УДК 629.7; 629.3 https://doi.org/10.15407/itm2020.02.123

О. В. ОСАДЧИЙ, О. Л. УСЕНКО, М. В. ПИЛИПЕНКО, А. І. ПОПОВ

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ТВЕРДОГО МАТЕРІАЛУ ПІСЛЯ ЗДРІБНЮВАННЯ ЙОГО ЗА КАВІТАЦІЙНО-ІМПУЛЬСНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і
Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; office.itm@nas.gov.ua

В Інституті технічної механіки Національної академії наук і Державного комічного агентства розроблено технологію отримання дрібнодисперсних середовищ: тверда речовина + вода методом кавітаційно-імпульсної обробки твердих речовин. Оперативний аналіз впливу режимів роботи кавітаційно-імпульсної установки і її конструктивних параметрів на ефективність дроблення твердих часток і спектр їх розмірів є актуальною задачею. Метою статті є аналіз можливих способів і методів оперативного визначення розмірів частинок, вибір найбільш зручного способу для використання в лабораторних умовах і адаптація його до умов дослідження кавітаційно-імпульсної технології.

Споживання порошкоподібних речовин і їх сумішей набуває все більшого поширення. Їх потребують металургія, медицина, лакофарбова промисловість тощо. Конкуренція, що посилюється серед виробників найрізноманітнішої продукції, пред'являє все зростаючі вимоги до стабільності технологічних процесів їх виготовлення, що, в свою чергу, диктує зростання вимог до вірогідності даних про характеристики компонентів, які застосовуються. Одночасно з підвищенням вимог до складу дрібнодисперсних матеріалів ростуть вимоги до оперативності визначення цього складу. Це, зрозуміло, відноситься і до гранулометричного складу компонентів. Відомо, що гранулометричний склад порошків – найважливіший і часто визначальний фактор технологічності їх застосування. Розроблено нову технологію застосування ситового способу визначення складу водоемульсійних сумішей. Вона відрізняється простотою і надійністю виконання, потребує мінімальної підготовки обслуговуючого персоналу, має достатню точність. Крім того гранулометричний склад можна визначити двома способами: в залежності від ваги частини продукту яка залишилася на ситі або в залежності від ваги частини продукту, яка пройшла через сито.

Ключові слова: *гранулометричний склад, кондуктометричний метод, седиментаційний метод, метод лазерного сканування, ситовий метод, сита.*

В Институте технической механики Национальной академии наук и Государственного комического агентства разработана технология получения мелкодисперсных сред: твердое вещество + вода методом кавитационно-импульсной обработки твердых веществ. Оперативный анализ влияния режимов работы кавитационно-импульсной установки и ее конструктивных параметров на эффективность дробления твердых частиц и на спектр их размеров является актуальной задачей. Целью статьи является анализ возможных способов и методов оперативного определения размеров частиц, выбор наиболее удобного способа для использования в лабораторных условиях и адаптация его к условиям исследования кавитационно-импульсной технологии.

Потребление порошкообразных веществ и их смесей приобретает все большее распространение. В них нуждается металлургия, медицина, лакокрасочная промышленность и т. д. Усиливающаяся конкуренция среди производителей самой разнообразной продукции предъявляет все возрастающие требования к достоверности технологических процессов их изготовления, что, в свою очередь, диктует возрастание требований к достоверности данных о характеристиках применяемых компонентов. Одновременно с повышением требований к составу мелкодисперсных материалов растут требования к оперативности определения этого состава. Это, разумеется, относится и к гранулометрическому составу компонентов. Известно, что гранулометрический состав порошков – важнейший и часто определяющий фактор технологичности их применения. Разработана новая технология применения ситового способа для определения состава смесей. Она отличается простотою и надежностью исполнения, требует минимальной подготовки обслуживающего персонала, имеет достаточную точность. Кроме того, гранулометрический состав можно определить двумя путями: в зависимости от веса части продукта, которая осталась на сите или в зависимости от веса части продукта, которая прошла через сито.

Ключевые слова: *гранулометрический состав, кондуктометрический метод, седиментационный метод, метод лазерного сканирования, ситовой метод, сита.*

The Institute of technical mechanics of the National Academy of Sciences has developed technology for obtaining fine-dispersed media: solid + water method of cavitation pulse processing of solids. Timely and objective analysis of influence of modes of cavitation pulse plant and its design parameters on the crushing efficiency of the solid particles and the spectrum of their sizes is an urgent task. The purpose of this article is to analyze the possible ways and methods for rapid determination of the particle size, the choice of the most convenient way for use in our environment and adapting it to the conditions of the researches of cavitational - pulse technology.

Consumption of powders and their mixtures is becoming more common. Need them metallurgy, medicine, paint industry etc. Increasing competition among manufacturers of various products makes increasing demands on the stability of technological processes of their production, which in turn dictates the increase of requirements to reliability of data on the characteristics of the components used. Simultaneously with the increase of requirements to quality of the composition of fine materials, growing demands on the quality and efficiency definition of this structure. It is clear, applies to the granulometric composition of the components. It is known that the particle size distribution of powders is a crucial and often determining factor in the manufacturability of their application.

Keywords: *undercarriage parts perspective of the freight car, the dynamic quality of the crew, the stability of motion, recommendations for improving VSC.*

В даний час до найбільш сучасних методів оцінки гранулометричного складу дрібнодисперсних матеріалів можуть бути віднесені: ситовий, мікроскопічний, кондуктометричний, седиментаційний і гріндометричний методи гранулометричного аналізу.

Мікроскопічний метод гранулометричного аналізу [1] проводиться за допомогою світлового (оптичного) мікроскопа, з двома ступенями збільшення – об'єктивом і окуляром, в якому загальне збільшення визначається як добуток збільшення об'єктива на збільшення окуляра. Основна перевага цього методу полягає в тому, що тільки з його допомогою можна виміряти поперечні розміри частинок, а до недоліків можна віднести велику трудомісткість методу і суб'єктивність в оцінці результатів різними операторами. Цей метод гранулометричного аналізу вимагає великих витрат часу і високої кваліфікації персоналу. Для отримання достовірних результатів мікроскопічного аналізу необхідно велике число частинок, підрахування при визначенні складу порошку. Крім того, даний метод підходить тільки для сухих сумішей. Застосування його для водоемульсійних сумішей є практично неможливим.

Кондуктометричний метод аналізу [2] засновано на визначенні зміни електропровідності (електричного опору) в момент проходження частинок через мікроотвір. Виникаючі при цьому імпульси прямо пропорційні обсягу частинок, що дозволяє зробити обробку цих імпульсів таким чином, щоб розділити частинки за кількістю або обсягом в залежності від їх діаметру. Кондуктометрія застосовується для швидкого визначення концентрації розчинів солей, кислот для контролю складу деяких промислових розчинів. Кондуктометрія включає прямі методи аналізу (використовувані, наприклад, в солемірах) і непрямі (наприклад, в газовому аналізі) із застосуванням постійного або змінного струму (низької та високої частоти), а також хронокондуктометрію, низькочастотне і високочастотне титрування.

Седиментаційний метод аналізу [3] засновано на різній швидкості осідання дрібних частинок в рідині або газі під дією гравітаційного поля або відцентрових сил. Використовується для дослідження дисперсності порошкових матеріалів з розміром частинок менше 40 мкм. При цьому методі гранулометричного аналізу в якості дисперсного середовища використовується, як правило, дистильована вода, яка є найбільш доступною і екологічно чистою речовиною. При вивченні швидкості осідання твердих частинок в рідині передбачається, що виміряна постійна швидкість осідання частинок в рідкому середовищі під дією сили тяжіння пов'язана з їх розміром законом Стокса. Існує кілька різновидів цього методу вивчення дисперсного складу. Однак найбільше поширення в останні роки отримав фотоелектричний метод, що полягає в тому, що при проходженні світлового потоку через шар осаджуваної суспензії величина абсорбції світла пропорційна сумарній поверхні частинок (концентрації частинок) і може бути виміряна за допомогою фотоелектричних датчиків. Із зарубіжних приладів цього типу слід зазначити ФОТОСдіментографи «Седіграф 5000» і «Седіграф 5500» фірми «Культронікс»

(Франція) «SKC-2000» фірми «CEICIH» (Японія) і «Analisette» фірми «Fritsch», що дозволяють здійснювати аналіз порошкоподібних матеріалів, крупність частинок в яких змінюється в діапазоні від 100 мкм до 0,1 мкм і від 500 мкм до 0,1 мкм відповідно.

Метод лазерного сканування [4]. Суть цього методу полягає в тому, що зразок порошку міститься в проточну кювету дослідницької установки. Порошок просвічується лазерним променем; потрапляючи в промінь світла, частинки починають розсіювати його, кутова залежність інтенсивності розсіяного світла залежить від розмірів частинок. Вимірювання інтенсивності розсіяного на різні кути світла проводиться за допомогою набору світлочутливих детекторів.

Найбільш придатними для гранулометричного аналізу дисперсних систем в лабораторних умовах є два способи: гріндометричний і ситовий способи.

Гріндометричний аналіз – самий оперативній аналіз гранулометричного аналізу дисперсних систем. Гріндометр є приладом для визначення розміру частинок і ступеня подрібнення різних матеріалів, таких як фарби, лаки, пігменти, наповнювачі, шоколад і тощо. Прилад складається з бруска і скребка. Брусок є блоком, виконаним із загартованої неіржавіючої сталі. У бруску зроблено один або кілька пазів. Залежно від глибини паза, прецизійний гріндометр розділяється на різні типорозміри. Паз має змінну глибину, яка змінюється від максимальної до мінімальної або нуля. Скребок потрібен для розмазування матеріалу. Градуювання може бути нанесено на верхній або бічній стороні блоку в мкм, одиницях Хегмана (Hegmana) або одиницях PCU. Зразок гріндометра сталевого наведено на рис. 1.

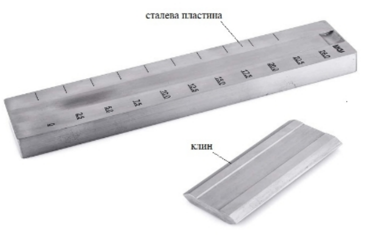

Рис. 1 – Гріндометр сталевий

Застосовують його в такий спосіб. У найбільш глибоку частину паза поміщають лакофарбовий матеріал і вручну з постійною швидкістю переміщують скребок від максимальної межі до нуля. Під впливом скребка частинки пігментованих лакофарбових матеріалів залишають поздовжні сліди або виступають над поверхнею фарби.

Ступінь перетирання оцінюють по глибині вимірювального клину на поздовжніх слідах. Як правило, ступінь перетирання найбільш поширених лакофарбових матеріалів становить (30 – 70) мкм. Спосіб дуже простий, надійний і оперативний.

Ситовий аналіз [5] – визначення процентного вмісту (за масою) фракцій в пилоподібному або зернистому матеріалі, що складається з частинок певного розміру. Аналіз проводять просіюванням навіски матеріалу крізь набір стандартних сит, що розрізняються розміром комірок. Комірки в ситах зазвичай квадратні або прямокутні. Зазвичай сита встановлюються одне на одному. Проба матеріалу, яка застосовується для визначення гранулометричного аналізу, засипається у верхнє сито. Чим нижче розташоване сито, тим менші в ньому комірки. Таким чином, частинки вихідного матеріалу розмірами меншими від розмірів комірок сита проходять до нижчого сита, а частинки більшого розміру затримуються на поверхні сита. Зазвичай застосовують не менше 5 і не більше 20 сит, а кількість фракцій завжди на одиницю більше кількості сит.

Як матеріали для виготовлення сит застосовують дріт (сталевий, мідний, латунний) або нитки (шовкові, капронові, нейлонові), з яких сплітають або прядуть сітки. Також зустрічаються сита з штампованих металевих решіток. Для відсіювання дуже дрібних порошків застосовують мікросита з нікелевої фольги, в яких квадратні комірки розширюються донизу (для запобігання забивання). Ситовий аналіз проводять ручним або механізованим способом, а також сухим або мокрим способом в залежності від розмірів і властивостей матеріалу і заданої точності аналізу.

Розділення проби на класи виконується ретельним просіюванням крізь набір сит з визначеними розмірами отворів. Ситовий аналіз застосовується для дослідження матеріалів крупністю від (150 – 200) мм до (0,074 мм – 0,043) мм. Гранулометричний склад матеріалу крупністю менше від 0,074 мм (0,043) мм звичайно визначається за допомогою седиментаційного аналізу. Для ситового аналізу застосовуються контрольні сита із металевих або синтетичних сіток з квадратними отворами. Набір сит для розсіву руд включає сита з розмірами отворів 60 мм; 40 мм; 30 мм; 20 мм; 10 мм; 5 мм; 2,5 мм; 1 мм; для розсіву вугілля – 150 мм; 100 мм; 50 мм; 25 мм; 13 мм; 6 мм; 3 мм; 1 мм; 0,5 мм. Для розсіву дрібних матеріалів використовують контрольні сита з розмірами комірок 1,6 мм; 1,25 мм; 0,8 мм; 0,56 мм; 0,4 мм; 0,28 мм; 0,2 мм; 0,14 мм; 0,1 мм; 0,071 мм; 0,045 мм, а для аналізу з підвищеною точністю – з розмірами комірок 0,071 мм; 0,063 мм; 0,56 мм; 0,05 мм; 0,045 мм. Вірогідність характеристики матеріалу за крупністю залежить від маси проби, способу її відбору і точності ситового аналізу. Залежно від потрібної точності аналізу та вологості матеріалу ситовий аналіз може виконуватися сухим або мокрим способом. При невисокій вологості матеріалу, а також якщо не потрібна особлива точність, застосовують сухий спосіб розсіву. При підвищеній вологості матеріалу крупністю (0 – 13) мм, що утруднює розсів сухим способом, пробу попередньо підсушують. Втрати маси розподіляють пропорційно виходам окремих класів, одержаних при розсіві. Крупні класи не сушать.

При наявності у пробі значної кількості дріб'язку і необхідності підвищеної точності аналізу пробу розсівають мокрим способом. Для цього пробу засипають на сито з найменшими розмірами комірок (наприклад, 0,074 мм) і відмивають шлам слабим струменем води або зануренням у бак з водою. Промивка триває до того часу, поки промивна вода не стане прозорою. Залишок на ситі висушують, зважують і за різницею мас визначають масу відмитого шламу. Висушений залишок розсівають сухим способом із застосуванням набору сит, що включає й найдрібніше сито, на якому відмивався шлам. Підрешітний продукт цього дрібного сита додають до одержаної раніше маси відмитого шламу.

Ситовий аналіз крупних матеріалів виконується на грохотах лабораторного типу. Розсів дрібних класів (крупністю до 6 мм) здійснюється на струшувачах різних конструкцій. Найбільше застосування знайшли механічні струшувачі, що надають набору сит кругові коливання у горизонтальній площині та струшування. Але механічні струшувачі поступово витісняються більш досконалими і простими електромагнітними вібраційними струшувачами. Ці струшувачі мають регульовану частоту і амплітуду коливань. Для мокрого розсіву на струшувачі матеріалів, що трудно просіюються, розроблені кришки, сита і піддони, до яких можна прикріпити форсунки-бризкала і підвести до них воду. Аналізатор складається з корпусу 11, усередині якого на кронштейнах 13 розташовані електродвигуни 12 і 14, а зверху на чотирьох пружинах 10 – опора 9 з двома стійками 7. Набір сит 6 з піддоном 8 та кришкою 5, установлений на опору 9, притискується траверсою 3 та закріплюється гвинтами 1, 2 і 4 (рис. 2).

Сита отримують коливання від двох дебалансних вібраторів, що розташовані на опорі 9 (у середині корпусу) та приводяться в обертання через клинопемінну передачу. Реле часу служить для автоматичного відключення аналізатора по закінченні тривалості розсіву.

Необхідна кількість сит (завантажується верхнє сито) обумовлюється технологічними вимогами. При мокрому розсіві в комплекті сит встановлюються кришка і піддон з штуцерами для подачі чистої води та відводу пульпи з нижнім класом досліджуваного матеріалу. Розсів матеріалу залежно від крупності і вологості продовжується (10 – 30+) хвилин (дрібний та вологий матеріал вимагає більшого часу розсіву). Розсів вважається закінченим, якщо при контрольному просіванні протягом 1 хв маса матеріалу, що пройшов крізь сито, не буде перевищувати 1 % від маси матеріалу, який залишився на ситі. Усі класи зважують і визначають їх вихід у відсотках. Втрати при розсіві, які не перевищують 1 % від маси вихідної проби, розподіляють пропорційно виходам кожного класу. Втрати більше 1 % не допускаються.

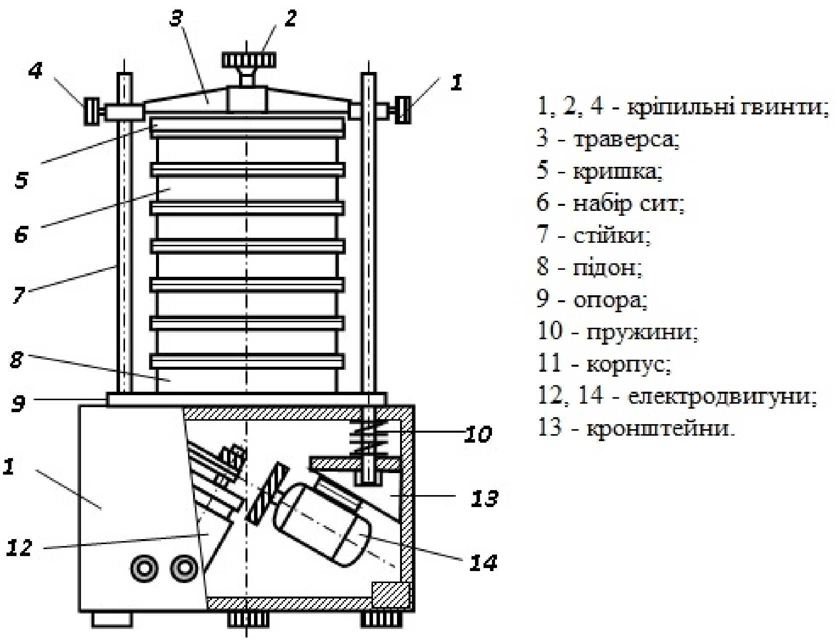

Рис. 2 – Схема ситового вібраційного аналізатора

Ситовий аналіз – один з методів визначення гранулометричного складу порошків і сипучих матеріалів – здійснюється шляхом механічного поділу матеріалу на фракції з частинками визначеної крупності. У ситовому аналізі використовують стандартні нормовані ткані, дротові і шовкові сітки з квадратними отворами (комірками), а також металеві решітні сітки з пробивними круглими, довгастими і трикутними отворами.

Кількість продукту, що не пройшов крізь комірки сита при проведенні аналізу, називається залишком на ситі. Ситовий аналіз дозволяє визначити крупність часток до 40 мкм (мінімальний розмір отворів застосовуваних сит). Дані ситового аналізу можна зобразити графічно, тобто за сумарним залишком матеріалу на ситах, починаючи із самих великих, при цьому на осі абсцис у масштабі відкладається розмір отворів сит, на яких проводився ситовий аналіз, у міліметрах, а на осі ординат – сумарний залишок на ситах у відсотках.

В Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного комічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) проводяться успішні роботи по отриманню водовугільного палива. Водовугільне паливо, отримане в інституті, являє собою суміш води до 30 % і частинок вугілля, до 90 % яких складають частинки від 50 мкм і менше. Наявність незначної кількості води унеможливлює способи сухого просівання. Не тільки водовугільне паливо, але й багато інших емульсій (наприклад лаки, фарби, продукція медичної і харчової промисловості тощо) за своїми фізико-хімічними властивостями подібні водовугільному паливу. Усі сучасні способи, які розглянуті вище, або коштовні, або малоточні, або вимагають висококваліфікованого персоналу і великої кількості часу. Таким чином організація дешевого, оперативного і точного аналізу є досить актуальною і цікавою задачею.

Тому в даному випадку для визначення гранулометричного складу продукту розроблено і застосовано спосіб паралельного промивання на ситах навішень продукту. Для промивань використовуються сита лабораторні марки СЛ розміром: 500 мкм, 400 мкм, 315 мкм, 250 мкм, 200 мкм, 160 мкм, 125 мкм, 100 мкм, 71 мкм, 50 мкм, 40 мкм.

Процес визначення гранулометричного складу виглядає так.

Для проведення промивання відбирається контрольна проба продукту у кількості, що забезпечує мокрий просів крізь кожне з наявних сит, плюс одна проба для визначення вологовмісту продукту тобто

$$G_{сум} = (n+1) \cdot G_{пр} , \qquad (1)$$

де $G_{пр}$ – маса навішення (проби) для просива на одному ситі; n – кількість використовуваних сит; $G_{сум}$ – сумарна маса навішень.

Кожне навішення продукту масою $G_{пр}$ треба промити струменем води на кожному із сит, що входять у набір для визначення гранулометричного стану. (Промивання продовжується доти, поки вода, що витікає із сита, не буде містити частинок продукту.) У результаті такої процедури промивання одержуємо залишки маси на ситах з комірками різного розміру. Ці залишки називають "повними залишками" – $R_{пз}$. За визначенням повний залишок на ситі даного розміру дорівнює масі продукту, що складається з частинок розміром більшим, ніж розмір отворів даного сита. Отримані на кожному із сит залишки висушуються. Після висушування проводиться зважування залишків із ситами. Остаточне (контрольне) зважування залишків проводиться після витягу їх із сит.

Для n сит будемо мати такі величини повних залишків $R_{пз}(i)$, де i = 1, 2….n. Тут $R_{пз}(i)$ – маса продукту на i-ому ситі. (Всі сита розташовуються в порядку убування отворів в ситі.). Тому що кількість сит обмежена, повний залишок на "віртуальному" ситі, яке розташовується після останнього сита, що має мінімальний розмір отворів, визначається відніманням з ваги продукту ваги повного залишку на останньому ситі.

Для визначення на даному ситі маси залишку продукту, частинки якого більші від розміру комірок даного сита, але менші від розміру комірок попереднього сита (так називані часткові залишки – $R_{чз}(i)$, де i – номер сита) з величини повного залишку для даного сита віднімається величина повного залишку для сусіднього сита з комірками більшого розміру, тобто

$$R_{чз}(i) = R_{пз}(i) - R_{пз}(i-1). \qquad (2)$$

Гранулометричний склад продукту характеризується відсотковим умістом часток продукту різного розміру, що визначається розподілом часткових залишків на кожному ситі на масу сухого продукту в навішенні, що виходить у процесі сушіння навішення продукту масою $G_{сп.}$.

Таким чином, приймаючи до уваги викладене вище, можна записати

$$R_{\%чз}(i) = \frac{R_{пз}(i) - R_{пз}(i-1)}{G_{сп}} \cdot 100\,\%, \qquad (3)$$

де $R_{\%чз}(i)$ – відсотковий уміст i-ої фракції в досліджуваному навішенні продукту диспергації за кавітаційно-імпульсною технологією.

Можна також характеризувати гранулометричний склад здрібненого продукту процентним відношенням кількості продукту, що пройшов крізь сито даного розміру, тобто

$$R_{\%пс}(i) = \frac{G_{сп} - R_{пз}(i)}{G_{сп}} \cdot 100\,\%, \qquad (4)$$

де $R_{\%пс}(i)$ – відсотковий уміст кількості продукту, що пройшов крізь сито i-ої фракції; $G_{сп}$ – маса навішення для просіва крізь сито i-ої фракції.

Процедура з обчислення фракційного складу продукту при наявності результатів експериментального просіву (промивання) виконується так. У таблицях 1 – 4 наведено результати гранулометричного аналізу водовугільного палива, яке отримано способом кавітаційно-імпульсного руйнування твердих частинок на установці КІУ-2018 в ІТМ НАНУ і ДКАУ. Для автоматизації процесу аналізу рекомендується використовувати Exsel зі складу Microsoft Office або будь-який його безкоштовний аналог, наприклад Open Office або йому подібний.

У Exsel від руки заповнюються перші два рядки таблиці (див. таблиці 1 – 4). У першому рядку розміщені по спадаючій розміри отворів сита. У другому рядку – повна маса висушеного продукту, який залишився на кожному ситі після промивання – $R_{пз}(i)$ в грамах.

1. Відбирається i + 1 проба (i – кількість сит, яке застосовується для просіювання).

2. i проб розкладаються по ситах. i + 1 – пробу треба покласти в окрему чашку з щільним дном.

3. Усі i проб треба промити струменем води на кожному із сит, які входять у набір для визначення гранулометричного стану. Промивання продовжується доти, поки вода, що витікає із сита, не буде прозорою.

4. Усі i +1 проби висушуються при температурі не більше 40 градусів за Цельсієм.

5. Від руки заповнюються перший і другий рядки таблиці.

6. У третьому рядку повна маса висушеного продукту, який залишився на кожному ситі після промивання – $R_{пз}(i)$ у відсотках від загальної маси висушеного вихідного продукту – $G_м$.

7. У четвертому рядку таблиці в кожну клітинку заноситься значення маси продукту у відсотках від загальної маси висушеного вихідного продукту – G, яка має розмір твердих частинок більший за діаметр отворів попереднього сита – $R(i)$. Він дорівнює $R_{чз}(i) = R_{пз}(i) – R_{пз}(i\text{-}1)$.

Заповнення третього і четвертого рядків таблиці можна легко автоматизувати методами Excel або їй подібними безкоштовними програмами.

У таблицях 1 – 4 і на рисунках 3 – 8 наведено результати визначення гранулометричного складу двох зразків водовугільного палива, отриманих за кавітаційно-імпульсною технологією, які розраховано за (3) та (4).

Табл. 1. Гранулометричний склад водовугільного палива, яке має склад 54 % вугілля і 46 % води, визначений за відсотковим умістом часткових залишків на кожному ситі.

мкм	500	400	315	250	200	160	125	100	71	50	40	<40
$R_{пз}$(i), гр	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00	20,00	24,00	30,00
$R_{пз}$(i), %	7,41	11,11	14,81	18,52	22,22	25,93	29,63	33,33	37,04	37,04	44,44	55,56
$R_{чз}$(i), %	7,41	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	0,00	7,41	11,11

Табл. 2. Гранулометричний склад водовугільного палива, яке має склад 54 % вугілля і 46 % води, визначений за відсотковим умістом часткових залишків продукту, що пройшов крізь сито даного розміру.

мкм	500	400	315	250	200	160	125	100	71	50	40	<40
$R_{пз}$(i), гр	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00	20,00	24,00	30,00
$R_{пс}$(i), гр	50,00	48,00	46,00	44,00	42,00	40,00	38,00	36,00	34,00	34,00	30,00	24,00
$R_{пс}$(i), %	92,59	88,89	85,19	81,48	77,78	74,07	70,37	66,67	62,96	62,96	55,56	44,44

На рис. 3 для порівняння наведено гранулометричний склад водовугільного палива складу 54 % вугілля і 46 % води, визначений за кількістю вугілля (у процентному відношенні) даної фракції, що залишилось на ситі (3), і гранулометричний склад, визначений за кількістю вугілля (у процентному відношенні), що пройшло крізь сито даного розміру (4).

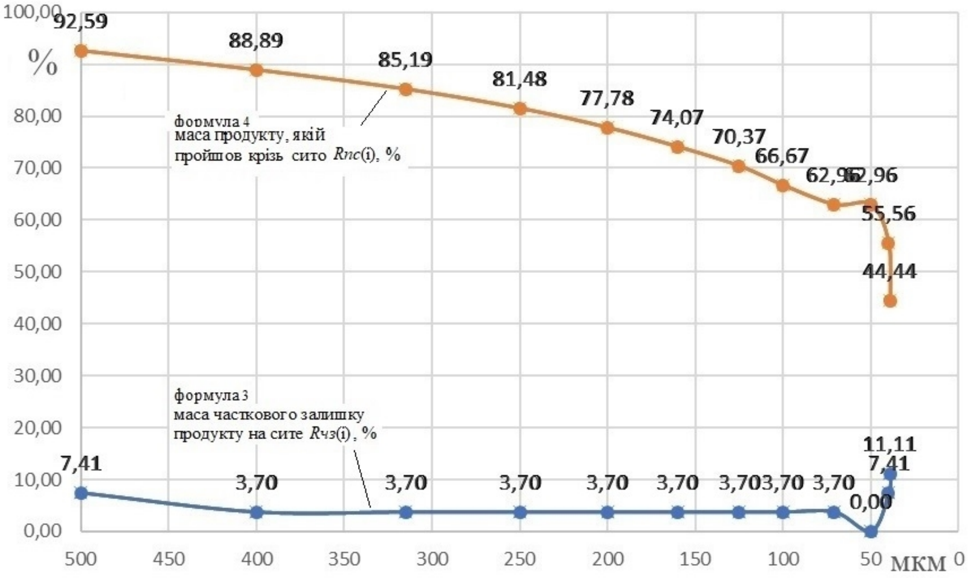

Рис. 3 – Гранулометричний склад водовугільного палива складу 54 % вугілля і 46 % води, що розрахований за (3) та (4)

Табл. 3. Гранулометричний склад водовугільного палива, яке має склад 60 % вугілля і 40 % води, визначений за відсотковим умістом часткових залишків на кожному ситі.

мкм	500	400	315	250	200	160	125	100	71	50	40	<40
Rпз(i), гр	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	8,70	14,00	46,00
Rпз(i), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,33	6,67	14,50	23,33	76,67
Rчз(i), %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,33	3,33	7,83	8,83	53,33

Табл. 4. Гранулометричний склад водовугільного палива, яке має склад 60 % вугілля і 40 % води, визначений за відсотковим умістом часткових залишків продукту, що пройшов крізь сито даного розміру.

мкм	500	400	315	250	200	160	125	100	71	50	40	<40
Rпз(i), гр	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	4,00	8,70	14,00	46,00
Rпс(i), гр	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	58,00	56,00	51,30	46,00	14,00
Rпс(i), %	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,67	93,33	85,50	76,67	23,33

На рисунку 4 для порівняння наведено гранулометричний склад водовугільного палива складу 60 % вугілля і 40 % води, визначений за кількістю вугілля (у процентному відношенні) даної фракції, що залишилися на ситі (3), і гранулометричний склад, визначений за кількістю вугілля (у процентному відношенні), що пройшло крізь сито даного розміру (4).

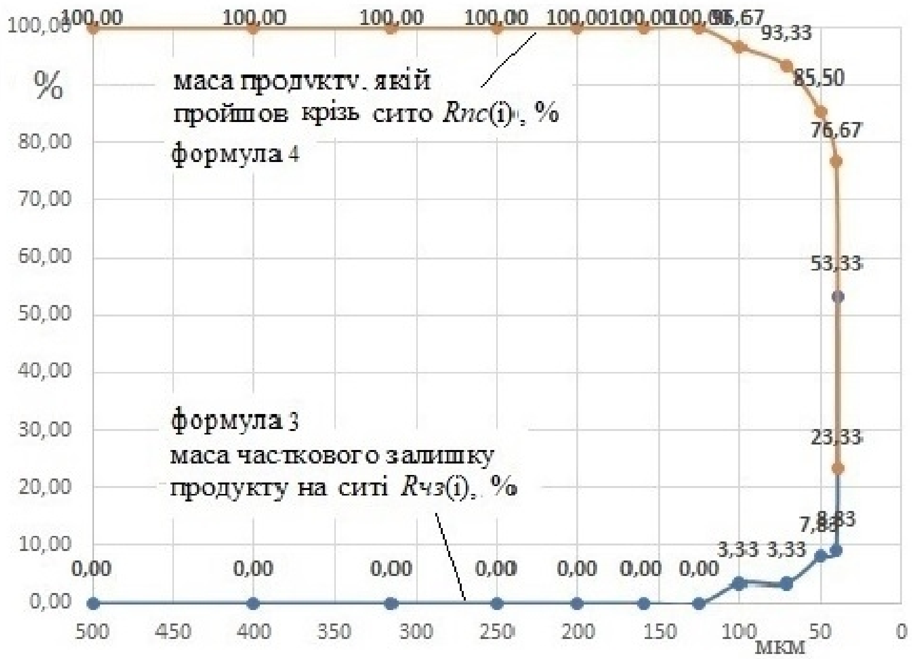

Рис. 4 – Гранулометричний склад водовугільного палива складу 60 % вугілля і 40 % води, що розрахований за (3) та (4)

На рис. 5 для порівняння наведено гранулометричний склад двох зразків водовугільного палива, визначений за кількістю вугілля (у процентному відношенні) даної фракції, що залишилося на ситі (3).

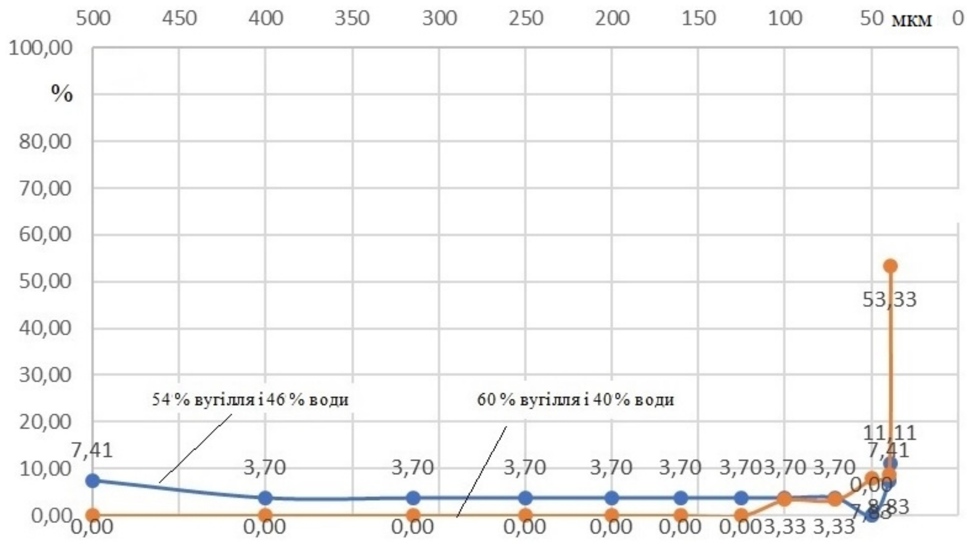

Рис. 5. – Порівняння гранулометричного складу двох зразків водовугільного палива за відсотковим складом часткових залишків на кожному ситі.

На рисунку 6 для порівняння наведено гранулометричний склад двох зразків водовугільного палива, визначений за кількістю вугілля (у процентному відношенні) даної фракції, що пройшло крізь сито даного розміру (4).

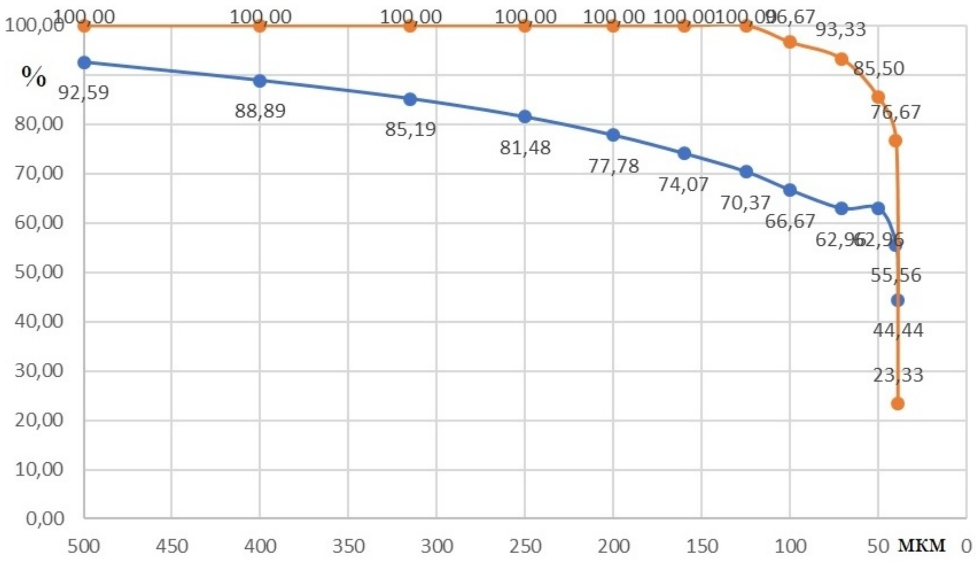

Рис. 6 – Порівняння гранулометричного складу двох зразків водовугільного палива за відсотковим складом часткових залишків продукту, що пройшов крізь сито.

Табл. 5 – Гранулометричний склад водовугільного палива, яке має склад 70 % вугілля і 30 % води, визначений за відсотковим умістом часткових залишків на кожному ситі.

мкм	500	400	315	250	200	160	125	100	71	50	40	<40
$R_{пз}$(i), гр	6,00	8,00	16,00	18,00	24,00	25,00	26,00	29,00	30,00	32,00	34,00	36,00
$R_{пз}$(i), %	8,57	11,43	22,86	25,71	34,29	35,71	37,14	41,43	42,86	45,71	48,57	51,43
$R_{чз}$(i), %	8,57	2,86	11,43	2,86	8,57	1,43	1,43	4,29	1,43	2,86	2,86	51,43

Табл. 6 – Гранулометричний склад водовугільного палива, яке має склад 70 % вугілля і 30 % води, визначений за відсотковим умістом часткових залишків продукту, що пройшов крізь сито даного розміру.

мкм	500	400	315	250	200	160	125	100	71	50	40	<40
Rпз(i), гр	6,00	8,00	16,00	18,00	24,00	25,00	26,00	29,00	30,00	32,00	34,00	38,00
$R_{пс}$(i), гр	64,00	62,00	54,00	52,00	46,00	45,00	44,00	41,00	40,00	38,00	36,00	40,00
$R_{пс}$(i), %	91,43	88,57	77,14	74,29	65,71	64,29	62,86	58,57	57,14	54,29	51,43	45,71

На рисунку 7 для порівняння наведено гранулометричний склад водовугільного палива складу 70 % вугілля і 30 % води, визначений за кількістю вугілля (у процентному відношенні) даної фракції, що залишилося на ситі (3), і гранулометричний склад, визначений за кількістю вугілля (у процентному відношенні), що пройшло крізь сито даного розміру (4).

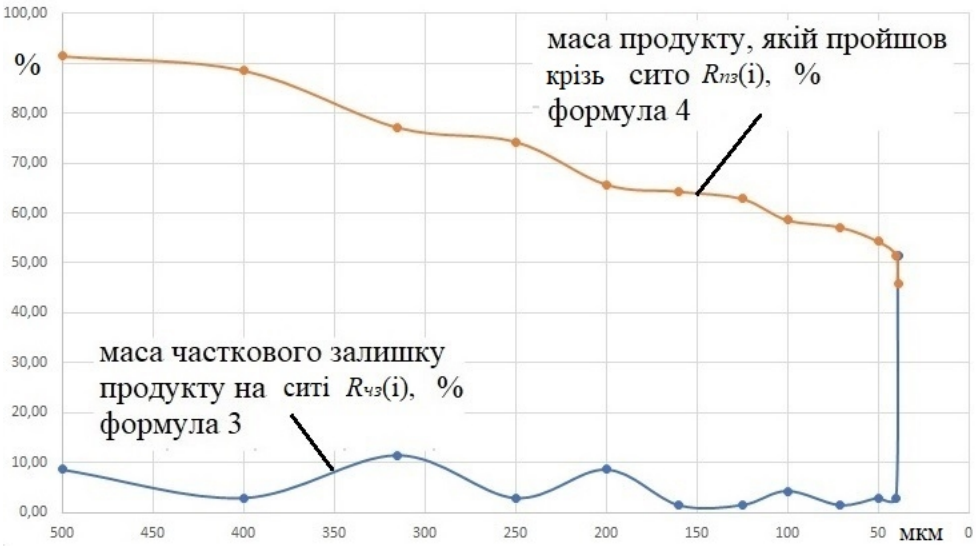

Рис. 7 – Гранулометричний склад водовугільного палива складу 70 % вугілля і 30 % води, що розрахований за (3) та (4)

На рисунку 8 для порівняння наведено гранулометричний склад двох зразків водовугільного палива, визначений за кількістю вугілля (у процентному відношенні) даної фракції, що залишилось на ситі (3).

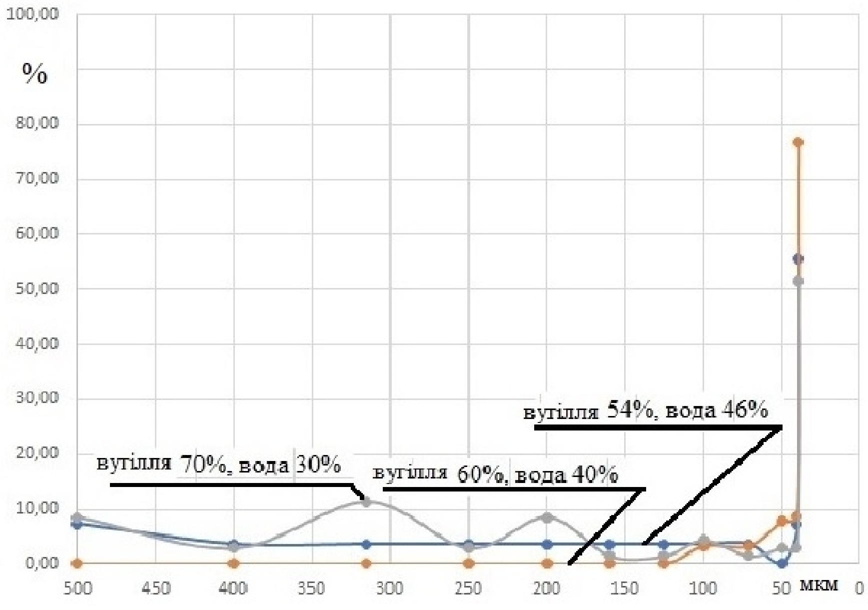

Рис. 8 – Порівняння гранулометричного складу трьох зразків водовугільного палива за відсотковим складом часткових залишків на кожному ситі.

На рис. 9 для порівняння наведено гранулометричний склад двох зразків водовугільного палива, визначений за кількістю вугілля (у процентному відношенні) даної фракції, що пройшло крізь сито даного розміру (4).

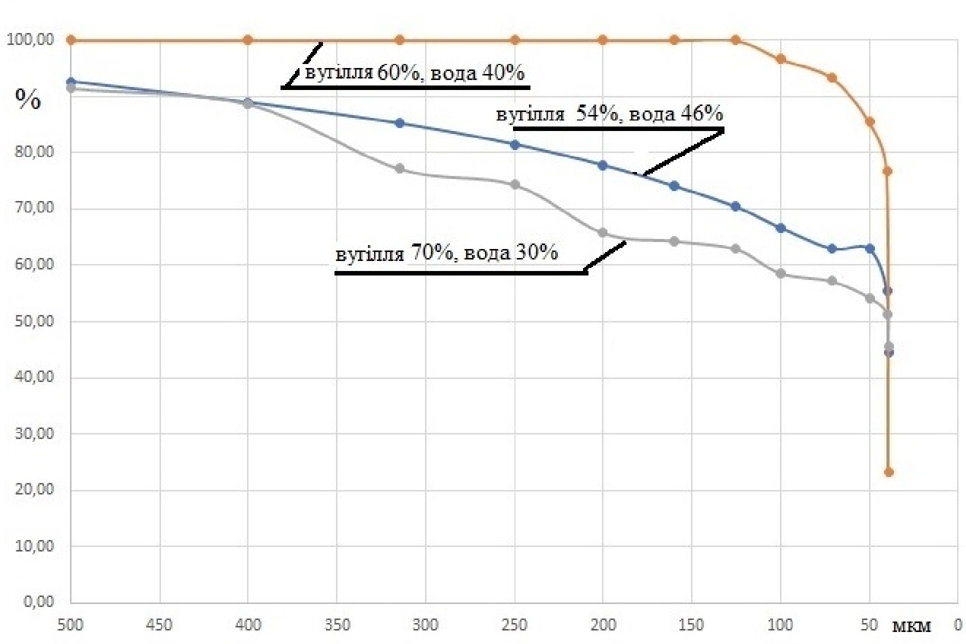

Рис. 9 – Порівняння гранулометричного складу трьох зразків водовугільного палива за відсотковим умістом часткових залишків продукту, що пройшов крізь сито.

Порівнюючи вирази (3) і (4), отримаємо такий зв'язок між частковим залишком на ситі і кількістю продукту, що пройшов крізь сито даного розміру.

$$R_{\%чз}(i)+R_{\%пс}(i)+R_{\%чз}(i-1)=100\,, \qquad (5)$$

де $R_{\%чз}(i)$ – відсотковий уміст кількості продукту *i*-ой фракції, що остався на сите (частковій залишок); $R_{\%пс}(i)$ – відсотковий уміст кількості продукту, що пройшов крізь сито і-ой фракції; $R_{\%чз}(i-1)$ – відсотковий уміст часткового залишку на ситі (*i-1*) фракції.

На перший погляд здається що сума маси продукту, яка пройшла крізь сито, і маси, яка залишилася на ситі, повинна для кожного сита дорівнювати повній вазі проби (або 100 %). Рівняння показує, що це не так. Це викликано тим, що на кожне сито проба береться окремо і сита промиваються окремо. Рівність суми двох мас, які вказані вище, повній масі проби можлива тільки у варіанті промивання, в якому сита встановлені одне над іншим.

Висновки. У статті розглянуті основні, перспективні методи визначення гранулометричного складу водоемульсійних сумішей. Розглянуто їх основні переваги та недоліки. В якості найбільш зручного у використанні обрано ситовий метод визначення гранулометричного складу емульсії. Він відрізняється простотою і надійністю виконання, вимагає мінімальної підготовки обслуговуючого персоналу, має достатню точність. Зазвичай, коли використовують цей спосіб, сита встановлюють одне на одне. При цьому розмір отворів сит зменшується зверху донизу. У статті запропоновано модифікацію цього методу. У кожне сито поміщаються проби. Сита промиваються окремо одне від одного, висушуються, і за пропонованою методикою обраховується гранулометричний склад емульсії. При цьому гранулометричний склад можна задати в залежності від ваги частини продукту, яка залишилася на ситі або в залежності від ваги частини продукту, яка пройшла крізь сито.

1. *Аппельт Г.* Введення в методи мікроскопічного дослідження. Москва: Медгіз, 1959. 429 с.

2 *Самойленко С. О., Губський С. М.* Сучасні методи дослідження сировини та харчових продуктів: конспект лекцій. Харків: Харківський державний університет харчування та торгівлі, 2019. 73 с.

3 *Смирнов В. О., Сергєєв П. В., Білецький В. С.* Технологія збагачення вугілля. Навчальний посібник. Донецьк: Східний видавничий дім, 2011. 476 с.

4. *Наумов С. В.* Современные методы определения гранулометрического состава порошкообразных компонентов сварочных материалов. Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. машиностроение, материаловедение. 2012. 7 с.
URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-opredeleniya-granulometricheskogo-sostava-poroshkoobraznyh-komponentov-svarochnyh-materialov/viewer.

5. *Волков В.* Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы. Издательство «Лань», 2012, 672 с.

Отримано 02.06.2020,
в остаточному варіанті 26.06.2020