

ПРО МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМУ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ПОЛІДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Запорізька державна інженерна академія

Описаны структурная и химическая неоднородность, а также неоднородность по плотности в сыпучих материалах. Разработан алгоритм расчета фракционного состава полидисперсного сыпучего материала с однородной и неоднородной структурой. Для материала с неоднородной структурой предложенный алгоритм позволяет определять фракционный состав каждой из локальных областей материала. Его можно использовать для сравнения результатов ситового анализа полидисперсного сыпучего материала, полученных при разных условиях.

Описано структурну та хімічну неоднорідність, а також неоднорідність за щільністю в сипких матеріалах. Розроблено алгоритм розрахунку фракційного складу полідисперсного сипкого матеріалу з однорідною та неоднорідною структурою. Для матеріалу з неоднорідною структурою запропонований алгоритм дозволяє визначати фракційний склад кожної з локальних областей матеріалу. Його можна використовувати для зіставлення результатів ситового аналізу полідисперсного сипкого матеріалу, одержаних за різних умов.

Вступ. Структура полідисперсних матеріалів визначається взаємним розташуванням окремих фракцій усередині сипкої маси. Залежно від змінювання структури полідисперсний сипкий матеріал може набувати однорідного або неоднорідного характеру. У першому випадку всі фракції матеріалу рівномірно розподілені в його об'ємі. Це нестійкий стан, оскільки як результат процесів сегрегації, який спостерігають під час роботи різних технологічних агрегатів, однорідність сипкої маси порушується, що призводить до виникнення локальних об'ємів з різним питомим вмістом окремих фракцій, а, отже, і різною структурою.

Фракційний склад полідисперсного сипкого матеріалу характеризується рівнянням:

$$d_1 \cdot \Phi_1 + d_2 \cdot \Phi_2 + \dots + d_n \cdot \Phi_n = d_{\text{сеп}} \cdot \Phi_{\Sigma} , \quad (1)$$

де d_i – діаметр i -ої фракції сипкого матеріалу, мм; $d_{\text{сеп}}$ – середній діаметр фракцій сипкого матеріалу, мм; Φ_i – вміст i -ої фракції у масі полідисперсного матеріалу, %; n – кількість фракцій сипкого матеріалу.

Складові рівняння (1) можна представляти як окрему фракцію, так і групи частинок різного розміру. У останньому разі $d_{\text{ісеп}}$ можна подати як

$$d_{\text{ісеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ij} \cdot \Phi_{ij}}{\sum_{i=1}^n \Phi_{ij}} , \quad (2)$$

де d_j – діаметр j -ої фракції, що входить до групи фракцій із середнім діаметром d_i , яку досліджують, мм; j – кількість j -ої фракції у групі фракцій, що досліджують,

%; d_{cp} – середній діаметр частинок, які складають групу фракцій матеріалу, що досліджують, мм.

Таким чином, рівняння (1) набуває вигляду:

$$d_{1cep} \cdot \Phi_{1\Sigma} + d_{2cep} \cdot \Phi_{2\Sigma} + \dots + d_{n.cep} \cdot \Phi_{n\Sigma} = d_{cep\Sigma} \cdot \Phi_{\Sigma} . \quad (3)$$

Вибір конкретної групи фракцій визначається очікуванням складом полідисперсного матеріалу та параметрами лабораторного обладнання, якого використовують для аналізу. Звичайно кожне підприємство використовує певний набір сит для аналізу фракційного складу сипкого матеріалу [1-3].

Для порівняння результатів ситового аналізу, одержаних за різних умов, використовують параметр $d_{cep\Sigma}$, який не може однозначно характеризувати масу, що досліджують.

Постановка задачі. У зв'язку з вищевикладеним завдання теоретичного обґрунтування об'єктивного та достатньо простого способу зіставлення результатів ситового аналізу полідисперсного сипкого матеріалу, одержаних за різних умов, є актуальною та практично важливою проблемою.

Основна частина досліджень. Перспективною вважається розробка механізму перерахунку одержаних результатів і приведення їх до одних показників, тобто уніфікація одержаних результатів.

У полідисперсних матеріалах окремі мінераловмістні компоненти розподілені між фракціями нерівномірно, що обумовлено технологічними особливостями формування сипких сумішей. За структурних змінювань матеріалу, разом з автономним рухом крупних частинок, переміщуються цілі масиви, які, не дивлячись на часткову деформацію та руйнування, також сприяють створенню у сипкій масі локальної структурної неоднорідності.

Прийнято виділяти три основні види об'ємної неоднорідності, що впливають на хід технологічного процесу та якість кінцевого продукту [4-7]:

- структурна неоднорідність, яка полягає в різному вмісті фракцій у зіставних об'ємах матеріалу;
- хімічна неоднорідність, яка спричинена неоднаковим хімічним складом гранул різного розміру;
- неоднорідність матеріалу за щільністю, яка обумовлена закономірностями формування структури сипкого матеріалу.

Серед перерахованих видів неоднорідності первинною є структурна, поява якої спричинює виникнення хімічної неоднорідності усередині сипкої маси, а також відповідне локальне змінювання її щільності. У зв'язку з цим особливий інтерес має розгляд механізму та закономірностей виникнення локальних структурних утворень у масі полідисперсного сипкого матеріалу.

Види локальної структурної неоднорідності сипкої маси характеризуються схе-мами, поданими на рис. 1 і 2.

У зв'язку із взаємозв'язками, наведеними на схемах, розрахунок якісних параметрів сипких мас, які знаходяться у стаціонарному стані, необхідно починати з визначення структури матеріалу. Практичне вирішення такої задачі має значні складно-щі, оскільки джерелом структурних змінювань є всі технологічні операції щодо тран-спортування та переробки сипких матеріалів. Доцільним

представляється розгляд механізму структурних перетворень полідисперсних сипких мас, що спостерігають в агломераційному виробництві. Технологічні агрегати, які використовують для переробки залізорудної сировини, реалізують практично повний спектр механічних дій на полідисперсний матеріал на етапі його підготовки до грудкування.

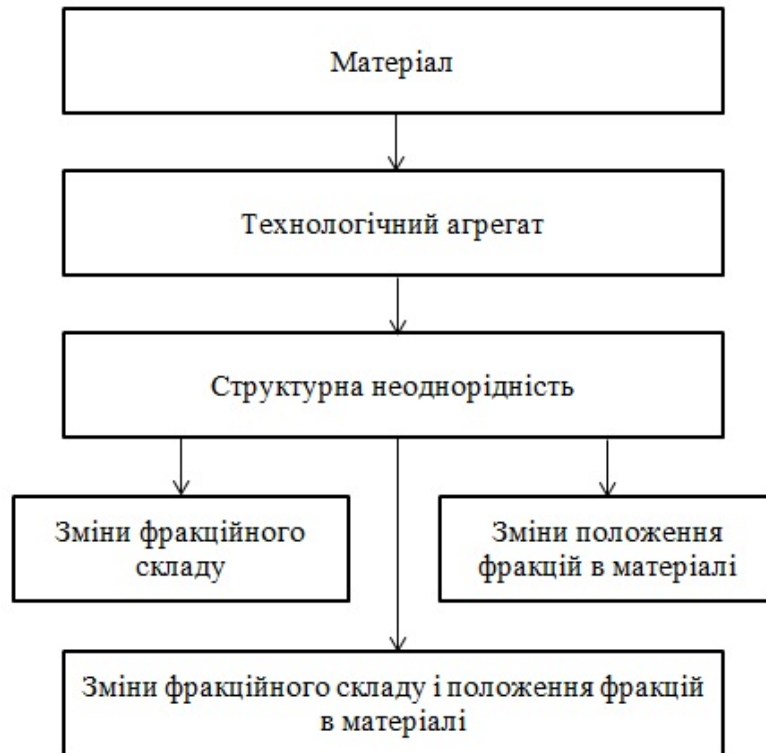


Рисунок 1 – Види локальної об’ємної неоднорідності в полідисперсних сипких матеріалах

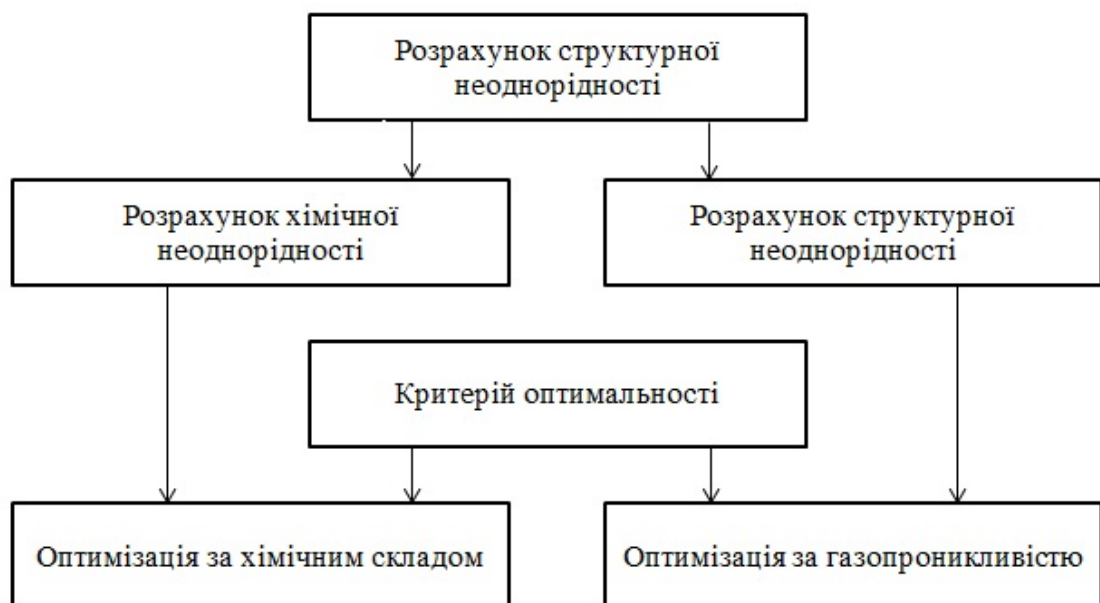


Рисунок 2 – Алгоритм розрахунку якісних параметрів стаціонарного шару полідисперсного матеріалу

Заздалегідь необхідно теоретично досліджувати гранулометричні характеристики різних за своїм класом сипких середовищ і розробити узагальнену методику розрахунку їх параметрів стосовно умов протікання сучасних технологічних процесів.

Загальна характеристика полідисперсного матеріалу, що має однорідну структуру, може бути подана наступними рівняннями:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n = \Phi_\Sigma ; \quad (5)$$

$$d_1 \cdot \Phi_1 + d_2 \cdot \Phi_2 + \dots + d_n \cdot \Phi_n = d_{\text{сеп}\Sigma} \cdot \Phi_\Sigma , \quad (6)$$

де Φ_i – вміст i -ої фракції у матеріалі, %; Φ_Σ – загальна кількість матеріалу, %, $\Phi_\Sigma = 100$ %; d_i – середній діаметр i -ої фракції, мм; $d_{\text{сеп}\Sigma}$ – середній діаметр частинок матеріалу, мм.

Фракційний склад полідисперсного матеріалу визначають за результатами розсівань, а середній діаметр частинок розраховують згідно рівняння (2).

За кількості фракцій більше двох розрахунок значень $d_{\text{сеп}\Sigma}$ є неможливим через неоднозначність результатів, яких одержують, що призводить до необхідності використання додаткових обмежень і умов.

Для двохфракційної суміші результати розрахунків $d_{\text{сеп}\Sigma}$ однозначно пов'язані із параметрами Φ_i і d_i . Фракційний склад однорідної двокомпонентної суміші характеризується наступною системою рівнянь

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_\Sigma ; \quad (7)$$

$$d_1 \cdot \Phi_1 + d_2 \cdot \Phi_2 = d_{\text{сеп}\Sigma} \cdot \Phi_\Sigma . \quad (8)$$

З рівняння матеріального балансу системи (7)-(8) за відомих значень $d_{\text{сеп}\Sigma}$, d_1 і d_2 знаходять величину Φ_1 .

$$\Phi_1 = \Phi_\Sigma - \Phi_2 . \quad (9)$$

Підставляючи залежність (9) до рівняння (8), одержують

$$d_1 \cdot (\Phi_\Sigma - \Phi_2) + d_2 \cdot \Phi_2 = d_{\text{сеп}\Sigma} \cdot \Phi_\Sigma . \quad (10)$$

Вирішуючи рівняння (10) відносно Φ_2 , можна записати

$$\Phi_2 = \frac{\Phi_\Sigma \cdot (d_{\text{сеп}\Sigma} - d_1)}{d_2 - d_1} ; \quad (11)$$

$$\Phi_1 = \Phi_\Sigma \cdot \left[1 - \frac{(d_{\text{сеп}\Sigma} - d_1)}{d_2 - d_1} \right] . \quad (12)$$

Таким чином, у двокомпонентних сумішах значення Φ_1 , Φ_2 і Φ_Σ пов'язані між собою функціональною залежністю, що дозволяє при дослідженні гранулометричних характеристик сипкої суміші обмежуватися тільки контролем параметра $d_{\text{сеп}\Sigma}$ за заданих значень d_i .

Вирішення системи вищого порядку можна виконати методом послідовного групування невідомих. Так, для сипкого матеріалу, що містить три фракції, система рівнянь (5)-(6) приймає вигляд:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \Phi_\Sigma ; \quad (13)$$

$$d_1 \cdot \Phi_1 + d_2 \cdot \Phi_2 + d_3 \cdot \Phi_3 = d_{\text{сеп}\Sigma} \cdot \Phi_{\Sigma} . \quad (14)$$

Розділяють рівняння на дві групи

$$d_1 \cdot \Phi_1 + d'_2 \cdot (\Phi_2 + \Phi_3) = d_{\text{сеп}\Sigma} \cdot \Phi_{\Sigma} , \quad (15)$$

де d'_2 – середній діаметр суміші фракцій Φ_2 і Φ_3 , мм.

Тоді можна записати

$$\Phi_1 = \Phi_{\Sigma} - (\Phi_2 + \Phi_3) . \quad (16)$$

Як результат одержують

$$d_1 \cdot [\Phi_{\Sigma} - (\Phi_2 + \Phi_3)] + d'_2 \cdot (\Phi_2 + \Phi_3) = d_{\text{сеп}\Sigma} \cdot \Phi_{\Sigma} . \quad (17)$$

Звідси

$$d'_2 = \frac{d_{\text{сеп}\Sigma} \cdot \Phi_{\Sigma} - d_1 \cdot [\Phi_{\Sigma} - (\Phi_2 + \Phi_3)]}{\Phi_2 + \Phi_3} \quad (18)$$

або

$$d'_2 = \frac{d_{\text{сеп}\Sigma} \cdot \Phi_{\Sigma} - d_1 \cdot \Phi_1}{\Phi_{\Sigma} - \Phi_1} . \quad (19)$$

Для знаходження величини d'_2 послідовно задають ряд значень Φ_1 в інтервалі від 0 до $\Phi_{\Sigma} = 100$. Враховуючи, що значення d'_2 повинне знаходитися в інтервалі між діаметрами d_2 і d_3 , з одержаних значень вибирають ті, які відповідають зазначеній умові.

На основі вибраних величин d'_2 за допомогою системи рівнянь (7)-(8) визначають значення Φ_2 і Φ_3 :

$$\Phi_2 + \Phi_3 = \Phi_{\Sigma} - \Phi_1 ; \quad (20)$$

$$d_2 \cdot \Phi_2 + d_3 \cdot \Phi_3 = d'_2 \cdot (\Phi_2 + \Phi_3) . \quad (21)$$

Вирішуючи дану систему рівнянь, одержують

$$\Phi_2 = \frac{(\Phi_{\Sigma} - \Phi_1) \cdot (d'_2 - d_3)}{d_2 - d_3} ; \quad (22)$$

$$\Phi_3 = \Phi_{\Sigma} - \Phi_1 - \Phi_2 . \quad (23)$$

Як результат розрахунку, виконаного для кожного значення d'_2 , мають ряд значень Φ_1 , що змінюються із заданим кроком $\Delta\Phi_1$ від $\Phi_{1\text{min}}$ до $\Phi_{1\text{max}}$.

У зв'язку з тим, що в однорідній масі вміст фракцій пов'язаний між собою чітко встановленими залежностями для визначення фракційного складу суміші досить встановити значення Φ_1 .

На початковому етапі розрахунку приймають, що необхідні значення Φ_1 знаходяться в середині інтервалу можливих значень цієї функції, тобто

$$\Phi_{1p} = \Phi_{1\text{min}} + 0,5(\Phi_{1\text{max}} - \Phi_{1\text{min}}) . \quad (24)$$

Використовуючи ці дані, визначають величини Φ_{2p} і Φ_{3p} , які відповідають вибраному Φ_{1p} .

Коли кількість фракцій сипкої маси, що розраховують, більше трьох розрахунок виконують у декілька етапів (рис. 3). На кожному етапі визначають вміст вибраної фракції та відповідний цьому значенню середній діаметр частинок сипкої маси, що залишилася d'_{i+1} .

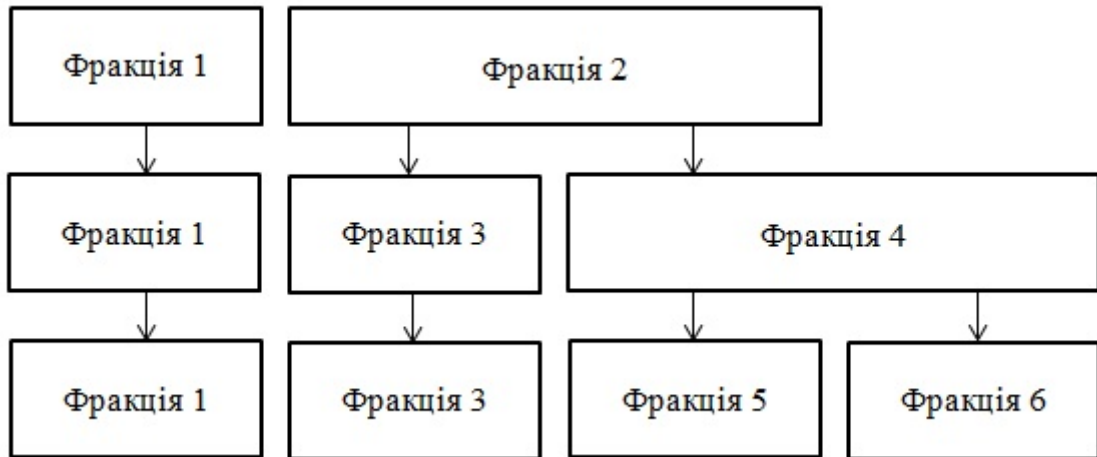


Рисунок 3 – Схема розрахунку фракційного складу полідисперсного матеріалу з однорідною структурою

Величини d'_{i+1} , одержані розрахунковим шляхом, повинні знаходитися у межах інтервалу $d_{i+1} < d'_{i+1} < d_{i+2}$. Розрахунок продовжують до визначення значень двох останніх фракцій сипкого матеріалу.

Таким чином, використовуючи метод послідовного групування змінних можна з достатньо високою мірою достовірності визначити фракційний склад багатокомпонентного сипкого матеріалу.

Для характеристики полідисперсного сипкого матеріалу з неоднорідною структурою використовують наступні системи рівнянь:

$$\Phi_{\Sigma 1} + \Phi_{\Sigma 2} + \dots + \Phi_{\Sigma k} = \Phi_{\Sigma} ; \quad (25)$$

$$d_{\text{cep}\Sigma 1} \cdot \Phi_{\Sigma 1} + d_{\text{cep}\Sigma 2} \cdot \Phi_{\Sigma 2} + \dots + d_{\text{cep}\Sigma k} \cdot \Phi_{\Sigma k} = d_{\text{cep}\Sigma} \cdot \Phi_{\Sigma} ; \quad (26)$$

$$\Phi_{11} + \Phi_{12} + \dots + \Phi_{1n} = \Phi_{\Sigma 1} ; \quad (27)$$

$$\Phi_{21} + \Phi_{22} + \dots + \Phi_{2n} = \Phi_{\Sigma 2} ; \quad (28)$$

.....

$$\Phi_{k1} + \Phi_{k2} + \dots + \Phi_{kn} = \Phi_{\Sigma k} ; \quad (29)$$

$$d_1 \cdot \Phi_{11} + d_2 \cdot \Phi_{12} + \dots + d_n \cdot \Phi_{1n} = d_{\text{cep}\Sigma 1} \cdot \Phi_{\Sigma 1} ; \quad (30)$$

$$d_1 \cdot \Phi_{21} + d_2 \cdot \Phi_{22} + \dots + d_n \cdot \Phi_{2n} = d_{\text{cep}\Sigma 2} \cdot \Phi_{\Sigma 2} ; \quad (31)$$

...

$$d_1 \cdot \Phi_{k1} + d_2 \cdot \Phi_{k2} + \dots + d_n \cdot \Phi_{kn} = d_{\text{cep}\Sigma k} \cdot \Phi_{\Sigma k} , \quad (32)$$

де $\Phi_{\Sigma k}$ – загальна кількість матеріалу в k -ій зоні сипкої маси, %; Φ_{ik} – вміст i -ої фракції в k -ій зоні, %; $d_{cp\Sigma k}$ – середній діаметр частинок матеріалу в k -ій зоні, мм; k – кількість зон; n – кількість фракцій.

Для характеристики локальних областей сипкого матеріалу, що мають однорідну структуру, можуть бути використані залежності, одержані для однорідного полідисперсного матеріалу. Це дозволить визначити величину Φ_{ij} у кожній зоні

$$\Phi_{j2} = \frac{\Phi_{\Sigma j} \cdot (d_{cp\Sigma j} - d_1)}{d_2 - d_1}; \quad (33)$$

$$\Phi_{j1} = \Phi_{\Sigma j} \cdot \left(1 - \frac{d_{cp\Sigma j} - d_1}{d_2 - d_1} \right). \quad (34)$$

Загальний вміст окремих фракцій у матеріалі складає:

$$\Phi_1 = \Phi_{11} \cdot \frac{\Phi_{\Sigma 1}}{\Phi_{\Sigma}} + \Phi_{21} \cdot \frac{\Phi_{\Sigma 2}}{\Phi_{\Sigma}}; \quad (35)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{12} \cdot \frac{\Phi_{\Sigma 1}}{\Phi_{\Sigma}} + \Phi_{22} \cdot \frac{\Phi_{\Sigma 2}}{\Phi_{\Sigma}}; \quad (36)$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_{\Sigma}. \quad (37)$$

Середній діаметр частинок сипкого матеріалу в кожній із зон буде дорівнювати

$$d_{cp\Sigma j} \cdot \Phi_{\Sigma j} = d_1 \cdot \Phi_{j1} + d_2 \cdot \Phi_{j2}; \quad (38)$$

$$d_{cp\Sigma 1} = d_1 \cdot \Phi_{11} + d_2 \cdot \Phi_{12}; \quad (39)$$

$$d_{cp\Sigma 2} = d_1 \cdot \Phi_{21} + d_2 \cdot \Phi_{22}. \quad (40)$$

За значень $d_{cp\Sigma j}$, що відомі для всієї сипкої маси, дана залежність набуває вигляду:

$$d_{cp\Sigma} = d_{cp\Sigma 1} \cdot \frac{\Phi_{\Sigma 1}}{\Phi_{\Sigma}} + d_{cp\Sigma 2} \cdot \frac{\Phi_{\Sigma 2}}{\Phi_{\Sigma}}. \quad (41)$$

Підставляючи значення $d_{cp\Sigma j}$ до рівняння (41), одержують

$$d_{cp\Sigma} = (d_1 \cdot \Phi_{11} + d_2 \cdot \Phi_{12}) \cdot \frac{\Phi_{\Sigma 1}}{\Phi_{\Sigma}} + (d_1 \cdot \Phi_{21} + d_2 \cdot \Phi_{22}) \cdot \frac{\Phi_{\Sigma 2}}{\Phi_{\Sigma}}. \quad (42)$$

Після перетворення рівняння (42) можна записати

$$d_{cp\Sigma} \cdot \Phi_{\Sigma} = d_1 \cdot (\Phi_{11} \cdot \Phi_{\Sigma 1} + \Phi_{21} \cdot \Phi_{\Sigma 2}) + d_2 \cdot (\Phi_{12} \cdot \Phi_{\Sigma 1} + \Phi_{22} \cdot \Phi_{\Sigma 2}). \quad (43)$$

Запропонована методика може бути використана під час аналізу структури неоднорідного сипкого матеріалу із кількістю локальних зон, що перевищує дві. В процесі розрахунку здійснюють послідовне групування двох суміжних локальних зон і визначення їх сумарних гранулометричних характеристик. Як результат

відбувається поетапне скорочення кількості локальних зон сипкої маси до етапу розрахунку Φ_1 , Φ_2 і $d_{cp\Sigma}$.

Під час розрахунку фракційного складу полідисперсного матеріалу обчислення ведуть для кожної з локальних областей сипкої маси.

Послідовно задаючись значеннями Φ_{1j} в інтервалі від 0 до $\Phi_{\Sigma j}$, визначають на їх основі величини d'_{2j} . З одержаного ряду значень d'_{2j} вибирають величини, які відповідають умові $d_2 < d'_{2j} < d_3$.

Для вибраних d'_{2j} за допомогою системи рівнянь вигляду (3) визначають значення Φ_{2j} і Φ_{3j} :

$$d_2 \cdot \Phi_{2j} + d_3 \cdot \Phi_{3j} = d'_2 \cdot (\Phi_{2j} + \Phi_{3j}) ; \quad (44)$$

$$\Phi_{2j} + \Phi_{3j} = (\Phi_{2j} + \Phi_{3j}) . \quad (45)$$

Вирішуючи дану систему рівнянь відносно Φ_{2j} , одержують

$$\Phi_{2j} = \frac{(\Phi_{2j} + \Phi_{3j}) \cdot (d'_2 - d_3)}{d_2 - d_3} . \quad (46)$$

Як результат виконання розрахунку для кожної локальної області сипкої маси мають послідовний ряд значень Φ_{1j} , які змінюються із заданим кроком від Φ_{1jmin} до Φ_{1jmax} .

У зв'язку з тим, що у кожній локальній зоні значення Φ_{ij} пов'язані між собою чітко встановленими залежностями, то для визначення фракційного складу суміші до-сить визначити значення Φ_{1j} .

На початковому етапі розрахунку приймають, що необхідне значення Φ_{1j} знаходиться у середині встановленого інтервалу можливих значень, тобто

$$\Phi_{1jp} = \Phi_{1jmin} + 0,5(\Phi_{1jmax} - \Phi_{1jmin}) . \quad (47)$$

Потім визначають значення Φ_{2jp} і Φ_{3jp} , які відповідають величині Φ_{1jp} для кожної локальної зони сипкого матеріалу.

Сума значень Φ_{ij} , одержаних для окремої локальної зони, повинна відповідати вмісту даної фракції у сипкому матеріалі:

$$\sum_{j=1}^n \Phi_{ijp} = \Phi_i . \quad (48)$$

Для випадку, коли $\sum_{j=1}^n \Phi_{ijp} > \Phi_i$, значення Φ_{1jp} зменшують із заданим кроком Φ_1 для всіх зон, інакше – збільшують на Φ_1 . Потім розрахунок повторюють.

Пошук Φ_{1jp} продовжують до тих пір, поки не буде виконано умову

$$\left| \Phi_i - \sum_{j=1}^n \Phi_{ijp} \right| \leq \Delta i , \quad (49)$$

де Δi – припустима погрішність розрахунку Φ_{ij} , %.

Коли кількість фракцій Φ_i сипкого матеріалу більше трьох, розрахунок передбачає декілька етапів, при цьому по черзі розраховують склад сипкої маси від

Φ_1 до Φ_Σ . На кожному етапі розрахунку визначають вміст певної фракції та діаметр частинок фракції матеріалу, що залишилася $d'_{(i+1)j}$, який відповідає цьому значенню. Одержане значення $d'_{(i+1)j}$ повинне відповідати умові: $d_{(i+1)} < d'_{(i+1)j} < d_{(i+2)}$. Для кожного із значень $d'_{(i+1)j}$ визначають величину $\Phi_{(i+1)j}$ і відповідні їм значення $d'_{(i+2)j}$. Розрахунок продовжують до визначення двох останніх фракцій сипкого матеріалу та перевірки відповідності кількості кожної фракції у всіх локальних зонах заданому значенню.

Висновки. Під час переробки полідисперсних сипких матеріалів у технологічних агрегатах виникає структурна неоднорідність, яка, в свою чергу, призводить до появи хімічної неоднорідності та неоднорідності за щільністю у масі матеріалу. Можливість розрахунку кількісних показників структурної неоднорідності дозволить виконати оптимізацію маси матеріалу за хімічним складом і за щільністю, зокрема за газопроникливістю для агломераційного виробництва.

Запропоновано алгоритм розрахунку фракційного складу полідисперсного сипкого матеріалу з однорідною й неоднорідною структурою, який дозволяє визначити фракційний склад кожної з локальних областей матеріалу та виконати зіставлення результатів ситового аналізу полідисперсного сипкого матеріалу, одержаних за різних умов.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Русаков, П. Г.* Описание сегрегации агломерационной шихты и других сыпучих материалов [Текст] / П. Г. Русаков, Н.Ф. Русаков // Теория и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке. – Днепропетровск : ДМетИ, 1985. – С. 159-160.
2. Формирование слоя агломерационной шихты перед спеканием [Текст] / *А. А. Готовцев, В. И. Тихонов, И. М. Сальников, С. А. Вакуленко* // Сталь. – 1981. – № 12. – С. 11-15.
3. *Марюта, А. Н.* Автоматический контроль гранулометрического состава сыпучих материалов [Текст] / А. Н. Марюта, Ю. Г. Качан. – Киев – Донецк : Вища школа, 1977. – 120 с. – Библиогр. : с. 115-119.
4. *Юсфин, Ю. С.* Управление окускованием железорудных материалов [Текст] / Ю. С. Юсфин, А. Д. Каменов, А. П. Буткарев. – М. : Металлургия, 1999. – 279 с. – Библиогр. : с. 278. – ISBN 5-229-00539-4.
5. *Маковский, В. А.* Оптимальное управление агломерационным процессом [Текст] / В. А. Маковский, Ю. Н. Власюк, Ю. В. Карташов. – Киев. : Вища школа, 1987. – 122 с. – Библиогр. : с. 119-120.
6. *Федоровский, Н. В.* Автоматизация процессов окускования железных руд [Текст] / Н. В. Федоровский, Е. М. Дементьева, А. П. Руденко. – Киев : Техніка, 1976. – 144 с. – Библиогр. : с. 139-143.
7. *Федоровский, Н. В.* Разработка АСУ ТП окускованием железных руд [Текст] / Н. В. Федоровский. – Киев : Знание, 1978. – 20 с.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2012 р.
Рецензент, проф. О.Д. Шамровський