

УДК 664:001.3

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ ЧАСТИНОК
ДЛЯ СУСПЕНЗІЙ ПРОМІЖНИХ ПРОДУКТІВ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА****Стичинський Є. В.**^{1,2}, аспірант, директор ТОВ «Фабрика ФІЛКОН»<https://orcid.org/0000-0001-9477-6296>**Ткаченко С. В.**¹, к.т.н. 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,

в. о. директора, завідувач відділу технології цукру,

цукровмісних продуктів та інгредієнтів

<https://orcid.org/0000-0001-9003-0315>**Зайчук Л. П.**¹, головний інженер лабораторії якості сировини

відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів

<https://orcid.org/0000-0001-9526-0275>¹Інститут продовольчих ресурсів НААН, Київ, Україна²ТОВ «Фабрика ФІЛКОН», Київ, Україна<https://doi.org/10.31073/foodresources2023-20-13>

Предмет. Дисперсний аналіз оцінюється кількісним співвідношенням частинок різного розміру. За результатами аналізу можна зробити висновки про дисперсність різних суспензій, емульсій і порошкоподібних матеріалів, а також провести їх класифікацію. **Мета.** Метою роботи було провести аналітичне оцінювання ефективності найбільш використовуваних методів дослідження дисперсного складу частинок суспензій проміжних продуктів цукрового виробництва. **Методи.** Аналіз та моніторингове дослідження проводилося з використанням методичних підходів, які застосовуються у вітчизняній та міжнародній практиці. **Результати.** Виконано аналіз та підбір найбільш придатних методів дослідження дисперсного складу частинок суспензій проміжних продуктів цукрового виробництва. Серед проаналізованих методів ситовий аналіз, седиментаційний аналіз, кондуктометричні методи, мікроскопічні методи, хроматографічні методи, акустичні методи, оптичні методи. Кожен із цих методів аналізу дисперсного складу ґрунтується на певному фізичному принципі та має особливі способи пробопідготовки. У розрахункові моделі закладено різні форми часток. З усіх вище згаданих методів для вимірювання розмірів частинок, найбільш ефективними можна вважати оптичні методи, що ґрунтуються на лазерній дифракції або малокутовому світлорозсіюванні – доволі поширені методи визначення розмірів частинок. За допомогою цього методу можна вимірювати розміри частинок у широкому діапазоні. Метод є доволі оперативним, оскільки вимірювання триває близько 20 с. **Сфера застосування результатів.** Застосування сучасного методу лазерного дисперсного аналізу дозволить досліджувати напівпродукти цукрового виробництва і допоміжні матеріали практично на всіх стадіях технологічного процесу очищення дифузійного соку.

Ключові слова: аналізатор, дисперсний аналіз, лазерна дифракція, суспензія, цукор.

ANALYSIS OF THE METHODS OF RESEARCHING THE DISPERSED COMPOSITION OF PARTICLES FOR SUSPENSIONS OF INTERMEDIATE PRODUCTS OF SUGAR PRODUCTION

Yevhenii Stychynskyi^{1,2}, Director, Postgraduate
<https://orcid.org/0000-0001-9477-6296>

Serhii Tkachenko¹, Ph.D., Engineering, Senior Research Fellow of Department of Sugar Technology, Sugar-Containing Products and Ingredients
<https://orcid.org/0000-0003-2897-8978>

Liubomyr Khomichak¹, D-r of Sc., Engineering, Professor, Corresponding Member of NAAS, Acting Director Head of the Department of Technology of Sugar, Sugar-Products and Ingredients
<https://orcid.org/0000-0001-9003-0315>

Liudmyla Zaichuk¹, Chief Engineer Laboratory for Quality of Raw Materials, Department of Sugar Technology, Sugar Products and Ingredients
<https://orcid.org/0000-0001-9526-0275>

¹Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine

²LLC "Fabrica Filcon", Kyiv, Ukraine

<https://doi.org/10.31073/foodresources2023-20-13>

Subject. Dispersion analysis is evaluated by the quantitative ratio of particles of different sizes. Based on the results of the analysis, it is possible to draw conclusions about the dispersion of various suspensions, emulsions and powdery materials, as well as to carry out their classification. **Purpose.** The purpose of the work was to conduct an analytical evaluation of the effectiveness of the most used methods of researching the dispersed composition of particles of suspensions of intermediate products of sugar production. **Methods.** The analysis and monitoring research was carried out using methodological approaches that are used in domestic and international practice. **Results.** The analysis and selection of the most suitable methods of researching the dispersed composition of particles of suspensions of intermediate products of sugar production was performed. Among the analyzed methods are sieve analysis, sedimentation analysis, conductometric methods, microscopic methods, chromatographic methods, acoustic methods, optical methods. Each of these methods of analysis of dispersed composition is based on a certain physical principle and has special methods of sample preparation. Different forms of particles are included in the calculation model. Of all the above-mentioned methods for measuring particle sizes, optical methods based on laser diffraction or small-angle light scattering can be considered the most effective – quite common methods for determining particle sizes. With this method, it is possible to measure particle sizes in a wide range. The method is quite operational, as the measurement takes about 20 seconds. **Scope of results.** The application of the modern method of laser dispersion analysis will allow to study semi-products of sugar production and auxiliary materials at almost all stages of the technological process of purification of raw juice.

Key words: analyzer, dispersion analysis, laser diffraction, suspension, sugar.

Постановка проблеми. Розмір – одна із найбільш важливих характеристик частинок різноманітних речовин та суспензій, оскільки здебільшого визначає їх технологічні властивості, режими їх отримання, а також кінцеві властивості напівпродуктів та продуктів. В цукровій промисловості є важливим контроль дисперсного складу частинок у нефільтрованих та фільтрованих напівпродуктах (сік I-ї, II-ї карбонізації, сиропи), що дає змогу оцінити вплив різноманітних хімічних реагентів та допоміжних речовин на технологічний процес та якість проведення фільтрування. За результатами дисперсного аналізу частинок можна оцінити ефективність використання різних фільтрувальних тканини та фільтраційних агентів (перліт, кізельгур тощо). Визначення розміру кристалів затравочних матеріалів для уварювання утфелю дасть інформацію, щодо їх вихідних якісних характеристик, оскільки розміри їхніх кристалів впливають на швидкість утворення та рівномірність кристалів цукру. Оцінка дисперсного складу частинок вапна та

вапняного молока у цукровій промисловості дасть змогу оцінити кристалічну структуру вапнякового каменю та режими його випалу.

Широко застосовувані в практиці цукрової промисловості допоміжні матеріали та отримувані суспензії можуть мати розміри частинок від 0,1 до 500 мкм. Варто зазначити, що жоден метод не дозволяє отримати частинки одного розміру. У зв'язку з цим для характеристики таких речовин зручно користуватись дисперсним складом – відносним умістом фракцій частинок різних розмірів.

Під розміром частинки зазвичай розуміють її діаметр. За допомогою цієї величини однозначно можна охарактеризувати лише частинки, що мають сферичну форму. Якщо частинка має неправильну форму, вводять поняття еквівалентного діаметра [1].

Для визначення середнього розміру частинок порошків застосовують методи, характеристики яких наведено в таблиці 1. [2]

Таблиця 1

Методи визначення розміру частинок

Метод	Розмір вимірюваних частинок, мкм
Інтегральні методи	
Сепараційні методи Ситовий аналіз: стандартні сита прецизійні сита Повітряно-сепараційний аналіз: гравітаційна класифікація відцентрова класифікація	понад 20 5...100 5...40 1...60
Седиментаційні методи Гравіметрична седиментація: метод накопичення осаду піпетковий метод	 0,5...70 1...60
Концентраційні методи Фотоседиментація Фотоседементация у відцентровому полі Метод поглинання рентгенівського випромінювання	 0,1...500 0,05...10 0,03...1000
Диференційні методи	
Розрахункові методи Кондуктометричний метод Лазерно-променевий метод Оптична мікроскопія Електронна мікроскопія	 0,4...1200 0,1...2000 1...100 0,004...1

Матеріали та методи. Аналіз та моніторингове дослідження проводилося з використанням методичних підходів, які застосовуються у вітчизняній та міжнародній практиці.

Результати та обговорення. Для того, щоб визначити геометричні розміри частинок, застосовують як прямі так і непрямі методи вимірювання. До прямих відносять ситовий аналіз, мокрий ситовий аналіз, оптичну мікроскопію, електронну просвітлювальну мікроскопію, електронну скануючу мікроскопію. До непрямих – седиментаційний аналіз в гравітаційному полі, седиментаційний аналіз в відцентровому полі, динамічне розсіювання світла (визначення коефіцієнту дифузії), лазерну дифракцію та акустичну спектроскопію. Кожен із цих методів має певну сферу застосування, обмежену матеріалами і розмірами вимірюваних частинок.

Ситовий аналіз. Ситовий аналіз характеризується дешевизною обладнання та можливістю застосування для крупних частинок. До недоліків цього аналізу слід віднести те, що процес вимірювання сухих порошкоподібних матеріалів, діаметр частинок яких менше 38 мкм, є доволі проблематичним. Частково цю проблему вирішує мокрий ситовий аналіз, однак він має дуже низьку результативність і є дуже трудомістким.

Сутність ситового аналізу полягає в розсіянні певної наважки порошку на наборі сит з розмірами отворів полотна сита від 1000 мкм до 40 мкм, розміщених у послідовності 1000, 900, 800, 500, 450, 315, 250, 180, 160, 125, 100, 80, 71, 63, 56 і 40 мкм. Середній розмір частинок порошоків кожної фракції, тобто порошку, що залишився на одному із сит, визначають за співвідношенням

$$d_{\text{сер}} = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (1)$$

де d_1 , d_2 – розмір частинок відповідно верхнього сита і сита, на якому затримався порошок.

При цьому фракції позначають так: d_1+d_2 . Наприклад, фракція порошку, що просіявся крізь сито з розміром частинок 180 мкм, але затримався на ситі з розміром частинок 160 мкм, позначають як –180+160, що відповідає номерам сит – 018+016 [2].

Незважаючи на свою простоту та поширеність метод ситового аналізу має кілька значних недоліків. Частинки розподіляються лише за двома вимірами, тобто циліндроподібні частинки однакових діаметрів, але різної довжини можуть бути класифіковані, як частинки однакових розмірів. Крім цього, проходження частинки довільної форми через сито випадковим чином залежить від рухів при пересіванні, від часу пересівання, а також від фізичних властивостей частинок (крихкість, твердість та форма частинок).

Седиментаційний аналіз. Седиментаційний аналіз – це традиційний метод гранулометричного аналізу. Залежно від ряду факторів, діапазон застосовності даного методу обмежується частиками розміром 2-50 мкм [3, 4]. Принцип вимірювання ґрунтується на використанні закону Стокса і реєстрації усталеної (граничної) швидкості осідання частинок [2, 5, 6]:

$$V = \frac{2}{900} \cdot R^2 \cdot \frac{(\gamma_c - \gamma_p) \cdot g}{\eta}, \quad (2)$$

$$R = \sqrt{\frac{900 \cdot \eta \cdot V}{2 \cdot (\gamma_c - \gamma_p) \cdot g}}, \quad (3)$$

де V – швидкість осадження, м/с; R – радіус частинок, м; γ_c, γ_p – густина відповідно матеріалу частинок і рідини, кг/м³; g – прискорення сили тяжіння, м/с²; η – в'язкість рідини, кг/(м·с).

Рівняння (1) чинне для частинок сферичної форми, що повільно осідають в рідині, яка знаходиться в резервуарі безмежних розмірів, та не взаємодіють з іншими силами. Для виконання цих умов експерименти повинні проводитися при низьких концентраціях частинок, а розміри частинок повинні знаходитися в визначених межах.

Для більшості речовин у водних розчинах розміри частинок, які можна виміряти за допомогою гравітаційно-седиментаційних методів, знаходяться в межах від 0,5 до 100 мкм, та в межах від 0,05 до 5 мкм для методів, в яких використовується відцентрова сила.

Седиментаційні методи широко використовуються вже протягом тривалого часу, але їм притаманні деякі суттєві обмеження. Так, наприклад, складно досягнути виконання умов ламінарного потоку як для дуже великих частинок, швидкості котрих є настільки великими, що ці частинки утворюють турбулентності, так і для дуже малих частинок, яким перешкоджає осідати броунівський рух молекул середовища. Якщо похибка діаметра Стокса не повинна перевищувати 3%, то осідання частинок повинно відбуватися при числах Рейнольдса, менших ніж 0,25 [7, 8].

Крім цього орієнтація несферичних частинок в розчині при низьких числах Рейнольдса є випадковою. Частинки осідають з швидкостями, що можуть змінюватися в широких межах. Із зростанням числа Рейнольдса частинки, що осідають, будуть прагнути поміняти свою орієнтацію так, щоб створити максимальний опір, і отже, будуть осідати з найменшою швидкістю. Таким чином для полідисперсної вибірки несферичних частинок буде мати місце зміщення в розподілі частинок за розмірами в сторону більших розмірів і отриманий розподіл частинок буде мати ширші межі, ніж реальний. Проте всі частинки, що аналізуються такими методами, повинні мати однакову та відому густину, інакше частинки різних розмірів можуть осідати з однаковою швидкістю. Крім цих недоліків слід зазначити також, що при седиментаційному аналізі необхідні додаткові дослідження за піпетковим методом, методом седиментаційного балансу і ін., що є досить складно та вимагає тривалого часу.

Отже, недоліком методу седиментаційного аналізу є обмежений діапазон розмірів вимірюваних частинок, тривалий час осідання частинок, який буде залежати від їх розмірів, маси та густини середовища, що, у свою чергу, значно ускладнює повторення експерименту. Також цей метод не підходить для систем, де фракція має високе значення щільності – це обумовлено тим, що частинки будуть мати дуже високу швидкість осідання або якщо суміш складається з матеріалів різної густини. Метод дуже чутливий до зміни температури середовища, яка, у свою чергу, вносить значну похибку в результат вимірювання [5].

Кондуктометричні методи. Кондуктометричні методи ґрунтуються на залежності електропровідності гетерогенних середовищ від концентрації, ступеня дисперсності та співвідношення між електропровідностями частинок і середовища, в якому вони перебувають [8, 9].

Робота приладу, що працює за кондуктометричним методом, здійснюється у такий спосіб. Частинки перебувають у завислому стані в розчині електроліту і проходять через невеликий отвір. Два електроди створюють електричний струм у цьому отворі. Коли частка проходить через нього, вона заміщує власним об'ємом електроліт, збільшуючи опір в отворі. Створена пульсація прямо пропорційна до об'єму частки. Аналіз пульсацій дає змогу отримати розподіл завислих частинок за розміром [10]. Цей прилад визначає гранулометричний склад, а також концентрацію часток у зразку. Вимірювання на лічильнику охоплюють частки діаметром від 1,8 до 20,7 мкм [10, 11].

До недоліків цього методу можна віднести неможливість визначення справжньої форми частинок, неможливість визначення електричної та магнітної провідності порошкоподібних матеріалів. Крім цього, застосування цього методу ускладнене необхідністю підбору електроліту, провідність якого для досягнення найбільшої зміни опору при проходженні частинки через канал повинна бути в два рази меншою, ніж провідність самих частинок. Ця умова не може бути виконаною у більшості випадків, оскільки опір електроліту повинен бути або надто малим (провідні частинки), або навпаки – дуже великим (діелектричні частинки) [8, 9].

Мікроскопічні методи. Отримання зображення може бути здійснене шляхом оптичної мікроскопії (ОМ) або електронної мікроскопії (ЕМ). Залежно від енергії електронів та способу опрацювання інформації ЕМ може бути розділена на просвітлювальну та скануючу.

Оптична мікроскопія (ОМ) – метод вимірювання, оснований на візуалізації частинок. За допомогою цього методу можна вимірювати частинки від 1 мкм до 100 мкм, та навіть більше – діапазон вимірювання буде залежати від чутливості обладнання. Якщо використовувати мікроскопію разом з програмним забезпеченням для обробки зображення, можна досягти досить великої точності вимірювання [6].

Для отримання зображення за допомогою ОМ може використовуватися як розсіяне випромінювання, так і випромінювання, що пройшло крізь досліджуваний зразок. Зокрема для отримання зображення маленьких частинок можуть бути використані електронні

мікроскопи, принцип дії яких ґрунтується на використанні випромінювання, що пройшло крізь зразок. На практиці нижньою межею вимірювань для традиційної ОМ є приблизно 3 мкм. З розвитком близькозонної оптичної мікроскопії, в якій оптоволоконний зонд розташовується настільки близько до зразка, що світло взаємодіє із зразком до того, як дифракційні ефекти знизять роздільну здатність, вдалося досягнути субмікронних меж вимірювання [8].

Також для аналізу частинок розміром до 2 мкм застосовують такі прилади, як трансмісійні електронні мікроскопи (ТЕМ) та скануючі електронні мікроскопи (СЕМ), що надають інформацію про розміри, форму та морфологічні особливості.

Одним з сучасних ЕМ методів, що використовується для дослідження частинок, є метод растрової електронної мікроскопії з контрастом атомного числа (РЕМ). У цьому методі для сканування досліджуваного зразка використовується малий чутливий елемент ($\sim 2\text{\AA}$) [7]. Розсіяна інтенсивність випромінювача є пропорційною квадрату атомного числа досліджуваного елемента. Цьому методу притаманна висока роздільна здатність. Використовуючи цей метод, можна отримати інформацію про розташування атомів та хімічний склад зразків [8]. Метод передбачає аналіз РЕМ-зображень спеціально підготовлених поверхонь зразків. Основною відмінністю цього методу є те, що він дає змогу вирішити проблему одночасного опрацювання кількох різномасштабних зображень (до десяти) [10].

Проте класичні ТЕМ та СЕМ методики передбачають дуже складну і трудомістку процедуру підготовки зразків (усунення агломератів глинистих частинок). Нове покоління мікроскопів представлене скануючим зондовим мікроскопом (СЗМ), що відрізняється простотою процедури підготовки зразка та високою роздільною здатністю (від мікроскопічних до розмірів атома). Визначення дисперсного складу ґрунтується на вимірюванні діаметра та товщини часток; результати наведені у відсотках щодо маси чи кількості часток [10].

Основною перевагою мікроскопічних методів вимірювань стосовно інших методів вимірювань є те, що вони надають детальну інформацію про розміри, форму, структуру поверхні та деякі оптичні властивості окремих частинок в широкому діапазоні розмірів.

Основним недоліком цих методів є те, що кількість частинок, властивості яких можна досліджувати одночасно, є обмеженою. Тому завдання адекватного опису статистичного розподілу полідисперсного зразка є складним. У цілому, мікроскопічні методи здатні давати точну та вичерпну інформацію про розміри та форму частинок. До недоліків цього методу також відносять: тривалість вимірювання та необхідність обробляти велику вибірку даних, що робить цей процес трудомістким [8].

Хроматографічні методи. Хроматографічні методи призначені для дослідження сумішей та ґрунтується на розподілі компонентів цих сумішей між двома фазами – нерухомою та рухомою (елюент), що протікає крізь нерухому. При взаємодії з нерухомою фазою частинки суміші розподіляються у просторі відповідно до їх фізичних або хімічних властивостей, що так чи інакше пов'язані з їх розмірами. Розподілені частинки детектуються згодом за допомогою різноманітних методів. В загальному хроматографічні методи можна розділити на ексклюзійну хроматографію (ЕХ) і гідродинамічну хроматографію (ГДХ). ЕХ відома також як гель-проникаюча хроматографія (ГПХ). В цьому методі як нерухома фаза використовується стовпець, заповнений кульками гелю однорідної мікропористості. Частинки, що переносяться рухомою фазою, проходячи по стовпцю, розділяються залежно від їх розмірів. Більші частинки досягають дна першими, оскільки є занадто великими, щоб потрапити в мікропори, та переміщуються між кульками гелю. Менші частинки затримуються гелем залежно від об'єму пор, в які частинки можуть потрапити. Чим менші розміри рухомих частинок, тим в більший об'єм пор ці частинки здатні потрапити і тим довша затримка [8].

При проведенні ГДХ частинки розділяються за допомогою гідродинамічної взаємодії з потоком рідини (рухомою фазою). При русі рідини крізь вузький канал

швидкість рідини буде меншою біля стінок і більшою по центру каналу. Більші частинки через їх об'єм будуть зосереджені далі від стінок каналу, ніж менші і матимуть більшу швидкість відносно частинок менших розмірів. Практично існує два види ГДХ. В одному з них, де використовується стовпець, заповнений непористими бульбашками, гідродинамічна взаємодія виникає між частинками та криволінійною поверхнею. За допомогою цього виду ГДХ досліджуються частинки субмікронних розмірів (0,03–2 мкм). В іншому виді ГДХ як хроматографічний шлях використовується довгий капіляр. Гідродинамічна взаємодія виникає між стінками капіляра та частинками. Хроматографічні методи є більш придатними для лабораторних умов, ніж до умов виробництва. Крім цього, не слід забувати також про проблему хімічної нейтральності середовища відносно частинок, а також про те, що хроматографічними методами неможливо визначити електричну та магнітну проникність частинок [8].

Акустичні методи. Значна частина згаданих вище методів ґрунтується на використанні розчинів, але в деяких випадках необхідно, щоб класифікація частинок здійснювалась в природному середовищі (без використання розчинників), де динамічні процеси (агломерація, флокуляція та ін.) можуть відбуватися значно швидше. В інших випадках розведення є неприпустимим, оскільки воно здатне змінити саму систему. Оскільки звукові хвилі проходять через скупчення частинок, акустичні методи також можуть використовуватися для дослідження розмірів частинок при їх концентрації до 60% об'єму [7, 8].

Одним з різновидів акустичних методів є акустична спектроскопія. За допомогою цього методу можна визначити розміри частинок в межах 0,01–1000 мкм.

Метод ґрунтується на вимірюванні частотної залежності загасання звукових хвиль у діапазоні частот 1–150 МГц. Передача коливань крізь середовище з концентрованою суспензією здійснюється за допомогою ультразвукового перетворювача, інший ультразвуковий перетворювач приймає послаблені звукові хвилі. Послаблення звукових хвиль зумовлене частинками, які для звукових хвиль є порушенням неперервності середовища, та може бути розділене на наступні типи: захоплення енергії звукової хвилі, що спостерігається, коли розміри частинок є значно меншими за довжину хвиль, резонанс – коли розміри частинок є співрозмірними з довжиною хвиль, та розсіяння – коли розміри частинок значно перевищують довжину хвиль [8].

Іншим різновидом акустичних методів є електроакустичний спектральний аналіз (ЕСА). На відміну від акустичної спектроскопії, в ЕСА звукові хвилі генеруються внаслідок дії електричного поля високої частоти на колоїдну суспензію, що переміщує заряджені частинки. Вимірюючи амплітуди та фазові зсуви акустичних хвиль на різних частотах (типово від 1 МГц до 10 МГц), можна визначити динамічну рухомість частинки. У свою чергу, з динамічної рухливості частинок можна визначити дзета-потенціал частинок та розподіл частинок за розмірами, вважаючи при цьому, що дзета-потенціал усіх частинок є однаковим, а їх розподіл за розмірами підпорядковується відомому аналітичному співвідношенню. Основними обмеженнями цього методу є те, що частинки повинні бути заряджені, їх густина повинна суттєво відрізнятися від густини середовища, в якому вони знаходяться, та бути достатньо малими, щоб генерувати акустичні хвилі під впливом зовнішнього електромагнітного поля [8].

Основним недоліком акустичних методів є необхідність знати механічні, термодинамічні та кінетичні властивості системи, що досліджується, з похибкою, меншою за 5%. До цих параметрів відносяться густина, коефіцієнт поглинання звуку, коефіцієнт теплового розширення, теплопровідність, теплоємність та ін. Зміни хоча б одного з цих параметрів можуть призвести до значних змін у результаті вимірювань.

Таким чином, можна зробити висновок, що акустичні методи хоча і є цілком придатними для вимірювання розмірів частинок, але в багатьох випадках використовувати їх недоцільно з огляду на їх складність [8].

Оптичні методи. Оптичні методи ґрунтуються на визначенні характеристик дисперсності матеріалів шляхом вимірювання параметрів світла, розсіяного частинками. При цьому теоретичною основою для визначення функції розподілу розмірів частинок в першому наближенні є теорія Мі. Її використання стало можливим, якщо припустити, що відбувається однократне розсіювання. Тобто кожна частинка розсіює світло незалежно від інших. При цьому ми дотримуємося припущень, наведених, зокрема, в [12, 13].

Для здійснення вимірювань параметрів дисперсності матеріалів за допомогою оптичних методів, які ґрунтуються на ефектах розсіювання світла, необхідно, щоб частинки досліджуваного порошку знаходилися в зваженому стані. Цього можна досягнути двома шляхами: розташуванням гранул в хімічно нейтральному та оптично прозорому середовищі, густина якого приблизно рівна густині матеріалу частинок, або створенням газового потоку, в якому частинки знаходяться у зваженому стані. Перший варіант є більш прийнятним, оскільки було зроблено припущення про те, що в цьому випадку має місце лише однократне розсіювання світла [8].

Тіньовий метод – оптичний метод визначення дисперсного складу сухих порошків. Аналіз полягає в прямому вимірюванні розмірів частинок по їх тіні, яка утворюється при перетинанні тонкого світлового променя. За допомогою цього методу можна вимірювати частинки в діапазоні від 5 мкм до 300 мкм. Серед переваг цього методу слід відмітити те, що система не потребує калібрування за допомогою частинок відомих розмірів, охоплює досить широкий спектр вимірюваних частинок та його дешевизна. До недоліків можна віднести те, що дуже дрібнодисперсні частинки можуть пропускати через себе та заломлювати світловий промінь, що, у свою чергу, збільшуватиме похибку вимірювання [6].

Рентген-седиментаційний метод гранулометричного аналізу ґрунтується на принципі вимірювання густини седиментувальної дисперсії за поглинутими рентгенівськими променями з автоматичною реєстрацією результатів у вигляді інтегральної кривої мас-розподілу в діапазоні часток діаметром від 100 мкм (0,1 мм) і менше. Цей метод добре показує неперервну криву гранулометричного складу та виділяє особливості досліджуваного зразка; розділення проби за допомогою ультразвуку до оптимального виходу тонких фракцій, що забезпечує цілісність дисперсних елементів. Дані розподілу наводять у відсотках щодо маси. [10].

Серед оптичних методів інтенсивно розвивається метод лазерної дифракції або малокутового світлорозсіювання – доволі поширений метод визначення розмірів частинок. За допомогою цього методу можна вимірювати розміри частинок у доволі широкий діапазоні – від 0,1 мкм до 3 мм та навіть більше (при застосуванні додаткового обладнання). Метод лазерної дифракції або розсіювання ґрунтується на явищі кутового розподілу інтенсивності розсіяного світла часткою (картина розсіювання), яка залежить від розміру частинок. Якщо розсіювання походить від скупчення або групи частинок, інтенсивність розсіювання буде залежати від кількості частинок і їх оптичних властивостей [14]. Метод має велику надійність, а тривалість вимірювання є доволі короткою – близько 20 с. [6]

Зазначені методи аналізу дисперсного складу ґрунтуються на певному фізичному принципі. Кожен із цих методів має особливі способи пробопідготовки. У розрахункові моделі закладено різні форми часток тощо.

З усіх вище наведених методів для вимірювання розмірів частинок, найбільш ефективними можна вважати оптичні методи.

Методи аналізу розмірів частинок або дисперсного аналізу, що широко використовуються на практиці, не набули поширення в технологічному процесі цукробурякового виробництва, оскільки мають загальні і власні похибки, такі як похибка по масі частинок, коливання за визначення щільності частинок речовини, зміна температури, в'язкості і густини суспензії і т.д. Пріоритетними чинниками за визначення

розміру частинок має бути простота підготовки проби і швидкість проведення випробувань.

Спектр застосування лазерного дисперсного аналізу частинок у цукровому виробництві дуже широкий, це і аналіз соків I, II карбонізації, сиропів, осадів, суспензій, вапняного молока, матеріалів, що використовуються для створення наливного фільтрувального шару. Зокрема на етапах I та II карбонізації однією із умов якості проведення технологічного процесу є отримання однорідних частинок осаду з метою забезпечення гарних фільтраційних властивостей соків. Визначивши розмір частинок вапняного молока, можна встановити та контролювати режим випалу вапняку [17], а визначення розмірів частинок наливного матеріалу для фільтрування (перліт, кізельгур, діатоміт, тощо) дозволить підібрати дисперсний матеріал, що забезпечить оптимальне співвідношення між якісними показниками отриманого продукту та пропускнуою здатністю фільтрувальної перегородки.

Окрім цього, дисперсний аналіз частинок дасть змогу оцінити ефективність використання різноманітних фільтрувальних перегородок (фільтрувальних тканин, сит, нетканних матеріалів) порівнюючи дані розміру частинок у напівпродуктах до фільтрувальної перегородки та після неї та дію різноманітних флокулянтів та коагулянтів, щодо укрупнення частинок на етапах технологічного процесу очищення дифузійного соку [16].

Таким чином, застосування сучасного методу лазерного дисперсного аналізу дозволяє досліджувати напівпродукти цукрового виробництва і допоміжні матеріали практично на всіх стадіях технологічного процесу очищення дифузійного соку. Це дає змогу значно поглибити і розширити спектр показників контролю технологічного процесу виробництва цукру з метою удосконалення чи оптимізації виробничих процесів та оптимального підбору фільтрувальних тканин, що будуть найкраще відповідати поставленим вимогам.

Висновки. Виконано аналіз та підбір найбільш придатних методів дослідження дисперсного складу частинок суспензій проміжних продуктів цукрового виробництва. Серед проаналізованих методів ситовий аналіз, седиментаційний аналіз, кондуктометричні методи, мікроскопічні методи, хроматографічні методи, акустичні методи, оптичні методи. Зазначені методи аналізу дисперсного складу ґрунтуються на певному фізичному принципі. Кожен із цих методів має особливі способи пробопідготовки. У розрахунковій моделі закладено різні форми часток. З усіх вище наведених методів для вимірювання розмірів частинок, найбільш ефективними можна вважати оптичні методи.

Для визначення розмірів частинок лазерним дифрактометричним (оптичним) методом використовують прилади різних конструкцій. Застосування сучасного методу лазерного дисперсного аналізу дозволить досліджувати напівпродукти цукрового виробництва і допоміжні матеріали практично на всіх стадіях технологічного процесу очищення дифузійного соку.

Бібліографія

1. 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. P. 91-107. ISBN 9780080970530. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00004-2>.
2. Степанчук А. М. Основи отримання порошкових та композиційних матеріалів: метод. вказівки до викон. лабор. робіт для студ. студентів спеціальностей напряму підготовки 6.050403 – “Інженерне матеріалознавство”. Київ: НТУУ “КПІ”, 2010. 133 с.
3. Lambourne R., Strivens T.A. Paint and surface coatings: Theory and practice (2nd ed.); (Strivens T.A. Ed). Woodhead Publishing Ltd.. 1999. 784 p. ISBN 1 85573 348 X; ISBN-13: 978 1 85573 348 0
4. Allen T. Particle Size Measurement (5th ed.). Chapman & Hall. 1997. ISBN 0412 753502. P. 262–265.

5. Bergeret G., Gallezot P. Particle Size and Dispersion Measurements. Handbook of Heterogeneous Catalysis. 2. Wiley-VCH. 2008. P. 738-765. <https://doi.org/10.1002/9783527610044.hetcat0038>.
6. Погорілий В. К. Порівняльний аналіз методів визначення розмірів деревних частинок при обґрунтуванні вимог до очисника повітря. Матеріали III Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції "Напрями розвитку технологічних систем і логістики в АПВ". (Харків 22 квітня 2021 р). Харків: ХНТУСГ, 2021. С. 116-117.
7. Renliang X. Particle Characterization: Light Scattering Methods. Kluwer Academic Publishers, 2002. 416 p.
8. Голдак А. Аналіз методів визначення розмірів частинок порошкоподібних матеріалів. Методи та прилади контролю якості. 2006. № 16. С. 86-90.
9. Allen, T. The electrical sensing zone method of particle size distribution determination (the Coulter principle). In: Particle Size Measurement. Powder Technology. Springer, Dordrecht. 1990. p.p. 455-482. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0417-0_13.
10. Радзій В. Сучасні методи визначення гранулометричного складу ґрунтів. Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2013. № 44. С. 302-308. ISSN 2078-6441
11. Стадніченко С. М. Сучасні методи визначення гранулометричного складу осадових порід та особливості їх застосування. Зб. наук. праць Інституту геологічних наук НАН України. 2009. № 2. С. 152-161.
12. Leung Tsang, Jin Au Kong, Kung-Hau Ding. Scattering of Electromagnetic Waves: Theories and Applications. John Wiley & Sons. 2000. 417 p. <https://doi.org/10.1002/0471224286>.
13. Michael I., Mishchenko Larry D., Travis Andrew A. Laci. Scattering, Absorption, and emission of Light by Small Particles Revised electronic edition. New York. Goddard Institute for Space Studies. 2004. 445 p.
14. ISO 13320:2020 Particle size analysis – Laser diffraction methods. ISO. Geneva, 2020. 6 p.
15. Shimadzu-SALD-201V. Технічний опис та характеристика аналізатора. <https://www.shimadzu.com/an/powder/sald201v/201v.html>.
16. Ткаченко С. В., Шейко Т. В., Хомічак Л. М., Стичинський Є. В., Коротинський О. В. Дисперсний аналіз частинок суспензій для оптимізації технологічних процесів цукробурякового виробництва. Цукор України. 2018. №4 (146). С. 36- 40.
17. Гусарук Т. С. Технологічна оптимізація якості вапняного молока для підвищення ефекту очищення дифузійного соку : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.18.05 "Технологія цукристих речовин та продуктів бродіння". Київ. 2008. 22 с.

References

1. 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. ISBN 9780080970530. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00004-2>.
2. Stepanchuk, A. (2010). Osnovy otrymannia poroshkovykh ta kompozytsiynykh materialiv: metod.vkazivkydo vykon. labor. robit dlia stud. studentiv spetsialnostei napriam pidhotovky 6.050403 – "Inzhenerne materialoznavstvo" [Basics of obtaining powder and composite materials: method. Instructions for execution. labor works for students students majoring in the field of training 6.050403 – "Engineering materials science"]. Kyiv: NTUU "KPI". 133 p. [in Ukrainian].
3. Lambourne, R., Strivens, T.A. (Strivens T. A. Ed). (1999). Paint and surface coatings: Theory and practice (2nd ed.). Woodhead Publishing Ltd. 784 p. ISBN 1 85573 348 X; ISBN-13: 978 1 85573 348 0.
4. Allen, T. (1997). Particle Size Measurement (5th ed.). Chapman & Hall. ISBN 0 412 753502. P. 262- 265.
5. Bergeret, G., Gallezot, P. (2008). Particle Size and Dispersion Measurements. Handbook of Heterogeneous Catalysis. 2. Wiley-VCH. P. 738-765. <https://doi.org/10.1002/9783527610044.hetcat0038>.
6. Pohorilyi, V. (2021) Porivnialnyi analiz metodiv vyznachennia rozmiriv derevnykh chastynok pry obgruntuvanni vymoh do ochysnyka povitria. [Comparative analysis of methods for determining the size of wood particles when substantiating the requirements for an air purifier]. Materialy III Mizhnarodnoi naukoivo-praktychnoi internet-konferentsii "Napriamy rozvytku tekhnolohichnykh system i lohistyky v APV". [Materials of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference

"Directions of Development of Technological Systems and Logistics in APV"]. P. 116-117. (April 22, 2021 Kharkiv). [in Ukrainian].

7. Renliang, X. (2002). Particle Characterization: Light Scattering Methods. Kluwer Academic Publishers. 416 p.

8. Goldak, A. (2006). Analiz metodiv vyznachennia rozmiriv chastynok poroshkopodibnykh materialiv . Metody ta prylady kontroliu yakosti [Analysis of methods for determining the size of particles of powdery materials. Methods and devices for quality control]. №16. P. 86-90. [in Ukrainian].

9. Allen, T. (1990). The electrical sensing zone method of particle size distribution determination (the Coulter principle). In: Particle Size Measurement. Powder Technology. Springer, Dordrecht. p.p. 455-482. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0417-0_13

10. Radzii, V. (2013). Suchasni metody vyznachennia hranulometrychnoho skladu gruntiv [Modern methods of determining the granulometric composition of soils]. Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriiia heohrafichna. [Bulletin of Lviv University. The series is geographical]. №44. P. 302-308. [in Ukrainian].

11. Stadnichenko, S. M. (2009). Suchasni metody vyznachennia hranulometrychnoho skladu osadovykh porid ta osoblyvosti yikh zastosuvannia [Modern methods of determining the granulometric composition of sedimentary rocks and features of their application]. Zb. nauk. prats Instytutu heolohichnykh nauk NAN Ukrainy [Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine]. №25. P. 152-161. [in Ukrainian]

12. Leung Tsang, Jin Au Kong, Kung-Hau Ding. (2000). Scattering of Electromagnetic Waves: Theories and Applications. John Wiley & Sons. 417 p. <https://doi.org/10.1002/0471224286>.

13. Michael I., Mishchenko Larry D., Travis Andrew A. Lacis. (2004). Scattering, Absorption, and emission of Light by Small Particles Revised electronic edition. New York . Goddard Institute for Space Studies. 445 p.

14. ISO 13320:2020 Particle size analysis – Laser diffraction methods. ISO. Geneva, 2020. 6 p.

15. Shimadzu-SALD-201V. Tekhnichnyi opys ta kharakterystyka analizatora. [Technical description and characteristics of the analyzer]. URL: <https://www.shimadzu.com/an/powder/sald201v/201v.html>.

16. Tkachenko, S. V., Sheiko, T. V., Khomichak, L. M., Stychynskyi, Ye. V., Korotynskyi O. V. (2018). Dyspersnyi analiz chastynok suspensii dlia optymizatsii tekhnolohichnykh protsesiv tsukroburiakovoho vyrobnytstva. [Dispersion analysis of particles of suspensions for optimization of technological processes of sugar beet production]. Tsukor Ukrainy. [Tsukor Ukrainy]. №4(146). P. 36-40. [in Ukrainian].

17. Husaruk, T. S. (2008) Tekhnolohichna optymizatsiia yakosti vapnianoho moloka dlia pidvyshchennia efektu ochyshchennia dyfuziinoho soku : avtoref. dys. na здобuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.18.05 "Tekhnolohiia tsukrystykh rehovyn ta produktiv brodinnia" [Technological optimization of the quality of milk of lime to increase the effect of purification of diffusion juice: autoref. thesis for obtaining sciences. candidate degree technical Sciences: spec. 05.18.05 "Technology of sugary substances and fermentation products"]. Kyiv, 22 p. [in Ukrainian].