

УДК 664.1.038:658.562
DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2026.2.2.32>

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРУ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕКСПОРТНОЇ ЯКОСТІ

Шульга С. А. – кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології цукру і підготовки води
Національного університету харчових технологій
ORCID ID: 0000-0002-1774-6031

У статті проведено комплексне дослідження сучасного стану та перспективних напрямів удосконалення способів обробки напівпродуктів бурякоцукрової галузі. Особливу увагу приділено проблематиці досягнення високих якісних параметрів готового продукту, що відповідають жорстким міжнародним стандартам. Проведено всебічний аналіз сучасних технологій очищення напівпродуктів цукрового виробництва, що є критично важливим для розширення експортного потенціалу України та успішної інтеграції до європейського ринку. В умовах посилення нормативних вимог до якості цукру з боку Європейського Союзу, зокрема згідно з оновленими стандартами ДСТУ 4623:2023 та відповідними Регламентами ЄС, обґрунтовано необхідність інтеграції традиційних підходів із новітніми технологічними рішеннями.

Науково обґрунтовано, що основним методом підвищення якості готової продукції в умовах переробки сировини нестабільної якості є впровадження стадії додаткового адсорбційного очищення сиропу. В ході експериментальних досліджень доведено високу технологічну доцільність використання активованого вугілля марки Norit CA1, яке демонструє високу селективність щодо барвних-речовин та солей кальцію сиропу. На основі аналізу кінетичних кривих встановлено оптимальні параметри процесу: дозування сорбенту на рівні 0,3% до маси сиропу при тривалості контакту фаз 20...25 хвилин. Визначено, що досягнення стану адсорбційної рівноваги обмежує доцільність подальшого збільшення витрат вугілля та подовження часу контакту. Встановлено, що ефективність знебарвлення безпосередньо корелює із розвиненою питомою поверхнею пор обраного адсорбенту, що дозволяє досягти стабільно низьких значень каламутності та оптичної густини розчинів.

Застосування запропонованого комплексу заходів забезпечує суттєве зниження вмісту солей кальцію та показника забарвленості сиропу, що є критично важливим для виготовлення цукру відповідно до вимог міжнародних стандартів. Результати роботи можуть бути впроваджені на цукрових заводах для підвищення загального технічного рівня виробництва, об'єктивності систем технічного контролю та гарантування стабільно високої якості продукції.

Ключові слова: цукор, очищення сиропу, сорбенти, активоване вугілля, експортна якість, міжнародні стандарти якості, нецукри, солі кальцію, забарвленість.

Shulga S. A. Improvement of sugar production technology to increase its export quality

The article conducts a comprehensive study of the current state and promising directions for improving the methods of processing semi-finished products in the beet sugar industry. Particular attention is paid to the problem of achieving high quality parameters of the finished product that meet strict international standards. A comprehensive analysis of modern technologies for the purification of semi-finished sugar products has been carried out, which is critically important for expanding Ukraine's export potential and successful integration into the European market. In the context of tightening regulatory requirements for sugar quality by the European Union, particularly in accordance with the updated standards of DSTU 4623:2023 and relevant EU Regulations, the necessity of integrating traditional approaches with innovative technological solutions is substantiated.

It is scientifically proven that the main method for increasing the quality of finished products under conditions of processing raw materials of unstable quality is the introduction of an additional stage of adsorption purification of the syrup. In the course of experimental studies, the high technological feasibility of using Norit CA1 activated carbon has been proven, which demonstrates high selectivity towards coloring substances and calcium salts in the syrup. Based on the analysis of kinetic curves, optimal process parameters have been determined: dosage of the adsorbent at the level of 0.3% to the mass of the syrup at a contact time of 20...25 minutes. It is determined that achieving the state of adsorption equilibrium limits the expediency of further increasing the amount of activated carbon and prolonging the contact time. It is established that the efficiency of decoloration is directly correlated with the developed specific surface area of the selected adsorbent, which allows achieving reliably low turbidity and optical density of solutions.



Стаття опублікована за умов
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

on the analysis of kinetic curves, the optimal process parameters were established: adsorbent dosage at the level of 0.3% by weight of the syrup with a phase contact duration of 20–25 minutes. It was determined that the achievement of the adsorption equilibrium state limits the feasibility of further increasing carbon consumption and extending the contact time. It has been established that the decolorization efficiency directly correlates with the developed specific surface area of the pores of the selected adsorbent, which allows for consistently low turbidity and optical density values of the solutions.

The application of the proposed set of measures provides a significant reduction in the content of calcium salts and the color index of the syrup, which is critically important for the production of sugar in accordance with the requirements of international standards. The results of the work can be implemented at sugar factories to increase the overall technical level of production, the objectivity of chemical control systems, and to guarantee consistently high product quality.

Key words: *sugar, syrup purification, sorbents, activated carbon, export quality, international quality standards, non-sugars, calcium salts, color.*

Постановка проблеми. Світовий ринок цукру на сучасному етапі демонструє стабільну динаміку зростання. Для України, як одного з провідних виробників у Європі, це відкриває «вікно можливостей» для розширення експортного потенціалу, що супроводжується жорсткими технологічними та економічними викликами. Зокрема це призведе до зростання вартості енергоносіїв і підвищення вимог до якості харчових продуктів. Інтеграція до європейського ринку та відповідність сучасним нормативним документам (зокрема ДСТУ 4623:2023 та Регламентом ЄС) вимагають докорінної зміни підходів до якості готової продукції. При цьому особливої актуальності набуває вдосконалення технологічних процесів переробки цукрових буряків [23].

Мета роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні та практичній реалізації комплексу заходів щодо вдосконалення технологічних процесів виробництва цукру. Реалізація запропонованих рішень забезпечить виготовлення продукції, що відповідає вимогам європейським стандартів та ДСТУ 4623:2023 “Цукор. Технічні умови” [17]. Це створює передумови для розширення експортного потенціалу галузі навіть при переробці сировини низької якості.

Виклад основного матеріалу. Модернізація цукрового виробництва є виробничою необхідністю, що забезпечить конкурентоспроможність вітчизняного продукту на світовій арені [23]. У сучасних умовах функціонування цукрової галузі України спостерігається тенденція до погіршення технологічних показників цукрових буряків, що призводить до зростання вмісту нецукрів і суттєво впливає на склад та властивості дифузійного соку. Інша частина нецукрів утворюється безпосередньо в процесі технологічної обробки, що додатково ускладнює їх ефективне видалення. Класична технологія очищення дифузійного соку ґрунтується на послідовному поєднанні фізико-хімічних стадій, зокрема попереднього та основного вапнування, першої та другої карбонізації, а також сульфитації. Ефективність цієї схеми залежить від якості сировини та умов ведення процесу. Погіршення якості буряків зумовлює отримання соків із низькою чистотою та недостатньою термостійкістю [22].

Головним недоліком класичного очищення дифузійного соку та сиропу є неповне видалення азотистих сполук, меланоїдинів та високомолекулярних речовин, які є активними мелясоутворювачами. Особливу роль відіграють продукти термічного розкладу сахарози, серед яких найбільш небажаними є барвні речовини. У процесі випарювання таких соків утворюються сиропи із підвищеними величинами кольоровості та в'язкості, що призводить до зниження швидкості кристалізації та збільшення втрат сахарози [22].

Тому особливого значення набуває розроблення нових підходів до очищення сиропів. Оскільки стадії уварювання та кристалізації є надзвичайно чутливими

до залишкових домішок, навіть незначне підвищення ступеня очищення здатне забезпечити відчутне зростання виходу цукру та зниження енергетичних витрат.

Технологічні особливості очищення цукрових сиропів від нецукрів

Традиційні способи очищення, зокрема сульфатація, забезпечують переважно знебарвлення сиропу, але не вирішують проблему видалення високомолекулярних сполук та інших нецукрів [3].

Нецукри, що містяться у цукрових розчинах, являють собою гетерогенну систему органічних та мінеральних сполук, які мають різну молекулярну масу та ступінь іонізації. Процес згущення сиропу характеризується інтенсивним наростанням його кольоровості за рахунок утворення меланоїдинів. Тому дуже важливо видаляти ці сполуки для досягнення високих показників чистоти готового білого цукру [12]. За технологічних значень рН, характерних для цукрового виробництва, меланоїдини проявляють аніонні властивості. Ця особливість дозволяє ефективно видаляти їх із розчинів шляхом адсорбції на аніонообмінних смолах [2, 14].

Внаслідок термічного розкладання сахарози в сиропі спостерігається утворення продуктів карамелізації (гідроксиметилфурфуролу), в результаті чого збільшується в'язкість та інтенсивність забарвлення сиропу. На відміну від меланоїдинів, продукти карамелізації характеризуються меншою полярністю, що обумовлює їх високу спорідненість до активованого вугілля [2, 14].

Мінеральні сполуки (зольність) сиропу представлені переважно катіонами кальцію (Ca^{2+}), магнію (Mg^{2+}), калію (K^{+}) та відповідними аніонними групами [3].

Найбільш негативний вплив на стабільність роботи обладнання мають солі кальцію, які провокують інтенсивне накипоутворення на теплообмінних поверхнях. Ефективне видалення цих іонів потребує застосування специфічних методів іонного обміну [3, 6].

Перспективним напрямком удосконалення технології цукрового виробництва є застосування природних мінеральних сорбентів (ПМС), для додаткового очищення сиропу. ПМС дозволяють ефективно вилучати ті групи нецукрів, що залишаються стійкими до традиційних технологічних впливів. Використання вапняно-вуглекислотного очищення сиропу дозволяє підвищити ефективність адсорбції за рахунок утвореного сорбенту CaCO_3 , однак супроводжується технологічними труднощами, такими як утворення в'язких структур і зниження швидкості масообміну.

Сучасні тенденції розвитку галузі спрямовані на пошук альтернативних або комбінованих методів очищення, які дозволяють підвищити ефективність видалення нецукрів при одночасному зниженні витрат реагентів. Одним із таких напрямів є впровадження сорбційних технологій із використанням природних матеріалів.

Застосування основних груп сорбентів для очищення цукрових розчинів

Світовий досвід свідчить про перспективність застосування природних мінеральних сорбентів для очищення цукровмісних розчинів. Для таких матеріалів характерний комплексний механізм дії, що включає фізичну адсорбцію, іонний обмін та участь у процесах коагуляції. [10]. Тобто завдяки розвиненій пористій структурі, високій питомій поверхні та іонообмінним властивостям ці сорбенти здатні вибірково адсорбувати широкий спектр домішок. В результаті цього підвищується чистота сиропу, знижується його кольоровість та покращується якість цукру. При цьому природні мінеральні сорбенти можуть виконувати функції фільтрувальних допоміжних матеріалів, підвищуючи ефективність фільтраційних процесів. Ефективність цих процесів визначається структурними особливостями сорбентів, зокрема пористістю, питомою поверхнею та хімічним складом.

Залежно від типу кристалічної будови мінеральні сорбенти поділяються на такі групи [22]:

- 1) шаруваті алюмосилікати (глини): монтморилоніт (бентоніт), глауконіт;
- 2) шарувато-стрічкові алюмосилікати: палигорськіт, сепіоліт;
- 3) каркасні алюмосилікати (цеоліти): клиноптилоліт;
- 4) кремнієві матеріали: діатоміт, фільтроперліт;
- 5) вуглецеві матеріали: активоване вугілля.

Кожна з цих груп має специфічні властивості, що визначають їх ефективність у процесах очищення сиропу.

Монтморилоніт (бентоніт) – це мінерал з алюмосилікатною кристалічною решіткою, що має високу питому поверхню, володіє високою гідрофільністю, а також має здатність до внутрішньокристалічного набухання та обміну катіонів (Na^+ , Ca^{2+}). При цьому видалення білків та колоїдів відбувається шляхом адсорбції на активних центрах зовнішньої поверхні мінералу, а також шляхом проникнення молекул у міжшарові проміжки [15].

Глауконіт належить до групи ненабрякаючих або обмежено набрякаючих шаруватих силікатів. Його структура є більш жорсткою через міцну фіксацію іонів калію в міжшарових проміжках, що обмежує доступ води всередину кристалічної ґратки. У технології цукру глауконіт використовується переважно як селективний катіонообмінник. Завдяки своїй природі він виявляє високу спорідненість до важких металів та радіонуклідів, а також може брати участь в іонному обміні кальцію. Хоча його питома поверхня менша, ніж у монтморилоніту, він має вищу хімічну стійкість в агресивних середовищах. Глауконіт ефективно затримує дрібнодисперсні нецукри та сприяє частковому знебарвленню соку за рахунок специфічної адсорбції на залізистих центрах поверхні [16].

Палигорськіт, сепіоліт. Ці мінерали характеризуються специфічною кристалохімічною будовою, яка зумовлює наявність розвиненої системи внутрішньокристалічних мікроканалів (пор) із перетинами. На відміну від бентоніту, ці адсорбенти мають недеформовану решітку, що виключає ефект набухання у водних середовищах. Це дозволяє підтримувати високу гідравлічну проникність адсорбційного шару та забезпечує якісне фільтрування цукрових розчинів.

Сорбційна здатність палигорськіту та сепіоліту забезпечується завдяки механізму адсорбції на активних центрах внутрішніх каналів. Вони виявляють високу селективність щодо пігментів та органічних нецукрів розміром 1...10 нм, які затримуються в пористій структурі мінералів. Сепіоліт вирізняється підвищеною стійкістю до високих температур, що робить його ефективним реагентом для знебарвлення гарячих сиропів. Завдяки значній мікропористості ці мінерали забезпечують глибоке очищення розчинів без ризику підвищення їх забарвленості під час термічної обробки [4, 11].

Палигорськіт має розвинену поверхню (до 220 м²/г) і дуже добре видаляє білкові сполуки та пектини. Його використання дозволяє знизити в'язкість сиропу та зменшити його кольоровість на 15...31%. Оптимальна доза становить близько 2,5...3% до маси сиропу, що забезпечує зростання чистоти розчину та виходу готової продукції [21].

За результатами сучасних досліджень науковців Стеценко Н., Бублієнко Н., Салавор О. та ін. (2025) [16] встановлено високий ступінь видалення барвних речовин при використанні палигорськіту для очищення цукрових розчинів, причому карбонат кальцію та глауконіт дали значно нижчі результати.

Клиноптилоліт має тривимірну каркасну будову, яка зумовлює наявність відкритої системи порожнин та сполучених каналів із фіксованими діаметрами

вікон. На відміну від палигорськіту, кристалічна решітка клиноптилоліту є недеформованою та не змінює об'єму при сорбції, що класифікує його як природне молекулярне сито з високою термічною та хімічною стійкістю. У технологічному процесі очищення цукрових розчинів клиноптилоліт функціонує переважно як селективний катіонообмінник. Завдяки високій спорідненості каркасу до двовалентних металів, відбувається ефективне вилучення іонів кальцію із заміщенням їх на еквівалентну кількість іонів натрію або калію. Це дозволяє радикально знизити концентрацію солей жорсткості в очищеному розчині, що є критично важливим для інгібування процесів накипоутворення на поверхнях нагріву випарних апаратів. Крім того, мікропористий простір мінералу забезпечує часткову адсорбцію низькомолекулярних нецукрів, розмір яких не перевищує критичний діаметр вхідних вікон цеолітового каркасу [9].

Науковцями Нryhorenko N., Husiatynska N., Kalenyuk O. (2021) [7] були проведені експериментальні дослідження по адсорбційному очищенню сиропу з використанням цеоліту-клиноптилоліту. Авторами встановлено, що інтеграція адсорбції на цеоліті з мембранними та іонообмінними процесами дозволяє досягти підвищення загального ефекту очищення сиропу до 52% за рахунок збільшення ступеню видалення білкових речовин високомолекулярних сполук відповідно до 89,2 та 98,5% [7].

Дослідженнями науковців Husiatynska N., Nechypor T., Husiatynskyi M., Shulga S. (2018) доведено, що застосування цеоліту не лише знебарвлює цукрові розчини, а також при цьому суттєво підвищується загальний ефект очищення та покращуються седиментаційно-фільтраційні характеристики осаду соку першої карбонізації. Отримані результати підтверджують високу сорбційну ефективність цеоліту для підвищення якісних показників у бурякоцукровому виробництві [10].

Діатоміт, фільтроперліт. Дані матеріали є високодисперсними пористими сорбентами, основу яких становить аморфний діоксид кремнію (SiO_2). Діатоміт (кізельгур) формується з окам'янілих панцирів діатомових водоростей, що зумовлює його унікальну мікроструктуру, тоді як фільтроперліт є продуктом термічного розширення вулканічного скла. Обидва матеріали характеризуються надзвичайно високою загальною пористістю (до 85...90%) та низькою насипною щільністю, що дозволяє їм зберігати інертність відносно хімічного складу цукрових розчинів.

У цукровому виробництві ці матеріали переважно виконують функцію допоміжних фільтрувальних засобів. Їхня роль полягає у формуванні практично нестисливого пористого шару на фільтрувальній перегородці. Завдяки розгалуженій структурі діатоміт і перліт запобігають швидкому забиванню фільтрувальних тканин колоїдними сполуками, не ущільнюються при високих температурах, забезпечуючи високу швидкість освітлення соку та прозорість фільтрату при мінімальному гідравлічному опорі [5].

Науковцями кафедри технології цукру і підготовки води НУХТ був розроблений спосіб очищення сиропу шляхом застосування 2,5% фільтроперліту (при тривалості контакту 30 хвилин) дозволяє досягти максимального ефекту видалення розчинних нецукрів [19, 20].

Активоване вугілля являє собою гідрофобний адсорбент із полідисперсною структурою пор (мікро-, мезо- та макропори). Має колосальну питому поверхню та високу енергію зв'язку з органічними ароматичними сполуками. Він застосовується для глибокого знебарвлення сиропів. Механізм полягає в адсорбції високомолекулярних бервних речовин (меланоїдинів та продуктів карамелізації).

Активоване вугілля визнане одним із найпотужніших засобів для знебарвлення розчинів шляхом фізичної адсорбції, зумовленій силами Ван-дер-Ваальса, та часткової хемосорбції за участю поверхневих функціональних груп [1]. Завдяки величезній питомій поверхні воно видаляє до 40% меланоїдинів та фенольних сполук. Проте висока вартість та складність регенерації обмежують його широке застосування. Сучасні дослідження пропонують використовувати вугілля у комбінації з мінеральними сорбентами або ферментами (наприклад, глюкозооксидазою), що дозволяє підвищити ефективність знебарвлення до 83% [13].

У роботі Штангєєва В. О. та групи науковців (2011) представлено комбінований спосіб застосування ПГМГХ та активного вугілля марки СКН-3 для підвищення якості густих напівпродуктів бурякоцукрового виробництва, в тому числі сиропу після третього корпусу випарної установки. В результаті цього підвищилася чистота напівпродукту на 0,9.2,0% за рахунок знебарвлення на 23...33%. Важливою перевагою даного способу є використання нетоксичних реагентів, що відповідає сучасним вимогам екологізації та безпеки харчових технологій [18].

Згідно з дослідженнями Husiatynska N., Hryhorenko N. (2025), перспективним напрямом інтенсифікації знебарвлення цукрових розчинів є застосування інноваційних вуглецевих сорбентів, які синтезовані шляхом модифікації відновлюваної деревної біомаси. Експериментально підтверджено, що такий адсорбент забезпечує глибше знебарвлення рідких напівпродуктів порівняно з поширеними комерційними аналогами, зокрема активованим вугіллям марок С607 та NORIT. Використання подібних модифікованих матеріалів дозволяє покращити якісні показники очищення цукрових розчинів, а також сприяє екологізації технологічного процесу завдяки переходу на відновлювані джерела сировини [8].

Аналіз сучасних наукових розробок свідчить про доцільність впровадження сорбційних методів у технологію бурякоцукрового виробництва. При цьому відсутні систематизовані дані щодо оптимальних режимів їх застосування, що зумовлює необхідність подальших експериментальних досліджень. Виходячи з цього, першочерговим завданням було проведення порівняльного аналізу ефективності різних сорбентів при обробленні цукрового сиропу. Пошук найбільш раціонального технологічного рішення передбачав оцінювання здатності кожного з них вилучати нецукри із сиропу, що дозволить обрати сорбент із найвищим очисним потенціалом для його подальшого впровадження в промислову експлуатацію.

Експериментальне обґрунтування вибору ефективних сорбентів для підвищення якості цукрового сиропу

Експериментальна частина роботи присвячена порівнянню ефективності різних сорбентів за їхньою здатністю видаляти із цукрового сиропу барвні речовини та колоїди. Це дозволить визначити найбільш ефективний з них для інтенсифікації процесу очищення сиропу.

У роботі було проведено ряд експериментальних досліджень по застосуванню для додаткового очищення сиропу з чистотою 91,22% таких сорбентів, як монтморилоніт, глауконіт, палигорськіт, сепіоліт, кліноптилоліт, діатоміт, фільтроперліт та активоване вугілля. З метою забезпечення ідентичності умов, кожен етап сорбційного очищення супроводжувався підготовкою сиропу, внесенням сорбентів у кількості по 2% до маси сиропу, витримуванням системи протягом 30 хвилин та фільтруванням.

Показники ефективності вилучення барвних речовин та колоїдних домішок сиропу із використанням різних сорбентів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Вплив різних сорбентів на технологічні показники якості сиропу

Назва сорбенту (марка)	Чистота, %	Вміст солей кальцію, % СаО до маси сухих речовин	Забарвленість, одиниць ICUMSA
Контроль (сироп без оброблення сорбентами)	91,22	0,242	615,0
Монтморилоніт (Bentolit P)	91,55	0,225	580,2
Глауконіт (K-1)	91,42	0,230	595,7
Палигорськіт (Attasorb)	91,95	0,205	520,4
Сепіоліт (Pansil)	91,80	0,212	535,8
Кліноптилоліт (Zeo-Food)	91,68	0,198	560,3
Діатоміт (Celatom)	91,35	0,235	602,1
Фільтроперліт (Perlite-100)	91,48	0,220	575,6
Активоване вугілля (Norit CA1)	92,35	0,194	415,8

Аналіз отриманих експериментальних даних (табл. 1) дозволяє визначити вплив різних сорбентів на зміну технологічних показників цукрового сиропу. Встановлено, що максимальний ступінь видалення барвних речовин (32,4%) та солей кальцію (19,8%) продемонструвало активоване вугілля марки Norit CA1, в результаті чого чистота очищеного сиропу підвищилася на 1,13%. Такий результат пояснюється його розвинутою питомою поверхнею та високою адсорбційною здатністю до високомолекулярних продуктів розпаду цукрів і меланоїдинів.

Враховуючи результати проведеного порівняльного аналізу, які підтвердили переважачу ефективність активованого вугілля марки Norit CA1 у процесах додаткового очищення сиропу, подальшим етапом досліджень стало встановлення раціональних параметрів його використання.

З огляду на це, наступний етап досліджень було спрямовано на визначення оптимального дозування активованого вугілля та раціональної тривалості його контакту із сиропом.

Для визначення оптимальної питомої витрати активованого вугілля Norit CA1 сироп з чистотою 91,22% обробляли різною кількістю сорбенту (від 0,1% до 0,5% до маси сиропу) протягом 30 хвилин при інтенсивному перемішуванні. Після цього проводили фільтрування кожної проби сиропу та виконували комплексний аналіз його показників якості. Результати досліджень представлені на рис. 1.

Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 2) свідчить те, що найбільш інтенсивне покращення якісних характеристик напівпродукту спостерігається при збільшенні витрат вугілля до 0,3%, після чого швидкість адсорбції нецукрів суттєво сповільнюється. Подальше збільшення кількості активованого вугілля не призводить до суттєвого зростання ефекту очищення. З огляду на це, збільшення витрат сорбенту понад 0,3% до маси сиропу є технологічно невиправданим та економічно недоцільним.

На наступному етапі досліджень проводилися експерименти по визначенню оптимальної тривалості оброблення сиропу активованим вугіллям. Для вивчення кінетики процесу використовували визначену в попередніх дослідженнях оптимальну дозу сорбенту (0,3% до маси сиропу), змінюючи час контакту сиропу від 5 до 30 хвилин і визначали технологічні показники якості сиропу. Результати досліджень наведені на рис. 2.

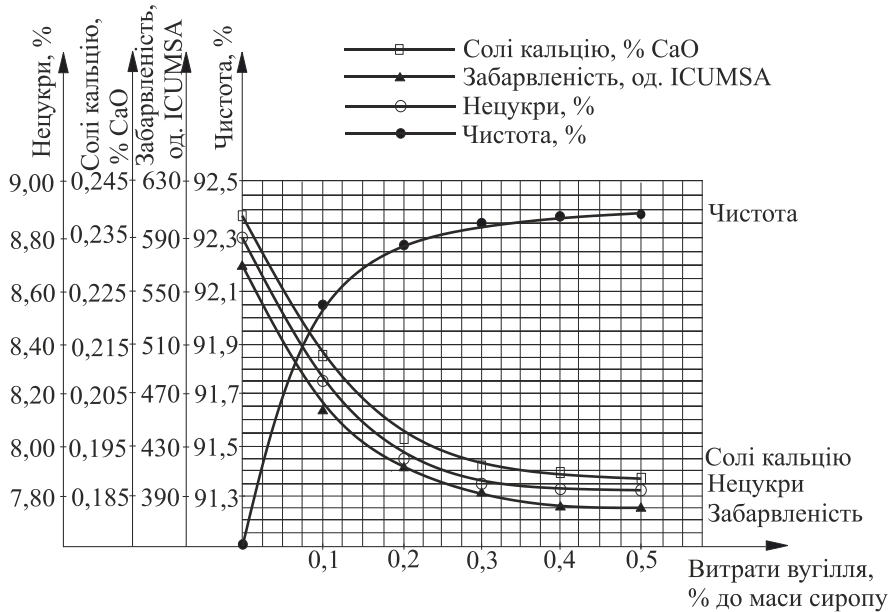


Рис. 1. Визначення оптимальних витрат активованого вугілля марки Norit CA1 при очищенні сиропу

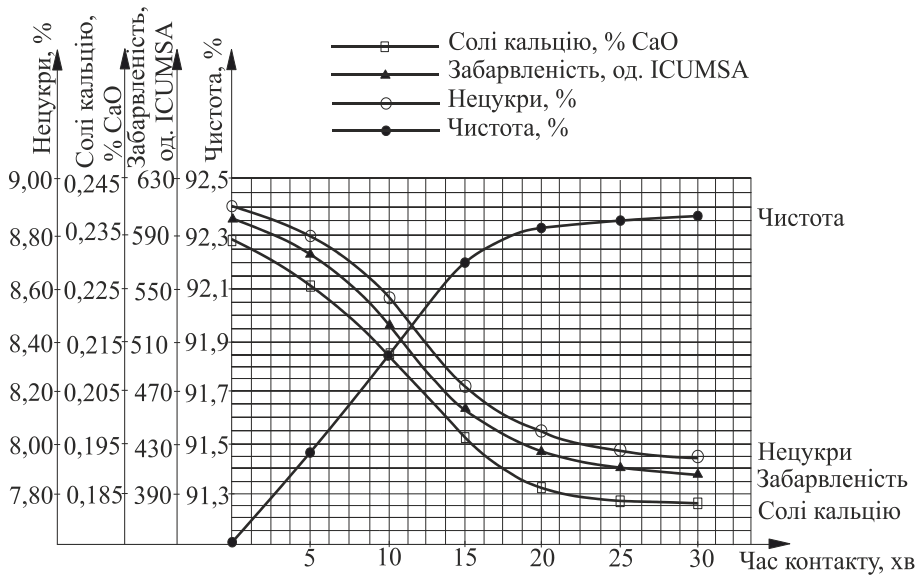


Рисунок 2. Визначення оптимальної тривалості контакту активованого вугілля марки Norit CA1 з сиропом

Аналіз отриманих експериментальних даних (рис. 3) свідчить про високу швидкість адсорбції протягом перших 15...20 хвилин, оскільки спостерігається найбільш стрімке зниження забарвленості та вмісту солей кальцію при одночасному зростанні чистоти сиропу. Враховуючи поступову стабілізацію показників та досягнення адсорбційної рівноваги, збільшення контакту понад 25 хвилин є недоцільним.

Висновки. Стратегічним напрямом удосконалення технології виробництва цукру в умовах нестабільної якості сировини є впровадження адсорбційних методів очищення напівпродуктів. Теоретично обґрунтовано та практично підтверджено, що застосування різних сорбентів для додаткового очищення сиропу забезпечує вилучення з нього нецукрів, які важко видаляються традиційними способами.

Експериментально доведено, що найбільш технологічно доцільним методом підвищення якості цукру до експортних стандартів є впровадження адсорбційного очищення сиропу з використанням активованого вугілля марки Norit CA1. Встановлено, що для досягнення показників якості сиропу оптимальним є дозування цього сорбенту на рівні 0,3% до маси сиропу при тривалості контакту фаз 20...25 хвилин. Подальше збільшення витрат вугілля та часу взаємодії компонентів системи не забезпечує вагомого технологічного ефекту через встановлення адсорбційної рівноваги.

Реалізація запропонованого комплексу заходів дозволяє суттєво знизити вміст солей кальцію та забарвленість сиропу, що створює необхідні передумови для стабільного випуску конкурентоспроможної продукції та розширення експортного потенціалу вітчизняної цукрової галузі.

Автор висловлює глибоку вдячність та присвячує цю роботу світлій пам'яті видатного Вчителя, доктора технічних наук, професора Рєви Леоніда Павловича, чий неоціненні поради, спільні дослідження та наукові настанови лягли в основу запропонованих технологічних рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Adsorption of Vitamin B12 on Sugarcane-Derived Activated Carbon : Fractal Isotherm and Kinetics Modelling, Electrochemistry and Molecular Modelling Studies / R. Ranguin et al. *Molecules*. 2025. Vol. 30, Iss. 10. Art. 2096. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules30102096>
2. AmberLite Cane Sugar Decolorization : Technical Brochure / DuPont. URL: <https://www.dupont.com/content/dam/water/amer/us/en/water/public/documents/en/IER-AmberLite-Cane-Sugar-Decolorization-Br-45-D02221-en.pdf>
3. Arslanoglu H., Tumen F. A study on cations and color removal from thin sugar juice by modified sugar beet pulp. *Journal of Food Science and Technology*. 2012. Vol. 49, No. 3. P. 319–327. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0288-1>
4. Comparison of Surface Properties of Sepiolite and Palygorskite : Surface Energy and Nanoroughness / R. Almeida et al. *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11, Iss. 6. Art. 1579. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano11061579>
5. ElSayed E. E. Natural diatomite as an effective adsorbent for heavy metals in water and wastewater treatment (a batch study). *Water Science*. 2018. Vol. 32, Iss. 1. P. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.02.001>
6. Gökmen V., Serpen A. Equilibrium and kinetic studies of adsorption of caramel colors and indirect indicators of sugar browning on ion-exchange resins. *Journal of Food Engineering*. 2002. Vol. 54, Iss. 4. P. 335–340. (PMC3614046). URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3614046/>

7. Hryhorenko N., Husiatynska N., Kalenyk O. Substantiation of a rational method of purification of sugar sorghum juice in the technology of food syrup production. *Ukrainian Food Journal*. 2021. Vol. 10, Iss. 2. P. 263–273. DOI: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-2-12>
8. Husiatynska N., Hryhorenko N. Decolorization of liquid sugar products by carbon sorbents. *Ukrainian Food Journal*. 2025. Vol. 14, Iss. 2. P. 290–303. DOI: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2025-14-2-8>
9. Natural Zeolites in Water Treatment – How Effective is Their Use / K. Margeta, N. Z. Logar, M. Šiljeg, A. Farkas. *Water Treatment* / ed. by W. Elshorbagy, R. K. Chowdhury. Rijeka : IntechOpen, 2013. P. 81–112. DOI: <https://doi.org/10.5772/50738>
10. Research into application of zeolite for purification of diffusion juice in sugar production / N. Husiatynska et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, Iss. 11 (95). P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143066>
11. Sabah E., Ouki S. Sepiolite and sepiolite-bound humic acid interactions in alkaline media and the mechanism of the formation of sepiolite-humic acid complexes. *International Journal of Mineral Processing*. 2017. Vol. 162. P. 69–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.03.005>
12. Study of coloured components formed in sugar beet processing / N. W. Coca et al. *Food Chemistry*. 2004. Vol. 86, No. 3. P. 421–433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.017>
13. Sugar Decolorization Carbon : Cases and Solutions / HeyCarbons. URL: <https://heycarbons.com/blog-cases-sugar-decolorization-carbon/>
14. The use of ion exchange resins in the sugar decolorization process / QEMI. URL: <https://qemi.com/the-use-of-ion-exchange-resins-in-the-sugar-decolorization-process/>
15. Uddin M. K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*. 2017. Vol. 308. P. 438–462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.029>
16. Адсорбційне очищення напівпродуктів цукрового виробництва палигорськітом та глауконітом / Н. Стеценко, Н. Бублієнко, О. Салавор та ін. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2025. № 2. С. 51–56. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-7>
17. ДСТУ 4623:2023 Цукор. Технічні умови [дата початку дії 01.11.2023]. Київ: Інститут продовольчих ресурсів Національної академії аграрних наук (ІПР НААН), 2023.
18. Очищення густих напівпродуктів цукрового виробництва з застосуванням нетоксичних реагентів / В. О. Штангес, О. М. Молодницька, Н. А. Гусятинська та ін. *Цукор України*. 2011. № 3. С. 30–33. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&user=TaYSdm4AAAAJ&citation_for_view=TaYSdm4AAAAJ:aqlVkm33-oC
19. Рева Л. П., Шульга С. А. Оптимізація раціональних витрат кремнієвмісних реагентів та визначення найбільш ефективного способу їх застосування для додаткового очищення дифузійного соку та сиропу. *Цукор України*. 2016. № 1 (121). С. 24–29. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/23535>
20. Спосіб очищення сиропу : пат. 33595 Україна : МПК (2006) С13Д 3/00 / Л. П. Рева, Н. М. Пушанко, С. А. Замура ; заявник і патентовласник Нац. ун-т харч. технологій. – № u200801831 ; заявл. 13.02.2008 ; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 12.
21. Спосіб очищення сиропу : пат. на корисну модель 113481 Україна : МПК С13В 20/12 / Л. П. Рева, Ю. Г. Береза, С. А. Шульга, О. В. Головіна ; власник Національний університет харчових технологій. – № u201608520 ; заявл. 02.08.2016 ; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/25164>
22. Технологія цукру: підручник: в 3 т. Т.2: Очищення дифузійного соку / А.А. Ліпєц та ін.; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. Київ, Експрес-об'ява, 2015, 272 с.

23. Чорна Т. М., Гусятинська Н. А. Аналіз нормативних документів ЄС щодо якості та безпечності цукрів у контексті розширення експортного потенціалу галузі. *Наукові праці НУХТ*. 2022. Т. 28, № 3. С. 154–176. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-3-15>.

REFERENCES:

1. Ranguin, R., Ncibi, M. C., Jean-Marius, C., Brouers, F., Cebrián-Torrejón, G., Doménech-Carbó, A., Souila, S., Sánchez-Aparicio, J.-E., Dorce, D., Zapirain-Gysling, I., Maréchal, J.-D., Jauregui-Haza, U., & Gaspard, S. (2025). Adsorption of vitamin B12 on sugarcane-derived activated carbon: Fractal isotherm and kinetics modelling, electrochemistry and molecular modelling studies. *Molecules*, 30(10), Article 2096. <https://doi.org/10.3390/molecules30102096>
2. DuPont. (n.d.). *AmberLite cane sugar decolorization: Technical brochure*. <https://www.dupont.com/content/dam/water/amer/us/en/water/public/documents/en/IER-AmberLite-Cane-Sugar-Decolorization-Br-45-D02221-en.pdf>
3. Arslanoglu, H., & Tumen, F. (2012). A study on cations and color removal from thin sugar juice by modified sugar beet pulp. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 319–327. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0288-1>
4. Almeida, R., Ferraz, E., Santarén, J., & Gamelas, J. A. F. (2021). Comparison of surface properties of sepiolite and palygorskite: Surface energy and nanoroughness. *Nanomaterials*, 11(6), Article 1579. <https://doi.org/10.3390/nano11061579>
5. ElSayed, E. E. (2018). Natural diatomite as an effective adsorbent for heavy metals in water and wastewater treatment (a batch study). *Water Science*, 32(1), 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.02.001>
6. Gökmen, V., & Serpen, A. (2002). Equilibrium and kinetic studies of adsorption of caramel colors and indirect indicators of sugar browning on ion-exchange resins. *Journal of Food Engineering*, 54(4), 335–340. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3614046/>
7. Hryhorenko, N., Husiatynska, N., & Kalenyk, O. (2021). Substantiation of a rational method of purification of sugar sorghum juice in the technology of food syrup production. *Ukrainian Food Journal*, 10(2), 263–273. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-2-12>
8. Husiatynska, N., & Hryhorenko, N. (2025). Decolorization of liquid sugar products by carbon sorbents. *Ukrainian Food Journal*, 14(2), 290–303. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2025-14-2-8>
9. Margeta, K., Logar, N. Z., Šiljeg, M., & Farkas, A. (2013). Natural zeolites in water treatment – How effective is their use. In W. Elshorbagy & R. K. Chowdhury (Eds.), *Water Treatment* (pp. 81–112). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/50738>
10. Husiatynska, N., Nechypor, T., Husiatynskyi, M., & Shulga, S. (2018). Research into application of zeolite for purification of diffusion juice in sugar production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11-95), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143066>
11. Sabah, E., & Ouki, S. (2017). Sepiolite and sepiolite-bound humic acid interactions in alkaline media and the mechanism of the formation of sepiolite-humic acid complexes. *International Journal of Mineral Processing*, 162, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.03.005>
12. Coca, N. W., García, M. T., González, G., Peña, M., & García, J. A. (2004). Study of coloured components formed in sugar beet processing. *Food Chemistry*, 86(3), 421–433. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.017>
13. HeyCarbons. (n.d.). *Sugar decolorization carbon: Cases and solutions*. <https://heycarbons.com/blog-cases-sugar-decolorization-carbon/>
14. QEMI. (n.d.). *The use of ion exchange resins in the sugar decolorization process*. <https://qemi.com/the-use-of-ion-exchange-resins-in-the-sugar-decolorization-process/>

15. Uddin, M. K. (2017). A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, 308, 438–462. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.029>
16. Stetsenko, N., Bublilenko, N., Salavor, O., & Husiatynska, N. (2025). Adsorbtsiine ochyshchennia napivproduktiv tsukrovoho vyrobnytstva palyhorskitom ta hlaukonitom [Adsorptive purification of intermediate products of sugar production with palygorskite and glauconite]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku [Problems of Chemistry and Sustainable Development]*, (2), 51–56. <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-7> [in Ukrainian].
17. State Standard of Ukraine. (2023). *Sugar. Specifications* (DSTU 4623:2023). Institute of Food Resources of the National Academy of Agrarian Sciences. [in Ukrainian].
18. Shtangeiev, V. O., Molodnytska, O. M., Husiatynska, N. A., Klymenko, L. S., & Kupchuk, L. A. (2011). Ochyshchennia hustykh napivproduktiv tsukrovoho vyrobnytstva z zastosuvanniam netoksychnykh reahentiv [Purification of thick intermediate products of sugar production using non-toxic reagents]. *Tsukor Ukrainy [Sugar of Ukraine]*, (3), 30–33. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&user=TaYSdm4AAAAJ&citation_for_view=TaYSdm4AAAAJ:aqIVkmm33-oC [in Ukrainian].
19. Reva, L. P., & Shulga, S. A. (2016). Optyimizatsiia ratsionalnykh vytrat kremnievmyshnykh reahentiv ta vyznachennia naibilsh efektyvnoho sposobu yikh zastosuvannia dlia dodatkovoho ochyshchennia dyfuziinoho soku ta syropu [Optimization of rational costs of silicon-containing reagents and determination of the most effective way of their application for additional purification of diffusion juice and syrup]. *Tsukor Ukrainy [Sugar of Ukraine]*, 1(121), 24–29. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/23535> [in Ukrainian].
20. Reva, L. P., Pushanko, M. M., & Zamura, S. A. (2008). *Sposib ochyshchennia syropu* [Method for syrup purification] (Ukrainian Patent No. 33595). State Intellectual Property Service of Ukraine. [in Ukrainian].
21. Reva, L. P., Bereza, Y. G., Shulga, S. A., & Holovina, O. V. (2017). *Sposib ochyshchennia syropu* [Method for syrup purification] (Ukrainian Utility Model Patent No. 113481). State Intellectual Property Service of Ukraine. [in Ukrainian].
22. Lipets, A. A., Logvin, V. M., & Ukrainets, A. I. (Eds.). (2015). *Tekhnolohiia tsukru: Pidruchnyk: Vol. 2. Ochyshchennia dyfuziinoho soku* [Sugar technology: Textbook: Vol. 2. Purification of diffusion juice]. Ekspres-ob'iava. [in Ukrainian].
23. Chorna, T. M., & Husiatynska, N. A. (2022). Analiz normatyvnykh dokumentiv YeS shchodo yakosti ta bezpechnosti tsukriv u konteksti rozshyrennia eksportnoho potentsialu haluzi [Analysis of EU regulatory documents on the quality and safety of sugars in the context of expanding the export potential of the industry]. *Naukovi pratsi NUKHT [Scientific Works of NUFT]*, 28(3), 154–176. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-3-15> [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 12.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 21.05.2026