

---

## REASONING OF NON-MIXING METHOD OF MIXTURE FORMING FROM BULK MATERIALS

I. Dudarev, I. Taraymovich

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

---



**Key words:**

mixture of bulk materials, mixing method, non-mixing technology, mixture quality, size of mixture sample

**Article history:**

Received 25.02.2020

Accepted 17.05.2020

**Corresponding author:**

i\_dudarev@ukr.net

### ABSTRACT

*The mixing process is the main technological operation in the premixes production. It is important to ensure the uniform distribution of components in mixtures from which premixes are made, because the quality of the mixture effects on the premixes efficiency and safety. Mixtures of premixes contain components in microdoses. The ratio between the components of the mixture may be 1:10 or more. It is impossible to ensure the high quality of such mixture by mixing the components. The non-mixing method of mixture forming can provide uniform distribution of components in such mixture. The new non-mixing method of mixture forming from bulk materials is proposed in the article. According to this method, the mixture is formed from elementary mixture volumes, which provides the necessary ratio between the components. The components with different properties and parameters can be mixed by this method. As a result of theoretical studies, the equations have been obtained which allows to substantiate the elementary volume of the mixture. If the mixture of components is formed from elementary volumes of the mixture by equipment, then the index of mixture quality will be very high. In addition, the equations have been obtained which allows to calculate the mass of components microdoses for forming the elementary volume of the mixture from bulk components.*

---

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.295>

---

УДК 621.929.1

## ОБҐРУНТУВАННЯ НОНМІКСИНГОВОГО СПОСОБУ ФОРМУВАННЯ СУМІШІ ІЗ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

І.М. Дударев, І.В. Тараймович

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

*Змішування є основною технологічною операцією під час виробництва преміксів для тварин. У сумішах, з яких виготовляють премікси, важливо забезпечити рівномірний розподіл компонентів, оскільки від цього залежать ефективність використання преміксів та їх безпечність. Суміші преміксів містять окремі компоненти в мікродозах, відповідно співвідношення між компонентами суміші може становити 1:10 та більше. Забезпечити високу якість такої суміші шляхом змішування компонентів неможливо. Рівномірний розподіл компонентів за об'ємом такої суміші можуть забезпечити нонміксингові способи формування сумішей. У статті обґрунтовано спосіб нонміксингового отримання суміші, що передбачає її формування з елементарних об'ємів суміші, в яких забезпечено необхідне співвідношення між компонентами. Цей спосіб дозволяє формувати суміш із компонентів із різними фізико-механічними властивостями та геометричними параметрами. У результаті теоретичних досліджень отримана залежність, яка дозволяє обґрунтувати елементарний об'єм суміші для реалізації запропонованого способу формування суміші. У разі формування технічними засобами елементарних об'єм суміші такої величини, можна отримати суміш високої якості, оскільки розподіл компонентів у ній буде наближатися до ідеального. Крім того, отримані залежності, які дозволяють розрахувати масу мікродоз компонентів для формування елементарного об'єму суміші та, відповідно, обґрунтувати режим роботи дозаторів.*

**Ключові слова:** суміш сипких матеріалів, спосіб змішування, нонміксингова технологія, якість суміші, розмір проби суміші.

### Стан питання та постановка проблеми

Традиційно у комбікормовому виробництві приготування сумішей із сипких компонентів відбувається шляхом їх змішування. У результаті змішування важливо отримати суміш із високою однорідністю розподілу компонентів. Високу однорідність суміші надзвичайно складно забезпечити за допомогою відомих конструкцій

змішувачів, особливо під час змішування компонентів у співвідношенні 1:10 і більшому та у випадку, якщо компоненти мають фізико-механічні властивості та геометричні характеристики, які суттєво відрізняються. Така проблема характерна для виробництва преміксів для тварин, що містять мікроелементи, вітаміни, терапевтичні препарати та біологічно-активні речовини, які необхідно вносити в суміш у невеликій кількості. Крім того, під час приготування сумішей із таких компонентів шляхом змішування можливе явище сегрегації, тобто розшарування компонентів у суміші внаслідок різних розмірів, властивостей та форми частинок компонентів [1], що не дозволяє отримати однорідну суміш та погіршує якісні та кількісні показники кінцевого продукту. А для такої продукції комбікормового виробництва як біодобавки та мінерально-вітамінні добавки від однорідності суміші, з якої їх виготовляють, суттєво залежать ефективність і безпечність їх використання під час годівлі тварин.

Теоретичному обґрунтуванню процесу змішування сипких матеріалів та огляду конструкцій змішувачів присвячені праці [2 – 7], в яких виокремлюється два способи змішування – періодичний та неперервний. Відповідно до цих способів змішування розрізняють змішувачі періодичної та неперервної дії. Змішування компонентів у змішувачах періодичної дії проходить у робочих камерах постійного об'єму з одночасним або по черговим завантаженням компонентів у необхідному співвідношенні. Режим роботи таких змішувачів має забезпечити однорідність суміші за об'ємом, що складно досягнути, оскільки переміщення частинок компонентів у робочій камері має, здебільшого, випадковий характер. Змішування компонентів у змішувачах неперервної дії відбувається у неперервному потоці компонентів всередині робочої камери. Режим роботи змішувачів неперервної дії має забезпечити однорідність суміші у поперечному перерізі потоку. Неперервний спосіб забезпечує кращу якість суміші у порівнянні із періодичним. До способів змішування, які також забезпечують високу якість суміші, можна віднести спосіб неперервного порційного змішування компонентів [8], який передбачає формування багат шарового потоку компонентів (кількість шарів потоку рівна кількості компонентів) із розділенням його на порції, у кожній з яких забезпечено необхідне співвідношення компонентів, з подальшим перемішуванням компонентів в кожній порції окремо та об'єднанням порцій в суміш.

Поширення набувають способи приготування суміші із сипких компонентів, які не передбачають їх змішування. Ці способи отримали

назву нонміксингових способів (технологій) [9, 10]. Вони полягають в упорядкованому рівномірному розподілі мікродоз компонентів в певному об'ємі або потоці шляхом нашаровування мікродоз одна на другу. Для реалізації цих способів запропоновані конструкції формувачів суміші двох типів [9, 11]: конвеєрні, в яких формування суміші здійснюється шляхом накладання шарів компонентів один на другий, та роторні, в яких суміш формується у циліндричній місткості внаслідок розташування шарів компонентів у формі секторів один над другим у різній послідовності. Однорідність суміші, що сформована нонміксинговими способами, у 2...2,5 рази вища [9], ніж за реалізації традиційних способів змішування.

Таким чином, способи отримання суміші, що не передбачають змішування компонентів, є більш перспективним, оскільки забезпечують кращу якість суміші, ніж традиційні способи змішування, тому дослідження в цьому напрямі є актуальними.

**Мета дослідження** – обґрунтування нонміксингового способу формування суміші із сипких матеріалів.

### **Матеріали і методи**

Теоретичні дослідження базувалися на основних положеннях теорії змішування сипких матеріалів, згідно якої, показником, що характеризує якість суміші, є рівномірність розподілу компонентів у заданому співвідношенні за об'ємом суміші. Під час моделювання частинок сипких матеріалів та елементарних об'ємів їх сумішей використовували метод ідеалізації. Припускали, що усі частинки сипкого матеріалу мають сферичну форму однакового діаметра та однакові фізико-механічні властивості.

### **Результати дослідження та обговорення**

Якість суміші сипких матеріалів (компонентів) характеризується рівномірністю розподілу частинок кожного компонента за об'ємом суміші. Розглянемо розподіл частинок компонентів в об'ємі суміші на прикладі суміші із двох компонентів, що змішані у співвідношенні 1:1. Нехай, частинки компонентів мають сферичну форму, однаковий діаметр та однакові фізико-механічні властивості. Також припускаємо, що частинки компонентів мають кубічне розташування (вкладання) у шарі суміші (рис. 1, а). Якщо в бінарній суміші у будь-якому місці виокремити три взаємно перпендикулярні елементарні шари (товщиною в одну частинку) і в кожному елементарному шарі суміші частинки компонентів будуть розташовані у шаховому порядку (рис. 1, б), то розподіл компонентів у такій суміші можна вважати ідеальним. На практиці отримати суміш із ідеальним розподілом частинок

компонентів шляхом їх перемішування неможливо. Такий розподіл частинок компонентів можна отримати лише у випадку формування суміші, тобто розташування частинок компонентів у кожному елементарному шарі суміші в необхідному порядку (залежно від співвідношення і кількості компонентів).

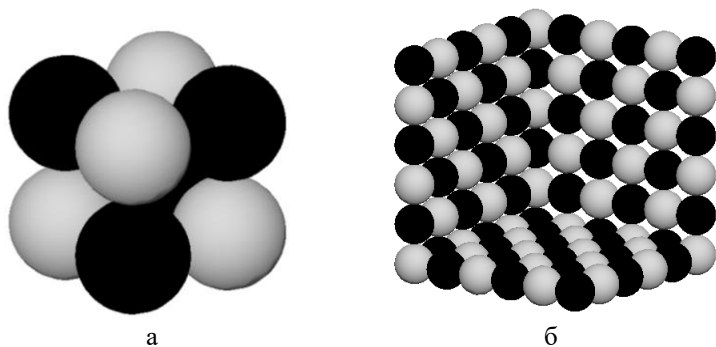


Рис. 1 – Моделі бінарної суміші з частинок сферичної форми:  
а – модель кубічного розташування частинок компонентів; б – модель трьох взаємно перпендикулярних елементарних шарів суміші

Розглянемо теоретичні передумови формування суміші у нонміксинговий спосіб (без змішування компонентів), яка за показником якості має наближатися до ідеальної суміші, тобто мати розподіл компонентів близький до ідеального. У такій суміші в кожному її елементарному об'ємі має бути забезпечено співвідношення між компонентами, яке задане для суміші. Для сипких компонентів співвідношення між компонентами – це співвідношення між масами компонентів із яких формується суміш. Елементарний об'єм суміші – це найменший її об'єм, в якому можна забезпечити необхідне співвідношення між компонентами. На величину елементарного об'єму суміші впливають геометричні характеристики та фізико-механічні властивості частинок сипких компонентів. Продемонструємо на прикладах, як визначається елементарний об'єм суміші, що містить компоненти, які мають частинки сферичної форми з однаковими фізико-механічними властивостями, зокрема масою, та однаковими геометричними характеристиками (діаметром).

Для бінарної суміші із співвідношенням компонентів 1:1 елементарний об'єм суміші буде містити дві частинки (рис. 2, а), причому по одній частинці кожного компонента. Якщо ж у бінарній

суміші співвідношення між компонентами становить 1:2, то елементарний об'єм суміші буде містити три частинки, причому одну частинку першого компонента та дві частинки другого компонента (рис. 2, б). Якщо суміш містить три компонента із співвідношенням 1:1:1, то елементарний об'єм суміші буде містити три частинки (рис. 2, в), причому по одній частинці кожного компонента. У випадку, коли суміш містить три компонента із співвідношенням 1:1:2, то елементарний об'єм суміші буде містити чотири частинки (рис. 2, в), причому по одній частинці перших двох компонентів і дві частинки третього компонента. Необхідно зауважити, що за будь-якого співвідношення компонентів та їх кількості у суміші, послідовність розташування частинок компонентів в елементарному об'ємі суміші не має значення.

Узагальнюючи зазначене вище, визначимо послідовність наближеного розрахунку елементарного об'єму суміші із довільною кількістю компонентів та довільним їх співвідношенням у суміші. Урахуємо, що кожен сипкий матеріал (компонент) містить сукупність дискретних частинок. Нехай, усі частинки одного компонента мають однакові фізико-механічні властивості та геометричні характеристики. Розглянемо суміш до якої входить  $n$  компонентів, співвідношення між якими  $1:k_1:k_2: \dots :k_{n-1}$  (зауважимо, що у будь-якому співвідношенні компонентів у суміші значення "1" характеризує компонент, що має найменший вміст у суміші), причому  $1 \leq k_1 \leq k_2 \leq \dots \leq k_{n-1}$ . Позначимо масу частинки компонента, що має найменший вміст у суміші, через  $m_{ч.к.1}$ . Елементарний об'єм має містити лише одну частинку компонента, що має найменший вміст у суміші. За відомою масою  $m_{ч.к.1}$  частинки компонента, що має найменший вміст у суміші, а також урахуовуючи співвідношення між компонентами у суміші, визначається маса усіх решти компонентів в елементарному об'ємі суміші:

$$m_{\Sigma_{ч.к.n}} = k_{n-1} m_{ч.к.1}, \quad (1)$$

де  $m_{\Sigma_{ч.к.n}}$  – маса частинок (частинки) компоненту  $n$  в елементарному об'ємі суміші, кг;  $k_{n-1}$  – коефіцієнт співвідношення між компонентом  $n$  (причому  $n \neq 1$ ) та компонентом, що має масу  $m_{ч.к.1}$ ;  $m_{ч.к.1}$  – маса частинки компонента, що має найменший вміст у суміші, кг.

Об'єм, що займає частинка компонента з масою  $m_{ч.к.1}$  в елементарному об'ємі суміші (наближено):

$$V_{ч.к.1} = m_{ч.к.1} / \rho_1, \quad (2)$$

де  $V_{ч.к.1}$  – об'єм, що займає частинка компонента з масою  $m_{ч.к.1}$  в елементарному об'ємі суміші, м<sup>3</sup>;  $\rho_1$  – насипна густина компонента, що має найменший вміст у суміші, кг/м<sup>3</sup>.

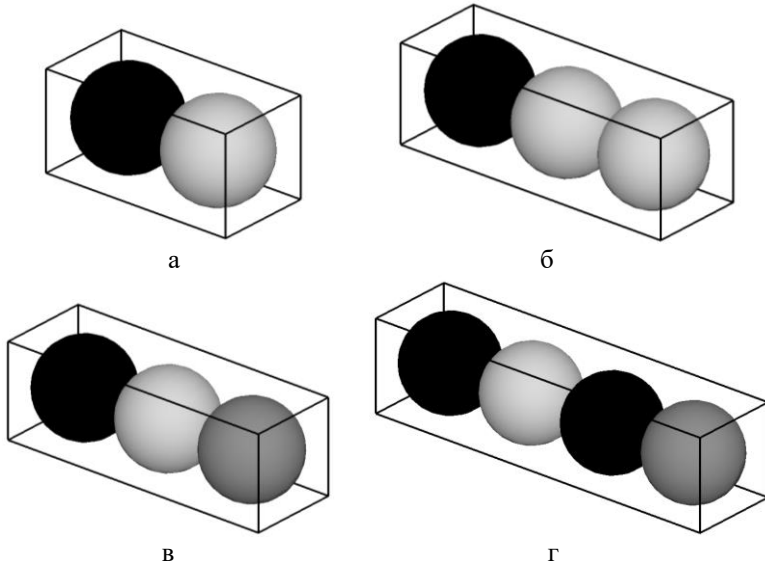


Рис. 2 – Схеми до визначення елементарних об'ємів сумішей:  
 а – бінарна суміш із співвідношенням компонентів 1:1; б – бінарна суміш із співвідношенням компонентів 1:2; в – суміш трьох компонентів із їх співвідношенням 1:1:1; г – суміш трьох компонентів із їх співвідношенням 1:1:2

За відомим значенням маси  $m_{\Sigma_{ч.к.п}}$  визначається об'єм, що займають частинки цього компонента в елементарному об'ємі суміші (наближено) та їх кількість, відповідно, за виразами:

$$V_{\Sigma_{ч.к.п}} = \frac{m_{\Sigma_{ч.к.п}}}{\rho_n} \quad \text{та} \quad N_{\Sigma_{ч.к.п}} = \frac{m_{\Sigma_{ч.к.п}}}{m_{ч.к.п}}, \quad (3)$$

де  $V_{\Sigma_{ч.к.п}}$  – об'єм, який займають частинки компонента  $n$  в елементарному об'ємі суміші ( $n \neq 1$ ),  $\text{м}^3$ ;  $\rho_n$  – насипна густина компонента  $n$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $N_{\Sigma_{ч.к.п}}$  – кількість частинок компонента  $n$  в елементарному об'ємі суміші ( $n \neq 1$ ), шт.;  $m_{ч.к.п}$  – маса частинки компонента  $n$ , кг.

Тоді елементарний об'єм суміші з  $n$  компонентів:

$$V_{ел.об.} = V_{ч.к.1} + \sum_{i=2}^n V_{\Sigma_{ч.к.п}} = m_{ч.к.1} \left( \frac{1}{\rho_1} + \sum_{i=2}^n \frac{k_{n-1}}{\rho_n} \right). \quad (4)$$

Розрахунок елементарного об'єму суміші за виразом (4) є наближеним, оскільки під час розрахунку не були враховані фактори, які впливають на його значення, зокрема, розташування частинок компонентів одна відносно одної в елементарному об'ємі, відмінність властивостей та геометричних параметрів частинок як одного компонента, так і різних компонентів. Тому для визначення якісного показника суміші, що сформована у нонміксинговий спосіб, доцільно приймати елементарний об'єм суміші рівним найменшому об'єму суміші, який може сформувати технічний засіб (як правило, дозатори мікродоз компонентів). Разом із тим, чим ближче значення елементарного об'єму суміші, що можуть сформувати технічні засоби, до розрахованого за виразом (4), тим кращої якості суміш можна отримати, оскільки розподіл компонентів у ній буде наближатися до ідеального.

У більшості випадків необхідно сформувати суміш із декількох (більше двох) компонентів у різних співвідношеннях. Причому компоненти відрізняються за фізико-механічними властивостями та геометричними характеристиками частинок. На практиці оцінити якість такої суміші можна шляхом визначення співвідношення компонентів у пробах, які відібрані із різних місць суміші. Об'єм проби суміші має бути рівний найменшому об'єму суміші, який можна сформувати із компонентів у необхідному співвідношенні за допомогою технічних засобів. Причому об'єм проби має наближатися до елементарного об'єму суміші. Таким чином, щоб отримати суміш, яка за якісними показниками буде наближатися до ідеальної, необхідно, щоб у кожному найменшому об'ємі суміші, який можна сформувати технічними засобами, було забезпечено необхідне співвідношення між компонентами. Для формування такої суміші можна використати матрицю (рис. 3), яка містить комірки кубічної форми, об'єм яких рівний найменшому об'єму суміші, який можуть сформувати технічні засоби. У кожному комірці матриці технічні засоби (дозатори мікродоз) одночасно або послідовно спрямовують компоненти у кількості, необхідній для забезпечення заданого співвідношення компонентів у суміші. Причому комірка має бути заповнена компонентами повністю. При завантаженні усіх комірок матриці утворюється елементарний шар суміші, в кожному елементарному об'ємі якого, що може бути забезпечений технічними засобами, дотримане необхідне співвідношення між компонентами. При накладанні таких елементарних шарів один на другий формується суміш компонентів. Для реалізації запропонованого способу нонміксингового формування суміші розроблено формувач суміші



сипких матеріалів [12]. Нонміксинговий спосіб доцільно використовувати для формування сумішей із співвідношенням компонентів 1:10 та більшим, в яких необхідно забезпечити точний вміст (мікродозу) певного компонента в елементарному об'єму суміші, перевищення якого недопустиме, оскільки значна концентрація компонента може зумовити небезпечність готової продукції, а недостатня концентрація – може зробити продукцію неефективною.

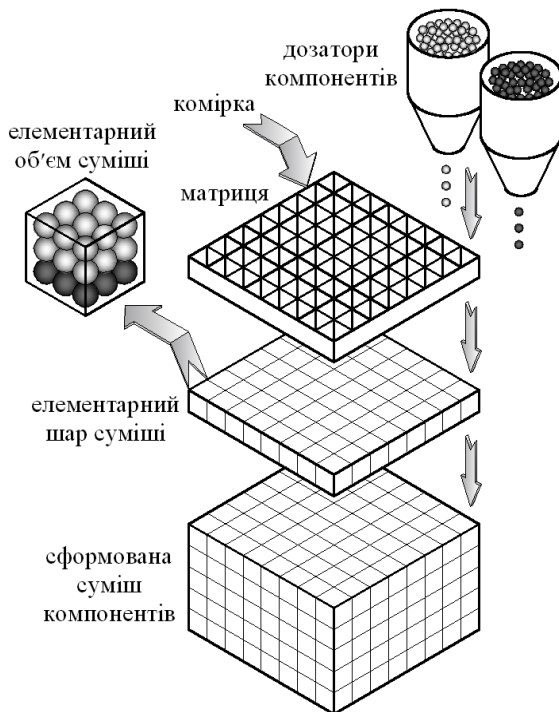


Рис. 3 – Схема нонміксингового способу формування суміші із сипких матеріалів

Необхідно зауважити, що в комірці матриці частинки компонентів не є перемішаними. Вони розташовані або шарами один над другим у порядку завантаження в комірку (рис. 4, а), або мають випадкове розташування (рис. 4, б). Розташування частинок сипких компонентів залежить від їх геометричних характеристик та фізико-механічних властивостей.

Покращити якість суміші, що утворена в нонміксинговий спосіб, можна, якщо завантажувати компоненти в сусідні комірки матриці у різній послідовності (рис. 5, а) або ж забезпечувати перемішування компонентів ще на етапі завантаження у комірку матриці, тобто одночасне завантаження (рис. 5, б).

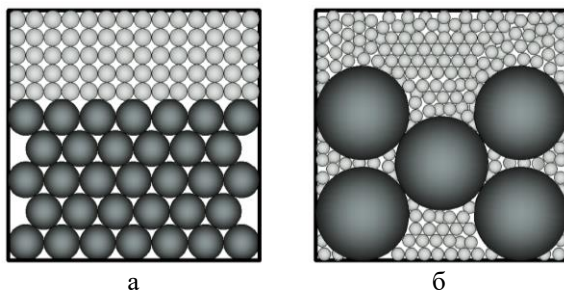


Рис. 4 – Схеми розташування компонентів суміші в комірці матриці:  
а – пошарове розташування; б – випадкове розташування

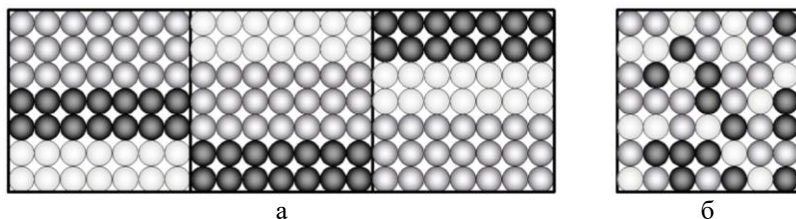


Рис. 5 – Способи завантаження компонентів у комірку матриці:  
а – завантаження у різній послідовності; б – одночасне завантаження

Нонміксинговий спосіб формування суміші із використанням матриці дозволяє отримати суміш із детермінованою структурою, в якій шар суміші складається із елементарних шарів, кожен з яких, в свою чергу, утворений з елементарних об'ємів суміші, у кожному з яких забезпечено необхідне співвідношення між компонентами. У такий спосіб формування суміші досягається рівномірний розподіл сипких компонентів за об'ємом суміші, що близький до ідеального, незалежно від необхідного співвідношення сипких компонентів та їх властивостей і характеристик.

Визначимо залежності, що необхідні для розрахунку маси сипких компонентів (мікродоз) для їх завантаження в комірку матриці в

необхідному співвідношенні. Нехай, компоненти у комірку матриці завантажуються пошарово, причому шари компонентів не перемішуються. Співвідношення між масами  $n$  компонентів, що необхідне для формування суміші, можна записати у вигляді:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{1}{k_1}, \frac{m_1}{m_3} = \frac{1}{k_2}, \frac{m_1}{m_4} = \frac{1}{k_3}, \dots, \frac{m_1}{m_n} = \frac{1}{k_{n-1}}, \quad (5)$$

або

$$m_2 = k_1 m_1, m_3 = k_2 m_1, m_4 = k_3 m_1, \dots, m_n = k_{n-1} m_1, \quad (6)$$

де  $m_1, m_2, m_3, m_4, \dots, m_n$  – маси, відповідно, першого, другого, третього, четвертого та  $n$ -го компонентів, які необхідні для формування елементарного об'єму суміші у заданому співвідношенні між компонентами, кг;  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_{n-1}$  – коефіцієнти співвідношення, відповідно, між другим, третім, четвертим,  $n - 1$  компонентами (причому  $n \neq 1$ ) та першим компонентом, що має масу  $m_1$ .

Маса  $n$ -го компонента визначається за виразом:

$$m_n = V_n \rho_n, \quad (7)$$

де  $V_n$  – об'єм, який займає  $n$ -й компонент масою  $m_n$ , м<sup>3</sup>;  $\rho_n$  – насипна густина  $n$ -го сипкого компонента, кг/м<sup>3</sup>.

Після підстановки виразу (7) у рівняння (6), після перетворень отримаємо рівняння:

$$V_2 = k_1 V_1 \frac{\rho_1}{\rho_2}, V_3 = k_2 V_1 \frac{\rho_1}{\rho_3}, V_4 = k_3 V_1 \frac{\rho_1}{\rho_4}, \dots, V_n = k_{n-1} V_1 \frac{\rho_1}{\rho_n}, \quad (8)$$

де  $V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$  – об'єм, який, відповідно, займає перший, другий, третій, четвертий та  $n$ -й компонент у комірці матриці, м<sup>3</sup>;  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \dots, \rho_n$  – насипна густина, відповідно, першого, другого, третього, четвертого та  $n$ -го сипкого компонента, кг/м<sup>3</sup>.

Оскільки комірка матриці заповнена компонентами повністю, тоді об'єм комірки, який відомий, рівний сумі об'ємів усіх компонентів, що завантажуються в комірку у необхідному співвідношенні (за умови, що компоненти розташовані в комірці шарами один над другим, тобто не перемішуються):

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \dots + V_n, \quad (9)$$

де  $V$  – об'єм комірки матриці, м<sup>3</sup>.

Після підстановки у вираз (9) рівнянь (8), отримаємо:

$$V_1 = \frac{V}{\left(1 + k_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} + k_2 \frac{\rho_1}{\rho_3} + k_3 \frac{\rho_1}{\rho_4} + \dots + k_{n-1} \frac{\rho_1}{\rho_n}\right)}. \quad (10)$$

Після підстановки значення об'єму  $V_1$ , що розраховане за виразом (10), у рівняння (8), розраховуються об'єми компонентів  $V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$ , що необхідні для їх завантаження в комірку матриці у заданому співвідношенні. За розрахованими значеннями об'ємів компонентів  $V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$  визначається маса кожного компонента, яка необхідна для їх завантаження в комірку матриці у заданому співвідношенні:

$$m_1 = V_1 \rho_1, m_2 = V_2 \rho_2, m_3 = V_3 \rho_3, m_4 = V_4 \rho_4, \dots, m_n = V_n \rho_n. \quad (11)$$

Залежності (11) дозволяють обґрунтувати режим роботи дозаторів мікродоз компонентів, що забезпечить високу якість суміші, яка сформована у нонміксинговий спосіб. Таким чином, ефективність способу нонміксингового формування суміші компонентів у значній мірі залежить від роботи дозаторів компонентів, зокрема від того, наскільки малу дозу сипкого компонента вони можуть сформувати із урахуванням фізико-механічних властивостей та геометричних характеристик його частинок. Оскільки, що менший елементарний об'єм суміші, який формується дозаторами із мікродоз компонентів, то більш рівномірний розподіл компонентів за об'ємом суміші і, відповідно, краща її якість.

### Висновки

Обґрунтований спосіб нонміксингового формування суміші із сипких компонентів дозволяє забезпечити рівномірний розподіл компонентів за об'ємом суміші, який близький до ідеального. У цей спосіб можна змішувати сипкі компоненти, що мають різні фізико-механічні властивості та геометричні характеристики частинок, із співвідношенням компонентів у суміші 1:10 та більшим. Отримана залежність, яка дозволяє обґрунтувати елементарний об'єм суміші для реалізації запропонованого способу формування суміші. У разі формування технічними засобами елементарних об'єм суміші такої величини, можна отримати суміш високої якості, оскільки розподіл компонентів у ній буде наближатися до ідеального. Також отримані залежності, які дозволяють розрахувати масу мікродоз компонентів для формування елементарного об'єму суміші та, відповідно, обґрунтувати режим роботи дозаторів.

### Список посилань

1. Балагуров, И. А. Кинетика формирования многокомпонентных смесей разнородных дисперсных материалов : дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.17.08 – “Процессы и аппараты химических технологий” / Балагуров Иван Александрович; ФГБОУВО “Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина”. – Иваново, 2018. – 131 с.

2. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
3. Harnby, N. Mixing in the process industries (Second edition) / N. Harnby, M. F. Edwards, A. W. Nienow. – Butterworth-Heinemann, 1997. – 432 p. <http://doi.org/10.1016/B978-0-7506-3760-2.X5020-3>
4. Berthiaux, H. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology / H. Berthiaux, V. Mizonov, V. Zhukov // Powder Technology. – 2005. – № 157 (1–3). – P. 128–137. <http://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.019>
5. Bridgwater, J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means – A perspective / J. Bridgwater // Particuology. – 2012. – № 10 (4). – P. 397–427. <http://doi.org/10.1016/j.partic.2012.06.002>
6. Верлока, И. И. Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов / И. И. Верлока, А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев // Электронный научный журнал “Инженерный вестник Дона”. – 2014. – № 4. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа до журн. : <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599>
7. Техника переработки пластмасс / Под. Ред. Н. И. Басова, В. Броя. – М. : Химия, 1985. – 528 с.
8. Dudarev, I. Modeling of mixing bulk materials / I. Dudarev, R. Kirchuk, Y. Hunko, S. Panasyuk // In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2020. – P. 54–64. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_6)
9. Евсеев, А. В. Нонмиксинговые технологии и оборудование для получения многокомпонентных смесей / А. В. Евсеев, М. С. Парамонова // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 8. Ч. 2. – С. 188–194.
10. Евсеев, А. В. Новый критерий оценки качества смесей сыпучих материалов / А. В. Евсеев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 11. Ч. 1. – С. 139–147.
11. Васин, В. М. Способ смешивания сыпучих материалов и математические модели потоков их частиц / В. М. Васин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 1. – С. 9–18.
12. Патент №141534 UA, МПК В01F3/18, В01F7/00, В01F7/08. Формувач суміші сипких матеріалів / Дударев І. М.; заявл. 28.10.2019; опубл. 10.04.2020; Бюл. № 7, 2020 р.