

ДИСПЕРСНИЙ СКЛАД ЧАСТОЧОК КАРБОНІЗОВАНИХ СУСПЕНЗІЙ І ПРОДУКТІВ ЇХ РОЗДІЛЕННЯ У ЦУКРОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ ТА ЙОГО НОРМАТИВНІ ЗНАЧЕННЯ

Ткаченко С. В.¹, к.т.н., старший дослідник,
с.н.с відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів
<https://orcid.org/0000-0003-2897-8978>

Хомічак Л. М.¹, д.т.н., професор, член-кореспондент НААН, директор
<https://orcid.org/0000-0001-9003-0315>

Стичинський Є. В.^{1,2}, доктор філософії, консультант відділу
технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів¹, директор²
<https://orcid.org/0000-0001-9477-6296>

Скорик К. Д.¹, к.т.н., доцент, п.н.с.
відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів
<https://orcid.org/0009-0007-3815-7125>

Шейко Т. В.¹, к.т.н., старша дослідниця, п.н.с.
відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

Анісімова О. М.^{1,3}, аспірантка, провідна інженерка
<https://orcid.org/0000-0002-8459-1631>

¹Інститут продовольчих ресурсів НААН України, м. Київ, Україна

²ТОВ «Фабрика ФІЛКОН», Київ, Україна

³ТОВ «НВП «Електрогазохім», м. Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2025-25-04>

Предмет. Актуальним і важливим напрямком оцінки ефективності технологічного процесів цукрового виробництва є аналіз дисперсного складу часточок карбонізованих суспензій. Так, як наявність у фільтрованих соках дрібнодисперсних часточок твердої фази спричиняє зниження якості і виходу цукру. **Мета.** Метою роботи є встановлення взаємозв'язків з дисперсністю часточок карбонізованих суспензій і отриманих з них напівпродуктів (фільтрати декантати), а також пропозиції щодо нормативних значень дисперсності цих суспензій. **Методи.** Для визначення розмірів часточок (дисперсності) карбонізованих суспензій і фільтрованих напівпродуктів застосовували метод лазерної дифрактометрії. Визначення каламутності (кількісної оцінки вмісту часточок твердої фази) суспензій і напівпродуктів цукрового виробництва у одиницях мг/дм³ здійснювали за допомогою сучасного портативного турбідиметр AQ4500 (Orion, США). **Результати.** Проведено узагальнення існуючих даних розмірів часточок карбонізованих суспензій. У виробничих умовах одинадцяти цукрових заводів України досліджено дисперсність часточок карбонізованих суспензій до та після їх розділення, а також визначено каламутність цих суспензій і отриманих з них декантатів та фільтратів. Виявлено збільшення розміру часточок твердої фази у фільтратах карбонізованих соків порівняно з нефільтрованою суспензією, що спричинено дрібнодисперсними часточки твердої фази шару осаду, які частково проходять через фільтрувальну тканину, агрегуються (укрупнюються) на зворотному її боці, і потім потрапляють у фільтрат. Наведені пропозиції щодо орієнтовних діапазонів нормативних розмірів часточок для карбонізованих суспензій цукрового виробництва. **Сфера застосування результатів.** Цукрові підприємства одержать дані щодо об'єктивних значень дисперсності часточок карбонізованих суспензій до та після їх розділення, а також рекомендовані значення нормативних показників розмірів частинок, що забезпечують ефективність технологічного процесу розділення суспензій.

Ключові слова: сік першої карбонізації, сік другої карбонізації, декантат, фільтрат, суспензія, дисперсність, каламутність, цукор

DISPERSION COMPOSITION OF CARBONIZED SUSPENSION PARTICLES AND THEIR SEPARATION PRODUCTS IN SUGAR PRODUCTION AND ITS STANDARD VALUES

*Serhii Tkachenko*¹, PhD, Engineering, Senior Researcher, Senior Researcher of Department of Sugar Technology, Sugar-containing Products and Ingredients
<https://orcid.org/0000-0003-2897-8978>

*Liubomyr Khomichak*¹, D-r of Sc., Engineering, Professor, Corresponding member of the NAAS, Director of the IFR of the NAAS
<https://orcid.org/0000-0001-9003-0315>

Ievgen Stychynskyi^{1,2}, PhD, Advisor of Department of Sugar Technology, Sugar-containing Products and Ingredients¹, Director²
<https://orcid.org/0000-0001-9477-6296>

*Kostiantyn Skoryk*¹, PhD, Engineering, Associate Professor, Leading Researcher of Department of Sugar Technology, Sugar-containing Products and Ingredients
<https://orcid.org/0009-0007-3815-7125>

*Tamila Sheiko*¹, PhD, Engineering, Senior Researcher, Leading Researcher of Department of Sugar Technology, Sugar-containing Products and Ingredients
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

Olena Anisimova^{1,3}, postgraduate, Leading process engineer
<https://orcid.org/0000-0002-8459-1631>

¹Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine

²LLC «Fabrica Filcon», Kyiv, Ukraine

³LLC «Research and Production Enterprise «Electrogasochem», Kyiv, Ukraine

Subject. Analysis of the dispersion composition of carbonized suspensions is an important and relevant area of assessment of the efficiency of sugar production processes. This is because the presence of finely dispersed solid phase particles in filtered juices leads to a decrease in sugar quality and yield.

Purpose. The purpose of the work is to establish correlations between the particle size distribution of carbonized suspensions and the intermediate products obtained from them (filtrates and decantates), as well as to propose normative values for the particle size distribution of these suspensions. **Methods.** Laser diffraction was used to determine the particle size (dispersibility) of carbonized suspensions and filtered intermediate products. The turbidity (quantitative assessment of the solid phase particle content) of suspensions and intermediate products of sugar production in mg/dm³ units was determined using a modern portable turbidimeter AQ4500 (Orion, USA). **Results.** A summary was carried out of existing data on the particle sizes of carbonated suspensions. Under production conditions at eleven sugar factories in Ukraine, the dispersibility of carbonated suspension particles was studied before and after their separation. Also turbidity was determined of these suspensions, decantates and filtrates obtained from them. An increase in size of solid phase particles in carbonated juice filtrates was found compared to unfiltered suspension. It was caused by finely dispersed solid phase particles of the sediment layer, which partially pass through the filter cloth, aggregate (enlarge) on its reverse side, and then enter the filtrate. Recommendations are given for the approximate ranges of standard particle sizes for carbonated suspensions in sugar production. **Scope of results.** Sugar enterprises will receive data on the objective values of the particle size distribution of carbonized suspensions before and after their separation, as well as recommended values for the normative indices of particle sizes that ensure the efficiency of the technological process of suspensions separation.

Key words: first carbonatation juice, second carbonatation juice, decantate, filtrate, suspension, particle size, turbidity, sugar

Постановка проблеми. Важливою характеристикою різних суспензій та розчинів є розмір часточок, саме за цим показником визначаються технологічні властивості цих суспензій, технологічні режими їх отримання і властивості кінцевих продуктів та напівпродуктів.

У цукровій промисловості широко використовуються різні допоміжні матеріали та суспензії, які утворюються у виробництві в ході технологічного процесу, і вони можуть мати розміри часточок від 0,1 до 500 мкм [1, 2]. Слід зауважити, що технологічно не можливо отримати часточки лише одного розміру. Тому для характеристики таких суспензій

користуються дисперсним складом часточок.

Оцінювання дисперсного складу відбувається за кількісним співвідношенням структурних елементів твердої фази (часточок) різного розміру [3]. За результатами такого оцінювання можна зробити висновки про дисперсність різних суспензій, емульсій і порошкоподібних матеріалів. Разом з тим, за допомогою дисперсного складу можна класифікувати часточки за структурною характеристикою та походженням, а також оцінювати їх певні фізичні та хімічні властивості [3].

Розмір часточок характеризується здебільшого їх діаметром. За цією величиною однозначно можна охарактеризувати лише часточки сферичної форми, за неправильної форми часточки використовують поняття еквівалентного діаметра [1, 3].

Під час очищення дифузійного соку за додавання вапняного молока відбувається коагуляція високомолекулярних нецукрів з осадженням нерозчинних чи важкорозчинних комплексів. У наступних етапах очищення дифузійного соку, а саме на етапі карбонізації сатураційним газом, осаджується надлишок гідроксиду кальцію з утворенням карбонату кальцію [4]. Суспензії які утворюються мають назву карбонізованих (сік першої та другої карбонізації), а осад, що відділяється від них називають карбонізаційним осадом (або ж дефекатом).

Карбонізаційний осад є твердою фазою з досить складною полідисперсною системою, яка містить часточки різних розмірів від 0,1...50 мкм [1, 5–15]. Середній розмір часточок осаду залежить від різних факторів, у тому числі і від температури процесу карбонізації та концентрації іонів кальцію в розчині. З підвищенням температури збільшується середній розмір часток CaCO_3 [1, 10]. За переробки сировини низької якості знижується якість всіх напівпродуктів у виробництві та підвищується дисперсність часточок карбонізаційного осаду [6, 16].

Переважає більшість часточок є агрегатами, що складаються з карбонату кальцію і нецукрів, які адсорбуються на них та частинок (коагуляту) осаджених на попередньому вапнуванні високомолекулярних сполук [1, 4]. Також зустрічаються дрібні часточки CaCO_3 , що знаходяться окремо у суспензії. Із джерел [12, 14] відомо, що під час очищення дифузійного соку часточки розміром 0,45–1,00 мкм і менше є стійкими, залишаються в розчині та можуть переходити навіть у готовий продукт.

Важливими факторами за фільтрування цукрових соків є коефіцієнт об'ємного стиснення та питомий опір шару фільтрувального осаду карбонізованої суспензії [1, 17]. Також важливою є дисперсність часточок суспензій, що розділяються [5]. Зокрема, якщо розподіл часточок за розмірами у фільтраті аналогічний розподілу часточок суспензії нефільтрованого соку, то можна припустити, що пори фільтрувальної тканини збільшились і з'явилися отвори, або фільтрувальні елементи дуже щільно закріплені до фільтрувальної рамки [9]. Якщо ж у фільтраті розподіл часточок за розмірами вказує на менший середній розмір, то можна припустити, що використовується фільтрувальна тканина з надто великими розмірами пор або недостатня рециркуляція соку перед входженням в основний потік [9].

На показник питомого опору фільтрувального шару значно впливають дрібні часточки і це призводить до низької продуктивності фільтрації карбонізованих соків [1, 5, 9]. Наявність нерозчинних часточок карбонату кальцію в соку, що поступає на випарювання, підвищує ймовірність відкладання накипу на перших корпусах випарної установки [9]. Наявність нерозчинних часточок у соках значно знижує ефективність будь-яких засобів з антинакипним ефектом [9].

Ще одним з негативних факторів наявності нерозчинних часточок карбонату кальцію є їх проходження через станцію фільтрації соку другої карбонізації, що дає додаткове навантаження на фільтри сиропу, і призводить до зниження продуктивності роботи обладнання та погіршення якості отриманого фільтрату [9, 11, 12, 14].

Окрім вищенаведеного явного впливу часточок на якість сиропу, значно підвищується каламутність, яка спричинена дрібнодисперсними часточками. Це також негативно впливає на технологічний процес і призводить до зниження швидкості кристалізації цукрози та

супроводжується зміною морфології кристалів і зниження виходу цукру з погіршенням його якості [18].

Тому варто звертати увагу на ці фактори за фільтрування соку другої карбонізації, таким чином можна знизити ймовірність відкладення накипу на випарній установці і уникнути складнощів фільтрації сиропу у технологічному процесі виробництва [9].

Карбонізовані суспензії з крупними і однорідними за середнім розміром часточками, які утворюються в ході технологічних процесів, забезпечують якісне фільтрування [5, 9] та сприяють зниженню витрат вапна і палива на його отримання. Це також приведе до зниження викидів відпрацьованого сатураційного газу в атмосферу та дозволить мінімізувати кількість утвореного карбонізаційного осаду [7, 8].

Саме такий технологічний підхід до економічного та екологічного впливів дає в цілому ефект декарбонізації цукрової галузі і наближає виробництво цукру до вуглецево-нейтрального [20–22].

В науковій роботі [8] автори дослідили дисперсність часточок карбонізаційного осаду отриманого у технологічному процесі цукрового виробництва із застосуванням методу аналізу зображень. Було використано карбонізаційний осад після вивантаження з фільтр-пресів; карбонізаційний осад соку після першої карбонізації; карбонізаційний осад соку після першої карбонізації з додавання флокулянта та карбонізаційний осад згущеної суспензії, який надходить із фільтрів-згущувачів.

Дані отримані авторами [8] показують, що більшість часточок соку першої карбонізації має розмір 16,2...18,2 мкм. За додавання флокулянта до соку першої карбонізації розмір часточок збільшується у 2,9...3,3 рази. Часточки згущеної суспензії після фільтрів згущувачів мають розмір 13,0 мкм, а розмір часточок осаду з фільтр-преса у 1,7 разів більше порівняно із часточками згущеної суспензії.

Авторами [8] було відмічено необхідність подальших досліджень і вимірювань задля розширення діапазону даних дисперсного складу різних карбонізованих суспензій.

Однак метод визначення дисперсності часточок за аналізом зображень має ряд недоліків. Зокрема є обмеженою кількість часточок, властивості яких можна досліджувати одночасно. Відсутня можливість отримати безпосередньо розмір міцели, яка утворена часточкою при взаємодії з розчином (наявність адсорбційного і дифузного шару) [23, 24]. Так як за підготовки і препарування зразку для мікроскопіювання може відбутись його висихання на предметному склі, тощо. Серед недоліків цього методу відмічають: тривалість вимірювання та необхідність обробляти велику вибірку даних, що є трудомістким процесом. Тому завдання об'єктивного опису статистичного розподілу полідисперсного зразка за аналізом зображень є складним.

Альтернативним методом є оптичний метод лазерної дифрактометрії, що дозволяє нівелювати всі вище наведені недоліки [2, 3, 15].

З огляду на вищевикладене та використовуючи метод лазерної дифрактометрії нами було досліджено дисперсний склад карбонізованих суспензій цукрового виробництва і отриманих з них напівпродуктів. Вибірка зразків була відібрана з одинадцяти цукрових заводів України. Також для оцінки ефективності розділення суспензії визначали каламутність отриманих напівпродуктів.

Метою дослідження було встановлення взаємозв'язків з дисперсністю часточок карбонізованих суспензій і отриманих з них напівпродуктів (фільтрати декантати) на різному обладнанні для їх розділення (відстійники, фільтри), а також встановлення нормативних значень дисперсності цих суспензій.

Матеріали та методи. Матеріалами для досліджень були: сік першої і другої карбонізації; декантати першої і другої карбонізації; фільтрати першої і другої карбонізації після основного і контрольного фільтрування.

Для проведення наукових експериментів карбонізовані суспензії відбирали безпосередньо на цукрових заводах України з відповідної технологічної дільниці відбору проб.

Аналіз розміру часточок карбонізованих суспензій і фільтрованих напівпродуктів визначали за використання дифракційного лазерного аналізатора SALD-201V (SHIMADZU, Японія) [15, 25–27]. Карбонізовані суспензії, згущені карбонізовані суспензії для проведення досліджень додавали в кювету аналізатора SALD-201V згідно рекомендацій [26, 27].

Для кількісної оцінки вмісту часточок твердої фази (каламутності) суспензій і напівпродуктів цукрового виробництва у одиницях мг/дм³, застосовували сучасний портативний турбідиметр AQ4500 (Orion, США). Порівняння отриманих даних виконували згідно рекомендацій [15, 28]. Згідно яких норми каламутності складають для: декантатів і фільтрованих соків першої карбонізації – 200...500 мг/дм³; декантатів і фільтрованих соків другої карбонізації – 70...100 мг/дм³.

Результати та обговорення.

У науковому експерименті було задіяно проби карбонізованих суспензій з 11 заводів України. Користуючись методами лазерної дифрактометрії і турбідиметрії, визначено дисперсний склад і каламутність карбонізованих суспензій до та після розділення. Узагальнені результати експериментальних досліджень наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Діапазони дисперсного складу і каламутності карбонізованих суспензій

Тип суспензії/осаду	Середній розмір часточок, мкм	Мінімальний розмір часточок, мкм	Максимальний розмір часточок, мкм	Найбільша кількість часточок розміром, мкм	Каламутність, мг/дм ³
Нефільтрований сік I карбонізації	8,20±0,41... 43,50±0,27	0,30±0,30... 4,90±0,28	39,80±0,41... 196,10±0,28	10,10±0,41... 66,10±0,27	1552,0±5,0...> 4000
Декантат I карбонізації	9,50±0,38... 256,80±0,10	0,60±0,52... 169,60±0,10	19,30±0,38... 350,00±0,49	16,70±0,38... 302,80±0,10	3,1±2,0... 37,6±2,0
Фільтрований сік I карбонізації	7,70±0,27... 31,50±0,71	0,60±0,26... 1,10±0,32	24,00±0,27... 350,00±0,71	8,70±0,41... 350,00±0,71	5,0±2,0... 208,0±2,0
Сік I карбонізації з контрольного фільтрування	13,20±0,41... 217,6±0,10	1,10±0,41... 146,70±0,10	66,10±0,41... 302,80±0,10	27,70±0,41... 262,00±0,10	11,7±2,0... 25,9±2,0
Нефільтрований сік II карбонізації	10,30±0,27... 86,20±0,37	0,60±0,27... 13,40±0,20	39,80±0,27... 302,80±0,37	11,60±0,27... 243,60±0,37	202,5±2,0... 3645,0±10,0
Декантат II карбонізації	15,60±0,28... 219,50±0,10	3,20±0,28... 136,50±0,10	39,80±0,28... 350,00±0,10	27,70±0,28... 243,60±0,10	11,9±2,0... 98,0±2,0
Фільтрований сік II карбонізації	2,50±0,10... 261,90±0,10	0,60±0,47... 157,80±0,07	3,40±0,04... 350,00±0,58	2,70±0,10... 350,00±0,58	2,2±2,0... 52,2±2,0
Сік II карбонізації з контрольного фільтрування	1,10±0,08... 229,10±0,07	0,10±0,33... 169,60±0,07	1,60±0,08... 350,00±0,29	1,10±0,08... 350,0±0,19	3,0±2,0... 17,5±2,0

Аналізуючи отримані дані, які занесені до табл. 1 можна відмітити, що нефільтрований сік першої карбонізації має часточки твердої фази з середнім розміром в діапазоні від 8,20 до 43,50 мкм, мінімальний розмір часточок, складає 0,30...4,90 мкм; максимальний – 39,80...196,00 мкм. Діапазон показника каламутності соку за цього складає 1552,0...> 4000 мг/дм³. Саме такий широкий діапазон розмірів часточок у нефільтрованих соках першої карбонізації на різних цукрових заводах вочевидь зумовлений застосуванням різноманітних технологічних прийомів і різною ефективністю попереднього очищення соків, а саме: ефективне проведення прогресивного попереднього вапнування (ПВ); рециркуляція нефільтрованого соку чи суспензії I карбонізації на ПВ; рециркуляція соку в карбонізаторах; використання додаткових реагентів; режиму карбонізації; застосування дозрівачів соку I карбонізації тощо.

Декантат соку першої карбонізації після відстійника (табл. 1) містить часточки твердої фази з середнім розміром в діапазоні від 9,50 до 256,80 мкм, мінімальний розмір часточок –

0,60...169,60 мкм, максимальний розмір – 19,30...350,0 мкм. За середнім розміром часточок це у 1,2-1,3 рази більше у порівнянні з нефільтрованим соком першої карбонізації. Збільшення розмірів дисперсної фази соку, пов'язано з процесами флокуляції, тобто об'єднання менших часточок у більш крупні флокули, що відбуваються у відстійнику. Каламутність соку за таких умов лежить в діапазоні 3,1...37,6 мг/дм³, що відповідає нормативам [15, 28].

Після фільтрування соку першої карбонізації (табл. 1) розмір часточок зменшується, а саме: середній розмір їх знаходиться в діапазоні 7,70...31,50 мкм; мінімальний розмір часточок, що проходять крізь тканину складає 0,60...1,10 мкм; максимальний – 24,00...350,00 мкм. Каламутність отриманого фільтрату від 5,0 до 208,0 мг/дм³, що у 1,6...5,5 рази більше порівняно з декантатом соку першої карбонізації, але цілком відповідає встановленим нормативам [15, 28]. Це вказує на більш ефективне розділення суспензії соку першої карбонізації із застосування відстійників ніж прямого фільтрування. Різна дисперсність фільтрованого соку першої карбонізації залежить в основному від типу фільтрувальної перегородки, обладнання, режиму фільтрування, що використовуються для розділення суспензії та ефективності проведення попередніх етапів очищення соку.

Після контрольного фільтрування соку першої карбонізації з відстійника (табл. 3) розмір наявних часточок у фільтраті дещо менший в порівнянні декантатом з відстійника, а саме; мінімальний розмір часточок, що проходять крізь тканину складає 1,10...146,70 мкм; максимальний – 66,10...302,8 мкм; середній розмір має діапазон 13,20...217,60 мкм. За цього каламутність фільтрованого декантату становить від 11,7 до 25,9 мг/дм³, що є відмінним показником і цілком відповідає встановленим нормативам [15, 28].

Нефільтрований сік другої карбонізації (табл. 1) має часточки розміром від 0,60...11,60 мкм до 39,80...302,80 мкм, за цього діапазон середнього розміру їх складає – 10,30...86,20 мкм. Сік має діапазон каламутності – 202,5...3645 мг/дм³. Різні значення дисперсності часточок твердої фази в основному зумовлені ефективністю проведення другої карбонізації, а саме: встановлення оптимальної лужності соку; додавання вапна перед другою карбонізацією; рециркуляції соку в карбонізаторах; використання додаткових реагентів і їх дозування; застосування дозрівачів соку II карбонізації та ефективності проведення попереднього етапу очищення соку, тощо.

Декантат другої карбонізації (табл. 1) на одному з цукрових заводів містить часточки від 3,2 до 39,8 мкм, за цього середній розмір часточок складає 15,60 мкм, що у 1,55 рази менше порівняно з середнім розміром часточок нефільтрованого соку другої карбонізації. Сік має каламутність від 98,0 мг/дм³, що знаходиться на верхній межі встановлених вимог [15, 28]. Така ситуація вказує на те, що на відстійнику залишається значна кількість дрібнодисперсних часточок у завислому стані, тому необхідно проводити заходи що укрупнення часточок і зменшення каламутності.

Сік другої карбонізації після відстійника з іншого заводу (табл. 1) має досить крупні часточки від 136,50 до 350,0 мкм, середній розмір часточок складає 219,50 мкм, що у 9,0 рази більше у порівнянні з нефільтрованим соком другої карбонізації. За цього каламутність складає 11,9 мг/дм³, що задовольняє вимоги [15, 28]. Збільшення розмірів дисперсної фази соку, пов'язано з процесами флокуляції [8, 29], що відбуваються у відстійнику, також це може бути наслідком високого вмісту солей кальцію.

Після фільтрування соку другої карбонізації (табл. 1) розмір часточок збільшується в порівнянні з нефільтрованим соком, а саме; діапазон середнього розміру їх складає – 2,50...261,90 мкм; мінімальний розмір часточок, що проходять крізь тканину складає 0,60...157,80 мкм; максимальний – 3,40...350,0 мкм. За цього суттєво знижується каламутність соку – 2,20...52,20 мг/дм³, що у 1,9...5,4 рази менше порівняно із декантатом соку другої карбонізації з відстійника і цілком відповідає встановленим нормативам для очищених соків [15, 28]. У цьому разі це вказує на більш ефективне застосування прямого фільтрування для основного розділення соку другої карбонізації ніж гравітаційних відстійників.

Фільтрується сік другої карбонізації дещо гірше, ніж сік першої карбонізації. Збільшення розміру часточок твердої фази у фільтрах карбонізованих соків порівняно з нефільтрованою суспензією, спричинено проникненням дрібнодисперсних часточок утвореного шару осаду через фільтрувальну тканину, їх укрупненням (агрегуванням) на зворотному її боці з подальшим потраплянням у фільтрат [30, 31].

Помітне зменшення дисперсності часточок твердої фази отримано за контрольного фільтрування соку другої карбонізації (табл. 1). У соку спостерігаються часточки розміром від 0,10...169,60 мкм до 1,60...350,0 мкм, діапазон середнього розмір їх складає – 1,10...229,1 мкм. Каламутність соку другої карбонізації після контрольного фільтрування становить $3,0 \pm 2,0 \dots 17,5 \pm 2,0$ мг/дм³, що цілком відповідає нормам [15, 28]. По максимальних значеннях це відповідно у 5,6 і 3,0 рази менше порівняно із соком після відстійника і фільтратом після основного фільтрування. Також це свідчить про ефективність і необхідність застосування контрольної фільтрації для отримання очищених соків високої якості.

Раніше в роботі [15] у якості нормативних показників розмірів часточок карбонізованих суспензій ми наводили відомі дані, а саме для: нефільтрованого соку I карбонізації – 10,0...40,0 мкм; нефільтрованого соку II карбонізації – 5,0...16,0 мкм.

Опираючись на дані, що отримані авторами [8], а також дані отримані нами безпосередню у виробничих умовах цукрових заводів України. Ми запропонували діапазони орієнтовних нормативних розмірів часточок карбонізованих суспензій, що наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Орієнтовні діапазони нормативних характеристик дисперсності часточок карбонізованих суспензій цукрового виробництва

Суспензія	Орієнтовний розмір часточок, мкм
Нефільтрований сік I карбонізації	5,0...40,0
Декантат соку I карбонізації	10,0...60,0
Фільтрований сік I карбонізації	5,0...25,0
Сік I карбонізації після контрольної фільтрації	5,0...15,0
Нефільтрований сік II карбонізації	2,0...40,0
Декантат соку II карбонізації	4,0...40,0
Фільтрований сік II карбонізації	2,0...10,0
Сік II карбонізації після контрольної фільтрації	2,0...5,0

Потрібно врахувати необхідність уникання у фільтрованих очищених соках часточок розміром менше 1,0 мкм, так як такі часточки будуть у вигляді домішок надходити на подальші технологічні операції та знижуватимуть якість сиропу і цукру, відповідно [4, 11, 12, 14, 18, 19]. Саме часточки розміром до 1,0 мкм складно відокремлюються на етапі фільтрування сиропів [11, 14], тому варто використовувати способи укрупнення часточок на попередніх етапах очищення [29, 32].

Висновки. Таким чином, збільшення розміру часточок фільтрованого соку першої і другої карбонізації та соків після контрольного фільтрування спричинено тим, що осад, який відкладається на поверхні фільтрувальної тканини, має в своєму складі дуже дрібнодисперсні часточки менше 1,0 мкм. Ці часточки можуть частково проходити через фільтрувальну тканину, укрупнюватись на зворотному її боці, а потім відриватися і потрапляти у сік. Це і зумовлює більший розмір часточок фільтрату. Така ситуація потребує корегування технологічного процесу отримання карбонізованих соків, а саме укрупнення їх часточок. На це буде впливати: раціональне дозування флокулянтів і допоміжних реагентів (сода, гідроксид натрію, свіжоутворений CaCO_3 , вапняне молоко); встановлення оптимальної лужності карбонізованих соків; використання типу і кількості повернень у вапнований сік та першу карбонізацію, тривалість «дозрівання зерен» CaCO_3 у карбонізованих соках тощо.

Отримані, нами дані також показують, що на різних цукрових заводах можна очікувати дуже різних показників дисперсності і каламутності, як до так і після розділення

карбонізованих суспензій. Розподіл частинок за розмірами не відповідає якійсь загальній закономірності для цукрових заводів, а складається з незалежних фракцій для кожного цукрового заводу окремо. Це вочевидь пов'язано: з різноманітними особливостями проведення технологічного процесу очищення дифузійного соку; наявності тих чи інших виробничих ситуацій, що можуть спричинити зниження якості отриманих суспензій; типом фільтрувальних перегородок і термінів їх експлуатації; обладнання яке застосовується для розділення карбонізованих суспензій на цукрових заводах.

Бібліографія

1. Пушанко Н. Н., Лагода В. А., Шурбований В. Н., Пушанко Н. Н., Хомічак Л. М., Запольский А. К. Теория и практика разделения суспензий в свеклосахарном производстве: монография., Кн. 1. Образование суспензий и их свойства. Киев: Изд-во "Сталь", 2017. 542 с.
2. Стичинський Є. В., Ткаченко С. В., Хомічак Л. М., Зайчук Л. П. Аналіз методів дослідження дисперсного складу частинок для суспензій проміжних продуктів цукрового виробництва. Продовольчі ресурси. 2023. 11, 20. Р. 130–140. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-20-13>
3. Wills B. A., Finch J. A. Chapter 4 – Particle Size Analysis. Editor(s): Barry A. Wills, James A. Finch, Wills' Mineral Processing Technology (Eighth Edition). Butterworth-Heinemann. 2016. Р. 91–107. ISBN 9780080970530. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00004-2>.
4. Van der Poel P.W., Schiweck H., Schwartz T. Sugar Technology (Beet and Cane Sugar Manufacture): 1 edition. Berlin, Germany: Published with support of the Beet Sugar Development Foundation Denver, USA, 1998. 1120 p.
5. Burroughs P., Wones S. The effect of particle size on Dorr first and second carbonatation filtration. Zuckerindustrie. 2001. 126 (10). Р. 820–824.
6. Burroughs, P., Wones S. The effect of frost damaged beet and other factors on Dorr 2nd carbonatation juice particle size distribution. International Sugar Journal. 2003. 105(1256). Р. 237–246.
7. Šárka E., Bubník Z., Hinkova A. Changes in particle size of carbonatation slurry during preliming observed by the image analysis method. Zuckerindustrie / Sugar industry. 2006. 131. Р. 551–557.
8. Šárka E., Bubník Z., Kadlec P., Veselá-Trilčová A. The particle size of carbonation mud, and possibilities for influencing it. Journal of Food Engineering. 2008. 87(1), Р. 45–50, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.023>.
9. Burroughs P. Juice decalcification and evaporator protection. Sugar Industry / Zuckerind. 2008. 133. Р. 441–445.
10. Šárka E., Bubník Z., Pour V. Carbonatation precipitate – origin, separation and uses. Sugar Industry / Zuckerind. 2015. 140. Р. 434–442. <https://doi.org/10.36961/si16618>.
11. Abdel-Rahman El-S., Flöter E. Reduction of turbidity of beet sugar solutions by mechanical and chemical treatment. International Journal of Food Engineering. 2015. 11 (1). Р. 41–49. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0178>.
12. Abdel-Rahman El-S., Floeter E. Physico-chemical characterization of turbidity-causing particles in beet sugar solutions. International Journal of Food Engineering. 2016. 12 (2). Р. 127–137. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0129>.
13. Uchimiya M. Roles of reversible and irreversible aggregation in sugar processing. Crit Rev Food Sci Nutr. 2017. 57 (6). Р. 1206–1214. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.976788>.
14. Muir B., Schöpf S., Meade Ci. Filtration of stored thick juice for the syrup campaign. Sugar Industry. 2019. 144 (9). Р. 522–528. <https://doi.org/10.36961/si23572>.
15. Хомічак Л. М., Ткаченко С. В., Шейко Т. В., Кузнєцова І. В., Джоган О. І., Зайчук Л. П. Практичний досвід та перспективи застосування аналізу розмірів частинок суспензій в технології цукробурякового виробництва. Продовольчі ресурси. 2020. № 14. С. 196–203. <https://doi.org/10.31073/foodresources2020-14-20>.
16. Antczak-Chrobot A., Wojtczak M. The impact of exopolysaccharides on the purification process – filtration, sedimentation and particle size distribution. Sugar Industry / Zuckerind. 2024. 149. Р. 116–121. <https://doi.org/10.36961/si30894>.
17. Воробьев Е. И., Аникеев Ю. В. Совершенствование фильтровальной техники пищевых производств. Киев: Урожай, 1989. 136 с.
18. Cavalcante C. S., Albuquerque F. M. Chapter 14 – The Sugar Production Process, Editor(s): Fernando Santos, Aluizio Borém, Celso Caldas, Sugarcane. Academic Press. 2015. Р. 285–310. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00014-1>.

19. Tkachenko S. V., Sheiko T. V., Anisimova O. M., Petrenko V. V., Skoryk K. D., Dzhohan O. I., Khomichak L. M., Kuznietsova I. V. Influence of dispersion of a new type whole crystals seed on crystallization process and sugar quality. *Journal of Crystal Growth* (Elsevier Publishing). 2024. V. 648. 127909. P. 1–14 <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2024.127909>.
20. CEFS position paper: the path to carbon neutrality by 2050 must be supported by solid legal and financial tools, p. 6. European Association of Sugar Manufacturers. Brussels. 07.09.2020. [Електронний ресурс]. (дата звернення 25.08.2025). Режим доступу: <https://cefs.org/wp-content/uploads/2020/09/CEFS-position-paper-on-carbon-neutrality.pdf>.
21. Kuo Li, Mingyue Zhao, Yingchun Li, Yutong He, Xue Han, Xin Ma, Fen Ma, Spatiotemporal Trends of the Carbon Footprint of Sugar Production in China. *Sustainable Production and Consumption*. 2024. Volume 46. P. 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.010>.
22. Bahamin Bazooyar, Ali Nabavi, Peter Clough, Edward J. Anthony, Vasilije Manovic, Towards decarbonisation of sugar refineries by calcium looping: Process integration, energy optimisation and technoeconomic assessment. *Energy Conversion and Management*. 2024. Volume 314. 118597. ISSN 0196-8904. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118597>.
23. Хомичак Л. М. Совершенствование известковоуглекислотной очистки сока на основе изучения электроповерхностных свойств карбоната кальция: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.05 «Технология сахаристых веществ» / Хомичак Любомир Михайлович. Киев: КТИПП. 1985. 191 с.
24. Vyerchenko L., Tkachenko S., Sheiko T., Kos T., Dzhohan O., Vasuliv V. The Study of Calcium Hydroxide Structure and its Physico-Chemical and Electrokinetic Properties in Sugar Production. *Chemistry & Chemical Technology*. 2019. 13. P. 477–481. <https://doi.org/10.23939/chcht13.04.477>.
25. SALD-201V Laser Diffraction Particle Size Analyzer. Режим доступу: https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_document_file/brochures/16881/c060e005.pdf.
26. Shimadzu-SALD-201V Instruction manual: Shimadzu Corporation, Japan. 2016.
27. Software for laser diffraction particle size analyzer WingSALD II. Режим доступу: <https://www.shimadzu.com/an/products/particle-size-analysis/particle-size-analysis-software/wingsald-ii/index.html>.
28. Ярчук М. М., Калініченко М. Ф., Чупахіна В. П. та ін. Правила ведення технологічного процесу виробництва цукру з цукрових буряків. Правила усталеної практики (ПУП) 15.83 37-106:2007. Київ: Видавництво ТОВ «Інформаційно-аналітичний центр «Цукор України», 2007. 420 с.
29. Резніченко Ю. М., Виговський В. Ю., Логвін В. М., Хомічак Л. М., Петриченко І. Б. Ефективність використання флокулянта в процесі вапнокарбонізації зі ступінчастим підвищенням р. Цукор України. 2007. № 5–6. С. 22–24.
30. Стичинський Є. В., Ткаченко С. В. Класифікація, будова і вимоги до фільтрувальних тканин для ефективного розділення суспензій цукрового виробництва. *Продовольчі ресурси*. 2024. 12 (22). С. 164–176. <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-22-17>.
31. Стичинський Є. В. Підвищення ефективності розділення суспензій цукрового виробництва шляхом удосконалення фільтрувальної тканини: дис. ... доктора філософії: 181 «Харчові технології» / Стичинський Євген Васильович. Київ: ПП НААН. 2024. 327 с.
32. Хомічак Л., Ткаченко С., Шейко Т., Титарчук В. Визначення швидкості фільтрування напівпродуктів цукрового виробництва. *Продовольчі ресурси*. 2016. 4(07). С. 117–24. <https://iprjournal.kyiv.ua/index.php/pr/article/view/266>.

References

1. Pushanko, N. N., Lagoda, V. A., Shurbovanii, V. N., Pushanko, N. N., Khomichak, L. M., Zapolskii, A. K. (2017). *Teoriya i praktika razdeleniya suspenzii v sveklosakharnom proizvodstve: monografiya.*, Kn. 1. Obrazovanie suspenzii i ikh svoistva. [Theory and practice of suspension separation in sugar-beet production: monograph., Book 1: Suspension formation and their properties]. Kiev: Publishing House "Steel". 542 p. [in Ukrainian].
2. Stychynskiy, Ye., Tkachenko, S., Khomichak, L., Zaichuk, L. (2023). Analysis of the methods of researching the dispersed composition of particles for suspensions of intermediate products of sugar production. *Food Resources*. 11(20). P. 130–140. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-20-13>.
3. Wills, B. A., Finch, J. A. (2016). Chapter 4 – Particle Size Analysis. Editor(s): Barry A. Wills, James A. Finch, Wills' Mineral Processing Technology (Eighth Edition). Butterworth-Heinemann. P. 91–107. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00004-2>
4. Van der Poel, P. W., Schiweck, H., Schwartz, T. (1998). *Sugar Technology* (Beet and Cane Sugar

Manufacture): 1 edition. Berlin, Germany: Published with support of the Beet Sugar Development Foundation Denver, USA. 1120 p.

5. Burroughs, P., Wones, S. (2001). The effect of particle size on Dorr first and second carbonatation filtration. *Zuckerindustrie*. 126(10). P. 820–824.

6. Burroughs, P., Wones, S. (2003). The effect of frost damaged beet and other factors on Dorr 2nd carbonatation juice particle size distribution. *International Sugar Journal*. 105 (1256). P. 237–246.

7. Šárka, E., Bubník, Z., Hinkova, A. (2006). Changes in particle size of carbonatation slurry during preliming observed by the image analysis method. *Zuckerindustrie / Sugar industry*. 131. P. 551–557.

8. Šárka, E., Bubník, Z., Kadlec, P., Veselá-Trilčová, A. (2008). The particle size of carbonation mud, and possibilities for influencing it. *Journal of Food Engineering*. 87 (1). P. 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.023>.

9. Burroughs, P. (2008). Juice decalcification and evaporator protection. *Sugar Industry / Zuckerind.* 133. P. 441–445.

10. Šárka E., Bubník Z., Pour V. (2015). Carbonatation precipitate - origin, separation and uses. *Sugar Industry / Zuckerind.* 140. P. 434–442. <https://doi.org/10.36961/si16618>.

11. Abdel-Rahman, El-S., Flöter, E. (2015). Reduction of turbidity of beet sugar solutions by mechanical and chemical treatment. *International Journal of Food Engineering*. 11 (1). P. 41–49. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0178>.

12. Abdel-Rahman, El-S., Floeter, E. (2016). Physico-chemical characterization of turbidity-causing particles in beet sugar solutions. *International Journal of Food Engineering*. 12 (2). P. 127–137. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0129>.

13. Uchimiya, M. (2017). Roles of reversible and irreversible aggregation in sugar processing. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 57 (6). P. 1206–1214. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.976788>.

14. Muir, B., Schöpf, S., Meade, Ci. (2019). Filtration of stored thick juice for the syrup campaign. *Sugar Industry*. 144 (9). P. 522–528. <https://doi.org/10.36961/si23572>.

15. Khomichak, L. M.; Tkachenko, S. V.; Sheiko, T. V.; Kuznietsova, I. V.; Dzhohan, O. I.; Zaichuk, L. P. (2020). Practical experience and application prospects of analysis of suspension particles sizes in the technology of the beet sugar production. *Food Resources*. 8 (14). P. 196–203. <https://doi.org/10.31073/foodresources2020-14-20>.

16. Antczak-Chrobot, A., Wojtczak, M. (2024). The impact of exopolysaccharides on the purification process – filtration, sedimentation and particle size distribution. *Sugar Industry / Zuckerind.* 149. P. 116–121. <https://doi.org/10.36961/si30894>.

17. Vorobev, Ye. I., Anikeev, Yu. V. (1989). Sovershenstvovanie filtrovalnoi tekhniki pishchevikh proizvodstv [Improvement of filtering technology of food production facilities]. Kiev: Urozhay. 136 p. [in Ukrainian].

18. Cavalcante, C. S., Albuquerque, F. M. (2015). Chapter 14 – The Sugar Production Process, Editor(s): Fernando Santos, Aluizio Borém, Celso Caldas, Sugarcane. Academic Press. P. 285–310. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00014-1>.

19. Tkachenko, S. V., Sheiko, T. V., Anisimova, O. M., Petrenko, V. V., Skoryk, K. D., Dzhohan, O. I., Khomichak, L. M., Kuznietsova, I. V. (2024). Influence of dispersion of a new type whole crystals seed on crystallization process and sugar quality. *Journal of Crystal Growth* (Elsevier Publishing). Volume 648. 127909. P. 1–14 <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2024.127909>.

20. CEFS position paper: the path to carbon neutrality by 2050 must be supported by solid legal and financial tools, p. 6. European Association of Sugar Manufacturers. Brussels. 07.09.2020. [Elektronnyi resurs]. (data zvernennia 25.08.2025). <https://cefs.org/wp-content/uploads/2020/09/CEFS-position-paper-on-carbon-neutrality.pdf>.

21. Kuo Li, Mingyue Zhao, Yingchun Li, Yutong He, Xue Han, Xin Ma, Fen Ma (2024) Spatiotemporal Trends of the Carbon Footprint of Sugar Production in China. *Sustainable Production and Consumption*. Volume 46. P. 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.010>.

22. Bahamin Bazoooyar, Ali Nabavi, Peter Clough, Edward J. Anthony, Vasilije Manovic, (2024) Towards decarbonisation of sugar refineries by calcium looping: Process integration, energy optimisation and technoeconomic assessment. *Energy Conversion and Management*. Volume 314. 118597. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118597>.

23. Khomichak, L. M. (1985). Sovershenstvovanie izvestkovougleglekislotoi ochistki soka na osnove izucheniya yelektropoverkhnostnikh svoistv karbonata kaltsiya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.18.05 «Tekhnologiya sakharistikh veshchestv» [Improvement of lime-carbonic acid purification of juice on the basis of the study of electrosurface properties of calcium carbonate: dissertation. Candidate of Technical

- Sciences: 05.18.05 "Technology of sugar substances".] / Khomichak Lyubomir Mikhailovich. Kiev: KTIFP. 191 p. [in Ukrainian].
24. Vyerchenko, L., Tkachenko, S., Sheiko, T., Kos, T., Dzhohan, O., Vasuliv, V. (2019). The Study of Calcium Hydroxide Structure and its Physico-Chemical and Electrokinetic Properties in Sugar Production. *Chemistry & Chemical Technology*. 13. P. 477–481. <https://doi.org/10.23939/chcht13.04.477>.
25. SALD-201V Laser Diffraction Particle Size Analyzer. https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_document_file/brochures/16881/c060e005.pdf.
26. Shimadzu-SALD-201V Instruction manual (2016): Shimadzu Corporation, Japan.
27. Software for laser diffraction particle size analyzer WingSALD II. <https://www.shimadzu.com/an/products/particle-size-analysis/particle-size-analysis-software/wingsald-ii/index.html>.
28. Yarchuk, M. M., Kalinichenko, M. F., Chupakhina, V. P. ta in. (2007). *Pravyla vedennia tekhnolohichnoho protsesu vyrobnytstva tsukru z tsukrovykh buriakiv. Pravyla ustalenoï praktyky PUP 15.83 37-106:2007 [Rules for the technological process of sugar production from sugar beet. Rules of established practice (REP) 15.83 37-106:2007]. TOV «Informatsiino-analitychnyi tsentr «Tsukor Ukrainy» [Sugar Ukraine Information and Analytical Center LLC]. Kyiv. 420 p. [in Ukrainian].*
29. Reznichenko, Yu. M., Vyhovskyi, V. Yu., Lohvin, V. M., Khomichak, L. M., Petrychenko, I. B. (2007). Efektyvnist vykorystannia flokulianta v protsesi vapnokarbonizatsii zi stupinchatym pidvyshchenniam pH [Efficiency of flocculant use in the process of lime carbonation with a stepwise increase in pH]. *Tsukor Ukrainy [Sugar of Ukraine]. № 5–6. P. 22–24. [in Ukrainian].*
30. Stychynskiy, Ye., Tkachenko S. (2024). Classification, structure and requirements for filter fabrics for efficient separation of sugar production suspensions. *Food Resources*. 12 (22). P. 164–176. <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-22-17>.
31. Stychynskiy, Ye. (2024). *Pidvyshchennia efektyvnosti rozdilennia suspenzii tsukrovoho vyrobnytstva shliakhom udoskonalennia filtruvalnoi tkanyny: dis. ... doktora filosofi: 181 «Kharchovi tekhnolohii» [Increasing the efficiency of separation of sugar production suspensions by improving the filter fabric: Ph. D. Thesis: 181 «Food technology»] / Stychynskiy Iyevgen Vasylovych. Kiev: IFR of NAAS. 327 p. [in Ukrainian].*
32. Khomichak, L. M., Tkachenko, S. V., Sheiko, T. V., Titarchuk, V. M. (2016). Determination of filtration rate of sugar semi-finished products. *Food Resources*. 4 (7). P. 131–138. <https://iprjournal.kyiv.ua/index.php/pr/article/view/266>.