

УДК 622.785.5:621.783.11

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2023-2-08>

**Овчинникова Ірина Анатоліївна**, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4035-412X

**Пазюк Михайло Юрійович**, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-5424-0462

**Барішенко Олена Миколаївна**, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-6642-6341

**Коваленко Віктор Леонідович**, доцент, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-5950-4412

## УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ ЗА ВИСОТОЮ ШАРУ НА АГЛОСТРІЧЦІ ПРИ РІЗНИХ УМОВАХ ЗАВАНТАЖЕННЯ

Стаття присвячена проблемі управління розподілом агломераційної шихти за висотою шару на аглострічці під час її завантаження. Визначається, що сегрегація частинок сипкого матеріалу впливає на ключові параметри, такі як газопроникність та розподіл палива в шарі агломераційної шихти, завантаженої на аглострічку, і, в результаті, на якість готового агломерату. Задача вирішення цього завдання ставиться у знаходженні розподілу класів крупності агломераційної шихти за висотою шару без сегрегації та із сегрегацією.

У роботі використано моделі, описані в інших дослідженнях авторів роботи, для визначення розподілу класів крупності за висотою шару агломераційної шихти. Налаштування моделі здійснюється на основі експериментальних даних та параметрів завантажувального пристрою. Наведена схема чисельного експерименту щодо оцінки впливу параметрів завантажувального вузла на розподіл фракцій аглошихти за висотою шару на аглоленті. Результати розрахунків для конкретних підприємств підтверджують адекватність моделі.

Дослідження також вказує на вплив параметрів завантажувального пристрою та властивостей агломераційної шихти на розподіл фракцій за висотою шару. Зміна середнього діаметра часток матеріалу, кута нахилу та довжини завантажувального лотка впливає на сегрегацію у шарі шихти. Результати моделювання вказують, що зміна середнього діаметра часток матеріалу має істотний вплив на розподіл класів крупності агломераційної шихти у порівнянні із впливом зміни довжини завантажувального лотка.

Стаття вирішує проблему управління структурою шару агломераційної шихти на аглострічці шляхом зміни параметрів завантажувального пристрою, зокрема, кута нахилу. Результати вказують на ефективність зміни кута нахилу для керування сегрегацією частинок матеріалу за умови стабілізації його середнього діаметру.

Ключові слова: агломерація, агломераційна шихта, аглострічка, сегрегація, шар шихти, моделювання, класи крупності, управління, завантажувальний пристрій, кут нахилу завантажувального лотка.

*Вступ.* При завантаженні агломераційної шихти на аглострічку спостерігається сегрегація частинок матеріалу за висотою шару, яка впливає на такі найважливіші параметри, як газопроникність і розподіл палива в ньому.

Завдання знаходження розподілу класів крупності агломераційної шихти за висотою шару на аглострічці можна звести до завдання розрахунку фракційного складу сипкого матеріалу без сегрегації. Для цього необхідно розглядати шар шихти на аглострічці як сукупність горизонтів, фракційний склад яких можна визначити незалежно від інших згідно з методикою, описаною у [1].

*Методика експерименту.* Спільне використання моделей, описаних у [1, 2] (рис. 1), дає можливість визначити розподіл класів крупності за висотою шару агломераційної шихти по аглоленті.

Налаштування даної моделі виконується на основі експериментальних даних та відомостей про параметри завантажувального пристрою: тип живильника, кута нахилу та довжину завантажувального лотка. Налаштування полягає у знаходженні такого значення параметрів, для яких помилка моделювання буде мінімальною.

Алгоритм налаштування моделі збігається з алгоритмом налаштування моделі, яка використовується в [3] для ідентифікації гранулометричних характеристик агломераційної шихти з урахуванням особливостей її переробки.

Відмінність полягає в тому, що коефіцієнт  $K$  знаходиться для кожного з горизонтів шару. При налаштуванні моделі, сумарна помилка моделювання знаходиться за формулою:

$$e = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \sqrt{(\Phi_{ijp} - \Phi_{ijs})^2}$$

де  $k$  – кількість зон шару;  $n$  – кількість фракцій;  $\Phi_{ijp}$  – розрахункові значення вмісту фракції  $i$  у горизонті шару  $j$ , %;  $\Phi_{ijs}$  – експериментальні значення вмісту фракції  $i$  у горизонті шару  $j$ , %.

*Результати та їх обговорення.* Вихідними даними для розрахунку розподілу фракцій за висотою шару є загальна кількість матеріалу, середній діаметр частинок матеріалу, коефіцієнт зміни середнього діаметра частинок сипкого матеріалу в процесі його розсіву  $K$ , отриманий при налаштуванні моделі, середні діаметри часток фракцій, для яких виконується розрахунок, середні діаметри часток у кожному з горизонтів шару, розраховані згідно з методикою, описаною в [2]. Розглянемо процес розрахунку розподілу класів крупності за висотою шару для деяких підприємств. Значення коефіцієнта  $K$  та дані про помилку моделювання наведено у таблиці 1. У таблицях 2, 3 та 4 наведено результати розрахунків для умов комбінату «Запоріжсталь» (агломашина № 2 та № 4).

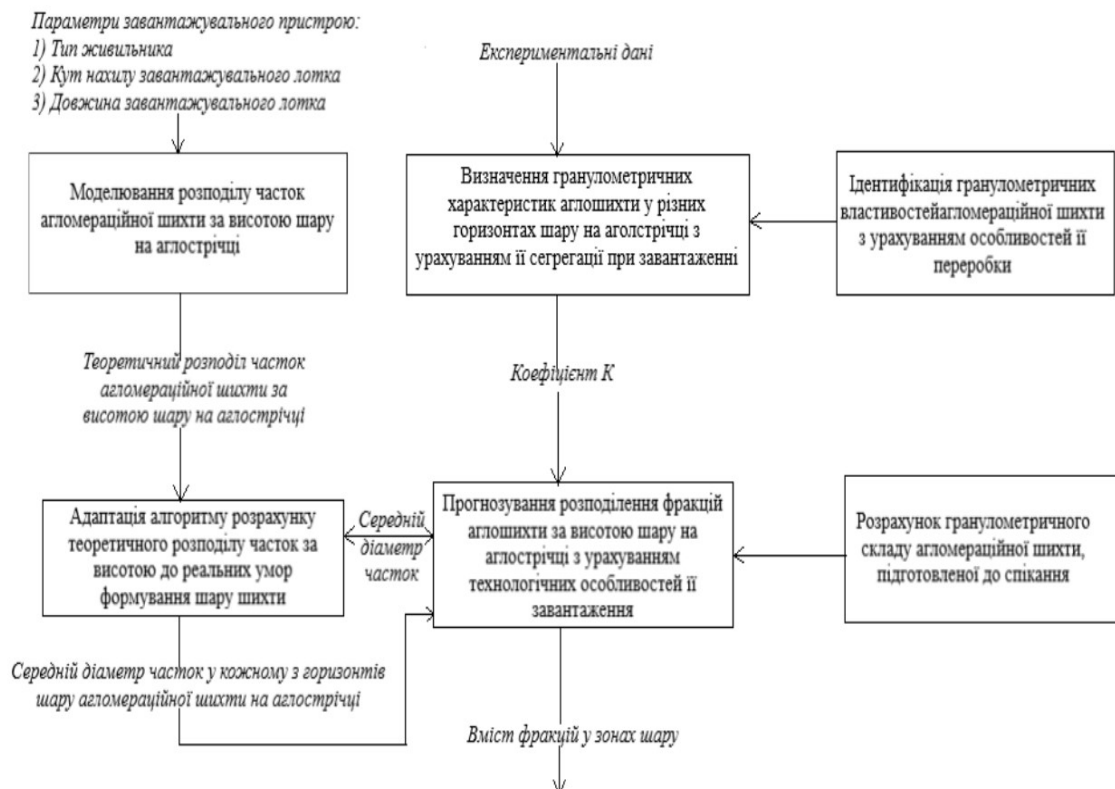


Рисунок 1 – Алгоритм розрахунку розподілення фракцій шихти за висотою шару на аглострічці

Таблиця 1 – Значення коефіцієнту зміни середнього діаметра часток сипкого матеріалу в процесі його розсівання К і помилки моделювання для умов ПАТ «Запоріжсталь»

Агломашина	К	Середньоквадратичне відхилення, %		
		Середн.	Мін.	Макс.
Агломашина №2	0,34	0,644	0,016	2,083
Агломашина №4	0,48	1,567	0,027	5,109

Таблиця 2 – Моделювання розподілу фракцій висотою шару на аглострічці. ПАТ «Запоріжсталь», агломашина №2

Характеристика шару		Середній діаметр часток фракції, мм				
		1,5	4,5	8	11	13
Експеримент						
Горизонт шару	1	9,53	3,7	2,02	0,6	0,82
	2	8,87	4,3	1,92	0,5	1,08
	3	8,48	4	2,15	0,58	1,45
	4	6,85	5,05	2,33	0,6	1,83
	5	5,98	5	2,63	0,73	2,32
	6	5,23	4,25	2,62	1,58	2,98
Моделювання						
Горизонт шару	1	9,55	3,16	2,13	1,21	0,62
	2	8,20	3,76	2,53	1,43	0,74
	3	7,50	4,07	2,74	1,55	0,80
	4	6,78	4,39	2,96	1,68	0,86
	5	6,57	4,49	3,02	1,71	0,88
	6	6,39	4,56	3,07	1,74	0,90
Середньоквадратичне відхилення, %						
Горизонт шару	1	0,01552	0,53657	0,10942	0,60667	0,19838
	2	0,66998	0,53886	0,61176	0,93467	0,34093
	3	0,97764	0,07107	0,59039	0,97288	0,65003
	4	0,06921	0,65839	0,62615	1,07515	0,96704
	5	0,58943	0,51450	0,38936	0,98097	1,43859
	6	1,16384	0,31350	0,45186	0,16072	2,08326

Таблиця 3 – Моделювання розподілу фракцій висотою шару на аглострічці. «Запоріжсталь», агломашина № 4

Характеристика шару		Середній діаметр часток фракції, мм		
		1,5	4,5	10
Експеримент				
Горизонт шару	1	14,2	1,7	0,8
	2	10	5	1,7
	3	7,5	5,8	3,4
	4	5,7	6	5
	5	4,2	5,5	7
	6	2,5	3,8	10,4
Моделювання				
Горизонт шару	1	10,87	3,01	2,78
	2	8,65	4,17	3,85
	3	7,40	4,82	4,45
	4	6,31	5,39	4,97
	5	5,97	5,56	5,13
	6	5,64	5,73	5,29
Середньоквадратичне відхилення, %				

Продовження таблиці 3

Характеристика шару		Середній діаметр часток фракції, мм		
		1,5	4,5	10
Горизонт шару	1	3,32540	1,31189	1,98021
	2	1,35049	0,83108	2,14823
	3	0,09729	0,98274	1,04670
	4	0,60709	0,61302	0,02740
	5	1,76997	0,06228	1,86559
	6	3,14307	1,93227	5,10868

Результати розрахунків показують, що модель є адекватною і може бути використана для розрахунку розподілу класів крупності агломераційної шихти по висоті шару шихти на аглострічці. Помилка моделювання для кожної з фракцій не перевищує 5,1%, в середньому помилка дорівнює 0,99%.

Для вирішення завдання формування структури шару агломераційної шихти на аглоленті необхідно знати, яким чином технологічні параметри завантажувальних вузлів агломашин і властивості самої шихти впливають на розподіл фракцій по висоті шару. Такими параметрами є тип живильника, кут нахилу і довжина завантажувального лотка, середній діаметр частинок шихти. Для оцінки впливу цих параметрів на розподіл фракцій агломераційної шихти по висоті шару на аглострічці проведено чисельний експеримент, схема якого представлена в таблиці 5. Експеримент виконаний для умов комбінату «Запоріжсталь», агломашини №2 (вібраційний живильник) та агломашини № 4 (барабанный живильник).

Таблиця 4 – Схема чисельного експерименту щодо оцінки впливу параметрів завантажувального вузла на розподіл фракцій агломераційної шихти за висотою шару на аглоленті

Вимірюваний параметр	Середній діаметр часток, мм	Кут нахилу завантажувального лотка, град	Довжина завантажувального лотка, м	Висота шару на аглострічці, м
Середній діаметр часток	4,7	45	1	0,4
	4,8	45	1	0,4
	4,9	45	1	0,4
	5,0	45	1	0,4
Кут нахилу завантажувального лотка	4,7	45	1	0,4
	4,7	46	1	0,4
	4,7	47	1	0,4
	4,7	48	1	0,4
	4,7	49	1	0,4
	4,7	50	1	0,4
Довжина завантажувального лотка	4,7	45	1	0,4
	4,7	45	1,1	0,4
	4,7	45	1,2	0,4
	4,7	45	1,3	0,4

Для оцінки впливу параметрів завантажувального пристрою та властивостей агломераційної шихти на розподіл її класів крупності по висоті шару на аглострічці, виділяється 3 горизонти шару: верхній, середній і нижній. У таблицях 5 і 6 наведено зміни вмісту фракцій у кожному з горизонтів шару при зміні параметрів моделі, наведених у таблиці 5.

Таблиця 5 – Оцінка впливу параметрів завантажувального пристрою на розподіл фракцій по висоті шару на аглострічці. ПАТ «Запоріжсталь», агломашина № 2

Параметр	Горизонт шару	Фракція, мм				
		1,5	4,5	8	11	13
$\alpha$	Верхній	3,85	-1,71	-1,15	-0,65	-0,34
	Середній	1,47	-0,65	-0,44	-0,25	-0,13
	Нижній	-4,30	1,91	1,29	0,73	0,38
$l$	Верхній	4,21	-1,87	-1,26	-0,71	-0,37
	Середній	1,79	-0,79	-0,53	-0,30	-0,16
	Нижній	-4,36	1,94	1,30	0,74	0,38
$d_{cp}$	Верхній	2,64	-1,17	-0,79	-0,45	-0,23
	Середній	-0,47	0,21	0,14	0,08	0,04
	Нижній	-5,92	2,63	1,77	1,00	0,52

Таблиця 6 – Оцінка впливу параметрів завантажувального пристрою на розподіл фракцій по висоті шару на аглоленті. ПАТ «Запоріжсталь», агломашина № 4

Параметр	Горизонт шару	Фракція, мм		
		1,5	4,5	10
$\alpha$	Верхній	5,30	-2,76	-2,54
	Середній	2,10	-1,09	-1,01
	Нижній	-3,73	1,94	1,79
$l$	Верхній	5,51	-2,87	-2,65
	Середній	2,52	-1,31	-1,21
	Нижній	-3,93	2,04	1,89
$d_{cp}$	Верхній	2,33	-1,21	-1,12
	Середній	-0,63	0,33	0,30
	Нижній	-5,82	3,05	2,78

Як видно з таблиць 5 та 6, збільшення середнього діаметру часток матеріалу, кута нахилу і довжини завантажувального лотка призводять до посилення сегрегації у шарі. При цьому зміна перерахованих вище параметрів має найбільший вплив на вміст фракції 1,5 мм у верхньому і нижньому горизонтах шару, в середньому горизонті шару фракційний склад матеріалу змінюється незначно.

Як показують результати моделювання, зміна середнього діаметра часток матеріалу при незмінних параметрах завантажувального лотка надає істотний вплив на розподіл класів крупності агломераційної шихти по висоті шару на аглострічці.

Зміна середнього діаметра часток матеріалу відбиває зміну його гранулометричного складу. В умовах комбінату «Запоріжсталь» підготовлена до спікання шихта містить близько 44% фракції 1,5 мм. Тому, зміна середнього діаметра часток найбільш впливає на вміст саме цієї фракції. Як показують результати моделювання, збільшення середнього діаметра часток агломераційної шихти призводить до незначного збільшення вмісту фракції 1,5 мм у верхньому горизонті шару, в нижньому горизонті вміст цієї фракції різко падає. Зміст інших фракцій змінюються незначно.

Як видно з результатів моделювання, збільшення кута нахилу та довжини завантажувального лотка призводять до збільшення вмісту фракції 1,5 мм у верхньому горизонті шару зі зниження вмісту цієї фракції в нижньому горизонті. Розподіл решти фракцій за висотою шару змінюється незначно.

Для порівняння впливу різних параметрів на сегрегацію агломераційної шихти за висотою шару на аглострічці використовують наступні безрозмірні коефіцієнти чутливості сегрегації до зміни параметра процесу:

$$C_i = \frac{\Delta\Phi_{ij}}{\Delta\Pi_i},$$

де  $C_i$  – коефіцієнт чутливості до зміни  $i$ -го параметру;  $\Delta\Phi_{ij}$  – зміна вмісту  $i$ -ї фракції у  $j$ -му шарі, %;  $\Delta\Pi_i$  – зміна параметра завантажувального пристрою або матеріалу, %.

Результати розрахунку коефіцієнта  $C_i$  для агломашин № 2 та № 4 комбінату

«Запоріжсталь» наведено на рис. 2–4. Символом  $\diamond$  позначено значення коефіцієнту  $C_i$  для верхнього горизонту шару, символом  $\square$  – для середнього, символом  $\Delta$  – для нижнього.

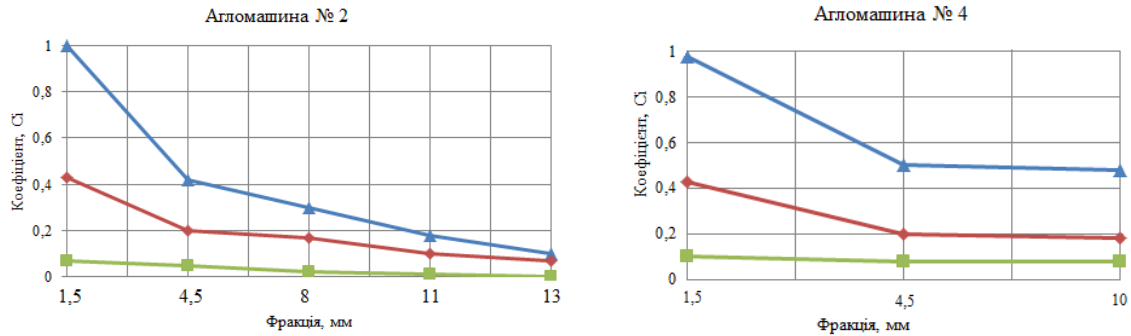


Рисунок 2 – Чутливість сегрегації до зміни середнього діаметра частинок агломераційної шихти

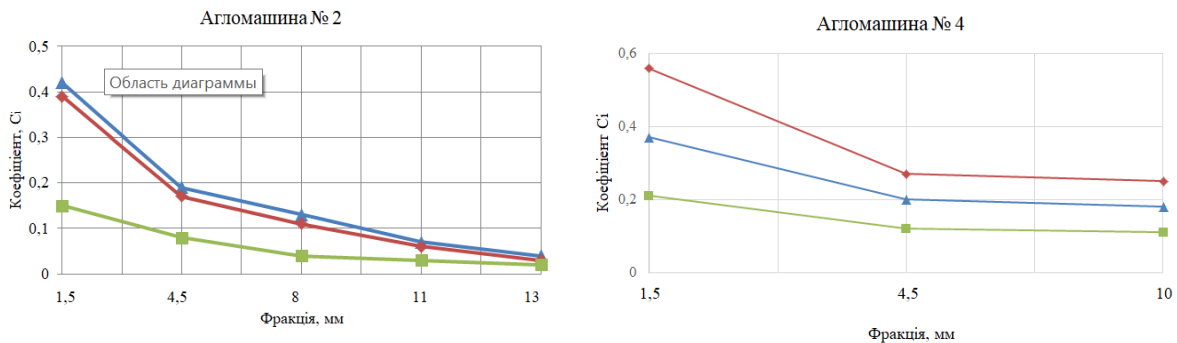


Рисунок 3 – Чутливість сегрегації до зміни кута нахилу завантажувального лотка

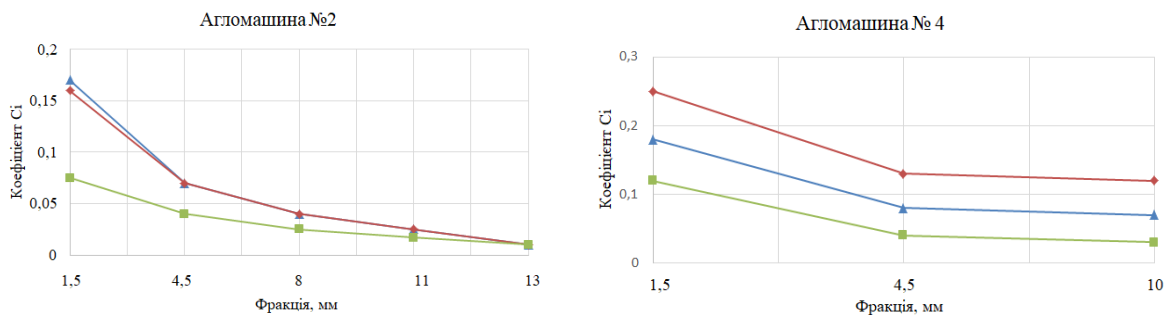


Рисунок 4 – Чутливість сегрегації до зміни довжини завантажувального лотка

**Висновки.** Порівняння залежностей, наведених на рис. 8–10 показує, що як для барабанного, так і для вібраційного живильників найбільший вплив на сегрегацію в шарі агломераційної шихти на аглострічці надає зміна середнього діаметра часток матеріалу.

Зміна кута нахилу завантажувального лотка значно впливає на сегрегацію в шарі агломераційної шихти на аглострічці, в той час як зміна довжини завантажувального лотка мало впливає на сегрегацію в шарі.

Таким чином, найбільш ефективно керувати структурою шару агломераційної шихти на аглострічці можна зміною кута нахилу завантажувального лотка. При цьому необхідно стабілізувати середній діаметр частинок матеріалу для мінімізації його впливу на процес сегрегації частинок по висоті шару.

### Бібліографічний перелік

1. Пожуев В. И., Пазюк М. Ю., Пазюк Ю. М., Баришенко Е. Н., Лимаренко Ю. А. Влияние параметров загрузочного устройства агломерационной машины на распределение топлива по высоте слоя на аглоленте. *Металлургия*. Запоріжжє : ЗГИА, 2009. Вып. 19. С. 5-11.

2. Пожуев В. И., Пазюк Ю. М. Алгоритм расчета структуры полидисперсных железорудных материалов на спекательных тележках агломашины. Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. Кіровоград : КНТУ, 2004. Вип. 15. С. 176-182.

3. Пазюк М. Ю., Пазюк Ю. М., Іванов В. І., Шаповаленко В. В. Методи оцінки гранулометричного складу залізовмісних сипких матеріалів. *Металургія : праці ЗДІА*. Запоріжжя : ЗДІА, 2011. Вип. 23. С. 5-12.

4. Пожуев В. И., Пазюк М. Ю., Пазюк Ю. М. Совершенствование конструкции загрузочного лотка агломашины. *Металлургия*. Запорожье : ЗГИА, 2003. Вып. 8. С. 28-31.

### References

1. Pozhuev V. I., Paziuk M. Yu., Paziuk Yu. M., Barishenko E. N., Limarenko Yu. A. Influence of parameters of the agglomerating machine loading device on the fuel distribution along the height of the layer on the agglomerate conveyor. *Metallurgy*. Zaporizhia: ZGIA, 2009. Issue 19. P. 5-11.

2. Pozhuev V. I., Paziuk Yu. M. Algorithm for calculating the structure of polydisperse iron ore materials on sintering carts of an agglomeration machine. Collection of scientific works of Kirovohrad State Technical University. Kirovohrad: KSTU, 2004. Issue 15. P. 176-182.

3. Paziuk M. Yu., Paziuk Yu. M., Ivanov V. I., Shapovalenko V. V. Methods for evaluating the granulometric composition of iron-containing bulk materials. *Metallurgy: Works of ZDIA*. Zaporizhia: ZDIA, 2011. Issue 23. P. 5-12.

4. Pozhuev V. I., Paziuk M. Yu., Paziuk Yu. M. Improvement of the design of the agglomeration machine loading chute. *Metallurgy*. Zaporizhia: ZGIA, 2003. Issue 8. P. 28-31.

**Ovchynnykova Iryna**, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university, ORCID: 0000-0002-4035-412X

**Paziuk Mikhailo**, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia national university, ORCID: 0000-0001-5424-0462

**Barishenko Olena**, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia national university, ORCID: 0000-0002-6642-6341

**Kovalenko Viktor**, associate professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia national university, ORCID: 0000-0001-5950-4412

### CONTROL OF AGGLOMERATE DISTRIBUTION BY LAYER HEIGHT ON THE AGGLOMERATING CONVEYOR UNDER DIFFERENT LOADING CONDITIONS

The article addresses the issue of managing the distribution of agglomerate charge by the height of the layer on the agglomerating conveyor during its loading. It is noted that the segregation of material particles affects key parameters such as gas permeability and fuel distribution within the layer. The task of solving this problem is formulated as finding the distribution of size classes of agglomerate charge by the height of the layer without segregation.

The article utilizes models described in other studies to determine the distribution of size classes by the height of the agglomerate charge layer. The model is calibrated based on experimental data and loading device parameters. Calculation results for specific enterprises confirm the adequacy of the model, where the modeling error does not exceed 5.1%.

The research also highlights the influence of loading device parameters and properties of the agglomerate charge on the distribution of fractions by height. Changes in the average particle diameter, tilt angle, and length of the loading chute affect segregation within the layer. Modeling results indicate that altering the average particle diameter significantly impacts the distribution of size classes in the agglomerate charge.

The article addresses the challenge of managing the structure of the agglomerate charge layer on the agglomerating conveyor by altering loading device parameters, particularly the tilt angle. Results suggest the effectiveness of changing the tilt angle to control particle segregation.

Key words: agglomeration, sintering charge, agglomeration, segregation, charge ball, modeling, size classes, control, innovative device, cutting of the innovative tray.