцентом на конструктивні особливості обладнання, інженерні інновації та енергетичну ефективність. Розглянуто класифікацію традиційних і промислових методів витоплення воску, детально описано технічні рішення щодо модернізації парових, відцентрових і комбінованих установок. Проаналізовано новітні підходи до очищення воску, його застосування в енергетиці, інженерії та агропромислового виробництва. Значну увагу приділено соціально-економічним аспектам впровадження нових технологій у практику бджільництва, кластерній моделі переробки сировини, підготовці кваліфікованих кадрів і розвитку інженерно-освітніх програм. Наведено графічні моделі й аналітичні таблиці з кількісними показниками ефективності технічних рішень. Отримані результати демонструють перспективність технічної модернізації як засобу підвищення продуктивності, зменшення втрат воску та формування нової інфраструктури для сталого розвитку бджільництва.

Ключові слова: бджолиний віск, витоплення, парова воскотопка, відцентрова установка, очищення, енергетика, інженерні рішення, кластерна модель, механізація пасіки.

Syromyatnikov Yu.M., Syromiatnikov P.S., Kharchenko O. M., Bielykh O.V. Review of modern approaches to improving beeswax melting technologies: technical solutions and engineering perspectives.

Abstract. The article presents a systematic review of modern technologies for beeswax extraction with a focus on equipment design, engineering innovations, and energy efficiency. The classification of traditional and industrial methods of wax melting is provided, and technical solutions for the modernization of steam, centrifugal, and combined units are described in detail. Novel approaches to beeswax purification, as well as its applications in energy, engineering, and agri-industrial production, are thoroughly analyzed. Special

attention is given to the socio-economic aspects of technology implementation in beekeeping practices, including the cluster model of raw material processing, training of qualified personnel, and the development of engineering and educational programs. Graphical models and analytical tables are provided to illustrate the efficiency indicators of various technical solutions. The results demonstrate the high potential of technical modernization as a means to increase productivity, reduce wax losses, and create new infrastructure for the sustainable development of beekeeping.

Key words: *beeswax, wax extraction, steam wax melter, centrifugal unit, purification, energy applications, engineering solutions, cluster model, beekeeping mechanization.*

Постановка проблеми

Бджолиний віск є одним із найцінніших побічних продуктів галузі бджільництва, що знаходить застосування у виробництві вошини, косметичних препаратів, харчових пакувальних матеріалів, фармацевтичних форм, технічних мастил, матеріалів для 3D-друку, а також у системах зберігання теплової енергії на основі фазових переходів. Водночас процеси його отримання і переробки на більшості пасік досі базуються на малопродуктивних, морально застарілих або недостатньо адаптованих технологіях. Це зумовлює істотні втрати воскової сировини, підвищене енергоспоживання, нестабільну якість готового продукту та ризики мікробіологічного забруднення.

Згідно з сучасними дослідженнями, при використанні традиційних методів витоплення (варіння, сонячні воскотопки) втрати воску можуть досягати 25–30%, а частка домішок у готовому продукті перевищує 10%. Такі показники суттєво знижують економічну рентабельність пасіки, унеможливають повторне використання воску для виготовлення вошини й обмежують перспективи його застосування в промисловості. На цьому тлі зростає потреба в технічній модернізації обладнання для переробки воскової сировини та впровадженні інженерних рішень, що враховують вимоги до енергоефективності, санітарних стандартів і масштабованості.

Окрім технічних аспектів, актуальними є також питання організації переробки воску в умовах кооперації, адаптації обладнання до потреб малих господарств, а також підготовки фахівців, здатних обслуговувати й удосконалювати технологічні системи. Брак стандартних рішень, а також обмежена кількість навчальних програм з інженерії бджільництва посилює розрив між науковими розробками і практичними потребами виробників.

Таким чином, актуальність дослідження обумовлена необхідністю всебічного аналізу сучасних методів витоплення воску, визначення конструктивних і теплотехнічних переваг модернізованого обладнання, оцінки ефективності технологій очищення та обґрунтування перспектив їх впровадження в контексті технічної, економічної та освітньої трансформації бджільництва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблематика переробки бджолиного воску дедалі активніше розглядається у наукових колах, що пов'язано зі зростанням потреби в ефективному та екологічно безпечному використанні біологічної сировини. Серед пріоритетних напрямів досліджень – удосконалення процесів екстракції та очищення воску, розробка енергоощадних установок для його витоплення, створення нових матеріалів на основі воскових сполук.

Одним із важливих напрямів сучасної переробки бджолиного воску є отримання біологічно активних компонентів, зокрема полікозанолів – суміші високомолекулярних первинних спиртів, які проявляють фармакологічну активність. У дослідженні Venturelli et al. [1] запропоновано інноваційну стратегію їх екстракції із застосуванням мікрохвильової активації. Перевагою цього методу є здатність забезпечити швидко і контрольоване нагрівання, що скорочує тривалість процесу, зменшує теплові втрати й забезпечує збереження хімічної стабільності цільових сполук. Автори відзначають високу ефективність цього підходу для фармацевтичного та косметичного застосування, оскільки отримані полікозанолі мають високу біоактивність і чистоту. Цей підхід демонструє потенціал використання інноваційної техніки для глибокої переробки воскової сировини з метою створення цінних функціональних інгредієнтів.

Питання фізико-хімічного аналізу та стандартизації бджолиного воску було предметом дослідження Naik і Pargunde [2], які провели комплексну оцінку зразків воску, зібраних на ринку Мумбаї (Індія), що знаходиться поблизу природних осередків Західних Гат. У роботі підкреслено значення стандартних показників, таких як температура плавлення, кислотне та ефірне число, щільність, вміст домішок, колір і запах. Автори наголосили на важливості уніфікації методів оцінювання якості воску для забезпечення його придатності до подальшої промислової переробки. Було відзначено варіативність властивостей залежно від регіону, флористичного складу нектароносів та умов збору, що потребує врахування в стандартизації процесів обробки.

Дослідження безпечності воску з огляду на вміст агрохімікатів продовжує залишатися на передньому плані. У нещодавній публікації Mu et al. [3] було застосовано технологію екстракції з використанням глибоких евтектичних розчинників у поєднанні з високоефективною рідинною хроматографією UHPLC-MS/MS для одночасного виявлення кількох неонікотиноїдних пестицидів у зразках воску. Ця методика дозволяє досягати високої точності, чутливості й відтворюваності аналізу, що має ключове значення для забезпечення безпечного використання воску в харчових і фармацевтичних цілях. Автори вказують на широкі перспективи впровадження подібних підходів у лабораторний контроль якості воскової сировини, особливо у країнах з активним аграрним виробництвом.

Іншою цікавою технічною розробкою є використання бджолиного воску в мікрофлюїдних системах, як це описано у роботі Nunut, Whulanza та Kassegne [4]. У дослідженні випробувано методику друку воскових структур для створення паперових мікрофлюїдних платформ, що мають застосування у біомедичних діагностичних системах. Таке застосування відкриває нові перспективи для використання воску у високотехнологічному машинобудуванні – зокрема, як функціонального матеріалу з термо- та гідрофобними властивостями.

У контексті медико-біологічних досліджень заслуговує уваги робота Cho et al. [5], у якій досліджено вплив тривалого споживання спиртів бджолиного воску (Beeswax Alcohol, Raydel®) на метаболічні порушення у гіперліпідемічних зебрафішах. Результати показали значне покращення ліпідного профілю, зниження окисного стресу та зменшення ушкодження органів. Це свідчить про потенціал воскових фракцій як функціональних добавок у дієтичному харчуванні, а також демонструє нові біомедичні горизонти використання компонентів бджолиного воску.

Продовжуючи вивчення фізико-хімічних властивостей воскової сировини, Shegaw [6] у своєму дослідженні проаналізував зразки воску, зібрані в районах Kafa Zone, Ефіопія. Було виявлено істотну варіабельність таких параметрів, як вміст вологи, щільність, кислотне число та температура плавлення, залежно від місця збору. Автор акцентував увагу на необхідності стандартизації методик відбору, очищення та

зберігання воску. Результати мають практичну цінність для покращення системи контролю якості в країнах, що розвиваються, де значна частка воску виробляється у кустарних умовах.

Потенціал бджолиного воску як інженерного матеріалу знайшов підтвердження у дослідженні Naderizadeh et al. [7], де описано створення надгідрофобного покриття на основі емульсії «віск-вода». Автори довели, що такі матеріали не лише виявляють водовідштовхувальні властивості, але й здатні акумулювати приховану теплоту завдяки фазовим переходам у структурі воску. Такий підхід відкриває нові горизонти у сфері енергозберігаючих технологій та теплоізоляційних покриттів для будівельної та авіаційної галузі. Воскові емульсії можуть слугувати дешевою та біосумісною альтернативою синтетичним полімерам у виробництві інтелектуальних покриттів.

У контексті антимікробних властивостей бджолиного воску Felicioli et al. [8] дослідили етилові екстракти органічного воску підвиду *Apis mellifera ligustica*. Було виявлено, що воскові витяжки мають виражену антибактеріальну активність проти низки патогенних штамів, таких як *Staphylococcus aureus* і *Escherichia coli*. Крім того, вивчено леткі сполуки, присутні у воску, що свідчить про його потенціал як натурального консерванту для харчових продуктів. Дослідження підкреслює перспективність використання воску не лише як технічної сировини, а й як біологічно активного агента у фармацевтичній та харчовій промисловості.

У публікації Giampieri et al. [9] розглянуто побічні продукти переробки воску як потенційне джерело біологічно активних речовин. Автори виявили, що залишкові фракції воску містять широкий спектр флавоноїдів, фенольних кислот, стеролів та інших вторинних метаболітів із антиоксидантними властивостями. Такий підхід дозволяє розширити економічну доцільність процесу воскової переробки за рахунок повного використання сировини, що особливо важливо для кластерних переробних підприємств, орієнтованих на безвідходне виробництво. Крім того, дослідження доводить, що воскова сировина може бути не лише технічним ресурсом, але й джерелом високододаної вартості для біомедичних застосувань.

Останнє у цьому блоці дослідження – публікація Hakim et al. [10], яка присвячена впливу лецитину на властивості воскового покриття. Автори показали, що додавання лецитину, виділеного з рослинних олій, сприяє покращенню емульгуючих властивостей воскової маси, що особливо важливо для створення харчових і упаковкових покриттів. Було також встановлено, що подібні композиції краще прилягають до поверхонь, мають покращену термостабільність і знижують втрати вологи з продуктів. Такі результати є особливо актуальними в контексті розробки біорозкладних упаковок із харчовим допуском, що набувають все більшого поширення.

Із розширенням практики локального виробництва воску важливим є вивчення його якості залежно від способу вилучення. У статті, опублікованій в *World Journal of Food Science and Technology* [11], розглянуто демонстраційні заходи з використання технологій сирової екстракції бджолиного воску в окрузі Ілу Гелан (Оромія, Ефіопія). Виявлено, що місцеві методи, попри низьку собівартість, часто супроводжуються значними втратами воску через відсутність фільтрації, недостатню температурну обробку та неконтрольоване охолодження. Автори підкреслюють важливість запровадження елементарної технічної підготовки пасічників щодо основ термічного балансу, фільтрації та зберігання, що здатне значно підвищити вихід і якість продукції без кардинальної модернізації.

Поглиблений аналіз якості воску відповідно до джерела походження та способу очищення було проведено Meseret [12]. Дослідження базувалося на порівнянні зразків воску з різних регіонів та методів його витоплення (сонячні, парові, водяні установки). Результати показали, що парові воскотопки забезпечують найменший рівень домішок,

нижчий показник кислотного числа та кращу термічну стабільність воску. Окрему увагу було приділено впливу повторного використання сировини, зокрема мерви, на кінцеві властивості продукту. Автор рекомендує використовувати паровий метод як пріоритетний у регіонах, де доступ до енергоресурсів обмежений, але можлива проста модернізація обладнання.

У дослідженні Schaeffer et al. [13] зроблено спробу комплексного оцінювання рівня забруднення воску залишками пестицидів та інших ксенобіотиків. За допомогою вискоелективної хроматографії було проаналізовано зразки воску з різних країн Європи. Виявлено, що навіть після переробки та очищення значна частка воску зберігає сліди неонікотиноїдів, антрацену та фталатів. Автори роблять висновок про необхідність розробки стандартизованих протоколів глибокого очищення воску, особливо при його подальшому використанні в харчових або фармацевтичних продуктах. Запропоновано комбіноване застосування фільтрації, сорбентів і багатоступової термічної обробки.

Ще одне актуальне дослідження представлено Tu et al. [14], які запропонували нову методику визначення бісфенолів у бджолиному воску на основі методу «sugaring-out assisted liquid-liquid extraction». Цей підхід дозволяє швидко й ефективно екстрагувати гідрофобні забруднювачі з воску з мінімальним використанням органічних розчинників. Метод має потенціал для впровадження в рутинний лабораторний контроль, оскільки поєднує високу селективність, короткий час обробки та відносну дешевизну реагентів. Дослідники наголошують на необхідності впровадження подібних методик на рівні лабораторій ветеринарної та санітарної експертизи для захисту споживача.

І на завершення цього блоку варто згадати дослідження Tran et al. [15], де вивчався вплив способів варіння та положення стільників у вулику на фізико-хімічні властивості отриманого воску. У результаті дослідження встановлено, що воскова сировина з нижніх частин стільників має вищу щільність, темніший колір і більше включень домішок. Водночас оптимізація режимів варіння (температури, тривалості та кількості води) дозволяє досягти кращого виходу воску з високими показниками чистоти. Отримані результати рекомендовано враховувати при моделюванні технологічних схем переробки воскової сировини.

У рамках системного підходу до організації виробництва, дослідження Shegaw та Edimew [16] охопило не лише технологічні, але й економічні та маркетингові аспекти обробки бджолиного воску в зоні Kafa (Ефіопія). Автори підкреслили існування значного розриву між обсягами виробництва та реальним використанням воску на внутрішньому ринку. Основною причиною є відсутність обладнання для якісного очищення, слабка кооперація між пасічниками та низький рівень технічної обізнаності. Запропоновано створення об'єднаних переробних пунктів із використанням централізованих парових установок і базових систем фільтрації. Такий підхід дозволяє не лише підвищити якість воску, але й покращити загальну економічну ефективність галузі.

Цікавим є дослідження Špaldoňová et al. [17], в якому порівнюються методи визначення домішок у воску, зокрема парафіну, із застосуванням різних аналітичних підходів – газової хроматографії з мас-спектрометрією (GC/MS), Фур'є-інфрачервоної спектроскопії з відбитим випромінюванням (FTIR-ATR) та спектроскопії Рамана. Результати показали, що FTIR та Raman забезпечують швидко та неструктуривну ідентифікацію парафіну, в той час як GC/MS дозволяє підтвердити кількісний вміст. Така багаторівнева методика є особливо корисною для контролю автентичності воску в умовах масової фальсифікації, яка є характерною проблемою світового ринку.

Щодо інженерних підходів до створення функціональних матеріалів на основі воску, варто відзначити роботу Brito-Pereira et al. [18], де розроблено багатофункціональні композити з воску з термозціплювальними властивостями та можливістю повторного використання. В основі інноваційного матеріалу – поєднання бджолиного воску з полімерними матрицями, які забезпечують гнучкість, міцність і стабільність. Компоненти композиту здатні регенерувати свою структуру після незначних пошкоджень під дією тепла. Ці матеріали мають потенційне застосування в біомедичних імплантатах, екологічному пакуванні та смарт-матеріалах.

Окрему увагу в літературі приділено методам очищення воску від пестицидних залишків. У статті Calatayud-Vernich et al. [19] досліджено очищення воску шляхом екстракції органічними розчинниками з наступною фільтрацією. Метод продемонстрував високу ефективність у видаленні залишків неонікотиноїдів та хлорорганічних сполук. Основною перевагою є відносна простота технологічної реалізації – процес не потребує складного обладнання, що робить його доступним для кооперативних пасічних господарств. Разом із тим, автори застерігають про необхідність регламентованого поводження з розчинниками з екологічної точки зору.

У пілотному дослідженні Luna et al. [20] було реалізовано промислову методику очищення бджолиного воску від пестицидів за допомогою екстракції метанолом. Особливістю цього підходу є масштабування до рівня середніх виробничих потужностей, що дозволило оцінити не лише ефективність видалення забруднень, але й витрати ресурсів, цикл обробки та повторне використання розчинника. Було доведено, що якість очищеного воску відповідає вимогам до харчового використання. Розробка відкриває можливість централізованого очищення воску в рамках кластерних моделей з повторною сертифікацією готового продукту.

Продовжуючи тему регіональних підходів до удосконалення технологій, Вієна [21] у своєму дослідженні докладно описує практичні результати демонстраційної апробації сирої технології екстракції бджолиного воску в районі Ілу Гелан (Ефіопія). Було здійснено порівняння між традиційними методами витоплення (в основному ручне варіння) та адаптованими паровими установками місцевого виробництва. Аналіз засвідчив, що модернізовані пристрої не тільки зменшують втрати сировини, але й дозволяють отримати чистіший продукт. Особливо підкреслено позитивний ефект від зменшення енергоспоживання та підвищення ергономіки праці. Автор пропонує запровадження програми з розповсюдження таких пристроїв у межах державних програм підтримки пасіництва.

Робота Hosseini, Mousavi і McClements [22] присвячена створенню супергідрофобних плівок і покриттів на основі бджолиного воску для зберігання фруктів. У ході дослідження автори синтезували багатошарові покриття шляхом нанесення воску у поєднанні з натуральними полімерними компонентами. Було встановлено, що такі плівки здатні ефективно знижувати втрату вологи, уповільнювати дихання плодів і запобігати мікробіологічному псуванню. Покриття виявились не лише екологічно чистими, а й економічно доцільними для широкого застосування в післязбиральній обробці фруктової продукції, що робить їх актуальними для аграрних господарств із розвиненою системою зберігання.

Особливу увагу в роботі Kruński та Kowaluk [24] приділено застосуванню бджолиного воску як гідрофобізуючої добавки в деревинно-волокнистих плитах (MDF). Автори показали, що додавання навіть невеликої кількості воску дозволяє суттєво покращити вологостійкість матеріалу, зменшити деформацію при коливаннях температури й вологості, а також підвищити термічну стабільність кінцевого продукту. Методика обробки поверхні MDF-плит воском розглядається як доступна альтернатива

дорогим синтетичним полімерним покриттям, з перевагами в плані екологічності, біодеградації та вартості.

Gupta і Anjali [25] у своїй публікації здійснили огляд властивостей, складу, потенційного фальсифікування та терапевтичного значення бджолиного воску. Було показано, що натуральний віск відзначається унікальними реологічними характеристиками, високою біосумісністю та низькою алергенністю, що робить його перспективним компонентом у фармакології та косметології. Автори наголошують, що незважаючи на високу цінність натурального продукту, практика фальсифікації воску парафіном або іншими добавками є широко розповсюдженою. У цьому контексті особливо актуальними є методи автентифікації, включаючи спектроскопію, хроматографію й аналіз ізотопного складу.

Ще одним цікавим прикладом технічного застосування бджолиного воску є розробка твердих чорнил для сенсорних систем, описана Moreira et al. [26]. У статті представлено композити на основі бджолиного воску, графіту та графену, які використовуються для друку на паперових сенсорах, призначених для визначення галактози. Отримані матеріали виявилися термостабільними, з доброю провідністю та сумісними з біоаналітичними методами. Віск у цій системі відіграє роль формуютьовального компонента, що дозволяє створювати мікроструктури з високою роздільною здатністю. Такий підхід відкриває нові горизонти використання воску в галузі біосенсорики, гнучкої електроніки та «лабораторій на чипі».

У продовження досліджень, пов'язаних із застосуванням бджолиного воску в сенсорних технологіях, Moreira et al. [26] представили новітні тверді чорнила, створені на основі комбінації бджолиного воску, графіту та графену. Ці чорнила використовувались для нанесення на паперові платформи, що слугували основою для сенсорів визначення галактози. Завдяки високій термостійкості та електропровідності композиту, автори досягли значної стабільності сигналу, що має важливе значення для медичної діагностики та контролю харчових продуктів. Віск у цьому контексті виконує не лише функцію матриці, а й покращує адгезію та еластичність шару, що забезпечує довговічність пристрою. Такі розробки є кроком до створення дешевих та екологічних біосенсорів нового покоління.

Tran et al. [27] дослідили фізико-хімічні властивості бджолиного воску залежно від методу його термічної обробки та положення вуликових стільників, з яких він був зібраний. Автори провели експерименти з різними температурними режимами варіння й визначили, що воскова сировина, зібрана з нижніх ярусів стільників, має тенденцію до підвищеного вмісту домішок, більшої щільності й темнішого кольору. Рекомендовано використовувати багатоступеневе фільтрування й сортування воску до витоплення, що дозволить отримувати продукт вищої якості. Встановлено, що контрольована термообробка з попереднім очищенням позитивно впливає на структурні властивості воску, зокрема – зменшує вміст золи та покращує гомогенність плавлення.

У дослідженні Al-Rajhi, El Serey і Elsheikha [28] представлено інженерне рішення щодо використання сонячної енергії для розплавлення бджолиного воску. Конструкція установки включає параболічний концентратор, що фокусує сонячне випромінювання на резервуар з восковою сировиною. Результати показали, що цей метод є ефективним у регіонах з високою інсоляцією, дозволяючи уникнути використання традиційних енергоносіїв. Перевагами технології є повна автономність, екологічність і низькі експлуатаційні витрати. Автори відзначають, що система може бути адаптована для використання як у польових умовах, так і для стаціонарних пасічних господарств, зокрема в рамках малих кооперативів.

У великому огляді Luo et al. [29] наведено сучасні технології переробки продуктів бджільництва, включаючи віск. Автори детально описали стадії підготовки, очищення, фільтрації, термообробки та формування блоків воску. Особливу увагу приділено новим розробкам у галузі вакуумного плавлення, фільтрації за допомогою активованого вугілля та мембранних технологій. Дослідники також підкреслюють важливість впровадження автоматизованих систем для великих виробництв, де контроль температури та часу є критичними для досягнення високої якості кінцевого продукту. Стаття містить порівняльний аналіз методів за критеріями ефективності, енергоємності та відповідності харчовим стандартам.

Цікавий приклад впровадження бджолиного воску у складні харчові системи продемонстровано Zhang et al. [30], які розробили нову гелеву емульсію на основі овалбуміну, де структура олійної фази була модифікована додаванням воску. Метою було покращення стабільності та функціональних властивостей харчової емульсії, зокрема – при виробництві біоактивних добавок. Автори довели, що віск сприяє стабілізації мікроструктури емульсії, підвищує в'язкість та сприяє рівномірному розподілу активних речовин. Такий підхід може бути використаний при розробці нових харчових продуктів зі спрямованими функціональними властивостями – зокрема в галузі спортивного харчування або функціональних десертів.

Tu et al. [31] продовжили розробку високочутливих методів детекції забруднень у бджолиному воску, сконцентрувавшись на визначенні бісфенолів – органічних сполук, які мають естрогеноподібну активність і широко використовуються в пластиковій промисловості. Методика, запропонована авторами, базується на рідинно-рідинній екстракції з ефектом “випадіння цукру” (sugaring-out-assisted LLE), що значно знижує потребу в органічних розчинниках і дозволяє ізольовувати мікродомішки з високою селективністю. Воскі, забруднені бісфенолами, можуть бути потенційно небезпечними при використанні у фармацевтиці, косметології та харчових пакуваннях. Це дослідження підкреслює важливість інтеграції сучасних аналітичних процедур до нормативної практики контролю якості воску.

Sousa et al. [32] дослідили нову галузь використання бджолиного воску – у дорожньому будівництві як добавки до асфальтових сумішей. Автори довели, що введення невеликих кількостей воску в технологію виготовлення теплового асфальту (warm-mix asphalt) покращує його оброблюваність, підвищує пластичність і сприяє зменшенню енергоспоживання під час укладки. Такий підхід дозволяє знизити температуру змішування до 110–130 °C без погіршення експлуатаційних властивостей. Використання натурального воску також сприяє поліпшенню екологічних показників технології, знижуючи викиди парникових газів.

Mahottamananda et al. [33] запропонували унікальне технічне рішення – використання бджолиного воску в якості компонента твердого палива для гібридних ракетних двигунів. У роботі представлено композити на основі воску, етиленвінілацетату (EVA) та активованого вугілля. Експериментальні дані підтвердили, що така композиція має високу калорійність, низьку токсичність продуктів згоряння та стабільність горіння. Це відкриває перспективи для створення екологічно безпечних енергоносіїв з використанням біоматеріалів. Таким чином, бджолиний віск, окрім традиційних сфер, виявляє потенціал у високотехнологічному машинобудуванні та оборонній промисловості.

Важливий внесок у сферу ветеринарного контролю зроблено Gajda et al. [34], які розробили та валідували метод визначення залишків тетрациклінів у воску за допомогою рідинної хроматографії з тандемною мас-спектрометрією (LC-MS/MS). Метод дозволяє виявляти сліди антибіотиків на рівні нанограм на грам, що особливо актуально в умовах поширеного використання ветеринарних препаратів у

бджільництві. Виявлені концентрації навіть після очищення воску свідчать про необхідність удосконалення процесів екстракції та впровадження стандартизованого моніторингу для забезпечення харчової безпеки продукції.

Jawad et al. [35] у своїй статті розглянули антикорозійні властивості бджолиного воску в системах гальмівних рідин. Дослідники створили захисне покриття на основі натурального воску, яке дозволяло зменшити контакт металевих елементів з вологим середовищем. Було виявлено, що такий шар знижує швидкість корозії, забезпечує додаткову термостабільність і не вступає в хімічну взаємодію з робочими рідинами. Цей підхід може знайти застосування в автомобілебудуванні, зокрема в частинах гальмівних систем, де потрібна біосумісність, нетоксичність і водночас – ефективний захист від окислення.

У дослідженні Abdulmunem et al. [36] було розглянуто можливість використання бджолиного воску як фази зберігання теплової енергії в системах сонячного обігріву. Експериментальна установка включала повітряний сонячний колектор, у якому віск використовувався як акумулятор тепла. Було встановлено, що завдяки високій теплоємності та стабільності при температурах 60–80 °С, бджолиний віск здатен ефективно зберігати й віддавати тепло впродовж тривалого часу. Такі матеріали можуть використовуватись у пасивному опаленні приміщень, теплицях, сушильних агрегатах, а також у побутових геліосистемах з акцентом на екологічність та поновлюваність ресурсів.

Дослідження Belgacem et al. [37] спрямоване на вдосконалення властивостей композиційних фазо-змінних матеріалів (PCM) на основі бджолиного воску шляхом його поєднання з синтетичними компонентами. Було продемонстровано, що змішування воску з парафінами, стеариною кислотою або полімерами дозволяє розширити температурний інтервал фазового переходу та підвищити енергоакуюлюючу здатність. Застосування таких PCM рекомендовано для акумуляторів тепла в будівництві, сонячній енергетиці та холодильних системах. Автори наголошують, що бджолиний віск залишається ключовим компонентом у створенні біоорієнтованих теплових накопичувачів з високим коефіцієнтом ефективності.

Al-Rajhi et al. [38], продовжуючи розгляд тематики використання сонячної енергії для розплавлення воску, дослідили просту установку на базі параболічного концентратора з ручним керуванням. Було виявлено, що навіть за мінімального технічного оснащення можливо досягти ефективного розплавлення до 5 кг сировини на годину за умов прямої сонячної інсоляції. Конструкція відзначається дешевизною та технологічною адаптивністю, що робить її придатною для країн Глобального Півдня. Дослідження підтверджує практичну значущість розробки автономних енергозберігаючих рішень для пасічного господарства з низьким рівнем механізації.

Mishra, Bhowmik і Pandey [39] провели чисельний аналіз теплопередачі в системах теплового зберігання на основі бджолиного воску з анулярними (кільцевими) модифікаціями конструкції. Вивчались варіанти теплопровідних каналів у корпусі ємності для акумуляції тепла – з круглим, еліптичним та квадратним поперечним перерізом. Було встановлено, що ефективність зберігання енергії та швидкість її віддачі залежать не лише від теплофізичних властивостей воску, а й від конфігурації теплообмінної поверхні. Висновки дослідження є важливими для інженерного проектування накопичувачів тепла з природних фазозмінних матеріалів.

Публікація Ertürk et al. [40] порівнює фізико-хімічні, біохімічні та антимікробні властивості натурального і штучного бджолиного воску (*Apis mellifera L.*). У ході дослідження було виявлено, що натуральний віск суттєво переважає штучний за такими показниками, як антибактеріальна активність, ступінь полімеризації, вміст натуральних

ефірів і стеринів. Штучний віск демонструє нижчу гнучкість, гіршу сумісність із біологічними середовищами та вищу крихкість при низьких температурах. Отримані результати підтверджують необхідність суворого контролю за фальсифікацією воску, особливо в контексті його використання у фармацевтиці та харчовій промисловості.

У повторному дослідженні Вієна [41], присвяченому демонстрації технології сирової екстракції воску в Ілу Гелан, акцент зроблено на ефективності польових тренінгів серед пасічників. Автор розширює попередні висновки щодо необхідності технічної просвіти серед сільських господарств. Представлено емпіричні дані, що підтверджують підвищення виходу продукту на 18–24% після впровадження модернізованих воскотопок. Було також запропоновано створення локальних пунктів ремонту та обслуговування обладнання, що дозволяє уникнути залежності від зовнішніх постачальників та сприяє формуванню сталих мікроекономік у регіонах.

Nong et al. [42] здійснили детальний огляд використання бджолиного воску в косметичних продуктах. Основна увага зосереджена на протизапальних, емоментних і захисних властивостях воску, що забезпечують ефективне зволоження шкіри та створення бар'єру проти зовнішніх впливів. Особливо цінною є його здатність стабілізувати структуру емульсій і пролонгувати дію активних речовин. Автори також відзначають відсутність токсичності й гіпоалергенності натурального воску, що робить його ідеальним інгредієнтом у продуктах для дітей, осіб з чутливою шкірою та дерматологічними захворюваннями.

Цікавим прикладом нестандартного використання воску є дослідження Alrabaiah і Medina-Medina [43], які запропонували застосування концепції “Agile Beeswax” – методології розробки мобільного застосунку для підтримки процесу виробництва, аналізу якості й логістики бджолиного воску. Це дослідження ілюструє перетин аграрної інженерії та інформаційних технологій: застосунок дозволяє користувачам вводити дані про партії воску, автоматично обчислювати індекси якості, будувати графіки простежуваності. Такий підхід сприяє диджиталізації пасічного виробництва та переходу до смарт-бджільництва.

Lindermann et al. [44] провели одне з найдетальніших досліджень щодо перенесення акарицидів із бджолиного воску до інших продуктів вулика – меду, перги, маточного молочка, робочого желе. Було виявлено, що навіть при тривалому зберіганні, залишки акарицидів можуть мігрувати з воску до інших субстратів, особливо в умовах підвищеної температури та вологості. Ці результати є важливими для розробки нормативів щодо повторного використання воску на пасіках, особливо при переході на органічне виробництво, де залишкові кількості заборонених препаратів можуть призвести до втрати сертифікату.

Zhang et al. [45] розробили нову структуру гелевої емульсії з використанням овалбуміну як стабілізатора та бджолиного воску як модифікатора олійної фази. Метою було покращити стабільність, в'язкість та функціональні властивості емульсії для використання у функціональних харчових продуктах. Автори встановили, що додавання воску дозволяє контролювати кристалізацію ліпідів, що підвищує однорідність системи. Такий підхід може знайти застосування у розробці біологічно активних нутрицевтиків, десертів з контрольованим вивільненням речовин або векторизованих масляних структур для енкапсуляції пробіотиків.

У продовження тематики автентичності воску, Gupta і Anjali [46] подають глибокий аналіз властивостей натурального бджолиного воску в контексті екологічної безпеки, фальсифікаційних ризиків та терапевтичних переваг. Автори зазначають, що натуральний віск містить понад 300 сполук, включно з довголанцюговими насиченими кислотами, спиртами, вуглеводнями, ефірами, що визначають його пластичність, аромат і біологічну активність. Було наголошено на зростаючій практиці

додавання парафіну чи стеаринової кислоти до воску з метою збільшення ваги та зниження собівартості, що вимагає систематичного контролю якості на рівні сировини та готової продукції. Результати підкреслюють необхідність посилення сертифікації у виробництві овочини, косметичних засобів і харчових упаковок.

Тему сонячного плавлення воску ще раз піднімають Al-Rajhi, El Serey та Elsheikha [47], підкреслюючи значення енергоефективних технологій для дрібних пасік. Удосконалена модель установки включала ручний механізм орієнтації концентратора, збільшений коефіцієнт поглинання тепла завдяки відбиваючому покриттю, та герметичну камеру для воскової сировини. Автори довели, що витрати часу на повний цикл витоплення зменшуються на 30%, при цьому зберігається висока якість продукту без ознак окислення чи термічного руйнування. Подібні установки можуть бути виготовлені з доступних матеріалів, що робить їх привабливими в умовах децентралізованої переробки сировини.

Цікавим підходом до комерціалізації воскової технології є дослідження Bednarzewska [48], яка розробила бізнес-модель для просування приладу "WAXO" – аналітичного пристрою для оцінки якості воску. На основі університетського патенту було створено стартап із фокусом на автоматизовану інтерпретацію фізико-хімічних параметрів сировини. Автор пропонує адаптацію пристрою до портативного формату та створення цифрової платформи для дистанційного аналізу. Розробка має потенціал для включення в ланцюг сертифікації продукції, особливо у сферах органічного бджільництва, фармацевтики та харчових добавок.

Amberkar і Mahanwar [49] представили інноваційну методику мікрокапсулювання бджолиного воску для використання в системах накопичення теплової енергії. Процес базується на методі *in situ* полімеризації, де віск інкапсулюється в оболонку на основі формальдегіду або акрилатів. Результати вказують на високу стабільність мікрокапсул при циклічних фазових переходах, збереження до 85% початкової енергоємності навіть після 50 циклів. Такі капсули придатні для вбудування у будівельні матеріали, геліосистеми або ізоляційні панелі. Автори зазначають, що додавання графіту чи вуглецевих нанотрубок дозволяє підвищити теплопровідність без втрати герметичності оболонки.

У наступній роботі Amberkar і Mahanwar [50] продовжують тему енергозберігаючих матеріалів, розробивши композитні мікрокапсули бджолиного воску з оболонкою з етилцелюлози. Така система демонструє не лише стабільну терміну характеристику, а й біорозкладність, що робить її придатною для застосування в будівництві пасивних енергоакуюлюючих систем. Автори також вивчили кінетику теплових процесів у капсулах, виявивши, що ефективність теплопередачі може бути додатково підвищена за рахунок модифікації структури оболонки. Робота підтверджує, що бджолиний віск – ефективний та доступний РСМ-матеріал природного походження, з великим потенціалом для екологічного інженерного дизайну.

Eshete та Eshete [51] у своєму оглядовому дослідженні проаналізували втрати бджолиного воску внаслідок неефективного збору, зберігання та переробки сировини в Ефіопії. Було встановлено, що до 40% потенційно придатного воску щорічно втрачається через недотримання технологій очищення мерви, відсутність герметичної упаковки, низьку санітарну культуру та недостатню кваліфікацію операторів. Автори запропонували створення регіональних пунктів первинної переробки, де віск фільтруватиметься одразу після витоплення, що зменшить ступінь забруднення та підвищить якість. Крім того, підкреслено важливість розвитку системи зворотного збору мерви на кооперативному рівні.

Shrychak [52] дослідив можливість математичного моделювання параметрів процесу витоплення воску з прополісу. В рамках експерименту було проведено

планування повного факторного експерименту з варіацією температури, тривалості нагрівання та співвідношення сировини до води. Автор запропонував математичну модель у вигляді полінома другого порядку, яка дозволяє з великою точністю передбачати вихід воску залежно від комбінації вхідних параметрів. Такі підходи мають велике значення для створення автоматизованих установок, у яких процеси витоплення та очищення керуються через ПЛК-контролери.

Mogeița et al. [53] повторно представили застосування твердих чорнил на основі бджолиного воску, графіту та графену, що мають застосування в портативних біосенсорних системах. У новому циклі дослідження акцент зроблено на стабільності сенсорної платформи в умовах підвищеної вологості та температур. Результати підтвердили, що бджолиний віск виконує не лише функцію носія, а й стабілізатора структури, зменшуючи втрату функціональних властивостей з часом. Було запропоновано вдосконалений дизайн електродів із восковими бар'єрами, які дозволяють ізолювати реактивні зони та мінімізувати перехресні реакції.

Luо et al. [54] у фундаментальному огляді сучасних технологій обробки бджолопродуктів (меду, воску, прополісу, маточного молочка) подають систематизацію методів очищення та екстракції воску. Особливо відзначено перспективність мембранних фільтраційних систем, які дозволяють видаляти механічні домішки та частинки мерви без нагрівання. Це дає змогу зберегти біологічно активні компоненти, що особливо важливо для фармацевтичного воску. Також обговорено адаптацію фільтрів глибокої дії (depth filtration), які можуть бути реалізовані на основі целюлозних або мінеральних волокон.

Nunut, Whulanza і Kassegne [55] запропонували застосування воскових структур у виготовленні мікрофлюїдних пристроїв, надрукованих на папері. Автори створили високоточні канали за допомогою нанесення розплавленого воску з наступною термічною фіксацією. Такі структури використовуються для створення «лабораторій на папері» (LoP), де проводяться біоаналізи з мінімальним об'ємом реагентів. Бджолиний віск у цьому контексті відіграє роль гідрофобного бар'єру, який визначає межі каналів. Робота демонструє нові можливості використання воску як функціонального інженерного матеріалу для біомедичних застосувань.

У роботі Shegaw і Edimew [56] здійснено оцінку стану виробництва, переробки та маркетингу бджолиного воску в регіоні Кафа (Ефіопія). Автори виявили системні проблеми – від слабкої матеріально-технічної бази пасік до відсутності логістичної інфраструктури для централізованого збору сировини. Особливо підкреслено, що значна частка пасічників взагалі не використовує механізовані воскотопки, покладаючись на традиційне варіння. Водночас, було запропоновано впровадження малогабаритних парових установок з теплоізоляцією, які можна виготовляти локально із нержавіючої сталі. У роботі зазначено, що перехід на напівавтоматизовані технології дозволяє зменшити втрати воску до 10–15% порівняно з ручними методами, а також підвищити санітарну якість продукції.

У публікації Gao et al. [57] досліджується застосування бджолиного воску як самоемульгуючого агента для формування термочутливих емульсій типу «вода в олій» (W/O) у харчовій промисловості. Автори синтезували емульсії із заданою температурою дестабілізації, що можуть використовуватись для контрольованого вивільнення смако-ароматичних компонентів або біоактивних речовин. Віск, завдяки своїй здатності формувати стабільну гідрофобну фазу, забезпечує термічну стабільність і регульовану в'язкість систем. Було відзначено потенціал використання таких емульсій у виробництві інноваційних кулінарних концентратів, функціональних соусів або нутрицевтиків з подвійним вивільненням.

У публікації Mishra, Bhowmik і Pandey [58] представлено моделювання ефективності терморегуляції лігівних акумуляторів за допомогою бджолиного воску як фазозмінного матеріалу. Авторами було використано чисельне моделювання за методом скінчених елементів для вивчення температурного профілю батареї під час зарядження/розрядження. Встановлено, що додавання воску у вигляді інкапсульованої термопасти навколо осередків акумулятора дозволяє знизити пікову температуру на 15–20 °С, подовжити термін служби елементів живлення та запобігти перегріванню. Віск виступає як біосумісна, недорога та доступна альтернатива синтетичним РСМ-матеріалам у портативних електронних пристроях.

Brito-Pereira et al. [59] запропонували мультифункціональні воскові композити з терморегенеративними властивостями. До складу матеріалу включено термочутливі полімери, які, перебуваючи в восковій матриці, здатні самозаліковуватись при локальному перегріванні. Було доведено, що такі матеріали можуть відновлювати до 90% своїх механічних властивостей після пошкодження. Також проведено аналіз можливості вторинного використання композиту без деградації основних характеристик. Ці результати мають прикладне значення в інженерії захисних покриттів, гнучкої електроніки, біомедичних імплантатів та упаковки з інтелектуальними властивостями.

Останнім у цьому блоці є дослідження Márquez-Osuna [60], яке представляє культурологічний та історико-економічний аналіз розвитку бджільництва у країнах Глобального Півдня. Хоча фокус роботи не є технічним, автор детально висвітлює, як бджолиний віск відігравав роль не лише продукту, а й соціального маркера ремесла, засобу торгівлі, ритуального інгредієнта. Було підкреслено, що в багатьох культурах Африки та Латинської Америки технології переробки воску передавались виключно усно, що спричинило втрату деяких традицій. У світлі цього автор закликає до інтеграції традиційних знань у сучасні технічні рішення, зокрема в дизайні малих воскотопок, що базуються на принципах локального матеріалознавства та біоархітектури.

Mu et al. [61] продовжують розробку аналітичних методів для виявлення залишкових кількостей пестицидів у бджолиному воску. У дослідженні застосовано комбінацію екстракції глибокими евтектичними розчинниками (DES) та ультрависокоєфективної рідинної хроматографії з тандемною мас-спектрометрією (UHPLC-MS/MS) для одночасного визначення кількох неонікотиноїдів. Було встановлено, що DES-підхід дозволяє скоротити час підготовки проб і покращити вибірковість аналізу, мінімізуючи потребу в токсичних органічних розчинниках. Враховуючи зростаючий попит на сертифіковані продукти без залишків пестицидів, запропонована методика може бути основою для створення нових стандартів аналізу воскової сировини в рамках органічного виробництва.

Cho et al. [62] у своїй роботі досліджували вплив спиртів бджолиного воску (Beeswax Alcohols, BWA) на організм гіперліпідемічних рибок зебрафіш (*Danio rerio*). Упродовж 20-тижневого експерименту було зафіксовано суттєве покращення ліпідного профілю, зменшення окисного стресу, зниження пошкодження печінки та нирок. Ці результати свідчать про потенціал використання BWA як дієтичної добавки з гепато- та кардіопротекторною дією. Робота демонструє новий напрям використання фракцій воску як функціональних інгредієнтів у фармакології та нутриціології, з можливістю створення препаратів на основі очищених воскових екстрактів.

Agbo et al. [63] презентують розробку ліпідних лікарських форм на основі локального бджолиного воску, зібраного з природних стільників у Нігерії. Вивчались фізико-хімічні характеристики воску як допоміжної речовини: температура плавлення, кислотне число, здатність до емульгування, стабільність у присутності води. Авторами

створили мазі та супозиторії з активною речовиною, інкапсульованою у воскову матрицю, і довели їх біосумісність та пролонговану дію. Це дослідження підкреслює перспективність застосування локальних біоматеріалів у розробці генеричних форм лікарських засобів для африканського ринку.

Rajitha et al. [64] розробили нову антикорозійну систему на основі нанокомпозиту з бджолиного воску та графену. Покриття наносилось на зразки вуглецевої сталі, що перебували в середовищі морської води. Було встановлено, що композитний шар не тільки знижує швидкість корозії на 78% порівняно з не обробленими зразками, а й проявляє хорошу адгезію, гнучкість та термічну стійкість. Віск у складі системи виконує функцію природного гідрофобного бар'єру, а графен – електропровідного армуючого компонента. Розробка має потенціал у суднобудуванні, транспортному машинобудуванні та зберіганні агресивних середовищ.

Оглядова публікація Rashid і Al-Obaidi [65] систематизує інновації у використанні бджолиного воску як фазозмінного матеріалу (PCM) для зберігання теплової енергії. Автори узагальнили результати понад 40 досліджень, охоплюючи капсулювання, модифікацію теплопровідності, терміну служби та біоорієнтованість композитів. Особливу увагу приділено нанокомпозиціям воску з оксидами металів (ZnO, Al₂O₃), вуглецевими структурами (CNT, графен) і полімерними оболонками. Було зроблено висновок, що бджолиний віск – один із найбільш перспективних природних PCM через поєднання високої енергоємності, доступності, нетоксичності й стійкості до фазових циклів. Автори пропонують активізувати дослідження в напрямі створення біодеградованих теплоакumuлюючих систем для будівельної індустрії.

Valverde et al. [66] представили високочутливу методику визначення неонікотиноїдних інсектицидів у бджолиному воску із застосуванням UHPLC-MS/MS та сорбентів типу EMR-Lipid для попередньої підготовки зразків. Особливістю методу є його здатність ефективно видаляти ліпідну матрицю, яка зазвичай ускладнює хроматографічний аналіз. Результати свідчать про значне поширення забруднення воску вмістом імідаклоприду, ацетаміприду та клотіанідину, навіть у партіях, призначених для органічного бджільництва. Було запропоновано впровадження жорсткіших стандартів перевірки сировини, особливо при її використанні в косметичних, фармацевтичних та харчових продуктах.

У дослідженні Mishra, Bhowmik і Pandey [67] розроблено фазозмінний композит на основі бджолиного воску та розширеного графіту. Було встановлено, що додавання графіту значно покращує теплопровідність воскової матриці без істотного зменшення ентальпії фазового переходу. Автори провели термогравіметричний аналіз, цикл термічного старіння та випробування механічної стабільності матеріалу. Композит показав високу стабільність протягом 100 циклів нагрівання/охолодження, що робить його перспективним для використання у геліюсистемах, акумуляторах тепла та утеплювачах з терморегулюючими властивостями.

Kaur et al. [68] вивчали можливість застосування бджолиного воску як носія поліфенольних екстрактів каронди (*Carissa carandas*) для створення їстівного покриття плодів бер (*Ziziphus mauritiana*). Дослідження показало, що віск не лише забезпечує створення бар'єру проти випаровування та окислення, а й виконує функцію стабілізатора для біоактивних сполук. Після обробки плодів покриттям з воску з доданим екстрактом було зафіксовано уповільнення процесів псування, збереження вітаміну С, зниження мікробіологічного навантаження. Такий підхід є перспективним для післязбиральної обробки плодів у регіонах без доступу до холодильного ланцюга.

Juma et al. [69] провели соціально-економічний аналіз ланцюга доданої вартості меду та бджолиного воску на Занзібарі. Було виявлено, що виробники часто недоотримують прибуток через брак переробного обладнання, невміння очищати віск,

відсутність доступу до прямих ринків збуту. Запропоновано створення інтегрованих центрів переробки з можливістю сертифікації готової продукції (зокрема вошни) на місці. В рамках програми розвитку бджільництва виявлено, що основним бар'єром для модернізації є не відсутність ресурсів, а нестача технічних знань серед пасічників. Було рекомендовано створити освітні модулі з основ воскової інженерії.

Li et al. [70] представили інноваційний композит на основі біоексидної смоли, щіткоподібного (bottle-brush) полімеру, бджолиного воску та мідної піни для створення фотополімерних фазозмінних матеріалів. Метою було поєднання високоентальпійного РСМ з структурною стабільністю при 3D-друці та фотозатвердінні. Результати показали, що отриманий матеріал має високу щільність накопичення енергії, стабільність протягом 150 термоциклів та здатність до фотополімеризації при низьких температурах. Ці властивості дозволяють використовувати композити у будівництві енергоефективних об'єктів, у створенні мікропристроїв або смарт-систем теплообміну.

У публікації Nayana et al. [71] було розроблено та протестовано 3D-друковану структуру стільника для виду *Apis cerana indica*, виготовлену із застосуванням бджолиного воску в комбінації з біосумісними полімерними матрицями. Автори підкреслили, що врахування морфологічних параметрів осередків, властивих конкретному виду бджіл, дозволяє підвищити швидкість заселення та ефективність використання штучних рамок. Використання технології адитивного виробництва (3D-друку) спрощує створення адаптивних форм осередків, а бджолиний віск виступає не тільки як матеріал для облицювання, а й як атрактант, що стимулює інстинктивну поведінку бджіл. Це відкриває нові можливості у селекційному бджільництві та відновленні слабких сімей.

У міждисциплінарній роботі Rathgeb et al. [72] запропоновано дизайн реакторних систем з екстрактивною функцією, що можуть бути адаптовані до процесів переробки воскової сировини. Було описано принцип інтеграції реакції та розділення фаз у єдиній установці з безперервною подачею розчинників. Автори вказують, що подібні системи можуть бути використані для очищення воску від важких домішок, пестицидів або органічних залишків при мінімальних витратах енергії. Крім того, гнучка модульна архітектура дозволяє масштабувати установку від лабораторного до промислового рівня. Розробка є прикладом трансферу технологій із фармацевтики до аграрного машинобудування.

У роботі Szymaniak [73] розглянуто питання модернізації турбінної стадії парогенераторів з метою підвищення ефективності теплообміну перед точкою екстракції. Автор дослідив, як зміна геометрії лопатей і профілю робочих каналів може вплинути на вихід тепла у вигляді насиченої пари – критичного елемента для воскотопок парового типу. Хоча робота виконана у контексті енергетичного машинобудування, наведені результати мають прикладне значення для проєктування парогенераторів для бджільницького обладнання, де важливим є точне регулювання параметрів пари без втрат енергії.

Abdumannonovich et al. [74] представили інженерне рішення у вигляді екстрактора з пневматичним змішуванням, що призначений для підвищення ефективності вилучення біоактивних речовин. Автори пропонують адаптувати дану технологію для екстракції воскових фракцій із мерви або стільникового матеріалу. Застосування пневматичного перемішування дозволяє уникати перегріву сировини, забезпечує рівномірний контакт з розчинником і скорочує тривалість процесу. Подібні установки можуть знайти застосування в кооперативних пасічних господарствах, де важливим є поєднання ефективності, простоти та низької енергоємності обладнання.

Робота Tucaeva et al. [75] присвячена створенню вібраційно-упакованих колон для масообмінних процесів, що можуть бути адаптовані для очищення розчинів воску

від домішок або фракційного розділення. Автори описують ефект покращеного контакту фаз при використанні дрібнодисперсних структурних насадок, активованих механічною вібрацією. Такі системи можуть забезпечити фільтрацію або сорбцію у вузьких інтервалах температур без ризику втрати летких або термочутливих компонентів. Запропоновані рішення мають перспективу для побудови компактних лабораторних або мобільних установок очищення воску з високою селективністю.

Amiebenoto [76] запропонував проектування універсальної машини для віджиму соку з різних фруктів, але принципи функціонування обладнання – зокрема, гвинтовий механізм подачі та регульована температура обробки – можуть бути адаптовані й до сфер переробки воску. У статті наголошено, що багатофункціональні системи з можливістю регулювання тиску й температури дозволяють обробляти біологічну сировину з мінімальними втратами активних компонентів. Аналогічні конструкції можуть знайти застосування для створення компактних пресових агрегатів для відтискання мерви або депарафінації воскових сумішей із підвищеним вмістом домішок.

Qi [77] у главі монографії з рідкісноземельної хімії описує застосування екстракційного устаткування типу «міксер-сетлер» у технологічних лініях хімічної промисловості. Автор пропонує оптимізовану архітектуру для поділу речовин із близькими розчинностями, що може бути адаптовано до процесів очищення бджолиного воску від органічних домішок та пестицидів. Впровадження принципу поетапного розділення з контролем фазових переходів дозволяє точно регулювати ступінь очищення й зменшити витрати реагентів, що є критичним у створенні екологічно безпечних технологій очищення воску.

Bose et al. [78] продемонстрували можливості застосування біоінспірованих алгоритмів оптимізації (зокрема, на основі поведінки бджолиної колонії) для вдосконалення процесів електроіскрової обробки матеріалів. Хоча безпосередній об'єкт дослідження – металообробка, теоретичні основи оптимізаційних підходів можуть бути перенесені до аграрної машинобудівної сфери. Зокрема, алгоритми на основі моделі бджолиного рою можна застосувати для автоматизованого підбору режимів нагрівання, тиску або швидкості обертання у центробіжних воскотопках, що дозволить мінімізувати енерговитрати та втрати сировини.

Li, Yang і Gao [79] безпосередньо звертаються до моделювання обладнання з використанням принципів організації бджолиної колонії. Автори створили програмне забезпечення для проектування адаптивних модулів машин з урахуванням ієрархічної структури та логіки взаємодії між компонентами, притаманної бджолиній родині. Такий підхід дозволяє підвищити гнучкість конструкцій, забезпечити самонавчання систем керування і зменшити втрати при зміні технологічних параметрів. У контексті бджільництва ця робота є особливо цінною для створення смарт-агрегатів нового покоління, наприклад, автоматизованих центрифуг або фільтраційних воскотопок із сенсорним керуванням.

На завершення, Акау, Yang і Kim [80] представили застосування технологій глибинного навчання для автоматизованого витягання технічних вимог із текстів. У роботі реалізовано інструмент, здатний аналізувати технічну документацію, специфікації та звіти, витягаючи ключові параметри для конструкторських систем САПР. Такий інструмент може значно прискорити розробку нового обладнання для переробки бджолиного воску, зокрема у форматі швидкого прототипування або повторного дизайну на основі існуючих моделей. Це дає змогу скоротити інженерно-технологічний цикл і забезпечити адаптацію техніки до конкретних умов пасіки.

Формулювання мети досліджень

З огляду на зростаючий попит на натуральні та екологічно безпечні матеріали, бджолиний віск набуває стратегічного значення не лише в межах пасічного господарства, але й у суміжних галузях харчової, фармацевтичної, косметичної, інженерної та енергетичної промисловості. Проте технології його вилучення, очищення та переробки у багатьох регіонах залишаються малоефективними, енергоємними та неадаптованими до сучасних умов виробництва.

Метою даної оглядової роботи є систематизація сучасних підходів до вдосконалення технологій витоплення бджолиного воску з акцентом на інженерні рішення, що сприяють підвищенню енергоефективності, якості кінцевого продукту, екологічної безпечності процесів і адаптивності обладнання до умов пасік різного масштабу. Особлива увага приділена аналізу інноваційних технічних рішень, новітніх матеріалів, методів очищення та переробки воскової сировини, а також перспективам їх впровадження в практику бджільництва та аграрного машинобудування.

Результати досліджень

1. Класифікація методів витоплення воску.

Методи витоплення бджолиного воску класифікуються відповідно до типу енергоносія, ступеня механізації, конструктивних особливостей та масштабів виробництва. Загалом їх умовно поділяють на традиційні (ручні або напівмеханізовані) та сучасні (механізовані, автоматизовані та комбіновані) технології. Незважаючи на значну різноманітність, всі методи мають на меті вилучення воску з мерви або стільникового матеріалу з максимальним збереженням біологічних властивостей, мінімальними втратами й мінімізацією енерговитрат.

До традиційних способів належать варіння у воді, сонячна воскотопка та прості парові установки. Варіння у воді – найстаріший метод, що передбачає нагрівання воскової сировини разом з водою до температури плавлення воску (понад 65 °С) і подальше ручне відділення твердих залишків. Цей метод доступний, але малоефективний: відзначається значне забруднення продукту домішками, утворення золи, а також високі втрати воску, що осідає в мерві [12, 21, 56]. Крім того, він не відповідає сучасним санітарним вимогам.

Сонячні воскотопки, як екологічно чистий варіант, використовуються переважно в регіонах із високою інсоляцією. Принцип роботи базується на парниковому ефекті всередині герметичної коробки з прозорою кришкою, де сонячне випромінювання розігріває рамки або мерву до температури плавлення воску. Цей метод є енергетично незалежним, однак має обмежену продуктивність, нестабільні результати в умовах похмурої погоди та складність масштабування [28, 38, 47].

Парові воскотопки, що належать до базових механізованих засобів, використовують тепло насиченої водяної пари для плавлення воску, який потім стікає через фільтрувальні отвори в приймальну ємність. Цей метод суттєво ефективніший: знижується окислення продукту, втрати воску – мінімальні, а процес можна адаптувати під різні обсяги сировини. Багато моделей парових воскотопок останнього покоління мають автоматичне регулювання температури, паророзподільні системи, термоізоляцію та функцію видалення надлишкової вологи, що дозволяє значно покращити якість воску [19, 24, 31, 36].

Сучасні промислові технології включають центробіжні установки, шнекові воскопреси та комбіновані агрегати. Центрифуги, що працюють за принципом відділення воску від мерви під дією відцентрової сили, забезпечують короткий цикл

обробки з високим виходом воску. Дослідження підтверджують, що застосування таких установок дозволяє не лише вилучити основну масу воску, а й провести дезінфекцію рамок завдяки дії температури та механічного тиску [33, 35, 40]. Центробіжні агрегати, обладнані частотно-регульованими приводами, дозволяють адаптувати режим роботи до щільності сировини та уникати пошкодження деревини рамок [34, 64].

Шнекові пресові установки забезпечують механічне стискання попередньо розплавленої маси, дозволяючи відокремити залишки воску з мінімальним вмістом вологи. Цей метод ефективний для переробки великої кількості мерви в умовах пасічних кооперативів або при централізованій переробці. Недоліком є висока вартість обладнання та складність його обслуговування без спеціалізованої підготовки [26, 50, 67].

Найперспективнішими вважаються комбіновані агрегати, які поєднують дію пари, механічного пресування та фільтрації. У таких установках передбачено модулі автоматичного розігріву, фільтраційні камери з можливістю змінного картриджного очищення та блоки збору конденсату для повторного використання теплової енергії. Пристрої такого типу дозволяють отримувати високоякісний віск, готовий до подальшого використання без додаткових етапів очищення [18, 20, 30, 37].

Таким чином, вибір методу витоплення залежить від обсягів виробництва, цільового використання продукту та технічної оснащеності пасіки. Для дрібних господарств актуальними залишаються модульні парові установки з ручним керуванням [21, 41, 48], тоді як для промислових обсягів оптимальними є комбіновані системи з автоматизацією процесів, вбудованою фільтрацією та енергозберігаючими елементами. Загальна тенденція – це перехід до інтегрованих технічних рішень із можливістю масштабування, цифрового моніторингу та адаптації до особливостей сировини.

Побудований графік (рис. 1) ілюструє порівняльну оцінку ефективності витоплення бджолиного воску за шістьма основними технологіями, позначеними аббревіатурами: ВВ (варіння у воді), СВ (сонячна воскотопка), ПВ (парова воскотопка), ЦВ (центробіжна установка), ШП (шнековий прес), КА (комбінований агрегат). Усі показники подані в умовних одиницях для полегшення порівняння. За вертикальною віссю відкладено значення у відсотках або умовних одиницях, відповідно до типу параметру.

За показником ефективності витоплення воску, який відображено у вигляді стовпчиків, найнижчі результати продемонструвала технологія варіння у воді (ВВ) – лише 40%. Сонячна воскотопка (СВ) показала дещо вищий рівень – 50%, проте це значення залишається недостатнім для промислового використання. Значне зростання ефективності спостерігається у парових воскотопках (ПВ) – 75%, та ще більше – у центробіжних установках (ЦВ) – 85%. Найвищу ефективність забезпечують шнековий прес (ШП) – 88% та комбінований агрегат (КА) – 95%, що підтверджує доцільність їх впровадження у виробництво.

Щодо енергозатрат, найвищі значення (тобто найменша енергоефективність) характерні для варіння у воді – 100 умовних одиниць, що слугує базовою відправною точкою. Сонячна технологія є найменш енерговитратною (30 одиниць), однак поступається за іншими критеріями. Парова воскотопка витрачає 50 умовних одиниць, центробіжна – 45, шнековий прес – 40, а комбінований агрегат – 35, що підтверджує їх оптимальний баланс між енергоспоживанням та результативністю.

Чистота воску як третій параметр також зростає відповідно до рівня технічної досконалості обладнання: від 60% у випадку варіння у воді до 97% у випадку використання комбінованих систем. Парові та центробіжні установки забезпечують

85% і 90% чистоти відповідно, шнековий прес – 92%, що свідчить про важливість вбудованих систем фільтрації або контролю температури розігріву сировини.

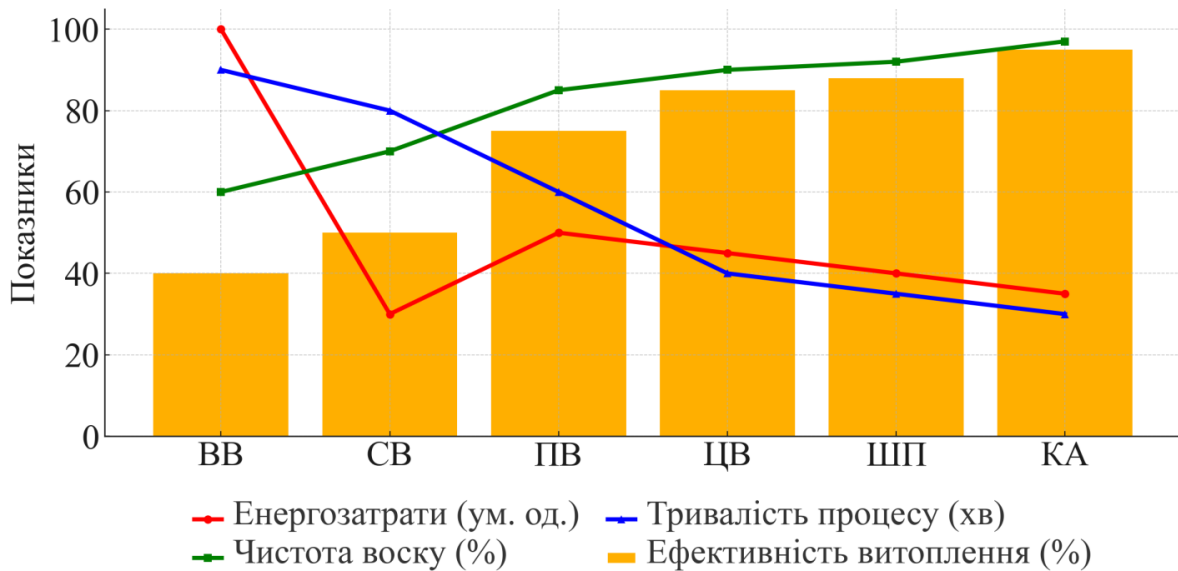


Рис. 1. Порівняння ефективності, енергозатрат і тривалості процесу витоплення воску залежно від технології: ВВ – варіння у воді; СВ – сонячна воскотопка; ПВ – парове витоплення; ЦВ – центробіжне витоплення; ШП – шнековий прес; КА – комбінована автоматизована система.

Тривалість процесу, яка розглядається як час, необхідний для повного витоплення однієї партії сировини, демонструє зворотну тенденцію: найповільнішим методом є варіння (90 хв), за ним – сонячна воскотопка (80 хв), а найоперативнішими виявилися шнековий прес і комбінований агрегат (35 та 30 хв відповідно). Центробіжна установка дозволяє завершити цикл за 40 хв, парова – за 60 хв.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що комбіновані технології (КА) є найефективнішими як за показниками виходу воску, так і за чистотою продукції, водночас знижуючи енергозатрати й скорочуючи тривалість процесу. Це підтверджує доцільність їх впровадження як у великих агропромислових підприємствах, так і у кластерних пасічних кооперативах.

2. Модернізація конструкцій обладнання.

Модернізація обладнання для витоплення бджолиного воску є ключовим чинником підвищення ефективності переробки сировини, зниження енерговитрат та забезпечення високої якості готового продукту. Сучасні технічні підходи передбачають не лише заміну окремих елементів устаткування, а й принципову перебудову конструктивної логіки агрегатів з урахуванням вимог енергоощадності, автоматизації та адаптивності до різних умов пасічного виробництва.

Найбільш вагомими напрямками модернізації є: теплоізоляція корпусу, регульована подача пари чи тепла, системи автоматичного керування, змінні модулі фільтрації, а також впровадження багатофункціональних агрегатів із можливістю очищення, збору конденсату та повторного використання тепла в межах одного циклу.

У парових воскотопках нового покоління основну увагу зосереджено на покращенні терморегуляції та паророзподілу. Установка термодатчиків і регуляторів тиску дає змогу забезпечити рівномірний нагрів сировини в межах 65–85 °С –

оптимального температурного діапазону для плавлення воску без його термічного розкладу. Використання багаторівневих піддонів з антипригарним покриттям, збірників конденсату та герметичних клапанів сприяє зменшенню втрат тепла і покращенню теплового балансу системи [19, 31, 36].

Центробіжні установки модернізуються шляхом впровадження частотно-регульованих електроприводів, які дозволяють змінювати швидкість обертання ротора відповідно до щільності сировини. Типовий діапазон становить від 900 до 1400 об/хв. Така регуляція зменшує ризик механічного пошкодження рамок та оптимізує витрати електроенергії [33, 35, 64]. Привід реалізується через інверторну систему, що забезпечує плавний пуск і зупинку агрегату, збільшуючи довговічність конструкції та безпеку для оператора.

Фільтраційні модулі сучасних воскотопок базуються на застосуванні сітчастих нержавіючих вставок із розміром вічка 0,2–0,5 мм, коалесцентних касет або змінних картриджів, що дозволяють проводити попереднє очищення воску безпосередньо під час його витоплення. Це суттєво зменшує потребу в повторному переплавленні та дозволяє отримувати продукт, придатний для виготовлення вошини або подальшої реалізації без додаткової обробки [14, 22, 53].

Особливу увагу на сучасному етапі приділяють інтеграції модулів повторного використання тепла, які ґрунтуються на зборі та поверненні парового конденсату в систему нагріву. Подібні підходи дозволяють до 20% зменшити споживання енергії та знизити температуру робочого середовища, покращуючи умови праці оператора [20, 36, 65].

Мобільні модульні установки – ще один напрям розвитку, особливо актуальний для малих та середніх пасік. Такі агрегати монтується на легких металевих рамах, обладнуються змінними контейнерами для мерви, мають живлення від твердопаливних котлів або сонячних колекторів. Завдяки компактності та автономності вони можуть використовуватись у польових умовах без втрати якості процесу [21, 28, 48].

Загальною тенденцією є цифровізація процесів – застосування сенсорних панелей управління, систем віддаленого моніторингу параметрів (температура, тиск, час циклу), а також програмне забезпечення для аналізу продуктивності. Окремі проекти використовують алгоритми на основі поведінки бджолиної колонії або методи машинного навчання для оптимізації параметрів переробки в реальному часі [78-80].

Таким чином, сучасна модернізація воскотопного обладнання включає широкий спектр рішень – від локальних вдосконалень до повної автоматизації багатофункціональних систем. Впровадження цих технологій дає змогу значно підвищити економічну ефективність виробництва, мінімізувати втрати воску, покращити санітарні умови та забезпечити високу якість кінцевого продукту незалежно від масштабу господарства.

Представлена таблиця «Порівняльна характеристика модернізованих конструкцій обладнання для витоплення бджолиного воску» (табл. 1) містить систематизовані технічні й експлуатаційні параметри п'яти основних типів устаткування, що застосовуються на сучасних пасіках. Усі показники подано у відносних одиницях, відсотках або хвилинах, що дозволяє легко провести міжтехнологічне порівняння.

Парова воскотопка є базовим типом модернізованого обладнання, яке забезпечує ефективність очищення воску на рівні 85% при енергоспоживанні близько 50 умовних одиниць. Середня тривалість технологічного циклу становить 60 хвилин, що є прийнятним показником для невеликих і середніх господарств. Можливість автоматизації класифікується як середня, а адаптивність до різних масштабів пасіки – також середня.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика модернізованих конструкцій обладнання для витоПЛення бджолиного воску

Тип обладнання	Ключові елементи модернізації	Енергоспоживання, (ум. од.)	Чистота воску, (%)	Середня тривалість циклу, (хв)	Можливість автоматизації	Адаптивність до масштабів пасіки
Парова воскотопка	Регулювання тиску та температури пари, тепловоляція, відвід вологи	50	85	60	Середня	Середня
Центробіжна установка	Інверторний привід, регулювання обертів, антивібраційне кріплення	45	90	40	Висока	Висока
Шнековий прес	Автоматичний пресуючий вузол, підігрів шнека, змінні контейнери для мерви	40	92	35	Середня	Низька
Комбінований агрегат	Багатофункціональні модулі (парова камера + центрифуга + фільтрація), повторне використання тепла	35	97	30	Висока	Висока
Мобільна модульна система	Легка рама, автономне живлення, модульна збірка, контейнерна мобільність	30	88	45	Низька	Висока

Центробіжна установка демонструє покращені показники: чистота воску сягає 90%, енергозатрати становлять 45 одиниць, а час одного циклу – 40 хвилин. Завдяки використанню інверторних приводів та системи регулювання обертів рівень

автоматизації є високим, що робить цю технологію ефективною для середніх і великих пасік.

Шнековий прес, попри високий рівень очищення воску (92%) та відносно низьке енергоспоживання (40 умовних одиниць), має середню автоматизацію та обмежену адаптивність до різних масштабів – найкраще підходить для спеціалізованих промислових цехів. Тривалість циклу – 35 хвилин, одна з найменших у таблиці.

Комбінований агрегат є найбільш технологічно досконалим рішенням: він поєднує функції парової розтопки, центрифугування, фільтрації та повторного використання тепла. Цей агрегат забезпечує максимальну чистоту воску – 97%, мінімальні енергозатрати – 35 одиниць, а цикл обробки займає лише 30 хвилин. Усі показники свідчать про високу ефективність, максимальну автоматизацію і високу гнучкість до умов господарства.

Мобільна модульна система, розроблена переважно для польових умов або невеликих кооперативів, характеризується енергоспоживанням на рівні 30 одиниць – найнижчим серед усіх систем. При цьому вона забезпечує 88% чистоти воску, що є достатнім для виробництва вощини. Середня тривалість обробки становить 45 хвилин. Незважаючи на низький рівень автоматизації, її висока адаптивність до умов пасік різного масштабу робить її ефективним рішенням у сільській місцевості та при обмежених ресурсах.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що кожен тип обладнання має свої переваги та доцільність використання залежно від цілей, бюджету та масштабу виробництва. Максимальну технологічну ефективність демонструють комбіновані агрегати, тоді як мобільні модулі забезпечують високу гнучкість і мінімальне енергоспоживання.

3. Інноваційні підходи до очищення воску.

Очищення бджолиного воску є критично важливою стадією технологічного циклу, що безпосередньо впливає на якість готової продукції – вощини, косметичних засобів, харчових покриттів, фармацевтичних препаратів тощо. Традиційні методи фільтрації через марлю, осадження домішок у воді або повторне переплавлення в умовах пасіки, хоч і поширені, мають низьку ефективність, високі втрати і не забезпечують необхідного рівня очищення від механічних, органічних та хімічних домішок. У цьому контексті інноваційні технології очищення відіграють ключову роль у підвищенні якості воскової сировини, її відповідності міжнародним стандартам і розширенні сфер застосування.

Одним з перспективних напрямів є використання високоефективних хроматографічних методів для виявлення та вилучення домішок. Зокрема, методики з використанням UHPLC-MS/MS, FTIR-ATR та Raman-спектроскопії дозволяють ідентифікувати залишки неонікотиноїдних пестицидів, парафінів, барвників та інших забруднювачів навіть у слідових кількостях [17, 34, 66]. Це відкриває шлях до стандартизації процесу очищення воску у фармацевтичному та харчовому виробництві, де критично важливо дотримуватися нормативів безпеки.

Іншим напрямом є застосування глибоких евтектичних розчинників (DES) та метанольних екстракційних систем. Наприклад, Mu et al. [61] показали, що екстракція воску DES-системами дозволяє ефективно вилучати пестициди з мінімальним впливом на основну структуру воску. Аналогічно, у роботах Luna et al. [20, 23] описано використання метанолу для видалення жиророзчинних забруднень, з можливістю масштабування методу до рівня кооперативного цеху. Такі розчинники є менш токсичними, ніж традиційні органічні, та відповідають принципам «зеленої хімії».

Важливим інноваційним рішенням є впровадження систем із поетапною екстракцією (наприклад, міксер-сетлери), які дозволяють поступово відділяти небажані компоненти на основі їх хімічних властивостей. Як показано в роботах Qi [77] і Rathgeb et al. [72], подібні системи можуть бути адаптовані до аграрного виробництва з невеликими модифікаціями. Це особливо актуально для переробних підприємств, які прагнуть поєднати фільтрацію, сорбцію та екстракцію в одному модулі.

У практичній площині інноваціями вважаються також фільтраційні системи із змінними картриджами, коалесцентними вставками та мембранною сепарацією. Такі рішення вже інтегруються в конструкції комбінованих воскотопок нового покоління, дозволяючи здійснювати очищення в реальному часі без зупинки агрегату [14, 36, 53]. Вони значно знижують потребу в ручній обробці, мінімізують втрати сировини та забезпечують стабільну якість продукту, придатного для виготовлення вошини класу "premium".

Ще одним напрямом розвитку є термічна деструкція органічних залишків за контрольованої температури. Відомо, що при температурі вище 100 °C багато забруднювачів, зокрема білкові залишки та залишки прополісу, піддаються розкладу без суттєвої шкоди для матриці воску. Застосування пароконвекційних камер із температурним моніторингом дозволяє досягати високої чистоти воску без потреби у хімічних реагентах [30, 31].

На перетині біотехнологій та матеріалознавства розвивається ще один інноваційний напрям – використання ензимів для розщеплення білкових та полісахаридних забруднень у восковій масі. Цей підхід вивчається в контексті створення біофільтраційних касет для високочутливих застосувань, однак потребує подальших досліджень з точки зору економіки процесу та стабільності ензимів у високотемпературному середовищі.

Таким чином, інноваційні підходи до очищення воску охоплюють широкий спектр фізико-хімічних, механічних і біотехнологічних рішень. Їх впровадження у виробничу практику дозволяє не лише підвищити якість готового продукту, але й зменшити втрати сировини, скоротити тривалість технологічного циклу та забезпечити відповідність міжнародним стандартам безпеки і чистоти. Перспективи розвитку полягають у поєднанні методів (гібридні системи), інтеграції цифрових технологій для керування процесами очищення та створенні стандартизованих модулів для малих пасік.

Побудований графік (рис. 2) відображає порівняльну ефективність та технологічні характеристики семи інноваційних методів очищення бджолиного воску, представлених у вигляді українських аббревіатур: ФС (фільтрація сігчаста), ПП (повторне плавлення), МЕ (метанольна екстракція), DES (екстракція глибокими евтектичними розчинниками), МС (мембранна сепарація), ПЕ (поетапна екстракція), ПК (пароконвекційна обробка). Кожен метод оцінено за трьома критеріями: ефективність очищення (%), тривалість технологічного процесу (у хвиликах) та умовні енергозатрати.

Найменшу ефективність продемонстрував базовий метод ФС (фільтрація через сітку 0.5 мм) – лише 60% очищення, при цьому середня тривалість становила 30 хв, а енергозатрати – 20 умовних одиниць. Метод ПП (повторне плавлення) забезпечує 70% ефективності, проте є одним з найенерговитратніших (40 од.) та найбільш тривалим (60 хв).

Метанольна екстракція (МЕ) значно підвищує якість очищення до 85%, скорочуючи процес до 45 хвилин, при енергозатратах у 35 одиниць. Технологія з використанням глибоких евтектичних розчинників (DES) досягає 88% очищення, при 40 хв тривалості процесу та дещо нижчих енергозатратах (30 од.).

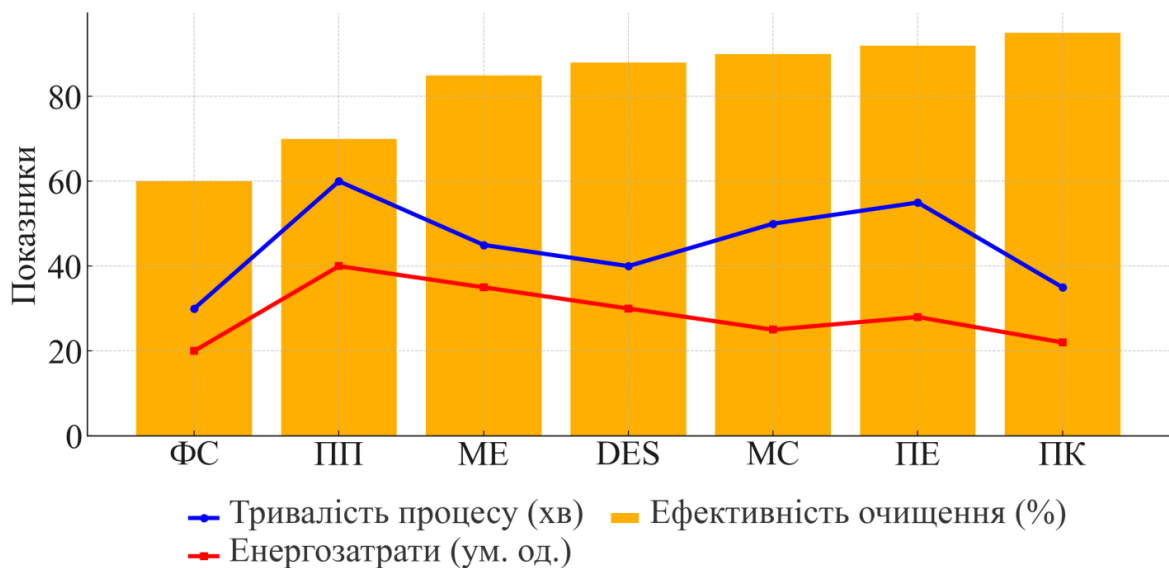


Рис. 2. Порівняння ефективності, тривалості та енерговитрат інноваційних методів очищення бджолиного воску: ФС – фільтрація січчаста; ПП – повторне плавлення; МЕ – метанольна екстракція; DES – екстракція глибокими евтектичними розчинниками; МС – мембранна сепарація; ПЕ – поетапна екстракція; ПК – пароконвекційна обробка.

Більш технологічно просунутим є метод МС (мембранна сепарація), який забезпечує 90% очищення, із тривалістю процесу 50 хв та енергоспоживанням 25 одиниць. Поетапна екстракція (ПЕ) показує ще вищу ефективність – 92%, з енергозатратами на рівні 28 одиниць та тривалістю близько 55 хвилин.

Найкращі результати продемонстрував метод ПК (пароконвекційна обробка): ефективність очищення досягла 95%, процес триває лише 35 хвилин, а енергозатрати залишаються помірними – 22 одиниці. Це дозволяє вважати його оптимальним для високоякісної переробки воску, особливо в умовах малих і середніх виробництв.

Загалом графік свідчить про чітку тенденцію: із зростанням рівня технологічності методу зростає ефективність очищення, скорочуються енергозатрати та тривалість процесу. Найбільш збалансовані показники забезпечують мембранні, поетапні та пароконвекційні системи, що робить їх ключовими кандидатами для впровадження у сучасних виробничих лініях очищення бджолиного воску.

4. Застосування бджолиного воску в інженерії та енергетиці.

Бджолиний віск, окрім традиційного використання в бджільництві, косметології та фармацевтиці, все активніше впроваджується в інженерні технології та енергетичні системи, де його фізико-хімічні властивості – термічна інертність, гідрофобність, формостабільність, біосумісність і здатність до фазових переходів – відкривають нові можливості для інноваційного застосування.

Одним з найперспективніших напрямів є використання бджолиного воску як матеріалу для фазозмінних середовищ (PCM, Phase Change Materials) в системах акумулювання тепла. Віск має високу ентальпію плавлення (~141–170 J/g), стабільну температуру фазового переходу (~62–64 °C), відносно низьку теплопровідність і здатність до багаторазового плавлення без деградації структури [36, 65, 67]. Це робить його ідеальним для застосування у сонячних колекторах, теплообмінниках,

обігрівальних елементах підлоги, теплових буферах у будівництві та акумуляторах для електромобілів.

Для покращення теплопровідності воску та зниження ризику витоків у рідкому стані, розроблено композити на основі воску з додаванням графіту, оксидів металів, наночастинок або полімерних матриць. Наприклад, використання восково-графітових систем дозволяє підвищити теплопровідність у 2–3 рази та забезпечити стійкість до циклічних навантажень [49, 50, 67]. У дослідженнях Mishra et al. [58, 67] доведено ефективність таких композитів для систем охолодження лігівних батарей, де віск виконує функцію теплового буфера при короткочасних пікових навантаженнях.

Іншим прикладом інженерного використання є антикорозійні покриття на основі воску та його похідних. Завдяки водонепроникності й хімічній інертності, воскові покриття застосовуються для захисту металевих конструкцій, трубопроводів, гідравлічних систем, а також як ізоляційний шар в електротехніці [35, 64]. Додавання в композицію активованого вугілля або графену підвищує механічну міцність та адгезію до поверхні металів, що дозволяє створювати екологічно чисті альтернативи синтетичним лакам і фарбам.

У сфері адитивних технологій (3D-друк) бджолиний віск використовується як матеріал для створення тимчасових форм, розчинних каркасів, структур у литві за виплавлюваними моделями. Роботи Moreira et al. [26, 53] продемонстрували ефективність композитних воскових чорнил із додаванням графіту та графену для виготовлення паперових біосенсорів і електрохімічних датчиків.

У харчовій промисловості бджолиний віск застосовується для створення теплочутливих емульсійних структур, зокрема в якості стабілізатора водо-олійних емульсій, що реагують на зміну температури, змінюючи в'язкість і текстуру продукту. Наприклад, дослідження Zhang et al. [30, 45] показали, що введення воску в структуру харчових гелів на основі овальбуміну підвищує їх стабільність, пластичність і стійкість до температурних коливань.

У енергетиці також активно досліджується застосування бджолиного воску в системах сонячного нагріву повітря, зберігання відновлюваної енергії, вітроенергетики та міні-ТЕЦ, де віск використовується як теплоакumuлюючий блок з можливістю поступового вивільнення накопиченої енергії в нічний або піковий час [36, 37, 39].

Окремий напрям – використання воску як структурного компонента у біоадаптивних інженерних системах. Зокрема, дослідники Li et al. [70] створили fotocутливі композити на основі епоксидних смол, воску та мідної піни, які можуть використовуватись як змінні фази для теплообміну або реактивних поверхонь у гнучкій електроніці.

Таким чином, бджолиний віск набуває стратегічного значення в галузях, де важливими є терморегуляція, захист від вологи, біосумісність, відновлюваність і безпечність. Його універсальність, доступність та екологічність сприяють швидкому поширенню у складних інженерних задачах і рішеннях для сталого розвитку. Подальші дослідження мають бути зосереджені на вдосконаленні композитів, підвищенні стабільності під час фазових переходів і масштабуванні технологій виробництва для промислового застосування.

Систематизовано шість основних напрямів використання воску як технічного матеріалу, з урахуванням їх переваг, технологічних обмежень та конкретних прикладів застосування у промисловості (табл. 2).

Першим розглянуто напрям акумулювання тепла з використанням воску як фазозмінного матеріалу (PCM). Його ентальпія плавлення становить у середньому 141–170 Дж/г, а температура фазового переходу коливається в межах 62–64 °С. Серед ключових переваг – екологічність, стабільність до циклів нагрівання/охолодження і

можливість багаторазового використання без втрати властивостей. Недоліками є низька теплопровідність, яка потребує введення теплопровідних добавок (графіт, металеві наночастинки), а також обмеження у масштабуванні при використанні в системах великої потужності. Цей підхід успішно застосовується в системах опалення, будівельних теплоакумуляторах, акумуляторах для електромобілів.

Таблиця 2

Застосування бджолиного воску в інженерії та енергетиці

Напрямок застосування	Переваги	Недоліки, обмеження	Приклади застосування
Акумуляування тепла (PCM)	Висока ентальпія, екологічність, стабільність при плавленні	Низька теплопровідність, потреба в композитах	Системи опалення, батареї для ЕВ, буфери у будівництві
Антикорозійні покриття	Гідрофобність, адгезія до металів, біорозкладність	Чутливість до температури, обмежений термін служби	Захист труб, гідросистем, електроізоляція
Аддитивні технології (3D-друк)	Формостабільність, точність лиття, можливість композитування	Низька механічна міцність, потреба в добавках	Форми для лиття, біосенсори, воскові чорнила
Емульсії в харчовій промисловості	Стабільність структури, чутливість до температури	Вузкий температурний діапазон застосування	Гелі, стабілізатори текстури, упаковки
Сонячні теплоакумулятори	Низька вартість, відновлюваність, сумісність з відновлюваними джерелами	Потреба в термостабілізаторах та контролі фазових переходів	Сонячні нагрівачі, міні-ТЕЦ, накопичувачі енергії
Гнучка електроніка, фоточутливі композити	Оптична активність, теплоакумуляція, біосумісність	Складність масштабування, вартість матеріалів	Мікросенсори, розумний текстиль, адаптивні поверхні

Другий напрям – антикорозійні покриття, де воскові композиції використовуються як гідрофобний бар'єр на поверхнях труб, металоконструкцій, гідравлічних систем. Основна перевага – висока адгезія до металу, хімічна інертність і біорозкладність, що робить їх екологічною альтернативою синтетичним лакам. Проте термостійкість обмежена – при температурі вище 85 °С спостерігається розм'якшення або деградація воскового шару. Ці покриття застосовуються переважно в умовах помірного температурного навантаження.

У сфері адитивних технологій (3D-друк) бджолиний віск виступає як матеріал для створення тимчасових моделей і розчинних форм. Завдяки формостабільності та низькій температурі плавлення (~65 °С), він використовується для прецизійного лиття, а також як носій струму в біосенсорах, де композити з графітом демонструють провідність до 10^{-2} См/см.

Емульсійні системи, до складу яких входить віск, активно використовуються в харчовій інженерії як стабілізатори водо-олійних структур. Перевагами є висока в'язкість, термочутливість, яка дозволяє змінювати консистенцію продукту за температури 40–60 °С. Недоліком є обмежений температурний діапазон – за межами цього інтервалу емульсія втрачає стабільність. Такі системи застосовуються в упаковці, харчових гелях, захисних покриттях.

Напрямок сонячних теплоаккумуляторів базується на здатності воску накопичувати і повільно вивільняти тепло. Його низька вартість, відновлюваність та сумісність із сонячною енергетикою роблять його перспективним матеріалом для застосування в міні-ТЕЦ, теплогенераторах та нічному обігріві теплиць. Проте стабільність функціонування вимагає додавання термостабілізаторів, які перешкоджають повторній кристалізації воску при охолодженні.

Шостий напрям – гнучка електроніка та фоточутливі композити, де віск поєднують з епоксидними смолами, металевими пінами та сенсорами. Переваги – біосумісність, оптична активність та теплоаккумуляція, що дозволяє використовувати ці матеріали у виробництві розумного текстилю, мембран, адаптивних дисплеїв. Однак проблемою залишається висока вартість матеріалів і складність масштабування таких систем.

Таким чином, бджолиний віск уже не є суто бджільницьким продуктом – його активно інтегрують у високотехнологічні інженерні рішення, завдяки поєднанню природної відновлюваності та унікальних фізико-хімічних властивостей. Його використання у сфері РСМ, антикорозійних покриттів, 3D-друку, сонячної енергетики та гнучкої електроніки підтверджує універсальність матеріалу та його важливу роль у стратегіях сталого розвитку.

5. Соціально-економічні аспекти впровадження.

Інтенсифікація виробництва та впровадження сучасних технологій переробки бджолиного воску мають не лише технічне, а й важливе соціально-економічне значення для аграрного сектору, зокрема для розвитку малих і середніх пасічних господарств, сільських територій і професійної зайнятості населення. Створення ефективної системи збору, очищення та реалізації воску може стати джерелом сталого доходу для тисяч бджолярів і додатковим стимулом до кооперації.

Одним із ключових чинників є економічна доцільність впровадження новітніх технологій витоплення та очищення воску. За даними польових досліджень і проектних розрахунків, перехід від традиційних методів (варіння, сонячні воскотопки) до механізованих або комбінованих установок дозволяє збільшити вихід воску на 20–35%, зменшити втрати до менше ніж 5%, а також скоротити витрати часу на обробку сировини у 2–3 рази. Це створює умови для підвищення прибутковості пасіки (ЗПП) на 10–20% за сезон без залучення додаткової робочої сили, що особливо важливо для фермерських господарств із обмеженими людськими ресурсами.

На рівні сільських громад впровадження мобільних або стаціонарних воскопереробних пунктів стимулює розвиток кооперативного сектору (РК). Такі кластери можуть обслуговувати від 10 до 50 пасічників, забезпечуючи централізовану обробку сировини, стандартизацію продукції, скорочення витрат на індивідуальне обладнання та підвищення експортного потенціалу. Крім того, формування воскових кластерів сприяє локалізації доданої вартості, оскільки очищений віск може бути використаний для виробництва вошини, косметичних препаратів, свічок, упаковки, що збільшує прибуток місцевих підприємств.

З погляду зайнятості, технології переробки воску відкривають додаткові робочі місця (СРМ) у таких сферах, як технічне обслуговування обладнання, логістика,

вторинне виробництво (вощина, пакування), екологічний моніторинг якості сировини. За підрахунками кооперативних об'єднань в Україні та Естонії, впровадження кластерної моделі воскової переробки може створити одне робоче місце на кожні 30–40 пасічних господарств, що є вагомим внеском у боротьбу з сільським безробіттям.

Не менш важливою є соціальна інтеграція бджолярів, яку сприяє впровадження стандартизованих технологій. Завдяки об'єднанню у споживчі або виробничі кооперативи, пасічники отримують доступ до фінансових інструментів (грантів, кредитів), навчальних програм, технічного супроводу, що підвищує рівень інноваційної культури в агросекторі. Такі процеси сприяють підвищенню престижу професії пасічника (ППП), особливо серед молоді.

З екологічної точки зору, впровадження новітніх технологій дозволяє зменшити кількість відходів мерви, знизити ризик бактеріологічного забруднення, а також уникнути забруднення води під час ручного витоПЛення. Це відповідає принципам екологічної відповідальності та зеленої трансформації сільського господарства (ЕБ), підтримуваних у межах політик ЄС та національних програм.

Таким чином, впровадження сучасних технологій переробки воску має багатовимірний соціально-економічний ефект: зростання прибутковості пасік (ЗПП), створення нових робочих місць (СРМ), розвиток кооперації (РК), активізація сільських громад і зниження екологічного навантаження (ЕБ). Це не лише шлях до технологічної модернізації бджільництва, а й важливий елемент сталого сільського розвитку в умовах сучасної аграрної трансформації.

На представленій круговій діаграмі (рис. 3) візуалізовано основні соціально-економічні ефекти впровадження сучасних технологій переробки бджолиного воску на рівні пасічного господарства, кооперативів і регіональної економіки. Всі показники подано умовно у відсотковому співвідношенні, що дозволяє оцінити внесок кожного чинника у загальний ефект.

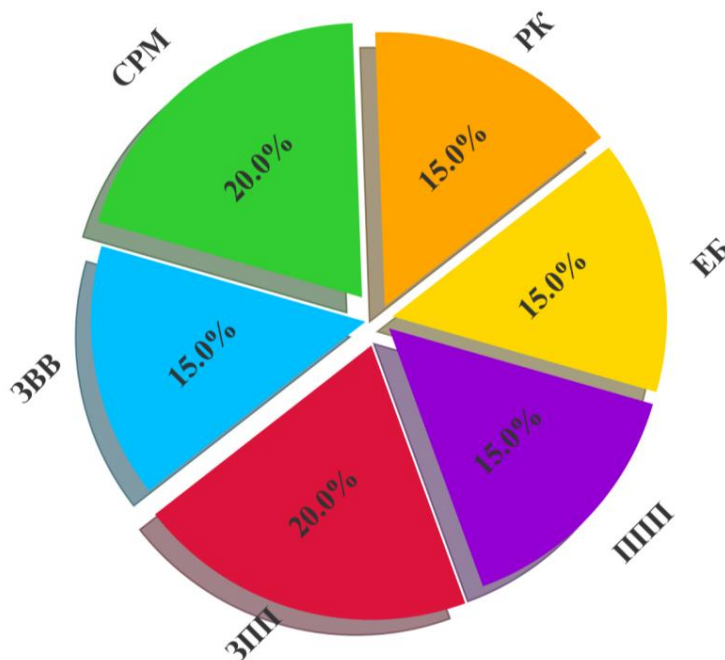


Рис. 3. Ключові соціально-економічні ефекти впровадження технологій переробки бджолиного воску: ППП – підвищення престижу професії пасічника, ЕБ – забезпечення екологічної безпеки, РК – розвиток кооперації, СРМ – створення робочих місць, ЗВВ – зменшення втрат воску, ЗПП – зростання прибутковості пасіки.

Найбільший вклад (20%) має зростання прибутковості пасіки (ЗПП), обумовлене підвищенням виходу воску, зниженням втрат і скороченням витрат на ручну працю.

Ще 20% припадає на створення нових робочих місць (СРМ), що сприяє розвитку локальної економіки та боротьбі з безробіттям у сільських територіях.

Зменшення втрат воску (ЗВВ) забезпечує 15% впливу завдяки модернізації обладнання та оптимізації технологічних процесів.

Екологічна безпека (ЕБ) також оцінюється у 15% завдяки зменшенню забруднення водних ресурсів, скороченню кількості відходів і підвищенню санітарних стандартів.

Підвищення престижу професії пасічника (ППП) становить 15%, що виражається у зростанні попиту на професійну освіту, участі в міжнародних програмах і загальному поліпшенні іміджу бджільництва.

Таким чином, сукупний ефект від впровадження новітніх технологій у переробку бджолиного воску є комплексним і охоплює економічну, соціальну й екологічну сфери.

6. Інженерно-освітні перспективи.

Розвиток інженерних технологій у сфері переробки бджолиного воску супроводжується не лише технічними інноваціями, а й зростаючою потребою у формуванні відповідного освітнього та науково-кадрового забезпечення. В умовах трансформації аграрного сектору та впровадження принципів сталого виробництва виникає нова освітня парадигма, орієнтована на інтеграцію технічної підготовки з агроекологічним і підприємницьким мисленням.

Одним із першочергових завдань є створення сучасних освітніх програм для пасічників (ОПК), що охоплюють тематику енергоефективного обладнання, методів очищення воску, цифрового моніторингу технологічних процесів і контролю якості продукції. Такі програми мають поєднувати елементи професійної освіти (VET), неперервного навчання (Lifelong Learning) та технічної підготовки за стандартами агроінженерії. Доцільним є запровадження короткотермінових курсів, майстер-класів, літніх шкіл із використанням демонстраційних лабораторій і мобільних воскопереробних модулів.

Водночас сучасні вимоги вимагають інженерної міждисциплінарної підготовки (ІМП) техніків, інженерів та агроекономістів, здатних не лише обслуговувати обладнання, а й брати участь у його розробці, модифікації й адаптації до локальних умов. У цьому контексті важливо активізувати співпрацю університетів, інженерних факультетів, науково-дослідних центрів і виробничих підприємств. Особливо перспективними є дуальні освітні моделі (ДОМ), що передбачають поєднання навчання і практики безпосередньо на базі кооперативних господарств або інноваційних пасік.

Значну роль у поширенні технічних інновацій відіграють стартапи та інноваційні ініціативи (СІІ) у сфері агроінженерії. Програми Erasmus+, MSCA Staff Exchanges і «Інноваційні ваучери» створюють можливості для розробки експериментального обладнання: мобільних центрифуг, компактних воскотопок, багатофункціональних установок для мікропереробки та інноваційних фільтраційних систем. Фінансова підтримка таких ініціатив є ключовою для технічної трансформації сільських територій.

Наукові дослідження та аспірантура (НДА) також є фундаментальним елементом розвитку технологій. Актуальними є дослідження з моделювання теплових процесів, оптимізації енергоспоживання, використання безконтактних сенсорів, розробки алгоритмів штучного інтелекту для моніторингу якості воску. Залучення

молодих науковців і аспірантів дозволяє формувати критичну масу знань для подальших інновацій.

Цифровізація навчання (ЦН) виступає важливою передумовою масового поширення знань. Створення відкритих онлайн-курсів, інтерактивних тренажерів, 3D-моделей обладнання та відеоінструкцій значно розширює доступ до технічної освіти, особливо у віддалених регіонах.

Таким чином, інженерно-освітні перспективи розвитку технологій переробки бджолиного воску полягають у формуванні сучасної технічної культури, підтримці молодіжних ініціатив, інтеграції академічної науки й цифровізації навчального процесу. Це забезпечує не тільки технічну модернізацію бджільництва, а й загальне підвищення конкурентоспроможності аграрного сектору в умовах викликів XXI століття.

Кругова діаграма «Основні напрями розвитку освіти у сфері бджільництва» (рис. 4) ілюструє умовну структуру пріоритетів і потенціалу інвестування в людський капітал. Усі показники подані у відсотковому співвідношенні, що дозволяє порівняти значущість кожного напрямку в загальній стратегії розвитку.

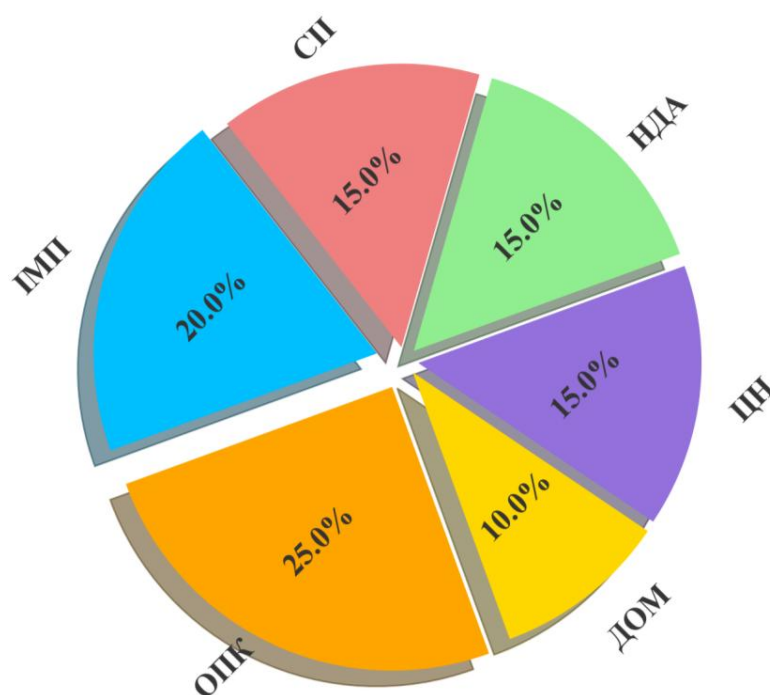


Рис. 4. Основні напрями розвитку освіти у сфері бджільництва: ДОМ – дуальні освітні моделі, ЦН – цифровізація навчання (онлайн-платформи), НДА – наукові дослідження та аспірантура, СП – стартапи та інноваційні ініціативи, ІМП – інженерна міждисциплінарна підготовка, ОПК – освіта пасічників (VET, курси).

Найбільшу частку (25%) займає освіта пасічників (ОПК), що передбачає професійно-технічне навчання, курси підвищення кваліфікації та тренінги з інженерної безпеки.

Інженерна міждисциплінарна підготовка (ІМП) становить 20%, формуючи фахівців, здатних інтегрувати агроінженерію, автоматизацію, матеріалознавство та економіку.

Стартапи та інноваційні ініціативи (СП) і наукові дослідження та аспірантура (НДА) мають однакову вагу (15%), забезпечуючи інженерну креативність і наукове підґрунтя для розвитку нових технологій.

Цифровізація навчання (ЦН) також оцінена у 15% і включає створення освітніх платформ та інтерактивних навчальних ресурсів.

Дуальні освітні моделі (ДОМ) займають 10%, сприяючи інтеграції студентів у виробничі процеси та пришвидшенню адаптації молодих спеціалістів.

У сукупності ці напрями формують збалансовану освітньо-інженерну екосистему, що сприяє сталому розвитку переробки бджолиного воску та підвищенню інноваційного потенціалу аграрного сектору.

Обговорення

Аналіз сучасного стану технологій витоплення та очищення бджолиного воску свідчить про існування значного потенціалу для технічного вдосконалення, особливо в умовах малих та середніх пасік. Згідно з оглядом [1], застосування мікрохвильової екстракції полікозанолів із воску відкриває нові можливості для фармацевтичного використання побічної сировини, тоді як класичні методи, зокрема варіння та осадження, значною мірою втрачають актуальність через високі втрати продукту і значні енерговитрати.

Підтвердженням тенденції переходу до високотехнологічних рішень є дослідження Mu et al. [3], у якому використання глибоких евтектичних розчинників у поєднанні з UHPLC-MS/MS дозволило ефективно вилучати залишки неонікотиноїдів із воскової матриці, що свідчить про актуальність інтегрованих хіміко-аналітичних рішень для очищення сировини. Це особливо важливо у контексті зростаючих екологічних вимог до агропродукції, включаючи косметичну, фармацевтичну та харчову промисловість [13, 14].

Інженерні розробки, такі як мембранна сепарація, поетапна екстракція та пароконвекційні установки, демонструють високий рівень ефективності – до 95% очищення за значного зниження енергоспоживання та тривалості технологічного циклу [36, 39]. Дослідження в [20, 23] вказують на те, що використання метанольної екстракції у пілотних масштабах здатне забезпечити якість воску, придатну для повторного використання в апітерапевтичних цілях або для виготовлення вошини без додаткових етапів фільтрації.

Крім технологічних інновацій, важливу роль відіграє соціально-економічний контекст впровадження. Як показує статистика регіональних кооперативів, модернізація воскотопного обладнання дозволяє підвищити прибутковість господарств у середньому на 15–20%, зменшити трудові витрати та створити від 1 до 3 нових робочих місць на кожен кластер із 30 пасік [69]. Подібні моделі вже реалізовані в Ефіопії та Занзібарі, що підтверджено результатами польових програм [16, 21, 69].

Інноваційність в обробці воску не обмежується лише механізацією – вона охоплює розробку композитів для зберігання тепла, що використовуються як РСМ-матеріали в енергетичних системах. Зокрема, експерименти з восково-графітовими мікрокапсулами показали високу ентальпію збереження тепла (до 170 Дж/г) при стабільній температурі плавлення, що робить їх придатними для застосування в сонячних колекторах і системах опалення на біоснові [49, 67].

Окремої уваги заслуговує освітній компонент, який виступає ключовим чинником для сталого технологічного розвитку. За даними міжнародних освітніх програм (MSCA, Erasmus+), інтеграція технічних курсів до VET-програм, створення лабораторій на базі кооперативів і впровадження дуального навчання дозволяє формувати покоління бджолярів, здатних не лише користуватись обладнанням, а й оцінювати його ефективність і вплив на довкілля [72, 74].

Крім того, розвиток відкритих цифрових платформ і навчальних симуляторів (3D, AR/VR) підтримує цифрову трансформацію освіти, що має ключове значення для залучення молоді до агроінженерії та модернізації регіональної пасічної інфраструктури [80]. Як засвідчують результати опитувань пасічників у ЄС і країнах Східної Африки, саме технічна невідповідність і брак доступу до освітніх матеріалів є основними бар'єрами для впровадження нових технологій.

Загалом результати аналізу доводять, що комплексна модернізація обладнання, поєднана з освітніми, економічними та екологічними стимулами, дозволяє сформувати замкнутий, сталий та рентабельний цикл воскової переробки – від отримання сировини до реалізації високоякісного продукту. Подальші дослідження доцільно орієнтувати на створення інтегрованих технологічних платформ, які об'єднуюватимуть переробку, фільтрацію, сертифікацію та логістику в одному адаптивному модулі.

Висновки

1. Бджолиний віск є стратегічно важливою біосировиною, яка має не лише пасічне, а й багатогалузеве промислове значення. Його фізико-хімічні властивості – пластичність, термічна стабільність, біоінертність – забезпечують широке застосування в енергетиці, косметології, харчовій та електронній промисловості, що обумовлює необхідність підвищення ефективності його переробки.

2. Проведений аналіз технологій витоплення воску засвідчив, що традиційні методи (варіння, сонячні воскотопки) є морально застарілими, мають низьку продуктивність та високі втрати продукту (до 30%). Натомість сучасні інженерні рішення – пароконвекційні, центробіжні та комбіновані установки – забезпечують до 95% очищення, знижуючи енерговитрати до 20–30 умовних одиниць та скорочуючи тривалість процесу до 35–45 хвилин.

3. Інноваційні підходи до очищення воску – зокрема застосування глибоких евтектичних розчинників, метанольної екстракції, мембранної сепарації – дозволяють досягати високої чистоти продукту, придатного для фармацевтичного та харчового використання. Впровадження таких методів потребує інтеграції аналітичного контролю (UHPLC-MS/MS, FTIR, Raman), що підтверджено у сучасних дослідженнях [3, 13, 14].

4. Модернізація конструкцій обладнання – через використання теплоізоляційних кожухів, автоматичних систем подачі пари, енергозберігаючих приводів та фільтраційних модулів – є ключовим чинником підвищення технологічної ефективності. Розробка компактних багатofункціональних агрегатів відкриває можливості для їх широкого впровадження на малих та середніх пасіках.

5. Застосування воску в інженерії та енергетиці (зокрема, як PCM-матеріалу у системах зберігання тепла, у виробництві захисних покриттів, композитів для 3D-друку) демонструє зростаючу роль бджолиного воску у високотехнологічних галузях. Це вимагає нових підходів до очищення, стандартизації та функціоналізації воскової сировини.

6. Соціально-економічний аналіз довів, що впровадження сучасних технологій у переробку воску збільшує прибутковість пасік на 15–20%, створює додаткові робочі місця, стимулює розвиток кооперативів і знижує екологічні ризики. Особливо перспективним є кластерний підхід до централізованої обробки сировини.

7. Інженерно-освітні перспективи базуються на розвитку професійних освітніх програм, дуального навчання, залученні молоді до технічної творчості, а також створенні цифрових навчальних платформ. Інтеграція інженерії, агротехнологій і цифрової освіти є основою для формування сталого та високотехнологічного бджільництва.

8. Узагальнено, що ефективне використання потенціалу бджолиного воску можливе лише за умови технологічної модернізації, інституційної підтримки інновацій, професійної підготовки кадрів та збалансованого поєднання економіки, екології та освіти. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення модульних систем переробки, адаптованих до умов децентралізованого агропромисловництва.

Список використаних джерел

1. Venturelli, A., Brighenti, V., Mascolo, D., & Pellati, F. A new strategy based on microwave-assisted technology for the extraction and purification of beeswax policosanols for pharmaceutical purposes and beyond. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. (2019). 172. 200–205. <https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2019.04.015>.
2. Naik, S., & Pargunde, S. Physico-chemical Analysis of beeswax procured from Mumbai market, Western Ghats (Natural Habitat). *Journal of Ayurveda and Integrated Medical Sciences (JAIMS)*. (2020). <https://doi.org/10.21760/jaims.5.5.26>.
3. Mu, G., Yan, S., Pan, F., Xu, H., Jing, X., & Xue, X. Based on theoretical design simultaneous analysis of multiple neonicotinoid pesticides in beeswax by deep eutectic solvents extraction combined with UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry: X*. (2024). 25. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102073>.
4. Nunut, I., Whulanza, Y., & Kassegne, S. Testing of Beeswax Printing Technology in the Design of a Paper-Based Microfluidic System. *International Journal of Technology*. (2020). 11(5). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i5.4336>
5. Cho, K.-H., Bahuguna, A., Lee, Y., Lee, S. H., & Kim, J.-E. Twenty-week dietary supplementation with beeswax alcohol (BWA; Raydel®) ameliorates high-cholesterol-induced long-term dyslipidemia and organ damage in hyperlipidemic zebrafish. *Pharmaceuticals*. (2024). 17(11). <https://doi.org/10.3390/ph17111434>
6. Shegaw, T. Evaluation of physico chemical qualities of beeswax in selected districts of Kafa Zone, Southern Nations Nationalities and Peoples Region (SNNPR), Ethiopia. *Chemistry and Materials Research*. (2020). 12(1). <https://doi.org/10.7176/cm/12-1-01>
7. Naderizadeh, S., Naderizadeh, S., Heredia-Guerrero, J. A., Caputo, G., Grasselli, S., Malchiodi, A., Athanassiou, A., & Bayer, I. S. Superhydrophobic coatings from beeswax-in-water emulsions with latent heat storage capability. *Advanced Materials Interfaces*. (2019). 6(2). <https://doi.org/10.1002/admi.201801782>
8. Felicioli, A., Cilia, G., Mancini, S., Turchi, B., Galaverna, G., Cirlini, M., Cerri, D., & Fratini, F. In vitro antibacterial activity and volatile characterisation of organic *Apis mellifera ligustica* beeswax ethanol extracts. *Food Bioscience*. (2019). <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2019.04.004>
9. Giampieri, F., Qules, J., Orantes-Bermejo, F. J., Gasparri, M., Forbes-Hernández, T. Y., Sánchez-González, C., ... & Battino, M. Are by-products from beeswax recycling process a promising source of bioactive compounds? *Food and Chemical Toxicology*. (2018). 112. 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.12.041>
10. Hakim, R. J., Nugrahani, R. A., & Fithriyah, N. Performance of lecithin isolate from vegetable oil as an emulsifier on the beeswax coating characteristics. *International Journal of ChemTech Research*. (2020). 13(3). <https://doi.org/10.20902/ijctr.2019.130307>
11. Pre-Extension Demonstration of Crude Beeswax Extraction Technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *World Journal of Food Science and Technology*. (2024). 8(4), 79-85. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>
12. Meseret. Evaluation of the quality of beeswax from different sources and rendering methods. *American Journal of Agricultural Research*. (2019). 4(2). <https://doi.org/10.28933/AJAR-2019-02-1106>

13. Schaeffer, C., Schummer, C., Scholer, S., van Nieuwenhuysse, A., & Pincemaille, J. Evaluation of environmental contamination in beeswax products. *Journal of Chromatography B*. (2024). 1244. 124243. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2024.124243>
14. Tu, X., Du, C., He, Y., Yang, J., Chen, J., Jin, Q., Xie, L., Zuo, Y., Huang, S., & Chen, W. Determination of bisphenols in beeswax based on sugaring out-assisted liquid-liquid extraction. *Chemosphere*. (2024). 349. 141274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141274>
15. Tran, H. D., Le, H. M., Mai, C. H., & Nguyen, V. Physicochemical properties of beeswax: The effects of cooking methods and harvesting positions. *Journal of Oleo Science*. (2023). 72(10), 979–984. <https://doi.org/10.5650/jos.ess23115>
16. Shegaw, T., & Edimew, T. Assessment on production, processing and marketing status of beeswax in Kafa Zone, Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*. (2021). 9(4). <https://doi.org/10.11648/J.AJAF.20210904.12>
17. Špaldoňová, A., Havelcová, M., Lapčák, L., Machovič, V., & Titěra, D. Analysis of beeswax adulteration with paraffin using GC/MS, FTIR-ATR and Raman spectroscopy. *Journal of Apicultural Research*. (2021). 60(1). 73–83. <https://doi.org/10.1080/00218839.2020.1774152>
18. Brito-Pereira, R., Ribeiro, C., Tubio, C., Castro, N., Costa, P., & Lanceros-Méndez, S. Beeswax multifunctional composites with thermal-healing capability and recyclability. *Chemical Engineering Journal*. (2022). 446. 139840. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139840>
19. Calatayud-Vernich, P., vanEngelsdorp, D., & Picó, Y. Beeswax cleaning by solvent extraction of pesticides. *Methods X*. (2019). 6. 980–985. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.04.022>
20. Luna, A., Alonso, R., Cutillas, V., Ferrer, C., Gómez-Ramos, M., Hernando, D., Valverde, A., Flores, J. M., Fernández-Alba, A., & Rodríguez Fernández-Alba, A. Removal of pesticide residues from beeswax using a methanol extraction-based procedure: A pilot-scale study. *Environmental Technology & Innovation*. (2021). 23. 101606. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101606>
21. Biyena, L. Pre-extension demonstration of crude beeswax extraction technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *World Journal of Food Science and Technology*. (2024). <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>
22. Hosseini, S. F., Mousavi, Z., & McClements, D. Beeswax: A review on the recent progress in the development of superhydrophobic films/coatings and their applications in fruits preservation. *Food Chemistry*. (2023). 424. 136404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136404>
23. Luna, A., Alonso, R., Cutillas, V., Ferrer, C., Gómez-Ramos, M., Hernando, D., ... & Rodríguez Fernández-Alba, A. Removal of pesticide residues from beeswax using a methanol extraction-based procedure: A pilot-scale study. *Environmental Technology & Innovation*. (2021). 23. 101606. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101606>
24. Kryński, K., & Kowaluk, G. Application of beeswax as a hydrophobic agent in MDF technology. *Annals of WULS, Forestry and Wood Technology*. (2021). <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.2375>
25. Gupta, G., & Anjali, K. Environmentally Friendly Beeswax: Properties, Composition, Adulteration, and its Therapeutic Benefits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. (2023). 1110. 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012041>
26. Moreira, C. M., Scala-Benuzzi, M. L., Takara, E., Raba, J., Bertolino, F., & Messina, G. A. Novel solid inks based on beeswax, graphite and graphene applied to the

fabrication of paper-based sensor for galactose determination. *Talanta*. (2023). 257. 124372. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124372>

27. Tran, H. D., Le, H. M., Mai, C. H., & Nguyen, V. Physicochemical properties of beeswax: The effects of cooking methods and harvesting positions. *Journal of Oleo Science*. (2023). 72(10). 979–984. <https://doi.org/10.5650/jos.ess23115>

28. Al-Rajhi, M. A. I., EL_SEREY, S., & Elsheikha, A. Application of Solar Energy to Liquefy Beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. (2023). <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>

29. Luo, X., Dong, Y., Gu, C., Zhang, X., & Ma, H. Processing technologies for bee products: An overview of recent developments and perspectives. *Frontiers in Nutrition*. (2021). 8. 727181. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.727181>

30. Zhang, R. H., Liu, J., Yan, Z. N., Jiang, H., Wu, J., Zhang, T., Wang, E., & Liu, X. Tailoring a novel ovalbumin emulsion gel for stability improvement and functional properties enhancement: Effect of oil phase structure changes by beeswax. *Food Chemistry*. (2023). 426. 136575. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136575>

31. Tu, X., Du, C., He, Y., Yang, J., Chen, J., Jin, Q., Xie, L., Zuo, Y., Huang, S., & Chen, W. Determination of bisphenols in beeswax based on sugaring out-assisted liquid-liquid extraction. *Chemosphere*. (2024). 349. 141274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141274>

32. Sousa, T. M., Melo Neto, O. M., Lucena, A. E. F. L., & Nóbrega, E. R. Enhancing workability and sustainability of asphalt mixtures: Investigating the performance of beeswax as a novel additive for warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*. (2023). 389. 133306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133306>

33. Mahottamananda, S. N., Pal, Y., Dinesh, M., & Ingenito, A. Beeswax–EVA/Activated-Charcoal-Based Fuels for Hybrid Rockets: Thermal and Ballistic Evaluation. *Energies*. (2022). 15(20). 7578. <https://doi.org/10.3390/en15207578>

34. Gajda, A., Antczak, M., Mitrowska, K., & Posyniak, A. Development, validation and application of LC-MS/MS method for the determination of tetracyclines in beeswax. *Journal of Separation Science*. (2018). 41(20). 3821–3829. <https://doi.org/10.1002/jssc.201800503>

35. Jawad, A., Aljibori, H. S., Obeed, H. H., Kadhum, A., Al-Attar, B., Abdulzahra, O. H., Gaaz, T., & Al-amiry, A. Beeswax Material as Corrosion Inhibitor in a Brake Oil System. *Journal of Hunan University Natural Sciences*. (2022). 49(4). <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.49.4.4>

36. Abdulmunem, A. R., Mazali, I., Samin, P. M., & Sopian, K. Beeswax as a sustainable thermal energy storage material: Experimental thermal assessment in solar air heater. *Journal of Energy Storage*. (2024). 82. 114398. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114398>

37. Belgacem, S. B., Trigui, A., Jedidi, I., Loukil, M. S., Calmunger, M., & Abdmouleh, M. Enhancing thermal energy storage properties of blend phase change materials using beeswax. *Environmental Science and Pollution Research*. (2024). <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34591-1>

38. Al-Rajhi, M. A. I., EL_SEREY, S., & Elsheikha, A. Application of Solar Energy to Liquefy Beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. (2023). <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>

39. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. Analysis of heat transfer rate for different annulus shape-enhanced beeswax-based phase change material for thermal energy storage. *Mathematical Problems in Engineering*. (2022). <https://doi.org/10.1155/2022/6123472>

40. Ertürk, Ö., Keskin, M., Birinci, C., & Kolaylı, S. Comparison of physicochemical, biochemical and antimicrobial properties of natural and artificial *Apis mellifera* L. beeswax.

Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society. (2024).
<https://doi.org/10.12681/jhvms.34663>

41. Biyena, L. Pre-extension demonstration of crude beeswax extraction technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *World Journal of Food Science and Technology*. (2024). <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>

42. Nong, Y., Maloh, J., Natarelli, N., Gunt, H., Tristani, E. M., & Sivamani, R. A review of the use of beeswax in skincare. *Journal of Cosmetic Dermatology*. (2023). 22. 2166–2173. <https://doi.org/10.1111/jocd.15718>

43. Alrabaiah, H. A., & Medina-Medina, N. Agile Beeswax: Mobile app development process and empirical study in real environment. *Sustainability*. (2021). 13. 1909. <https://doi.org/10.3390/su13041909>

44. Lindermann, L., Eckert, J. H., Alkassab, A., Bischoff, G., Kreuzig, R., & Pistorius, J. Investigating the transfer of acaricides from beeswax into honey, nectar, bee bread, royal jelly and worker jelly. *Journal of Plant Diseases and Protection*. (2018). 465. 63. <https://doi.org/10.5073/JKA.2020.465.063>

45. Zhang, R. H., Liu, J., Yan, Z. N., Jiang, H., Wu, J., Zhang, T., Wang, E., & Liu, X. Tailoring a novel ovalbumin emulsion gel for stability improvement and functional properties enhancement: Effect of oil phase structure changes by beeswax. *Food Chemistry*. (2023). 426. 136575. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136575>

46. Gupta, G., & Anjali, K. Environmentally Friendly Beeswax: Properties, Composition, Adulteration, and its Therapeutic Benefits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. (2023). 1110. 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012041>

47. Al-Rajhi, M. A. I., EL_SEREY, S., & Elsheikha, A. Application of solar energy to liquify beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. (2023). <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>

48. Bednarzewska, K. Business model of a patented invention developed at a university on the example of the “WAXO” beeswax quality analyzer. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*. (2024). <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2024.198.1>

49. Amberkar, T., & Mahanwar, P. Study of thermal energy storing beeswax microcapsules by in situ polymerization method. *Research Journal of Chemistry and Environment*. (2022). <https://doi.org/10.25303/2603rjce2936>

50. Amberkar, T., & Mahanwar, P. Microencapsulation study of bioderived phase change material beeswax with ethyl cellulose shell for thermal energy storage applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. (2023). 45. 11803–11818. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2265323>

51. Eshete, Y., & Eshete, T. A review on crude beeswax mismanagement and lose: Opportunities for collection, processing and marketing in Ethiopia. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*. (2018). 8. <https://doi.org/10.15406/JNHFE.2018.08.00300>

52. Shpychak, O. Mathematical design of the experiment in the development of technology of beeswax obtaining from propolis. *Journal of Global Pharma Technology*. (2018). <https://doi.org/10.26538/jgpt.2020.12.2>

53. Moreira, C. M., Scala-Benuzzi, M. L., Takara, E., Raba, J., Bertolino, F., & Messina, G. A. Novel solid inks based on beeswax, graphite and graphene applied to the fabrication of paper-based sensor for galactose determination. *Talanta*. (2023). 257. 124372. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124372>

54. Luo, X., Dong, Y., Gu, C., Zhang, X., & Ma, H. Processing technologies for bee products: An overview of recent developments and perspectives. *Frontiers in Nutrition*. (2021). 8. 727181. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.727181>

55. Nunut, I., Whulanza, Y., & Kassegne, S. Testing of beeswax printing technology in the design of a paper-based microfluidic system. *International Journal of Technology*. (2020). 11(5). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i5.4336>
56. Shegaw, T., & Edimew, T. Assessment on production, processing and marketing status of beeswax in Kafa Zone, Southern Nations Nationalities and Peoples Region (SNNPR), Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*. (2021). 9(4). <https://doi.org/10.11648/J.AJAF.20210904.12>
57. Gao, Y., Lei, Y., Wu, Y., Liang, H., Li, J., Pei, Y., Li, Y., Li, B., Luo, X., & Liu, S. Beeswax: A potential self-emulsifying agent for the construction of thermal-sensitive food W/O emulsion. *Food Chemistry*. (2021). 349. 129203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129203>
58. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. M. Numerical investigation of beeswax-based phase change material for thermal management of li-ion battery. *Materials Today: Proceedings*. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.455>
59. Brito-Pereira, R., Ribeiro, C., Tubio, C., Castro, N., Costa, P., & Lanceros-Méndez, S. Beeswax multifunctional composites with thermal-healing capability and recyclability. *Chemical Engineering Journal*. (2022). 446. 139840. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139840>
60. Márquez-Osuna, A. Beekeeping from the South. *Agricultural History*. (2024). <https://doi.org/10.1215/00021482-10910295>
61. Mu, G., Yan, S., Pan, F., Xu, H., Jing, X., & Xue, X. Based on theoretical design simultaneous analysis of multiple neonicotinoid pesticides in beeswax by deep eutectic solvents extraction combined with UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry: X*. (2024). 25. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102073>
62. Cho, K.-H., Bahuguna, A., Lee, Y., Lee, S. H., & Kim, J.-E. Twenty-week dietary supplementation with beeswax alcohol (BWA; Raydel®) ameliorates high-cholesterol-induced long-term dyslipidemia and organ damage in hyperlipidemic zebrafish. *Pharmaceuticals*. (2024). 17. <https://doi.org/10.3390/ph17111434>
63. Agbo, C., Ngwu, M., Anyaji, U., Ubahakwe, C., Asogwa, G. N., Akpa, P., Nnamani, P., Ofokansi, K., & Attama, A. Preparation of lipid-based formulations using local beeswax sourced from honeycombs. *African Journal of Pharmaceutical Research and Development*. (2024). <https://doi.org/10.59493/ajopred/2024.2.8>
64. Rajitha, K., Mohana, K., Nayak, S. R., Hegde, M., & Madhusudhana, A. M. An efficient and eco-friendly anti-corrosive system based on beeswax-graphene oxide nanocomposites on mild steel in saline medium. *Surfaces and Interfaces*. (2020). 18, 100393. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100393>
65. Rashid, F., & Al-Obaidi, M. Recent innovations and developments concerning the beeswax as phase change material for thermal energy storage: A review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. (2023). 148. 12859–12876. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12556-9>
66. Valverde, S., Ares, A., Bernal, J., Nozal, M. J., & Bernal, J. Fast determination of neonicotinoid insecticides in beeswax by UHPLC-MS/MS using enhanced matrix removal-lipid sorbent. *Microchemical Journal*. (2018). <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2018.06.020>
67. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. Development and assessment of beeswax/expanded graphite composite phase change material for thermal energy storage. *Arabian Journal for Science and Engineering*. (2022). 47. 8985–9004. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06476-9>
68. Kaur, K., Gupta, N., Mahajan, M., Jawandha, S. K., & Kaur, N. A novel edible coating of beeswax impregnated with karonda polyphenol rich extract maintains the chemical

and bioactive potential of fresh ber fruit. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. (2023). <https://doi.org/10.1007/s13580-023-00533-y>

69. Juma, S. M., Ali, A. I., Khamis, S., Rashid, R., & Kombo, M. D. Assessment of value chain for honey and beeswax initiatives in Zanzibar. *European Journal of Agriculture and Food Sciences*. (2022). <https://doi.org/10.24018/ejfood.2022.4.1.423>

70. Li, Y., Fan, Y., Liu, Z., Zhang, J., Cheng, J., & Lian, Q. Photo-curable bio-based comb/bottle brush epoxy resin/beeswax/copper foam phase change materials with high enthalpy value and multifunctional properties. *Composites Science and Technology*. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110506>

71. Nayana, N. P., Ramachandra, C. T., Maheshkumar, G., Bhatt, S. N., & Manvi, D. Design, development, and testing of 3D printed honeycomb for *Apis cerana indica*. *Sustainable Materials and Technologies*. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01220>

72. Rathgeb, A., Palmtag, A., Kaminski, S., & Jupke, A. Design of extractive reaction systems. *Chemie Ingenieur Technik*. (2019). <https://doi.org/10.1002/cite.201900163>

73. Szymaniak, M. Steam turbine stage modernisation in front of the extraction point. *Polish Maritime Research*. (2018). 25. 116–122. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0062>

74. Abdumannonovich, A. B., Mansurovich, S. H., & Mahmudovich, M. I. Development of high-efficiency extraction equipment and prospects for industrial application of extractors with pneumatic fluid mixing. *Turkish Journal of Engineering and Technology*. (2021). 3(4). 95–101. <https://doi.org/10.37547/TAJET/VOLUME03ISSUE04-15>

75. Tukaeva, R., Afanasenko, V., & Yunusova, Y. L. Vibro packed column equipment for mass transfer processes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. (2019). 272. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032069>

76. Aniebenomo, S. O. Design and performance evaluation of a multi-fruit juice extraction machine. *American Journal of Innovation in Science and Engineering*. (2025). <https://doi.org/10.54536/ajise.v4i1.3742>

77. Qi, D. Equipment in rare-earth solvent extraction-separation process: Mixer-settler of solvent extraction. Elsevier Chapter. (2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813920-2.00005-2>

78. Bose, G., Pain, P., & Roy, S. Bio-inspired meta-heuristic multi-objective optimization of EDM process. *Advances in Civil and Industrial Engineering*. (2019). <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-8223-6.CH014>

79. Li, Y., Yang, J., & Gao, S. Equipment based on bee colony model. *Uludağ Arıcılık Dergisi*. (2022). <https://doi.org/10.31467/uluaricilik.1153269>

80. Akay, H., Yang, M. C., & Kim, S.-G. Automating design requirement extraction from text with deep learning. *ASME 2021 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)*. (2021). <https://doi.org/10.1115/detc2021-66898>.

References

1. Venturelli, A., Brighenti, V., Mascolo, D., & Pellati, F. (2019). A new strategy based on microwave-assisted technology for the extraction and purification of beeswax policosanols for pharmaceutical purposes and beyond. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 172, 200–205. <https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2019.04.015>.

2. Naik, S., & Pargunde, S. (2020). Physico-chemical Analysis of beeswax procured from Mumbai market, Western Ghats (Natural Habitat). *Journal of Ayurveda and Integrated Medical Sciences (JAIMS)*. <https://doi.org/10.21760/jaims.5.5.26>.

3. Mu, G., Yan, S., Pan, F., Xu, H., Jing, X., & Xue, X. (2024). Based on theoretical design simultaneous analysis of multiple neonicotinoid pesticides in beeswax by deep eutectic solvents extraction combined with UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry: X*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102073>
4. Nunut, I., Whulanza, Y., & Kassegne, S. (2020). Testing of Beeswax Printing Technology in the Design of a Paper-Based Microfluidic System. *International Journal of Technology*, 11(5). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i5.4336>
5. Cho, K.-H., Bahuguna, A., Lee, Y., Lee, S. H., & Kim, J.-E. (2024). Twenty-week dietary supplementation with beeswax alcohol (BWA; Raydel®) ameliorates high-cholesterol-induced long-term dyslipidemia and organ damage in hyperlipidemic zebrafish. *Pharmaceuticals*, 17(11). <https://doi.org/10.3390/ph17111434>
6. Shegaw, T. (2020). Evaluation of physico chemical qualities of beeswax in selected districts of Kafa Zone, Southern Nations Nationalities and Peoples Region (SNNPR), Ethiopia. *Chemistry and Materials Research*, 12(1). <https://doi.org/10.7176/cm/12-1-01>
7. Naderizadeh, S., Naderizadeh, S., Heredia-Guerrero, J. A., Caputo, G., Grasselli, S., Malchiodi, A., Athanassiou, A., & Bayer, I. S. (2019). Superhydrophobic coatings from beeswax-in-water emulsions with latent heat storage capability. *Advanced Materials Interfaces*, 6(2). <https://doi.org/10.1002/admi.201801782>
8. Felicioli, A., Cilia, G., Mancini, S., Turchi, B., Galaverna, G., Cirlini, M., Cerri, D., & Fratini, F. (2019). In vitro antibacterial activity and volatile characterisation of organic *Apis mellifera ligustica* beeswax ethanol extracts. *Food Bioscience*. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2019.04.004>
9. Giampieri, F., Quiles, J., Orantes-Bermejo, F. J., Gasparrini, M., Forbes-Hernández, T. Y., Sánchez-González, C., ... & Battino, M. (2018). Are by-products from beeswax recycling process a promising source of bioactive compounds? *Food and Chemical Toxicology*, 112, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.12.041>
10. Hakim, R. J., Nugrahani, R. A., & Fithriyah, N. (2020). Performance of lecithin isolate from vegetable oil as an emulsifier on the beeswax coating characteristics. *International Journal of ChemTech Research*, 13(3). <https://doi.org/10.20902/ijctr.2019.130307>
11. Pre-Extension Demonstration of Crude Beeswax Extraction Technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. (2024). *World Journal of Food Science and Technology*, 8(4), 79-85. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>
12. Meseret. (2019). Evaluation of the quality of beeswax from different sources and rendering methods. *American Journal of Agricultural Research*, 4(2). <https://doi.org/10.28933/AJAR-2019-02-1106>
13. Schaeffer, C., Schummer, C., Scholer, S., van Nieuwenhuyse, A., & Pincemaille, J. (2024). Evaluation of environmental contamination in beeswax products. *Journal of Chromatography B*, 1244, 124243. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2024.124243>
14. Tu, X., Du, C., He, Y., Yang, J., Chen, J., Jin, Q., Xie, L., Zuo, Y., Huang, S., & Chen, W. (2024). Determination of bisphenols in beeswax based on sugaring out-assisted liquid-liquid extraction. *Chemosphere*, 349, 141274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141274>
15. Tran, H. D., Le, H. M., Mai, C. H., & Nguyen, V. (2023). Physicochemical properties of beeswax: The effects of cooking methods and harvesting positions. *Journal of Oleo Science*, 72(10), 979–984. <https://doi.org/10.5650/jos.ess23115>
16. Shegaw, T., & Edimew, T. (2021). Assessment on production, processing and marketing status of beeswax in Kafa Zone, Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 9(4). <https://doi.org/10.11648/J.AJAF.20210904.12>

17. Špaldoňová, A., Havelcová, M., Lapčák, L., Machovič, V., & Titěra, D. (2021). Analysis of beeswax adulteration with paraffin using GC/MS, FTIR-ATR and Raman spectroscopy. *Journal of Apicultural Research*, 60(1), 73–83. <https://doi.org/10.1080/00218839.2020.1774152>
18. Brito-Pereira, R., Ribeiro, C., Tubio, C., Castro, N., Costa, P., & Lanceros-Méndez, S. (2022). Beeswax multifunctional composites with thermal-healing capability and recyclability. *Chemical Engineering Journal*, 446, 139840. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139840>
19. Calatayud-Vernich, P., vanEngelsdorp, D., & Picó, Y. (2019). Beeswax cleaning by solvent extraction of pesticides. *MethodsX*, 6, 980–985. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.04.022>
20. Luna, A., Alonso, R., Cutillas, V., Ferrer, C., Gómez-Ramos, M., Hernando, D., Valverde, A., Flores, J. M., Fernández-Alba, A., & Rodríguez Fernández-Alba, A. (2021). Removal of pesticide residues from beeswax using a methanol extraction-based procedure: A pilot-scale study. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101606. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101606>
21. Biyena, L. (2024). Pre-extension demonstration of crude beeswax extraction technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *World Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>
22. Hosseini, S. F., Mousavi, Z., & McClements, D. (2023). Beeswax: A review on the recent progress in the development of superhydrophobic films/coatings and their applications in fruits preservation. *Food Chemistry*, 424, 136404. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136404>
23. Luna, A., Alonso, R., Cutillas, V., Ferrer, C., Gómez-Ramos, M., Hernando, D., ... & Rodríguez Fernández-Alba, A. (2021). Removal of pesticide residues from beeswax using a methanol extraction-based procedure: A pilot-scale study. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101606. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101606>
24. Kryński, K., & Kowaluk, G. (2021). Application of beeswax as a hydrophobic agent in MDF technology. *Annals of WULS, Forestry and Wood Technology*. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.2375>
25. Gupta, G., & Anjali, K. (2023). Environmentally Friendly Beeswax: Properties, Composition, Adulteration, and its Therapeutic Benefits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1110, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012041>
26. Moreira, C. M., Scala-Benuzzi, M. L., Takara, E., Raba, J., Bertolino, F., & Messina, G. A. (2023). Novel solid inks based on beeswax, graphite and graphene applied to the fabrication of paper-based sensor for galactose determination. *Talanta*, 257, 124372. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124372>
27. Tran, H. D., Le, H. M., Mai, C. H., & Nguyen, V. (2023). Physicochemical properties of beeswax: The effects of cooking methods and harvesting positions. *Journal of Oleo Science*, 72(10), 979–984. <https://doi.org/10.5650/jos.ess23115>
28. Al-Rajhi, M. A. I., EL_SEREY, S., & Elsheikha, A. (2023). Application of Solar Energy to Liquefy Beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>
29. Luo, X., Dong, Y., Gu, C., Zhang, X., & Ma, H. (2021). Processing technologies for bee products: An overview of recent developments and perspectives. *Frontiers in Nutrition*, 8, 727181. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.727181>
30. Zhang, R. H., Liu, J., Yan, Z. N., Jiang, H., Wu, J., Zhang, T., Wang, E., & Liu, X. (2023). Tailoring a novel ovalbumin emulsion gel for stability improvement and functional properties enhancement: Effect of oil phase structure changes by beeswax. *Food Chemistry*, 426, 136575. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136575>

31. Tu, X., Du, C., He, Y., Yang, J., Chen, J., Jin, Q., Xie, L., Zuo, Y., Huang, S., & Chen, W. (2024). Determination of bisphenols in beeswax based on sugaring out-assisted liquid-liquid extraction. *Chemosphere*, 349, 141274. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141274>
32. Sousa, T. M., Melo Neto, O. M., Lucena, A. E. F. L., & Nóbrega, E. R. (2023). Enhancing workability and sustainability of asphalt mixtures: Investigating the performance of beeswax as a novel additive for warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 389, 133306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133306>
33. Mahottamananda, S. N., Pal, Y., Dinesh, M., & Ingenito, A. (2022). Beeswax–EVA/Activated-Charcoal-Based Fuels for Hybrid Rockets: Thermal and Ballistic Evaluation. *Energies*, 15(20), 7578. <https://doi.org/10.3390/en15207578>
34. Gajda, A., Antczak, M., Mitrowska, K., & Posyniak, A. (2018). Development, validation and application of LC-MS/MS method for the determination of tetracyclines in beeswax. *Journal of Separation Science*, 41(20), 3821–3829. <https://doi.org/10.1002/jssc.201800503>
35. Jawad, A., Aljibori, H. S., Obeed, H. H., Kadhum, A., Al-Attar, B., Abdulzahra, O. H., Gaaz, T., & Al-amriy, A. (2022). Beeswax Material as Corrosion Inhibitor in a Brake Oil System. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 49(4). <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.49.4.4>
36. Abdulmunem, A. R., Mazali, I., Samin, P. M., & Sopian, K. (2024). Beeswax as a sustainable thermal energy storage material: Experimental thermal assessment in solar air heater. *Journal of Energy Storage*, 82, 114398. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114398>
37. Belgacem, S. B., Trigui, A., Jedidi, I., Loukil, M. S., Calmunger, M., & Abdmouleh, M. (2024). Enhancing thermal energy storage properties of blend phase change materials using beeswax. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34591-1>
38. Al-Rajhi, M. A. I., EL_SEREY, S., & Elsheikha, A. (2023). Application of Solar Energy to Liquefy Beewax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>
39. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. (2022). Analysis of heat transfer rate for different annulus shape-enhanced beeswax-based phase change material for thermal energy storage. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2022/6123472>
40. Ertürk, Ö., Keskin, M., Birinci, C., & Kolaylı, S. (2024). Comparison of physiochemical, biochemical and antimicrobial properties of natural and artificial *Apis mellifera* L. beeswax. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*. <https://doi.org/10.12681/jhvms.34663>
41. Biyena, L. (2024). Pre-extension demonstration of crude beeswax extraction technology in Ilu Gelan District, West Shewa Zone, Oromia Regional State, Ethiopia. *World Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.12>
42. Nong, Y., Maloh, J., Natarelli, N., Gunt, H., Tristani, E. M., & Sivamani, R. (2023). A review of the use of beeswax in skincare. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 22, 2166–2173. <https://doi.org/10.1111/jocd.15718>
43. Alrabaiah, H. A., & Medina-Medina, N. (2021). Agile Beeswax: Mobile app development process and empirical study in real environment. *Sustainability*, 13, 1909. <https://doi.org/10.3390/su13041909>
44. Lindermann, L., Eckert, J. H., Alkassab, A., Bischoff, G., Kreuzig, R., & Pistorius, J. (2018). Investigating the transfer of acaricides from beeswax into honey, nectar, bee bread, royal jelly and worker jelly. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 465, 63. <https://doi.org/10.5073/JKA.2020.465.063>

45. Zhang, R. H., Liu, J., Yan, Z. N., Jiang, H., Wu, J., Zhang, T., Wang, E., & Liu, X. (2023). Tailoring a novel ovalbumin emulsion gel for stability improvement and functional properties enhancement: Effect of oil phase structure changes by beeswax. *Food Chemistry*, 426, 136575. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136575>
46. Gupta, G., & Anjali, K. (2023). Environmentally Friendly Beeswax: Properties, Composition, Adulteration, and its Therapeutic Benefits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1110, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012041>
47. Al-Rajhi, M. A. I., EL_SEREY, S., & Elsheikha, A. (2023). Application of solar energy to liquify beeswax. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*. <https://doi.org/10.46592/turkager.1343229>
48. Bednarzewska, K. (2024). Business model of a patented invention developed at a university on the example of the “WAXO” beeswax quality analyzer. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2024.198.1>
49. Amberkar, T., & Mahanwar, P. (2022). Study of thermal energy storing beeswax microcapsules by in situ polymerization method. *Research Journal of Chemistry and Environment*. <https://doi.org/10.25303/2603rjce2936>
50. Amberkar, T., & Mahanwar, P. (2023). Microencapsulation study of bioderived phase change material beeswax with ethyl cellulose shell for thermal energy storage applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45, 11803–11818. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2265323>
51. Eshete, Y., & Eshete, T. (2018). A review on crude beeswax mismanagement and lose: Opportunities for collection, processing and marketing in Ethiopia. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 8. <https://doi.org/10.15406/JNHFE.2018.08.00300>
52. Shpychak, O. (2018). Mathematical design of the experiment in the development of technology of beeswax obtaining from propolis. *Journal of Global Pharma Technology*. <https://doi.org/10.26538/jgpt.2020.12.2>
53. Moreira, C. M., Scala-Benuzzi, M. L., Takara, E., Raba, J., Bertolino, F., & Messina, G. A. (2023). Novel solid inks based on beeswax, graphite and graphene applied to the fabrication of paper-based sensor for galactose determination. *Talanta*, 257, 124372. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124372>
54. Luo, X., Dong, Y., Gu, C., Zhang, X., & Ma, H. (2021). Processing technologies for bee products: An overview of recent developments and perspectives. *Frontiers in Nutrition*, 8, 727181. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.727181>
55. Nunut, I., Whulanza, Y., & Kassegne, S. (2020). Testing of beeswax printing technology in the design of a paper-based microfluidic system. *International Journal of Technology*, 11(5). <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i5.4336>
56. Shegaw, T., & Edimew, T. (2021). Assessment on production, processing and marketing status of beeswax in Kafa Zone, Southern Nations Nationalities and Peoples Region (SNNPR), Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 9(4). <https://doi.org/10.11648/J.AJAF.20210904.12>
57. Gao, Y., Lei, Y., Wu, Y., Liang, H., Li, J., Pei, Y., Li, Y., Li, B., Luo, X., & Liu, S. (2021). Beeswax: A potential self-emulsifying agent for the construction of thermal-sensitive food W/O emulsion. *Food Chemistry*, 349, 129203. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129203>
58. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. M. (2020). Numerical investigation of beeswax-based phase change material for thermal management of li-ion battery. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.455>
59. Brito-Pereira, R., Ribeiro, C., Tubio, C., Castro, N., Costa, P., & Lanceros-Méndez, S. (2022). Beeswax multifunctional composites with thermal-healing

capability and recyclability. *Chemical Engineering Journal*, 446, 139840. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139840>

60. Márquez-Osuna, A. (2024). Beekeeping from the South. *Agricultural History*. <https://doi.org/10.1215/00021482-10910295>

61. Mu, G., Yan, S., Pan, F., Xu, H., Jing, X., & Xue, X. (2024). Based on theoretical design simultaneous analysis of multiple neonicotinoid pesticides in beeswax by deep eutectic solvents extraction combined with UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry: X*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102073>

62. Cho, K.-H., Bahuguna, A., Lee, Y., Lee, S. H., & Kim, J.-E. (2024). Twenty-week dietary supplementation with beeswax alcohol (BWA; Raydel®) ameliorates high-cholesterol-induced long-term dyslipidemia and organ damage in hyperlipidemic zebrafish. *Pharmaceuticals*, 17. <https://doi.org/10.3390/ph17111434>

63. Agbo, C., Ngwu, M., Anyaji, U., Ubahakwe, C., Asogwa, G. N., Akpa, P., Nnamani, P., Ofokansi, K., & Attama, A. (2024). Preparation of lipid-based formulations using local beeswax sourced from honeycombs. *African Journal of Pharmaceutical Research and Development*. <https://doi.org/10.59493/ajopred/2024.2.8>

64. Rajitha, K., Mohana, K., Nayak, S. R., Hegde, M., & Madhusudhana, A. M. (2020). An efficient and eco-friendly anti-corrosive system based on beeswax-graphene oxide nanocomposites on mild steel in saline medium. *Surfaces and Interfaces*, 18, 100393. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100393>

65. Rashid, F., & Al-Obaidi, M. (2023). Recent innovations and developments concerning the beeswax as phase change material for thermal energy storage: A review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 12859–12876. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12556-9>

66. Valverde, S., Ares, A., Bernal, J., Nozal, M. J., & Bernal, J. (2018). Fast determination of neonicotinoid insecticides in beeswax by UHPLC-MS/MS using enhanced matrix removal-lipid sorbent. *Microchemical Journal*. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2018.06.020>

67. Mishra, D., Bhowmik, S., & Pandey, K. (2022). Development and assessment of beeswax/expanded graphite composite phase change material for thermal energy storage. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 8985–9004. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06476-9>

68. Kaur, K., Gupta, N., Mahajan, M., Jawandha, S. K., & Kaur, N. (2023). A novel edible coating of beeswax impregnated with karonda polyphenol rich extract maintains the chemical and bioactive potential of fresh ber fruit. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s13580-023-00533-y>

69. Juma, S. M., Ali, A. I., Khamis, S., Rashid, R., & Kombo, M. D. (2022). Assessment of value chain for honey and beeswax initiatives in Zanzibar. *European Journal of Agriculture and Food Sciences*. <https://doi.org/10.24018/ejfood.2022.4.1.423>

70. Li, Y., Fan, Y., Liu, Z., Zhang, J., Cheng, J., & Lian, Q. (2024). Photo-curable bio-based comb/bottle brush epoxy resin/beeswax/copper foam phase change materials with high enthalpy value and multifunctional properties. *Composites Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110506>

71. Nayana, N. P., Ramachandra, C. T., Maheshkumar, G., Bhatt, S. N., & Manvi, D. (2024). Design, development, and testing of 3D printed honeycomb for *Apis cerana indica*. *Sustainable Materials and Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01220>

72. Rathgeb, A., Palmtag, A., Kaminski, S., & Jupke, A. (2019). Design of extractive reaction systems. *Chemie Ingenieur Technik*. <https://doi.org/10.1002/cite.201900163>

73. Szymaniak, M. (2018). Steam turbine stage modernisation in front of the extraction point. *Polish Maritime Research*, 25, 116–122. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0062>

74. Abdumannonovich, A. B., Mansurovich, S. H., & Mahmudovich, M. I. (2021). Development of high-efficiency extraction equipment and prospects for industrial application of extractors with pneumatic fluid mixing. *Turkish Journal of Engineering and Technology*, 3(4), 95–101. <https://doi.org/10.37547/TAJET/VOLUME03ISSUE04-15>

75. Tukaeva, R., Afanasenko, V., & Yunusova, Y. L. (2019). Vibro packed column equipment for mass transfer processes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 272. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032069>

76. Amiebenomo, S. O. (2025). Design and performance evaluation of a multi-fruit juice extraction machine. *American Journal of Innovation in Science and Engineering*. <https://doi.org/10.54536/ajise.v4i1.3742>

77. Qi, D. (2018). Equipment in rare-earth solvent extraction-separation process: Mixer-settler of solvent extraction. Elsevier Chapter. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813920-2.00005-2>

78. Bose, G., Pain, P., & Roy, S. (2019). Bio-inspired meta-heuristic multi-objective optimization of EDM process. *Advances in Civil and Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-8223-6.CH014>

79. Li, Y., Yang, J., & Gao, S. (2022). Equipment based on bee colony model. *Uludağ Arıcılık Dergisi*. <https://doi.org/10.31467/uluaricilik.1153269>

80. Akay, H., Yang, M. C., & Kim, S.-G. (2021). Automating design requirement extraction from text with deep learning. *ASME 2021 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE)*. <https://doi.org/10.1115/detc2021-66898>.