

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.2>

УДК 621:542.3

БУРМІСТЕНКОВ О. П., БІЛА Т. Я., СТАЦЕНКО В. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

### АЛГОРИТМ ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЗМІШУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета.** Створення алгоритму проектування змішувальних комплексів безперервної дії, що дозволить визначати параметри обладнання, виходячи з вимог до якості, продуктивності та заданої рецептури суміші.

**Методика.** У роботі використано метод дискретних елементів, класичні положення механіки, теорії контактної взаємодії твердих тіл, метод математичного моделювання.

**Результати.** У роботі запропоновано узагальнений алгоритм проектування змішувального комплексу безперервної дії для сипких матеріалів. Представлено порядок проектування відцентрового змішувача, формувачів потоків, тарілчастих живильників та конічно-циліндричних бункерів. Розрахунки конструктивних та технологічних параметрів здійснюються на основі інформації про фізико-механічні властивості частинок сипких компонентів, вимог до продуктивності обладнання та однорідності суміші. Представлено результати розрахунків змішувального комплексу для трикомпонентної суміші, що використовується для виготовлення поліетиленової плівки. Для перевірки запропонованого алгоритму створено математичну модель на основі метода дискретних елементів. Проведено моделювання процесу змішування та визначено коефіцієнти неоднорідності кожного з компонентів у готовій суміші. Отримані результати підтвердили, що запропонований алгоритм дозволяє визначити параметри змішувального комплексу, які забезпечують відповідність заданим вимогам до якості та продуктивності обладнання.

**Наукова новизна.** У роботі удосконалено математичні моделі динаміки руху сипких матеріалів у змішувальних комплексах, що включають бункерні пристрої, тарілчасті живильники, формувачі потоків та відцентровий змішувач безперервної дії, з врахуванням дискретного характеру руху сипкого матеріалу.

**Практична значимість.** Отримані результати дозволяють за заданими значеннями продуктивності, рецептури та вимогами до однорідності суміші розрахувати конструктивні та технологічні параметри обладнання, що входить до складу змішувального комплексу безперервної дії.

**Ключові слова:** алгоритм; проектування; живильник; бункер; змішувач; сипкий матеріал; процес змішування; змішувальний комплекс.

**Вступ.** У різних галузях промисловості широко використовуються сипкі матеріали для виготовлення композицій у виробництві продукції різноманітного призначення: від деталей взуття до деталей машинобудування. Основними вимогами при виготовленні таких композицій є забезпечення високої продуктивності обладнання, заданого відсоткового складу та однорідності суміші [1, 3].

Перспективним з точки зору виконання поставлених завдань є використання автоматизованих змішувальних комплексів безперервної дії (АЗКБД). Вони забезпечують високу продуктивність, кращі масогабаритні та енергетичні показники порівняно з обладнанням періодичної дії. До складу таких комплексів входять бункери, живильники, формувачі потоків та змішувач. Одним з основних обмежень, що ускладнює використання обладнання безперервної дії, є підвищені вимоги до параметрів руху потоків частинок, що надходять у змішувач. Це обумовлено появою пульсацій і розривів у безперервних потоках частинок та призводить до зниження якості суміші внаслідок зміни відсоткового складу в локальних об'ємах суміші. Високі вимоги до якості кінцевих продуктів та, відповідно, до сипких композицій зумовлюють актуальність задач проектування змішувальних комплексів (ЗК) з заданими конструктивними та технологічними параметрами.

**Постановка завдання.** Завданням дослідження є обґрунтування вимог до конструктивних та технологічних параметрів елементів змішувального комплексу, фізико-механічних властивостей сипкого середовища та на цій основі розроблення алгоритму проектування АЗКБД, що забезпечує приготування сумішей заданої якості.

**Результати та їх обговорення.** Автоматизовані змішувальні комплекси безперервної дії, до складу яких входять бункери, живильники, формувачі та змішувачі, є найбільш поширеними в промисловості. Зберігання та переміщення сипкого матеріалу в обладнанні цього типу забезпечується технологічними лініями, що складаються з бункерів, живильників та формувачів потоків [5, 11]. Кількість таких ліній дорівнює кількості компонентів суміші. Потоки всіх компонентів надходять у змішувач, який забезпечує їх перемішування. В якості приклада розглянемо відому [3, 7] рецептуру суміші для виготовлення поліетиленової плівки товщиною 6-10 мкм. До її складу входять три компоненти з наступними фізико-механічними характеристиками (табл. 1).

Таблиця 1

**Рецептура та властивості компонентів суміші для виготовлення поліетиленової плівки**

Назва компоненту	Вміст компоненту у суміші, %	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Розміри гранул, мм	Кут природнього укусу, град	Коефіцієнт тертя ковзання
Поліетилен низького тиску TIPELIN FS 471-02	95	941	3–5	29	0,2
Поліетилен високого тиску LLDPE Sabic 118N	4	918	3–5	29	0,2
Добавка EFPE 1001	1	1150	3	35	0,3

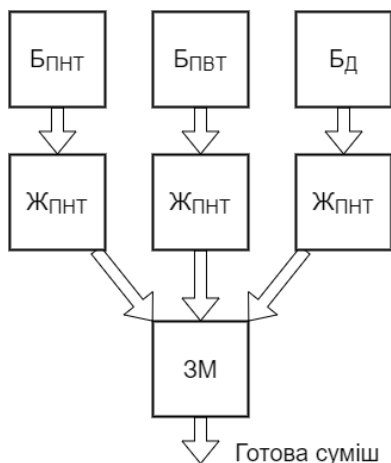


Рис. 1. Структурна схема змішувального комплексу для приготування поліетиленової плівки

З табл. 1 видно, що фізико-механічні властивості частинок достатньо близькі, але відсотковий вміст компонентів суміші відрізняється у 95 разів. Таким чином, для створення універсальних АЗКБД, які можна використовувати для приготування сумішей за різними рецептурами, необхідно забезпечити можливість керування продуктивністю живильників у максимально широкому діапазоні. Також важливо мінімізувати величину пульсацій потоків сипких компонентів у всьому діапазоні керування. Структурна схема ЗК для виготовлення трикомпонентної суміші зображена на рис.1. На схемі використані наступні аббревіатури: ПВТ – поліетилен високого тиску, ПНТ – поліетилен низького тиску, Д – добавка. Літерами Б позначені бункери, Ж – живильники, ЗМ – змішувач. Подвійними стрілками показаний напрямок руху сипких компонентів.

Запропонований у роботі алгоритм проектування АЗКБД наведено на рис. 2.

Перший етап розрахунку комплексу передбачає вибір наближених початкових конструктивних та технологічних параметрів відцентрового змішувача. На їх основі обчислюються траєкторії руху та час перебування частинок у змішувачі. Ці параметри є базовими для визначення продуктивності обладнання.



Рис. 2. Схема алгоритму проектування АЗКБД

Наступний етап дозволяє розрахувати розташування формувачів потоків частинок відносно змішувача. Керування переміщенням сипких компонентів від бункерів до змішувачів у ЗК такого типу доцільно здійснювати за допомогою живильників тарілчастого типу. Їх розрахунок передбачає визначення положення ножа, швидкості обертання та розмірів тарелі, відстані від поверхні тарелі до вихідного патрубку бункера, які забезпечують необхідну інтенсивність руху потоку сипкого матеріалу [10].

Наступним етапом алгоритму є визначення параметрів бункерів. Оскільки робочий орган тарілчастого живильника обертається навколо центральної вісі, оптимальним в цьому випадку є використання бункерів конічно-циліндричної форми. Розташування бункерів має забезпечувати збіг їх осей з відповідними осями обертання тарелей живильників для формування конусу сипкого матеріалу точно в центрі тарелі та його рівномірне переміщення у процесі роботи.

Розраховані значення дозволяють визначити інші параметри комплексу та здійснити перевірку їх відповідності заданим вимогам. У випадку невідповідності розрахованих значень заданим, змінюються початкові умови та процес розрахунку повторюється. Параметри, що є вхідними при проектуванні ЗК наведені у табл. 2.

Таблиця 2

**Перелік параметрів, що визначають вимоги до проектування змішувального комплексу**

№ п/п	Назва	Позначення
Технологічні параметри		
1	Масова продуктивність	$Q$ , кг/с
2	Однорідність суміші	$V_c$ , %
3	Відсотковий склад (концентрація ключового компонента)	$S_{KK}$ , %
4	Час роботи без додаткового завантаження	$T_p$ , с
Параметри сипкого матеріалу		
5	Радіус частинки	$r$ , м
6	Насипна густина	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
7	Кут природнього укусу	$\varphi$ , рад
8	Коефіцієнти тертя між частинками сипкого матеріалу та між частинками та матеріалом робочих органів	$f_{TP1} \dots f_{TPn}$
9	Максимально припустима сила впливу на матеріал	$F_m$ , Н
Масогабаритні та енергетичні параметри		
10	Максимально припустима потужність	$P$ , Вт
11	Максимально припустимі розміри комплексу	$L \times W \times H$ , м
12	Максимально припустима маса	$m_k$ , кг

Відповідно до принципу роботи відцентрового змішувача безперервної дії забезпечити високу однорідність суміші можна у випадку, коли частинки рухаються у розріджених шарах. Для цього достатньо, щоб запас матеріалу у змішувачі міг бути розташований на дні ротора в один шар. Час перебування частинок у змішувачі, запас матеріалу та його продуктивність є взаємозв'язаними параметрами, що визначають кількість частинок, які одночасно можуть знаходитись всередині змішувача. Прийmemo, що задана продуктивність АЗКБД становить  $Q = 0,066$  кг/с (238 кг/год) та задамо початкове наближення часу перебування частинок всередині ротора  $t_3 = 0,3$  с. Також прийmemo, що середній радіус частинок дорівнює 2 мм [7]. Це дозволить визначити маси частинок кожного з компонентів.

$$m_{\text{ч}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{ч}}, \quad (1)$$

де  $m_{\text{ч}}$  – маса частинки,  $\rho_{\text{ч}}$  – густина частинки.

Для нашого прикладу маса частинки ПНТ  $m_{\text{ПНТ}} = 0,0317$  г; ПВТ  $m_{\text{ПВТ}} = 0,0308$  г; добавки  $m_{\text{Д}} = 0,016$  г.

Розрахуємо середню кількість частинок, що можуть одночасно знаходитись всередині змішувача з урахуванням відсоткового складу суміші [8]:

$$n = \frac{Q}{0,95m_{\text{ПНТ}} + 0,04m_{\text{ПВТ}} + 0,01m_{\text{Д}}} t_3 = 630,2. \quad (2)$$

Мінімальна площа основи ротора, яка дозволяє розташувати  $n$  сферичних частинок радіусом  $r$ , визначається за формулою [3]:

$$S_p \geq \frac{n \cdot \pi \cdot r^2}{0,74048}. \quad (3)$$

За співвідношенням (3) розраховуємо мінімальну площу дна ротора, що дозволяє розташувати  $n$  частинок в один шар  $S_p = 0,0107$  м<sup>2</sup>. Тоді мінімальний радіус основи ротора дорівнюватиме  $R_0 = 0,058$  м.

Прийmemo наступні початкові наближення для швидкості обертання та геометричних розмірів ротора: швидкість обертання  $\omega = 125$  рад/с, кут нахилу бічної стінки  $\alpha = 35^\circ$ ; висота ротора  $H = 0,18$  м. Розрахунки траєкторій частинок за співвідношеннями, запропонованими у роботі [9], свідчать, що обрана швидкість обертання ротора є достатньою для виходу частинок з нього за рахунок відцентрових сил. Час виходу частинки з ротора становить 0,203 с (у найгіршому випадку, за якого частинка має пройти максимально довгу траєкторію по дну ротора). Отримані результати підтверджують, що обрані параметри змішувача дозволяють забезпечити задану продуктивність та необхідну форму траєкторій частинок.

Наступним етапом розрахунку за запропонованим алгоритмом є визначення розмірів та положення формувачів потоків. Схема розташування двох формувачів відносно змішувача показана на рис.3. При потраплянні на дно ротора центри потоків мають координати  $(x_2^I; 0)$  та  $(x_1^I; 0)$ . Найкраща однорідність забезпечується у випадку, коли центри потоків частинок збігаються, тобто різниця між їх координатами є мінімальною:

$$|x_2^I - x_1^I| = 0. \quad (4)$$

Ця умова може виконуватись у будь-якій точці дна ротора. Враховуючи, що формувачі потоків зручно розташовувати на однаковій висоті, і форма траєкторій частинок різних компонентів під час падіння у ротор буде приблизно однаковою, доцільно забезпечити потрапляння частинок в центр ротора, тобто  $x_2^I = 0$  та  $x_1^I = 0$ .

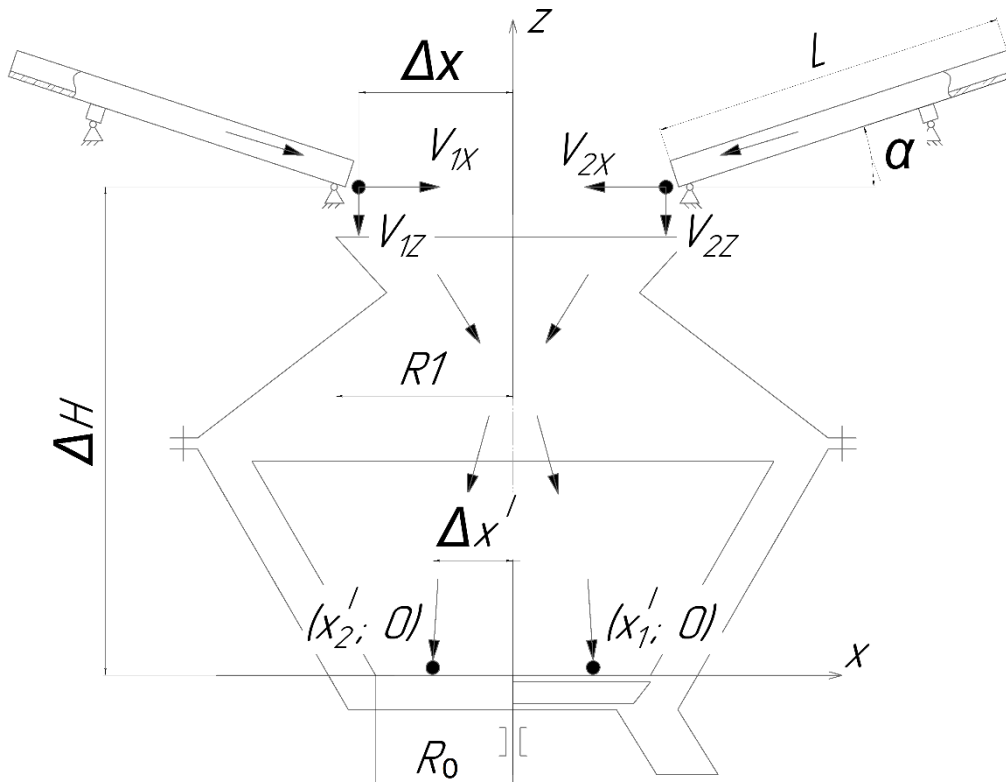


Рис. 3. Схема розташування відцентрового змішувача та формувачів потоків

Наступна система рівнянь дозволяє визначити координати частинок в момент падіння на дно ротора:

$$\begin{cases} a_f = \sqrt{(g \cos \alpha (\sin \alpha - k \cos \alpha))^2 + (g (\cos^2 \alpha + k \cos \alpha \sin \alpha - 1))^2} \\ t_f = \sqrt{\frac{2L}{a_f}} \\ V_x = g \cos \alpha (\sin \alpha - k \cos \alpha) \cdot t_f \\ V_z = g (\cos^2 \alpha + k \cos \alpha \sin \alpha - 1) \cdot t_f \\ \frac{gt^2}{2} - V_z t - \Delta H = 0 \\ x = -\Delta x + V_x t \end{cases} \quad (5)$$

Мінімізація значення  $x$  дозволяє визначити оптимальні параметри розташування змішувача та формувачів. Принципи роботи змішувального комплексу та властивості сипких матеріалів дозволяють встановити наступні обмеження:

1)  $\Delta H$  – діапазон відстаней від нижньої кромки формувача до дна ротора. Мінімальне значення обмежене розмірами ротора та змішувача. Максимальне значення цієї відстані жорстко не обмежене. Але доцільно зменшити цю відстань, оскільки падіння частинки з великої відстані збільшує її кінетичну енергію, що впливає на її траєкторію всередині ротора. Задаємо  $\Delta H \in [0,38; 0,45]$ .

2) Довжину поверхні формувача задамо у межах  $L \in [0,12; 1]$ . Розташувати три живильники для даного комплексу можна практично на будь-якій відстані від вхідного патрубку змішувача. Але довжина формувача менше 0,1 м значно ускладнить встановлення датчика маси, а довжина більше 1 м – призведе до суттєвого збільшення кінетичної енергії частинок.

3) Відстань від вісі обертання ротора до поверхні формувача обмежена радіусами вхідної воронки та вхідного патрубку змішувача. Обираємо  $\Delta x \in [0,05; 0,1]$ .

4) Максимальне значення кута нахилу поверхні формувача повинно дозволяти встановити датчик маси, мінімальне – має бути більшим за кут природнього укосу матеріалу. Обираємо  $\alpha \in [35^\circ; 45^\circ]$ .

Розв'язок оптимізаційної задачі для всіх трьох компонентів представлено у табл. 3.

Таблиця 3

Параметри формувачів потоків компонентів суміші

Назва параметру	ПНТ	ПВТ	Добавка EFPE 1001
Довжина поверхні формувача, м	0,12	0,12	0,12
Відстань від вісі обертання до формувача, м	0,1	0,1	0,1
Кут нахилу формувача, град	45	45	45
Відстань від дна ротора до формувача, м	0,38	0,38	0,38

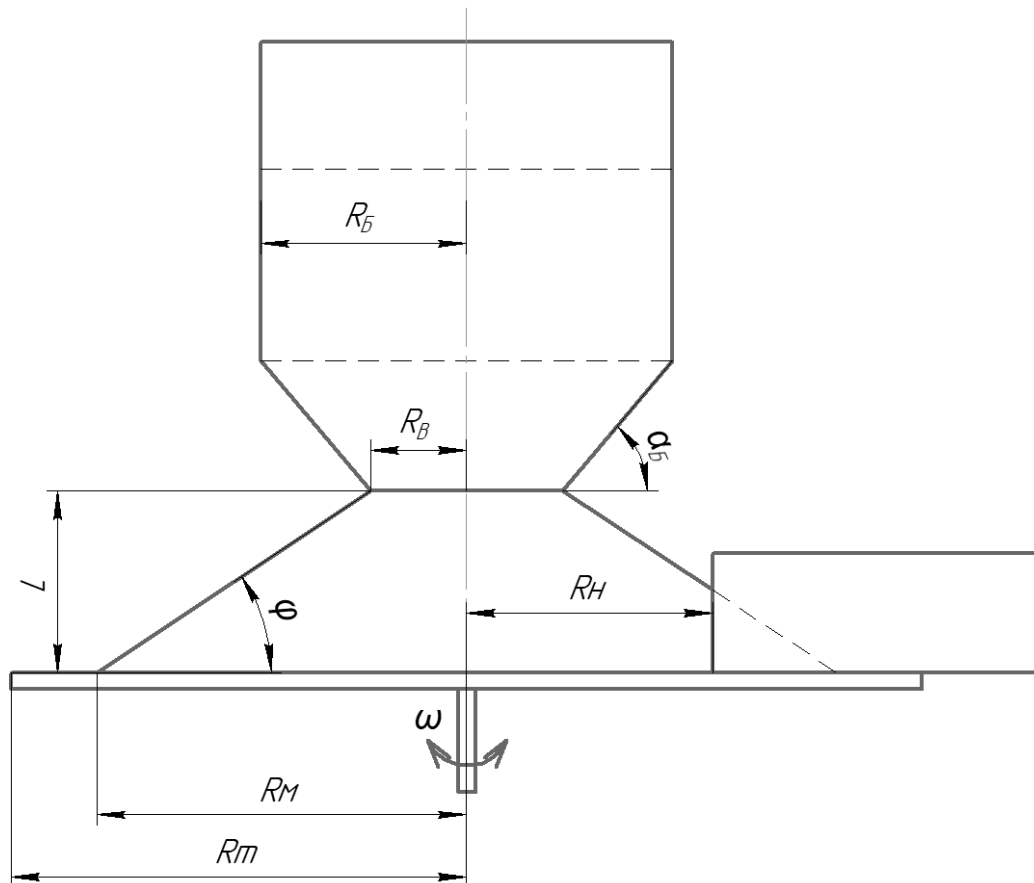
Визначення конструктивних та технологічних параметрів живильників має здійснюватись з урахуванням всієї системи «бункер – тарілчастий живильник» (рис. 4). Рух матеріалу забезпечується за рахунок знімання ножом частини матеріалу з тарелі. Тим самим змінюється форма конусу матеріалу, що знаходиться на її поверхні (рис. 4). Сипкий матеріал рухається під дією сил тяжіння та заповнює об'єм, що був знятий ножом [4, 6]. Таким чином, частинки постійно надходять з бункера.

Об'ємну продуктивність живильника можна визначити за наступною формулою на основі значень його конструктивних параметрів:

$$Q_V = \frac{\omega\pi}{3} (L + R_B \operatorname{tg} \varphi - R_H \operatorname{tg} \varphi) \left[ \left( \frac{L}{\operatorname{tg} \varphi} + R_B \right)^2 + \left( \frac{L}{\operatorname{tg} \varphi} + R_B \right) R_H + R_H^2 \right] - \pi R_H^2 (L + R_B \operatorname{tg} \varphi - R_H \operatorname{tg} \varphi) \quad (6)$$

При проектуванні нового обладнання потрібно визначити співвідношення технологічних та конструктивних параметрів, що дозволять отримати заданий діапазон зміни продуктивності та забезпечать коректну роботу системи. Мінімальне значення продуктивності завжди дорівнює нулю (у випадку тарілчастого живильника вона відповідає режиму роботи,

за якого ніж не торкається конуса матеріалу  $R_H > R_M$ ). Таким чином, задача зводиться до визначення параметрів, які забезпечать задане максимальне значення продуктивності.



Для рецептури суміші, яка розглядається у роботі, найбільше співвідношення продуктивностей живильників становить 95:1 (ПНТ та добавка EFPE 1001). Забезпечення цієї різниці за рахунок геометричних розмірів обладнання з практичної точки зору є недоцільним, оскільки це ускладнить використання комплексу для приготування сумішей з іншими рецептурами. Виходячи з цих міркувань, необхідно різницю у продуктивності компенсувати за рахунок зміни положення ножа та швидкості обертання таріли, а розміри бункерів та живильників обрати однаковими. Таким чином, спочатку доцільно розв'язати оптимізаційну задачу для живильника з максимальною продуктивністю (живильник ПНТ). А при розв'язку оптимізаційних задач для живильників інших компонентів встановити обмеження на геометричні параметри таким чином, щоб вони дорівнювали розмірам живильника ПНТ.

Обмеження для живильника ПНТ:

- 1) Відстань від вихідного патрубка бункера до поверхні таріли  $L \in [0,15; 0,2]$ . Величина цієї відстані має бути достатньою для того, щоб сипкий матеріал міг утворити конус на поверхні таріли та вільно висипатись з бункера.
- 2) Діапазон можливих швидкостей обертання таріли обмежений параметрами приводу таріли  $\omega \in [0,1; 100]$ .

Радіус вихідного патрубка бункера повинен максимально знижувати вірогідність появи склепін [6]. Він обирається виходячи з розмірів частинок. В даному випадку доцільно обрати  $R_B = 0,01$  м.

Результати розрахунків параметрів тарілчастих живильників наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Параметри тарілчастих живильників

Назва параметра	ПНТ	ПВТ	Добавка EFPE 1001
Швидкість обертання тарелі, $c^{-1}$	1,5	0,35	0,1
Відстань від кромки ножа до вісі обертання тарелі, м	0,257	0,279	0,287
Відстань від тарелі до патрубку бункера, м	0,2	0,2	0,2

Результати, що отримані на попередніх етапах розрахунку, дозволяють перейти до визначення розмірів конічно-циліндричних бункерів. Їх схема показана на рис. 5.

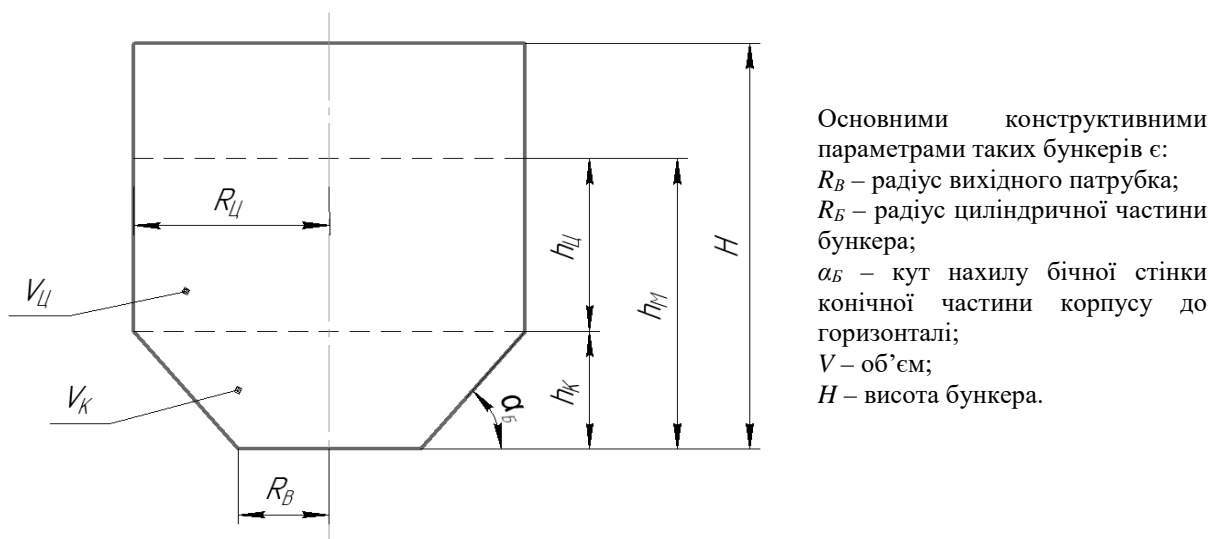


Рис. 5. Схема конічно-циліндричного бункера

Конструктивні параметри бункера мають:

забезпечувати можливість зберігання заданого об’єму сипкого матеріалу  $V_M$ ;

- зменшувати ймовірність утворення склепінь у зоні вихідного патрубка;

- створювати умови для повного витікання сипкого матеріалу за рахунок сил тяжіння без використання додаткових механічних пристроїв.

Висоту рівня матеріалу в бункері можна визначити через його конструктивні параметри та об’єм за формулою:

$$h_M = \frac{1}{\pi R_B^2} \left[ V_M - \frac{1}{3} \operatorname{tg} \alpha_B (R_B - R_B) (R_B^2 + R_B R_B + R_B^2) \right] + \operatorname{tg} \alpha_B (R_B - R_B). \quad (7)$$

Оскільки з практичних міркувань доцільно створювати бункери однакових геометричних розмірів для всіх компонентів суміші, необхідно при визначенні їх параметрів виходити з необхідного об’єму компоненту з найбільшим відсотковим складом (в даному випадку ПНТ). Цей об’єм визначається запасом матеріалу, який має зберігатись під час роботи комплексу.

Вважатимемо, що заданий об’єм дорівнює  $V = 0,1 \text{ м}^3$ . Введемо обмеження на можливі діапазони зміни параметрів бункерів:



1) Кут нахилу бічної стінки  $\alpha_B \in [45^0; 60^0]$ . Максимальне значення має бути меншим за кут, за якого матеріал починає рухатись гідравлічно [1]. Мінімальне – має перевищувати кут природнього укосу матеріалу.

2) Діапазон зміни радіусу циліндричної частини бункера визначається загальними габаритами обладнання. Прийемо  $R_B \in [0,04; 0,09]$ .

В результаті розв'язку оптимізаційної задачі отримуємо наступні параметри бункерів:  $R_B = 0,01$  м,  $\alpha_6 = 45^0$ ,  $R_6 = 0,09$  м.

Перевірку визначених конструктивних, технологічних параметрів та оцінку якості суміші виконано за допомогою математичної моделі АЗКБД (рис. 6) методом дискретних елементів [2] у системі EDEM 2017. До складу моделі входять живильники та бункери для всіх трьох компонентів суміші, формувачі потоків та відцентровий змішувач з турбулізатором та конічним ротором. Конструктивні та технологічні параметри обладнання, фізико-механічні властивості частинок були задані відповідно до розрахованих значень. З метою зменшення тривалості моделювання у бункери завантажувалась мінімальна кількість частинок, яка дозволяла забезпечити коректну роботу обладнання, а саме: ПВТ – 4000; ПНТ – 10000; добавка EFPE 1001 – 7000 частинок. Тривалість моделювання складала 15 сек. Після виходу із змішувача частинки збирались у циліндричну ємність, яка була розділена на 16 зон (рис. 7), що мали форму прямокутних паралелепіпедів. Границі зон показані тонкими лініями.



Рис. 6. Модель АЗКБД виготовлення суміші для поліетиленової плівки

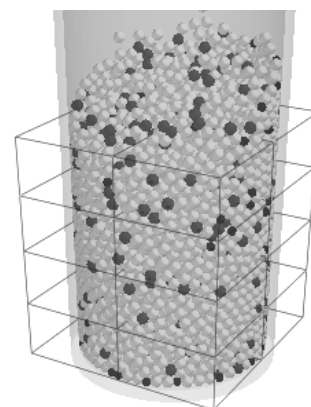


Рис. 7. Розділення ємності з готовою сумішшю на зони для визначення однорідності

У кожній з зон розраховувалась кількість частинок кожного з компонентів суміші. На основі цих значень визначався коефіцієнт неоднорідності на формулою:

$$V_c = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (c_i - \bar{c})^2}. \quad (8)$$

В результаті отримані наступні значення:

- 1) для ПНТ  $V_c = 0,028$ ;
- 2) для ПВТ  $V_c = 0,307$ ;
- 3) для добавки ЕФРЕ 1001  $V_c = 0,735$ .

Величини коефіцієнтів неоднорідності мають більші значення для компонентів, відсоткова кількість яких у складі суміші менша.

#### Висновки:

1) Запропонований алгоритм проектування змішувальних комплексів дозволив визначити конструктивні та технологічні параметри його складових елементів, що забезпечили задані продуктивність та якість суміші.

2) Проведені дослідження показали, що запропонований алгоритм можна використовувати для багатокомпонентних сумішей, в яких відсотковий склад окремих компонентів суттєво відрізняється.

#### References

#### Література

1. Statsenko, V. V., Burmistenkov, O. P., Bila, T. Y. (2017). Avtomatyzovani kompleksi bezperervnoho pryhotuvannya kompozycji syrkux materialiv: monografiya [Automated complexes for bulk material compositions continuous preparation]. Kyiv: Kyiv National University of Technologies and Design. 220 p. [in Ukrainian].
1. Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія. Київ: КНУТД, 2017. 220 с.
2. Statsenko, V., Burmistenkov, O., Bila, T., Demishonkova, S. (2021). Determining the Loose Medium Movement Parameters in a Centrifugal Continuous Mixer Using a Discrete Element Method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3(7 (111)), P. 59–67. doi:10.15587/1729-4061.2021.232636.
2. Statsenko V., Burmistenkov O., Bila T., Demishonkova S. Determining the Loose Medium Movement Parameters in a Centrifugal Continuous Mixer Using a Discrete Element Method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3(7 (111)). P. 59–67. doi:10.15587/1729-4061.2021.232636.
3. Burmistenkov, O. P., Starodub, O. A., Misiats, V. P., Bila, T. Y., Statsenko, V. V. (2011). Protsey ta obladnannia pidhotovchikh vyrobnytstv lëhkoï promyslovosti [Processes and equipment of light industry preparatory industries]. Kyiv: Kyiv National University of Technologies and Design. 137 p. [in Ukrainian].
3. Бурмістенков О. П., Стародуб О. А., Місяць В. П., Біла Т. Я., Стаценко В. В. Процеси та обладнання підготовчих виробництв легкої промисловості. К.: КНУТД, 2011. 137 с.
4. Paula Macías Vera, Torben Brøchner, Jan S. Strøm, Hisamitsu Takai (2014). Report 12: Flow of salt particles on a spinning spreader disk. External Influences on Spray Patterns. *EPAS*.
4. Paula Macías Vera, Torben Brøchner, Jan S. Strøm, Hisamitsu Takai. Report 12: Flow of salt particles on a spinning spreader disk. External Influences on Spray Patterns. *EPAS*. 2014.
5. Burmistenkov, O. P., Bila, T. Y., Statsenko, V. V. (2017) Osnovni napriamky avtomatyzatsii zmishuvalnykh kompleksiv bezperervnoi dii dlia syrkux materialiv [The main directions of continuous mixing complexes automation for bulk materials]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky = Bulletin of*
5. Бурмістенков О. П., Біла Т. Я., Стаценко В. В. Основні напрямки автоматизації змішувальних комплексів безперервної дії для сипких матеріалів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. № 6. С. 28–31.

*Khmelnytsky National University. Technical sciences*, № 6, P. 28–31 [in Ukrainian].

6. Burmistenkov, O. P., Statsenko, V. V. (2019). Doslidzhennia roboty systemy keruvannya produktyvnosti tarilchastoho zhyvlynyka bezpererвної dii [Research of control system work of a continuous action plate feeder productivity]. *VIII Ukrainko-Polski naukovi dialohy = VIII Ukrainian-Polish scientific dialogues: materialy mizhnar. konf. (16–19 zhovtnia 2019)*. Khmelnytskyi; Kamianets-Podilskyi [in Ukrainian].

7. Havrylova, O. E., Nyklytyna, L. L., Kanaeva, N. S., Herkyua, O. Yu. (2015). Obzor sovremennykh polymernykh materyalov, pryeniaemykh v proyzvodstvakh lehkoy promyshlennosti [Review of modern polymeric materials used in light industry]. *Vestnyk Kazanskoho tekhnolohycheskoho unyversytetu = Kazan Technological University Bulletin*, P. 276–278 [in Russian].

8. Bila, T. Y., Statsenko, V. V. (2016). Vyznachennya optymalnykh parametriv vidcentrovogo zmishuvacha bezpererвної diyi [Determination of optimal parameters of a continuous action centrifugal mixer]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho unyversytetu. Tekhnichni nauky = Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical sciences*, № 4, P. 25–27 [in Ukrainian].

9. Statsenko, V. V., Burmistenkov, O. P., Bila, T. Y. (2020). Vyznachennya rozpodilennya chastynek sypkykh materialiv pid chas peremishuvannya u rotori vidcentrovogo zmishuvacha bezpererвної diyi [Determination of particle size distribution of bulk materials during mixing in the rotor of a continuous action centrifugal mixer]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho unyversytetu. Tekhnichni nauky = Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical sciences*, № 1 (281), P. 238–244 [in Ukrainian].

10. Burmistenkov, O. P., Statsenko, V. V. (2019). Doslidzhennya efektyvnosti keruvannya robochymy parametramy tarilchastoho dozatora bezpererвної diyi [Research of efficiency of working parameters management of the continuous action dispenser]. *VII Ukrainko-Polski naukovi dialohy = VII Ukrainian-Polish scientific dialogues: materialy mizhnar. konf. (16–19 zhovtnia 2019)*. Membizh [in Ukrainian].

11. Burmistenkov, O. P., Bila, T. Y., Statsenko, V. V. (2020). Proektuvannya avtomatyzovanykh zmishuvalnykh kompleksiv bezpererвної diyi dlya sypkykh materialiv [Design of continuous action automated mixing complexes for bulk materials]. *VI Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferenciya TK-2020 = VI International Scientific and Technical Conference TC-2020 (2–4 chervnya 2020)*. Luczk [in Ukrainian].

6. Бурмістенков О. П., Стаценко В. В. Дослідження роботи системи керування продуктивністю тарілчастого живильника безперервної дії. *VIII Українсько-Польські наукові діалоги: матеріали міжнар. конф. (16–19 жовтня 2019 р.)*. Хмельницький; Кам'янець-Подільський, 2019.

7. Гаврилова О. Е., Никитина Л. Л., Канаева Н. С., Геркина О. Ю. Обзор современных полимерных материалов, применяемых в производствах легкой промышленности. *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. С. 276–278.

8. Біла Т. Я., Стаценко В. В. Визначення оптимальних параметрів відцентрового змішувача безперервної дії. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2016. № 4 (239). С. 25–27.

9. Стаценко В. В., Бурмістенков О. П., Біла Т. Я. Визначення розподілення частинок сипких матеріалів під час перемішування у роторі відцентрового змішувача безперервної дії. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2020. №1 (281). С. 238–244.

10. Бурмістенков О. П., Стаценко В. В. Дослідження ефективності керування робочими параметрами тарілчастого дозатора безперервної дії. *VII Українсько-Польські наукові діалоги: матеріали міжнародної конференції (18–21 жовтня 2019 р.)*. Меджибіж, 2017.

11. Бурмістенков О. П., Біла Т. Я., Стаценко В. В. Проєктування автоматизованих змішувальних комплексів безперервної дії для сипких матеріалів. *VI Міжнародна науково-технічна конференція TK-2020 (2–4 червня 2020 р.)*. Луцьк, 2020.

**STATSENKO VOLODYMYR**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor  
Department of Computer Engineering  
and Electromechanics  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3932-792X>  
Scopus Author ID: 57210344190  
Researcher ID: C-3646-2017  
E-mail: [statsenko.v@knuud.edu.ua](mailto:statsenko.v@knuud.edu.ua)

**BURMISTENKOV OLEKSANDR**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Department of Computer Engineering  
and Electromechanics  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0001-4229>  
Scopus Author ID: 57210341826  
Researcher ID: T-5180-2018  
E-mail: [burmistenkov.op@knuud.edu.ua](mailto:burmistenkov.op@knuud.edu.ua)

**BILA TETIANA**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Department of Computer Engineering  
and Electromechanics  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-8937-5244>  
Scopus Author ID: 57213345108  
Researcher ID: T-5276-2018  
E-mail: [bila.ty@knuud.edu.ua](mailto:bila.ty@knuud.edu.ua)

**БУРМИСТЕНКОВ А. П., БЕЛАЯ Т. Я., СТАЦЕНКО В. В.**

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Украина

**АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СМЕСИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

**Цель.** Создание алгоритма проектирования смесительных комплексов непрерывного действия, позволяющего определять параметры оборудования, исходя из требований к качеству, производительности и заданной рецептуры смеси.

**Методика.** В работе использован метод дискретных элементов, классические положения механики, теории контактного взаимодействия твердых тел, метод математического моделирования.

**Результаты.** В работе предложен обобщенный алгоритм проектирования смесительного комплекса непрерывного действия для сыпучих материалов. Представлен порядок проектирования центробежного смесителя, формирователей потоков, тарельчатых питателей и коническо-цилиндрических бункеров. Расчеты конструктивных и технологических параметров осуществляются на основе информации о физико-механических свойствах частиц сыпучих компонентов, требований к производительности оборудования и однородности смеси. Представлены результаты расчетов смесительного комплекса для трехкомпонентной смеси, используемой для изготовления полиэтиленовой пленки. Для проверки предложенного алгоритма создана математическая модель на основе метода дискретных элементов. Проведено моделирование процесса смешения и определены коэффициенты неоднородности каждого из компонентов в готовой смеси. Полученные результаты подтвердили, что предложенный алгоритм позволяет определить параметры смесительного комплекса, обеспечивающие соответствие заданным требованиям к качеству и производительности оборудования.

**Научная новизна.** В работе усовершенствованы математические модели динамики движения сыпучих материалов в смесительных комплексах, включающих бункерные устройства, тарельчатые питатели, формирователи потоков и центробежный смеситель непрерывного действия, с учетом дискретного характера движения сыпучего материала.

**Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют по заданным значениям производительности, рецептуры и требованиям к однородности смеси рассчитать конструктивные и технологические параметры оборудования, входящего в состав смесительного комплекса непрерывного действия.

**Ключевые слова:** алгоритм; проектирование; питатель; бункер; смеситель; сыпучий материал; процесс смешивания; смесительный комплекс.

**BURMISTENKOV O. P., BILA T. Y., STATSENKO V. V.**  
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
**ALGORITHM OF AUTOMATED CONTINUOUS MIXING  
COMPLEXES DESIGN FOR BULK MATERIALS**

**Purpose.** Creation of design algorithm of continuous action mixing complexes that will allow defining parameters of the equipment proceeding from requirements to quality, productivity and the set compounding of mixture.

**Methodology.** The method of discrete elements, classical mechanics positions, theory of solids contact interaction, method of mathematical modeling are used in the work.

**Findings.** The paper proposes a generalized algorithm for designing a continuous mixing complex for bulk materials. The procedure for designing a centrifugal mixer, the flow shapers, plate feeders and conical-cylindrical hoppers are presented. Calculations of design and technological parameters are carried out on the basis of information about the physical and mechanical properties of bulk components particles, requirements for equipment performance and the mixture homogeneity. The results of calculations of the mixing complex for the three-component mixture used for the production of polyethylene film are presented. To test the proposed algorithm, a mathematical model based on the discrete elements method is created. The mixing process is modeled and the coefficients of inhomogeneity of each of the components in the finished mixture are determined. The obtained results confirmed that the proposed algorithm allows to determine the parameters of the mixing complex, which ensure compliance with the specified requirements for the quality and the equipment performance.

**Originality.** Mathematical models of bulk motion dynamics in mixing complexes are improved, which include bunker devices, plate feeders, flow shapers and continuous centrifugal mixer, taking into account the bulk motion discrete nature.

**Practical value.** The obtained results allow calculating the design and technological parameters of the equipment that is a part of the continuous mixing complex according to the set productivity, recipe and requirements to the mixture homogeneity.

**Keywords:** algorithm; design; feeder; hopper; mixer; bulk material; mixing process; mixing complex.