

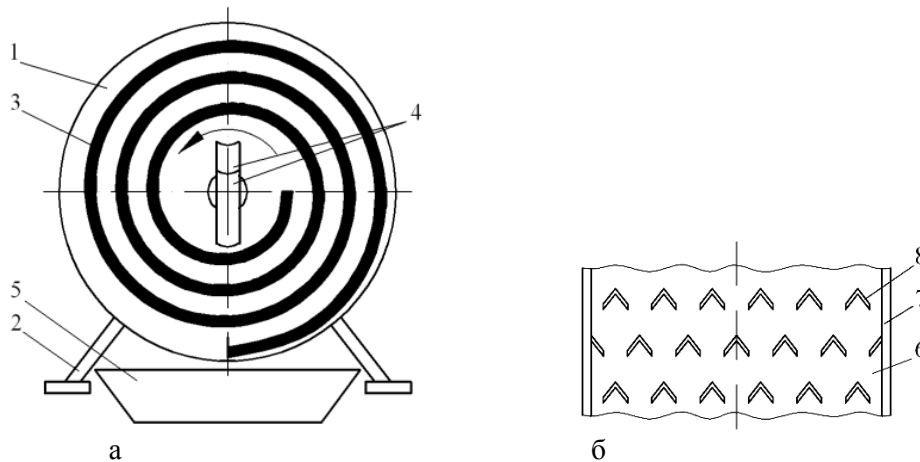
Дударев І.М.
Луцький національний технічний університет

РОЗРАХУНОК БАГАТОПОТОКОВОГО СПІРАЛЬНОГО ЗМІШУВАЧА СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті представлено результати розрахунку багатопотокового спірального змішувача сипких матеріалів. Спіральний змішувач у порівнянні з іншими конструкціями змішувачів не містить активних робочих органів, відповідно, унеможливується пошкодження компонентів суміші. Запропонована математична модель процесу змішування сипких матеріалів у спіральному змішувачі, яка розроблена з використанням математичного апарату, що розроблений для Марковського випадкового процесу. Моделювання процесу змішування здійснено на основі аналізу можливих випадків переміщення частинок сипких матеріалів спіральною робочою поверхнею змішувача. За допомогою розробленої математичної моделі можливо визначити ступінь змішування сипких матеріалів та обґрунтувати конструктивні параметри спірального змішувача.

Ключові слова: спіральний змішувач, процес змішування, розрахунок, сипкий матеріал, ймовірність станів.

Постановка проблеми. Для змішування сипких матеріалів у переробній та харчовій промисловості, а також у інших галузях використовуються змішувачі різного конструктивного виконання. Конструкція змішувача залежить від способу змішування, який він реалізовує. Найбільше поширення мають такі змішувачі: відцентрові, барабанні, вібраційні, черв'ячно-лопатеві, лопатеві відцентрової дії, гравітаційні, пневматичні, шнекові та стрічкові. Більшість змішувачів обладнано спеціальними робочими органами, що забезпечують інтенсивне перемішування компонентів суміші, що для окремих матеріалів є недопустимим, оскільки спричиняє їх пошкодження або погіршення якісних показників. Серед конструкцій змішувачів, що не містять активних робочих органів, є багатопотоковий спіральний змішувач (рис. 1), який обладнаний спіральною робочою поверхнею.



1 – диск; 2 – рама; 3 – спіральний матеріалопровід; 4 – завантажувальні горловини; 5 – ємкість для готової суміші; 6 – днище; 7 – борт; 8 – спрямовувач потоку

Рисунок 1 – Спіральний змішувач (а) та фрагмент розгортки спірального матеріалопроводу (б)

Для забезпечення якісного змішування сипких матеріалів у спіральному змішувачі необхідно обґрунтувати його конструктивні параметри, за яких досягається необхідний ступінь змішування компонентів. Тому дослідження спрямовані у цьому напрямку є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових праць [1 – 4], в яких досліджено чи здійснено моделювання процесу змішування сипких матеріалів, показав, що отримані математичні моделі не є універсальними, а розроблені для процесу змішування, який здійснюється у змішувачах певної конструкції. Тому ці моделі малоприменні для опису процесу змішування у спіральному змішувачі. Таким чином, розробка математичної моделі, що описує процес змішування сипких матеріалів у спіральному змішувачі, є необхідною для обґрунтування його параметрів.

Мета дослідження – розрахувати процес змішування сипких матеріалів у багатопотоковому спіральному змішувачі для визначення конструктивних параметрів змішувача та якісних показників процесу.

Результати дослідження. Дослідимо процес змішування сипких матеріалів у спіральному змішувачі, вздовж днища спірального матеріалопроводу якого встановлені у шаховому порядку спрямовувачі потоку V-подібної форми. З конструктивних міркувань приймаємо, що вздовж днища розташовані сім рядів спрямовувачів, у кожному з яких по шість спрямовувачів V-подібної форми. Кожен спрямовувач має по дві грані. Через один ряд до бортів матеріалопроводу прикріплено спрямовувачі, що мають лише одну грань (рис. 1).

Розглянемо переміщення вздовж днища матеріалопроводу окремих частинок сипкого матеріалу, які сходять з усіх граней спрямовувачів потоку першого ряду і визначимо ймовірності їх (частинок матеріалу) перебування, після проходження усіх рядів спрямовувачів потоку, на усіх гранях спрямовувачів потоку останнього ряду, тобто в кінці спірального матеріалопроводу.

Приймаємо, що усі частинки сипкого матеріалу мають однакові фізико-механічні властивості, форму, розміри та масу. Нехай при сходженні частинки з будь-якої грані усіх спрямовувачів потоку можливі три рівноймовірні випадки переміщення частинки:

1) траєкторія руху частинки днищем після сходження зі спрямовувача не перетинає поздовжню вісь днища, тобто змішування компонентів не відбувається, вони продовжують далі рух окремими потоками;

2) траєкторія руху частинки днищем після сходження зі спрямовувача перетинає поздовжню вісь днища, але змішування не відбувається, оскільки частинки матеріалів не контактують між собою, тому продовжують рухатися окремими потоками;

3) траєкторія руху частинки днищем після сходження зі спрямовувача перетинає поздовжню вісь днища, але цього не відбувається внаслідок удару (контакту) частинок різних матеріалів, що спричиняє зміну їх траєкторії, тому змішування не відбувається, частинки різних матеріалів продовжують рухатися далі окремими потоками.

Для математичного опису процесу змішування компонентів у спіральному змішувачі, тобто руху їх частинок вздовж днища спірального матеріалопроводу, застосуємо математичний апарат, що розроблений для Марковського випадкового процесу з дискретними етапами і дискретним часом [5].

Внаслідок великої кількості спрямовувачів потоку матимемо значну кількість станів можливого перебування частинки матеріалу. Для визначення ймовірностей станів частинки зручно користуватися графом станів. Пояснимо на прикладі як це можна зробити (рис. 2). Якщо частинка матеріалу перебуває у стані A з ймовірністю p_A (рис. 2, а), а ймовірності її переходу зі стану A в стани B та C відповідно рівні P_{AB} та P_{AC} , тоді ймовірність перебування частинки матеріалу в стані B буде $p_B = p_A \cdot P_{AB}$, а ймовірність перебування частинки в стані C буде $p_C = p_A \cdot P_{AC}$.

Якщо ж частинка матеріалу на попередньому етапі могла перебувати з певною ймовірністю у кількох станах, наприклад (рис. 2, б), A та D з відповідними ймовірностями p_A та p_D , тоді у відповідності до графа станів ймовірність її перебування у стані B визначається так само як і у попередньому випадку $p_B = p_A \cdot P_{AB}$, а ймовірність перебування у стані C визначається наступним чином $p_C = p_A \cdot P_{AC} + p_D \cdot P_{DC}$.

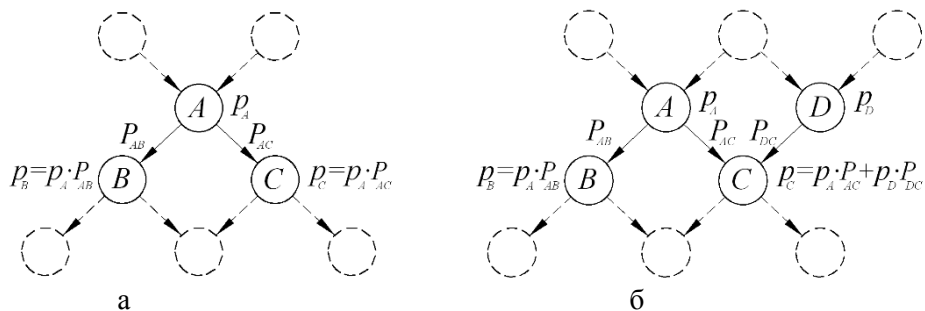


Рисунок 2 – Графи станів частинки сипкого матеріалу

Ймовірність станів частинки матеріалу $p_1(k)$, $p_2(k)$, ..., $p_n(k)$ після довільного k -го етапу розраховується за формулою [5]:

$$p_i(k) = \sum_{j=1}^n p_j(k-1) \cdot P_{ji}, \quad (i = \overline{1, n}) \quad (1)$$

де P_{ji} – ймовірність переходу частинки матеріалу зі стану S_j в стан S_i ;

n – кількість спрямовувачів об'єднувачів потоків, що розміщені вздовж днища спірального матеріалопроводу, на яких може перебувати частинка матеріалу, шт.

Розглянемо окремо переміщення частинок матеріалу спіральним матеріалопроводом, які сходять з кожної грані спрямовувачів потоку першого ряду. Оскільки в першому ряду встановлено шість спрямовувачів, які мають дванадцять граней, тоді, відповідно, необхідно розглянути дванадцять випадків переміщення частинок матеріалу. Пронумеруємо ці грані зліва направо від 1 до 12, як показано на рис. 3, а. Нижній індекс “1” вказує на те, що це грані першого ряду спрямовувачів по ходу матеріалу спіральним матеріалопроводом. Очевидним є те, що можливе переміщення (ймовірні стани) частинок матеріалу, що сходять з граней 1_1 та 12_1 , вздовж днища буде симетричним відносно поздовжньої осі днища. Аналогічно будуть симетричними відносно поздовжньої осі днища можливі переміщення частинок, що сходять з граней: 2_1 та 11_1 ; 3_1 та 10_1 ; 4_1 та 9_1 ; 5_1 та 8_1 ; 6_1 та 7_1 . Враховуючи зазначене, достатньо розглянути можливе переміщення (ймовірні стани) частинок матеріалу, що сходять з граней $1_1, 2_1, 3_1, 4_1, 5_1$ та 6_1 .

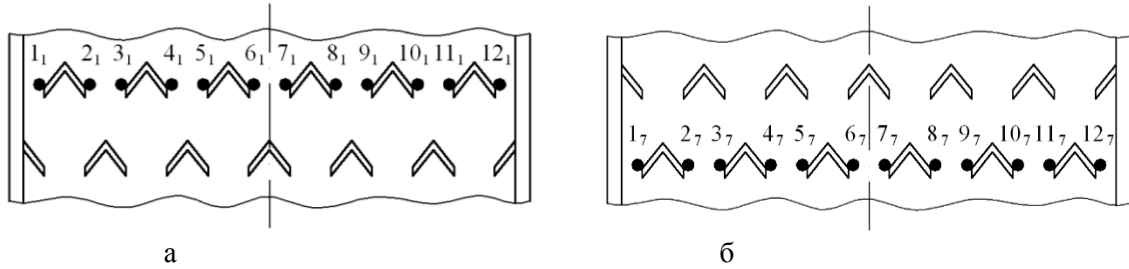


Рисунок 3 – Схеми до пояснення нумерації граней спрямовувачів потоку першого ряду (а) та сьомого ряду (б)

Спочатку розглянемо можливі переміщення частинки матеріалу, що сходять з грані 1_1 спрямовувача потоку першого ряду (рис. 4, а). Граф можливих станів частинки матеріалу під час переміщення днищем представлений на рис. 4, б. Відповідно до графу станів частинка може перебувати у 22 станах: S_1, S_2, \dots, S_{22} . На графі станів вказані перехідні ймовірності частинки з одного стану в другий на кожному k -му етапі.

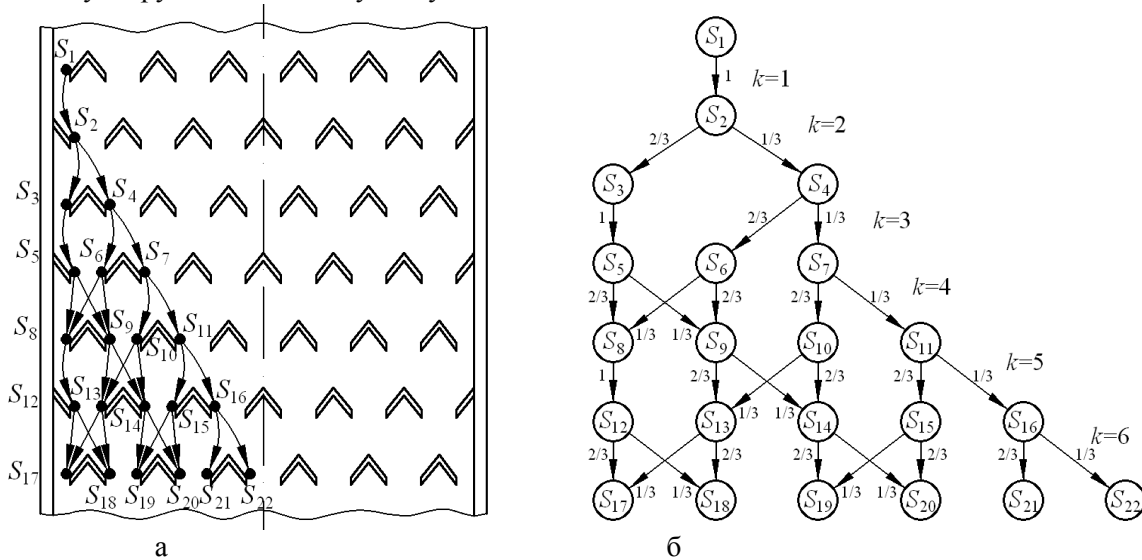


Рисунок 4 – Схема можливих переміщень частинки матеріалу, що сходять з грані 1_1 (а), та граф можливих станів частинки матеріалу, що сходять з грані 1_1 (б)

Визначимо ймовірності проходження частинки матеріалу через певні грані спрямовувачів на кожному етапі її руху днищем, тобто ймовірності перебування частинки у певних станах. Ймовірність перебування частинки матеріалу у станах після першого етапу:

– у стані S_2 : $p_2(1) = 1$.

Ймовірність перебування частинки матеріалу у станах після другого етапу:

– у стані S_3 : $p_3(2) = p_2(1) \cdot P_{23} = 1 \cdot 2/3 = 2/3$;

– у стані S_4 : $p_4(2) = p_2(1) \cdot P_{24} = 1 \cdot 1/3 = 1/3$.

Ймовірність перебування частинки матеріалу у станах після третього етапу:

$$- \text{у стані } S_5: p_5(3) = p_3(2) \cdot P_{35} = \frac{2}{3} \cdot 1 = \frac{2}{3};$$

$$- \text{у стані } S_6: p_6(3) = p_4(2) \cdot P_{46} = \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3} = \frac{2}{9};$$

$$- \text{у стані } S_7: p_7(3) = p_4(2) \cdot P_{47} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{9}.$$

Ймовірність перебування частинки матеріалу у станах після четвертого етапу:

$$- \text{у стані } S_8: p_8(4) = p_5(3) \cdot P_{58} + p_6(3) \cdot P_{68} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{3} + \frac{2}{9} \cdot \frac{1}{3} = \frac{14}{27};$$

$$- \text{у стані } S_9: p_9(4) = p_5(3) \cdot P_{59} + p_6(3) \cdot P_{69} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} + \frac{2}{9} \cdot \frac{2}{3} = \frac{10}{27};$$

$$- \text{у стані } S_{10}: p_{10}(4) = p_7(3) \cdot P_{710} = \frac{1}{9} \cdot \frac{2}{3} = \frac{2}{27};$$

$$- \text{у стані } S_{11}: p_{11}(4) = p_7(3) \cdot P_{711} = \frac{1}{9} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{27}.$$

Ймовірність перебування частинки матеріалу у станах після п'ятого етапу:

$$- \text{у стані } S_{12}: p_{12}(5) = p_8(4) \cdot P_{812} = \frac{14}{27} \cdot 1 = \frac{14}{27};$$

$$- \text{у стані } S_{13}: p_{13}(5) = p_9(4) \cdot P_{913} + p_{10}(4) \cdot P_{1013} = \frac{10}{27} \cdot \frac{2}{3} + \frac{2}{27} \cdot \frac{1}{3} = \frac{22}{81};$$

$$- \text{у стані } S_{14}: p_{14}(5) = p_9(4) \cdot P_{914} + p_{10}(4) \cdot P_{1014} = \frac{10}{27} \cdot \frac{1}{3} + \frac{2}{27} \cdot \frac{2}{3} = \frac{14}{81};$$

$$- \text{у стані } S_{15}: p_{15}(5) = p_{11}(4) \cdot P_{1115} = \frac{1}{27} \cdot \frac{2}{3} = \frac{2}{81};$$

$$- \text{у стані } S_{16}: p_{16}(5) = p_{11}(4) \cdot P_{1116} = \frac{1}{27} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{81}.$$

Ймовірність перебування частинки матеріалу у станах після шостого етапу:

$$- \text{у стані } S_{17}: p_{17}(6) = p_{12}(5) \cdot P_{1217} + p_{13}(5) \cdot P_{1317} = \frac{14}{27} \cdot \frac{2}{3} + \frac{22}{81} \cdot \frac{1}{3} = \frac{106}{243};$$

$$- \text{у стані } S_{18}: p_{18}(6) = p_{12}(5) \cdot P_{1218} + p_{13}(5) \cdot P_{1318} = \frac{14}{27} \cdot \frac{1}{3} + \frac{22}{81} \cdot \frac{2}{3} = \frac{86}{243};$$

$$- \text{у стані } S_{19}: p_{19}(6) = p_{14}(5) \cdot P_{1419} + p_{15}(5) \cdot P_{1519} = \frac{14}{81} \cdot \frac{2}{3} + \frac{2}{81} \cdot \frac{1}{3} = \frac{30}{243};$$

$$- \text{у стані } S_{20}: p_{20}(6) = p_{14}(5) \cdot P_{1420} + p_{15}(5) \cdot P_{1520} = \frac{14}{81} \cdot \frac{1}{3} + \frac{2}{81} \cdot \frac{2}{3} = \frac{18}{243};$$

$$- \text{у стані } S_{21}: p_{21}(6) = p_{16}(5) \cdot P_{1621} = \frac{1}{81} \cdot \frac{2}{3} = \frac{2}{243};$$

$$- \text{у стані } S_{22}: p_{22}(6) = p_{16}(5) \cdot P_{1622} = \frac{1}{81} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{243}.$$

Розглянемо можливі переміщення частинки матеріалу, що сходять з грані 2₁ спрямовувача потоку першого ряду (рис. 5, а). Граф можливих станів частинки матеріалу під час переміщення днищем представлений на рис. 5, б. Відповідно до графу станів частинка може перебувати у 33 станах: S₁, S₂, ..., S₃₃. На графі станів вказані перехідні ймовірності частинки з одного стану в другий на кожному k-му етапі. Розрахунок ймовірностей перебування частинки матеріалу під час руху днищем матеріалопроводу при сходженні з грані 2₁ спрямовувача потоку першого ряду здійснюється як і для частинки, що сходять з грані 1₁, за допомогою графа станів (рис. 5, б). Результати розрахунку ймовірностей станів частинки матеріалу представимо лише для сьомого ряду спрямовувачів:

$$p_{26}(6) = \frac{202}{729}; \quad p_{27}(6) = \frac{206}{729}; \quad p_{28}(6) = \frac{150}{729}; \quad p_{29}(6) = \frac{114}{729}; \quad p_{30}(6) = \frac{34}{729}; \quad p_{31}(6) = \frac{20}{729}; \quad p_{32}(6) = \frac{2}{729};$$

$$p_{33}(6) = \frac{1}{729}.$$

Розглянемо можливі переміщення частинки матеріалу, що сходить з грані 3₁ спрямовувача потоку першого ряду (рис. 6, а). Граф можливих станів частинки матеріалу під час переміщення днищем представлений на рис. 6, б. Відповідно до графу станів частинка може перебувати у 33 станах: S₁, S₂, ..., S₃₃. На графі станів вказані перехідні ймовірності частинки з одного стану в другий на кожному k-му етапі.

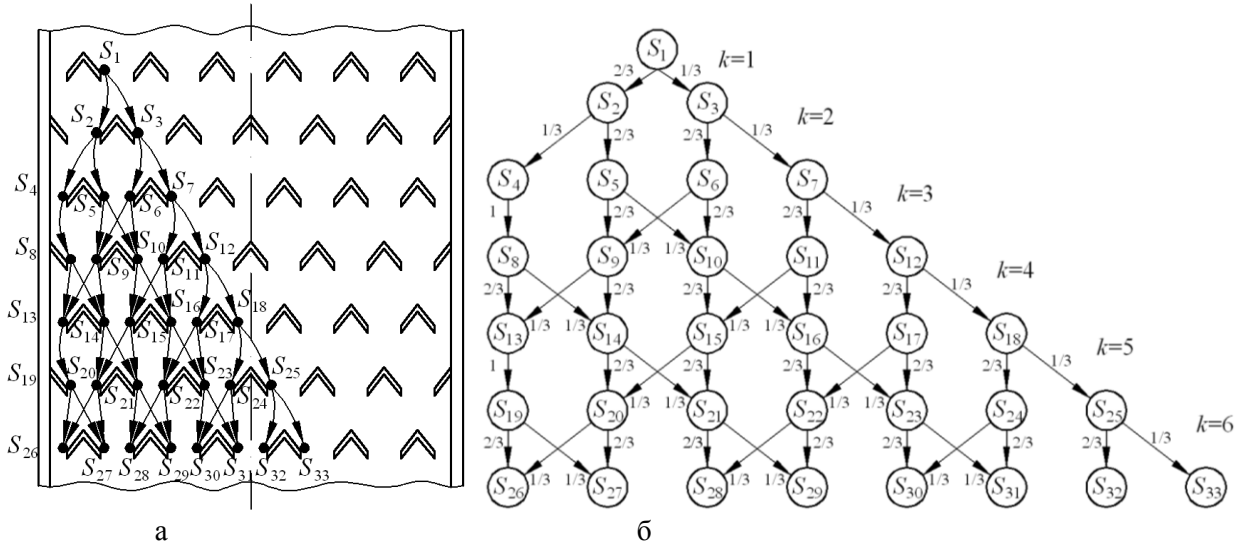


Рисунок 5 – Схема можливих переміщень частинки матеріалу, що сходить з грані 2₁ (а), та граф можливих станів частинки матеріалу, що сходить з грані 2₁ (б)

Результати розрахунку ймовірностей перебування частинки матеріалу, що зійшла з грані 3₁ спрямовувача потоку першого ряду, на гранях спрямовувачів сьомого ряду:

$$p_{26}(6) = \frac{146}{729}; \quad p_{27}(6) = \frac{166}{729}; \quad p_{28}(6) = \frac{174}{729}; \quad p_{29}(6) = \frac{147}{729}; \quad p_{30}(6) = \frac{56}{729}; \quad p_{31}(6) = \frac{34}{729}; \quad p_{32}(6) = \frac{4}{729};$$

$$p_{33}(6) = \frac{2}{729}.$$

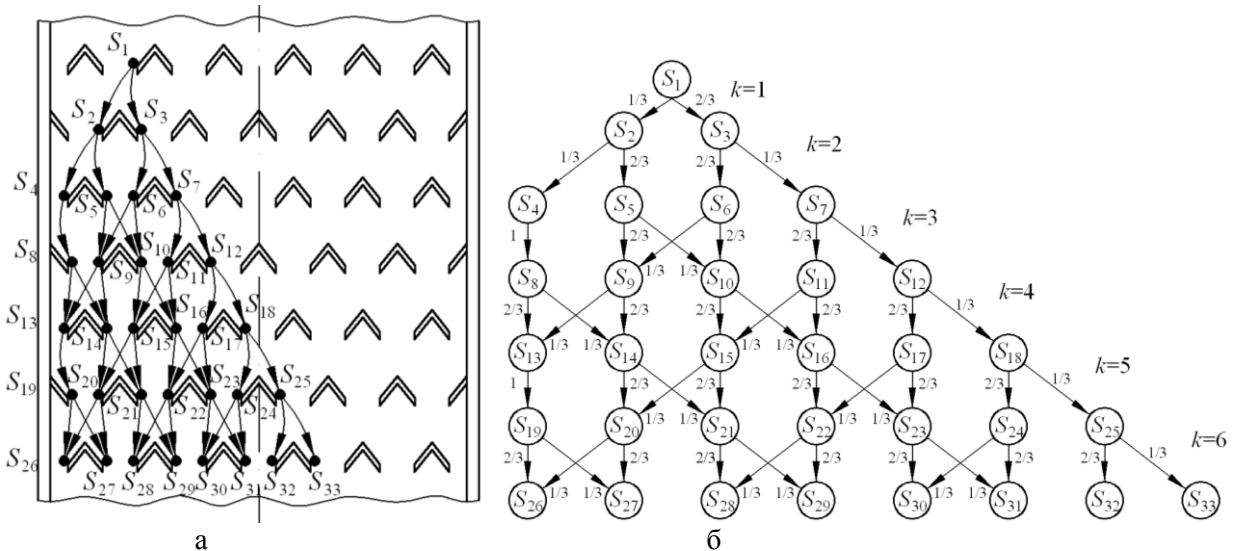


Рисунок 6 – Схема можливих переміщень частинки матеріалу, що сходить з грані 3₁ (а), та граф можливих станів частинки матеріалу, що сходить з грані 3₁ (б)

Розглянемо можливі переміщення частинки матеріалу, що сходить з грані 4₁ спрямовувача потоку першого ряду (рис. 7, а). Граф можливих станів частинки матеріалу під час переміщення днищем представлений на рис. 7, б. Відповідно до графу станів частинка може перебувати у 40 станах: S₁, S₂, ..., S₄₀. Результати розрахунку ймовірностей перебування частинки матеріалу, що зійшла з грані 4₁ спрямовувача потоку першого ряду, на гранях спрямовувачів сьомого ряду:

$$p_{31}(6) = \frac{38}{729}; p_{32}(6) = \frac{58}{729}; p_{33}(6) = \frac{146}{729}; p_{34}(6) = \frac{172}{729}; p_{35}(6) = \frac{146}{729}; p_{36}(6) = \frac{112}{729}; p_{37}(6) = \frac{34}{729};$$

$$p_{38}(6) = \frac{20}{729}; p_{39}(6) = \frac{2}{729}; p_{40}(6) = \frac{1}{729}.$$

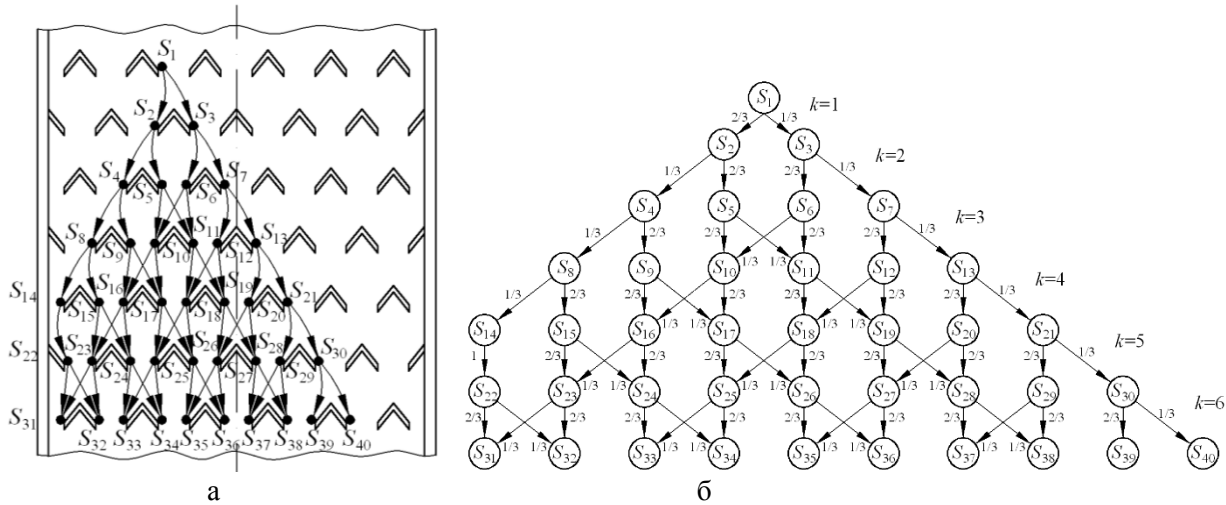


Рисунок 7 – Схема можливих переміщень частинки матеріалу, що сходить з грані 4₁ (а), та граф можливих станів частинки матеріалу, що сходить з грані 4₁ (б)

Розглянемо можливі переміщення частинки матеріалу, що сходить з грані 5₁ спрямовувача потоку першого ряду (рис. 8, а). Граф можливих станів частинки матеріалу під час переміщення днищем представлений на рис. 8, б. Відповідно до графу станів частинка може перебувати у 40 станах: S₁, S₂, ..., S₄₀. На графі станів вказані перехідні ймовірності частинки з одного стану в другий на кожному k-му етапі. Результати розрахунку ймовірностей перебування частинки матеріалу, що зійшла з грані 5₁ спрямовувача потоку першого ряду, на гранях спрямовувачів сьомого ряду:

$$p_{31}(6) = \frac{22}{729}; p_{32}(6) = \frac{35}{729}; p_{33}(6) = \frac{112}{729}; p_{34}(6) = \frac{146}{729}; p_{35}(6) = \frac{172}{729}; p_{36}(6) = \frac{146}{729}; p_{37}(6) = \frac{56}{729};$$

$$p_{38}(6) = \frac{34}{729}; p_{39}(6) = \frac{4}{729}; p_{40}(6) = \frac{2}{729}.$$

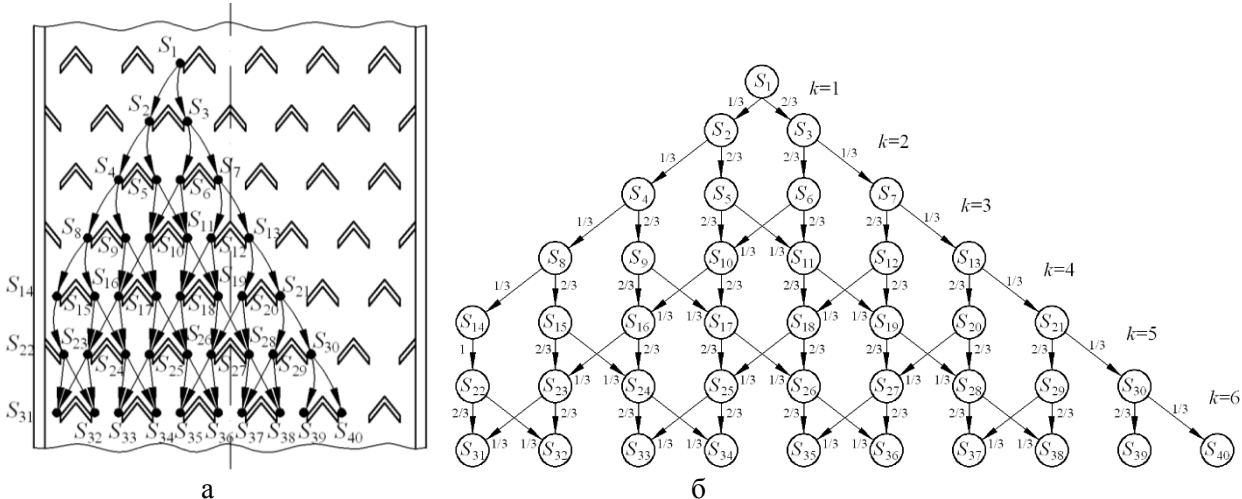


Рисунок 8 – Схема можливих переміщень частинки матеріалу, що сходить з грані 5₁ (а), та граф можливих станів частинки матеріалу, що сходить з грані 5₁ (б)

Розглянемо можливі переміщення частинки матеріалу, що сходить з грані 6₁ спрямовувача потоку першого ряду (рис. 9, а). Граф можливих станів частинки матеріалу під час переміщення днищем представлений на рис. 9, б. Відповідно до графу станів частинка може перебувати у 43 станах: S₁, S₂, ..., S₄₃. На графі станів вказані перехідні ймовірності частинки з одного стану в другий на кожному

k -му етапі. Результати розрахунку ймовірностей перебування частинки матеріалу, що зійшла з грані b_1 спрямовувача потоку першого ряду, на гранях спрямовувачів сьомого ряду:

$$p_{32}(6) = \frac{2}{729}; p_{33}(6) = \frac{4}{729}; p_{34}(6) = \frac{34}{729}; p_{35}(6) = \frac{56}{729}; p_{36}(6) = \frac{146}{729}; p_{37}(6) = \frac{172}{729}; p_{38}(6) = \frac{146}{729};$$

$$p_{39}(6) = \frac{112}{729}; p_{40}(6) = \frac{34}{729}; p_{41}(6) = \frac{20}{729}; p_{42}(6) = \frac{2}{729}; p_{43}(6) = \frac{1}{729}.$$

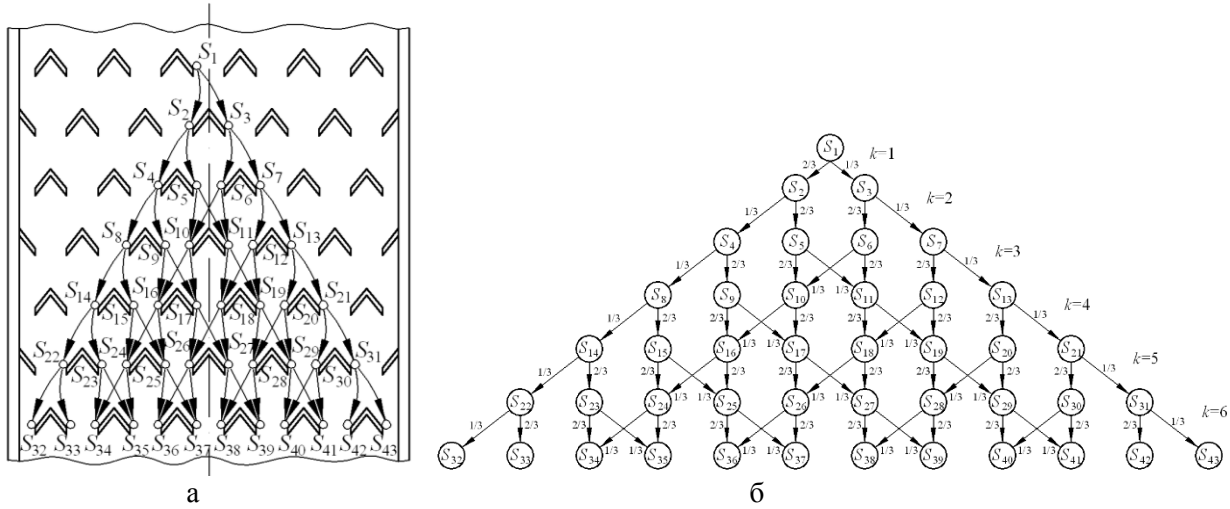


Рисунок 9 – Схема можливих переміщень частинки матеріалу, що сходить з грані b_1 (а), та граф можливих станів частинки матеріалу, що сходить з грані b_1 (б)

За одержаними у результаті розрахунків значеннями визначимо ймовірності попадання частинок сипкого матеріалу на грані спрямовувачів потоку сьомого (останнього) ряду. Пронумеруємо грані спрямовувачів останнього ряду зліва направо від 1 до 12 (рис. 3, б). Нижній індекс “7” вказує на те, що це грані сьомого ряду спрямовувачів потоку по ходу матеріалу днищем спірального матеріалопроводу.

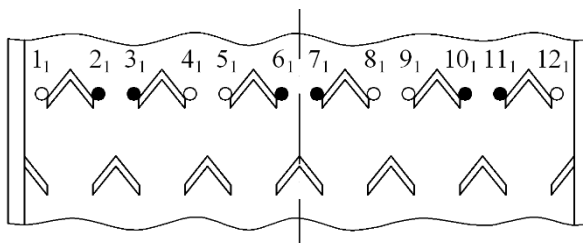
Розглянемо випадок, коли на усі грані спрямовувачів першого ряду подаються частинки одного сипкого матеріалу. Зведемо у таблицю 1 розраховані ймовірності надходження частинок матеріалу, що сходили з кожної грані спрямовувачів першого ряду, на грані спрямовувачів сьомого ряду. У таблиці 1 підрахована також величина $\sum p$, що являє собою суму ймовірностей надходження частинок матеріалу на певну грань спрямовувача сьомого ряду, які (частинки) сходили з усіх граней спрямовувачів першого ряду. Оскільки переміщення частинок, що зійшли з граней $1_1, 2_1, 3_1, 4_1, 5_1$ та 6_1 , симетричні відносно поздовжньої осі днища переміщенням частинок, які зійшли відповідно з граней $12_1, 11_1, 10_1, 9_1, 8_1$ та 7_1 спрямовувачів першого ряду, тому відповідні ймовірності надходження частинок на грані спрямовувачів сьомого ряду однакові. Наприклад, ймовірності надходження частинки на грані 1_7 та 12_7 однакові для частинок, що сходили з граней 1_1 та 12_1 (у таблиці 1 значення наведеного прикладу виділені напівжирним шрифтом). Значення суми ймовірностей надходження частинок матеріалу на усі грані спрямовувачів сьомого ряду $\sum p = 1$. Це значення вказує на те, що частинки матеріалу з високою ймовірністю (рівною одиниці) будуть рівномірно розподілені за всіма потоками в кінці спірального матеріалопроводу.

Розглянемо тепер випадок, коли на грані $1_1, 4_1, 5_1, 8_1, 9_1$ та 12_1 спрямовувачів першого ряду подається один матеріал (компонент A), а на грані $2_1, 3_1, 6_1, 7_1, 10_1$ та 11_1 подається другий матеріал (компонент B) (рис. 10).

Зведемо у таблицю 2 розраховані ймовірності надходження частинок двох компонентів на грані спрямовувачів сьомого ряду. Аналіз одержаних значень суми ймовірностей для компонента A ($\sum p_A$) та компонента B ($\sum p_B$) показує, що ймовірності знаходження частинок кожного з компонентів (A та B) у потоках суміші на всіх гранях спрямовувачів сьомого ряду є високою і знаходиться в межах $\sum p_A = 0,481...0,519$ та $\sum p_B = 0,481...0,519$, що свідчить про високий ступінь змішування компонентів суміші (у пропорції 1:1).

Таблиця 1 – Ймовірності надходження частинок матеріалу, що сходили з кожної грані спрямовувачів першого ряду, на грані спрямовувачів сьомого ряду

Грань, з якої почала рух частинка матеріалу	Ймовірності $p_i(6)$ надходження частинок матеріалу (перебування у стані S_i) на грані спрямовувачів потоку сьомого ряду											
	1 ₇	2 ₇	3 ₇	4 ₇	5 ₇	6 ₇	7 ₇	8 ₇	9 ₇	10 ₇	11 ₇	12 ₇
1 ₁	106/243	86/243	30/243	18/243	2/243	1/243	0	0	0	0	0	0
12 ₁	0	0	0	0	0	0	1/243	2/243	18/243	30/243	86/243	106/243
2 ₁	202/729	206/729	150/729	114/729	34/729	20/729	2/729	1/729	0	0	0	0
11 ₁	0	0	0	0	1/729	2/729	20/729	34/729	114/729	150/729	206/729	202/729
3 ₁	146/729	166/729	174/729	147/729	56/729	34/729	4/729	2/729	0	0	0	0
10 ₁	0	0	0	0	2/729	4/729	34/729	56/729	147/729	174/729	166/729	146/729
4 ₁	38/729	58/729	146/729	172/729	146/729	112/729	34/729	20/729	2/729	1/729	0	0
9 ₁	0	0	1/729	2/729	20/729	34/729	112/729	146/729	172/729	146/729	58/729	38/729
5 ₁	22/729	35/729	112/729	146/729	172/729	146/729	56/729	34/729	4/729	2/729	0	0
8 ₁	0	0	2/729	4/729	34/729	56/729	146/729	172/729	146/729	112/729	35/729	22/729
6 ₁	2/729	4/729	34/729	56/729	146/729	172/729	146/729	112/729	34/729	20/729	2/729	1/729
7 ₁	1/729	2/729	20/729	34/729	112/729	146/729	172/729	146/729	56/729	34/729	4/729	2/729
$\sum p$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Рисунок 10 – Схема до пояснення подачі компонентів A та B на грані спрямовувачів першого рядуТаблиця 2 – Ймовірності надходження частинок компонентів A та B , що сходили з граней спрямовувачів першого ряду, на усі грані спрямовувачів сьомого ряду

Грань, з якої почала рух частинка компонента	Ймовірності $p_i(6)$ надходження частинок компонентів A та B (перебування у стані S_i) на грані спрямовувачів потоку сьомого ряду											
	1 ₇	2 ₇	3 ₇	4 ₇	5 ₇	6 ₇	7 ₇	8 ₇	9 ₇	10 ₇	11 ₇	12 ₇
Частинок компонента A												
1 ₁	106/243	86/243	30/243	18/243	2/243	1/243	0	0	0	0	0	0
12 ₁	0	0	0	0	0	0	1/243	2/243	18/243	30/243	86/243	106/243
4 ₁	38/729	58/729	146/729	172/729	146/729	112/729	34/729	20/729	2/729	1/729	0	0
9 ₁	0	0	1/729	2/729	20/729	34/729	112/729	146/729	172/729	146/729	58/729	38/729
5 ₁	22/729	35/729	112/729	146/729	172/729	146/729	56/729	34/729	4/729	2/729	0	0
8 ₁	0	0	2/729	4/729	34/729	56/729	146/729	172/729	146/729	112/729	35/729	22/729
$\sum p_A$	378/729 (0,519)	351/729 (0,481)	351/729 (0,481)	378/729 (0,519)	378/729 (0,519)	351/729 (0,481)	351/729 (0,481)	378/729 (0,519)	378/729 (0,519)	351/729 (0,481)	351/729 (0,481)	378/729 (0,519)
Частинок компонента B												
2 ₁	202/729	206/729	150/729	114/729	34/729	20/729	2/729	1/729	0	0	0	0
11 ₁	0	0	0	0	1/729	2/729	20/729	34/729	114/729	150/729	206/729	202/729
3 ₁	146/729	166/729	174/729	147/729	56/729	34/729	4/729	2/729	0	0	0	0
10 ₁	0	0	0	0	2/729	4/729	34/729	56/729	147/729	174/729	166/729	146/729
6 ₁	2/729	4/729	34/729	56/729	146/729	172/729	146/729	112/729	34/729	20/729	2/729	1/729
7 ₁	1/729	2/729	20/729	34/729	112/729	146/729	172/729	146/729	56/729	34/729	4/729	2/729
$\sum p_B$	351/729 (0,481)	378/729 (0,519)	378/729 (0,519)	351/729 (0,481)	351/729 (0,481)	378/729 (0,519)	378/729 (0,519)	351/729 (0,481)	351/729 (0,481)	378/729 (0,519)	378/729 (0,519)	351/729 (0,481)

Висновок. Використання математичного апарата, що розроблений для Марковського випадкового процесу з дискретними етапами і дискретним часом, дозволило визначити ступінь змішування сипких матеріалів у багатопотоковому спіральному змішувачі. Крім того, математичне моделювання процесу змішування сипких матеріалів дозволило обґрунтувати необхідну кількість конструктивних елементів (рядів спрямовувачів потоку), які необхідно встановити вздовж спіральної робочої поверхні для забезпечення певного ступеня змішування сипких матеріалів.

1. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
2. 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”, №4 (2014) [Электронный ресурс]. – Режим доступа до журн.: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599>
3. Багринцев И.И. Исследование процесса смешения сыпучих материалов в гравитационно-решетчатом смесителе с пневмоциркуляцией / И.И. Багринцев, А.И. Барвин, В.Б. Модестов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – №7 (154), ч. 2. – Луганськ, 2010.
4. Воронин В.В. Критерии и способы оценки качества смешивания сыпучих материалов / В.В. Воронин, К.А. Адигамов, С.С. Петренко, Р.А. Сизякин // Электронный научный журнал “Инженерный вестник Дона”, №4 (часть 2), 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа до журн.: <http://ivdon.ru/ru/magazine/issue/106?page=2>
5. Боровик О.В. Дослідження операцій в економіці: навч. посіб. / О.В. Боровик, Л.В. Боровик. – К.: Центр учбової літератури, 2007. – 424 с.

REFERENCES

1. Makarov, Y. (1973). *Apparatus for mixing bulk materials*. [Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov]. Moscow, Mashinostroenie Publ. 216 p.
2. Verloka, I., Kapranova, A., Lebedev, A. (2014). Modern gravitational continuous devices for mixing bulk materials. [Sovremennyye gravitatsionnyye ustroystva nepreryvnogo deystviya dlya smeshivaniya sypuchikh materialov]. *Electronic scientific journal: Engineering Journal of Don*. Vol. 4.
3. Bagrintsev, I., Barvin, V., Modestov, V. (2010). Research of the mixing process of bulk materials in a gravity mixer with pneumatic circulation. [Issledovaniye protsessa smesheniya sypuchikh materialov v gravitatsionno-reshetchotom smesitele s pnevmotsirkulyatsiyey]. *Bulletin: Scientific Journal of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*. Vol. 7 (154). Lugansk, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University Publ.
4. Voronin, V., Adigamov, K., Petrenko, S., Sizyakov, R. (2012). Criteria and methods for quality of mixing bulk materials. [Kriterii i sposoby otsenki kachestva smeshivaniya sypuchikh materialov]. *Electronic scientific journal: Engineering Journal of Don*. Vol. 4 (2).
5. Borovyk, O., Borovyk, L. (2007). *Research of operations in the economy*. [Doslidzhennya operatsiy v ekonomitsi]. Kyiv, Center of educational literature Publ., 424 p.

Дударев И.Н. Расчет многопоточкового спирального смесителя сыпучих материалов.

Процесс смешивания сыпучих материалов довольно распространенный в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Способ смешивания компонентов зависит от свойств сыпучих материалов. Соответственно, конструкция смесителя выбирается с учетом способа смешивания. В большинстве конструкций предусмотрено действие активных рабочих органов (шнек, лопатки) на материал для обеспечения необходимой степени их смешивания. Такое взаимодействие активных рабочих органов с материалом может способствовать его повреждению, а это недопустимо. В статье предложена новая конструкция спирального смесителя, для которой необходимо определить параметры и смоделировать процесс смешивания. Спиральный смеситель не повреждает компоненты смеси и обеспечивает качественное смешивание сыпучих материалов. В статье также представлены результаты анализа случаев перемещения частиц сыпучих материалов спиральной рабочей поверхностью смесителя. Предложена математическая модель, которая описывает процесс смешивания сыпучих материалов в спиральном смесителе. Математическая модель основана на математическом аппарате Марковского процесса. Предложенная модель разрешает обосновать рациональные параметры спирального смесителя и определить качественные показатели смеси на каждом этапе процесса смешивания.

Ключевые слова: спиральный смеситель, процесс смешивания, расчет, сыпучий материал, вероятность состояний.

I. Dudarev. Calculation of multi-mixer of bulk materials.

The process of mixing bulk materials is widespread in agricultural and food industry. Method of mixing the components depends on the properties of bulk materials. Mixer design selected according to the method of mixing. The necessary degree of mixing of bulk materials in mixers provides active working bodies. Action of active working bodies at the bulk material causes damage to the material. It is unacceptable. New design spiral mixer suggested in the article. Spiral mixer does not damage the materials and provides high-quality mix of bulk materials. Parameters would be determined and the mixing process should be modeled for the new spiral mixer. Analysis of cases of bulk materials movement in the spiral mixer is presented in the article. The mathematical model of mixing bulk materials in the spiral mixer is proposed in the article. The mathematical model of mixing bulk materials is developed using mathematical equations of Markov random process. The mathematical model of mixing bulk materials determines rational parameters of the spiral mixer and quality of mix at each step of the process.

Keywords: spiral mixer, process of mixing, calculation, bulk material, probability states.

АВТОРИ:

ДУДАРЕВ Ігор Миколайович, доктор технічних наук, Луцький національний технічний університет, професор кафедри обладнання переробних виробництв, e-mail: opv@lntu.edu.ua

АВТОРЫ:

ДУДАРЕВ Игорь Николаевич, доктор технических наук, Луцкий национальный технический университет, профессор кафедры оборудования перерабатывающих производств, e-mail opv@lntu.edu.ua

AUTHORS:

Igor DUDAREV, Doctor of Technical Sciences, Lutsk National Technical University, Professor of Refining Production Equipment Department, e-mail: opv@lntu.edu.ua

Стаття надійшла в редакцію 28.05.2017 р.