

УДК 669.162.1:001.57

ПАЗЮК Михайло Юрійович<sup>(1)</sup>, завідувач кафедри, доктор технічних наук  
МІНЯЙЛО Наталія Олександрівна<sup>(1)</sup>, доцент, кандидат технічних наук  
ЗАВАЛЬНА Юлія Михайлівна<sup>(2)</sup>, інженер-математик відділу АСУ ТП

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ БУНКЕРІВ ПРИ ЇХ ЗАВАНТАЖЕННІ РОЗПОДІЛЬНИМ ПРИБРОЄМ У ЦИКЛІЧНОМУ РЕЖИМІ

<sup>(1)</sup> Запорізька державна інженерна академія

<sup>(2)</sup> ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь», м. Запоріжжя

Розглянуто особливості застосування циклічного режиму руху розподільного пристрою під час завантаження сипкими матеріалами послідовно розташованих бункерів. На основі розробленої моделі виконано дослідження впливу розташування бункерів, швидкості пересування розподільного пристрою та його продуктивності на забезпечення заданого рівня матеріалів у технологічних ємностях. Наведено рекомендації щодо застосування даного режиму роботи розподільного пристрою за виробничих умов.

Ключові слова: бункер, сипкий матеріал, розподільний пристрій, циклічний режим, моделювання

*Вступ.* Однією з основних вимог до роботи спікального відділення агломераційної фабрики є безперервність подавання шихти на палети агломераційних машин [1]. У зв'язку з тим, що до складу тракту підготовки сировинних матеріалів до спікання входять різні технологічні агрегати, кожний з яких має свою продуктивність та систему управління, на окремих ділянках спостерігають перебої з постачанням шихти. Для забезпечення сталого транспортування та постачання шихти до агломераційних машин на виробництві використовують приймальні бункери. Застосування даних технологічних ємностей дозволяє також додатково виконати усереднення шихти, яке максимально забезпечує за умов підтримання у них сталого заданого рівня сипкого матеріалу.

Обсяг необхідного запасу агломераційної шихти у приймальних бункерах значною мірою визначається продуктивністю агломераційних машин, властивостями шихти, технічними характеристиками та режимом роботи розподільного завантажувального пристрою (РЗП).

Визначення раціонального режиму руху РЗП під час завантаження шихти у бункера для умов конкретного виробництва є актуальним завданням під час проектування АСУ ТП, а також управління технологічним процесом у режимі реального часу.

*Аналіз стану питання.* Ефективність процесу розподілу агломераційної шихти між приймальними бункерами залежить від вибору типу РЗП, алгоритму його пересування та точності визначення поточної кількості сипкого матеріалу в ємностях. Залежно від вибору типу РЗП (пересувні та стаціонарні плужкові скидачі, ав-

тостели, стрічкові котучі конвеєри [2]), завантаження приймальних бункерів можна здійснювати у циклічному режимі, послідовному або у режимі «за викликом» [3].

РЗП будь-якого типу підтримують простий у практичній реалізації циклічний режим. Під час використання даного режиму реалізують послідовне завантаження ємностей у двох взаємно протилежних напрямках, дотримуючись умов підтримання сталої кількості матеріалу в приймальних бункерах протягом часу кожного циклу руху РЗП [4]. При такому режимі за умов сталості продуктивності завантаження сипких матеріалів досягають однакового пошарового укладання їх у ємність, що дозволяє під час завантаження матеріалів з бункерів мати максимальне їх усереднення та мінімальну сегрегацію.

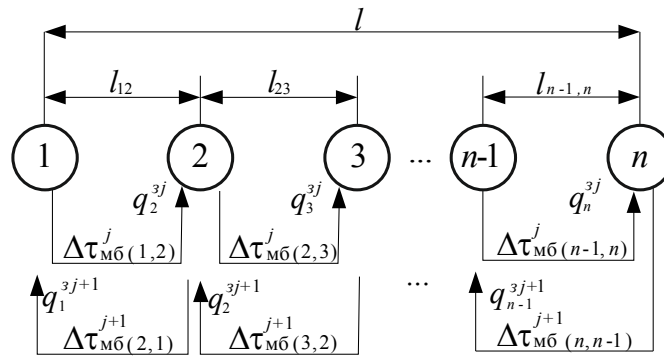
У зв'язку з конструктивними особливостями РЗП типу автостела дозволяють реалізувати лише циклічний режим завантаження бункерів. Дані пристрої вже значний час використовують на Південному гірничо-збагачувальному комбінаті (м. Кривий Ріг) та у спікальному відділенні аглофабрики ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» [5]. Проведений аналіз роботи бункерних пристроїв даних підприємств показав, що під час їх завантаження за циклічним режимом спостерігають значні коливання рівня матеріалів у крайніх бункерах, через що не підтримується необхідний запас шихти, а також спостерігаються часті випадки їх спустошення.

*Постановка завдання.* Для обґрунтування вибору циклічного режиму пересування автостели під час завантаження агломераційною шихтою технологічних ємностей для різних умов виробництва необхідно розробити модель системи управління роботою приймальних бунке-

рів, виконати дослідження та визначити за яких умов його застосування буде ефективним.

*Головна частина досліджень.* Завантаження приймальних бункерів у циклічному режимі полягає у послідовному переміщенні РЗП до кожної ємності у двох взаємно протилежних напрямках (рис. 1) та заповнення їх протягом часу  $\tau_{н\sigma(i)}$ .

Розробку моделі системи управління роботою приймальних бункерів здійснювали на основі балансового методу [6], що дозволяє описувати процеси завантаження-розвантаження сипкими матеріалами технологічних ємностей, залежно від положення РЗП:



$l_{n-1,n}$  - відстань між  $n-1$  та  $n$  бункерами, м;  $l$  - відстань між крайніми бункерами, м;  $q_n^{3j}$  - продуктивність розподільного пристрою під час завантаження сипкого матеріалу до  $n$  бункера на  $j$ -му циклі,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\Delta\tau_{м\sigma(n-1,n)}^j$  - час руху розподільного пристрою від  $n-1$  до  $n$  бункеру на  $j$  циклі, с

**Рисунок 1** – Структурна схема завантаження бункерів за циклічним режимом руху РЗП

Дотримуючись умов алгоритму роботи РЗП, необхідно враховувати час його пересування від одного бункера до іншого  $\Delta\tau_{м\sigma(i,i+1)}^j$ , а також час його знаходження над кожним бункером  $\Delta\tau_{н\sigma(i)}^j$ , протягом якого здійснюють його завантаження:

$$\Delta\tau_{м\sigma(i,i+1)}^j = \frac{l_{i,i+1}}{v^j} \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{н\sigma(i)}^j = \frac{D_i}{v^j} \quad (3)$$

де  $\Delta\tau_{м\sigma(1,i+1)}^j$  – час руху РЗП на  $j$ -му циклі від  $i$  до  $i+1$  бункера, с;  $l_{i,i+1}$  – відстань між  $i$  та  $i+1$  бункерами, м;  $v^j$  – швидкість руху РЗП, на  $j$ -му циклі, м/с;  $D_i$  – діаметр верхньої частини  $i$ -го бункера, м.

Враховуючи формули (2) та (3), визначаємо час повного циклу руху РЗП:

$$\Delta\tau_{\sigma}^j = \sum_{i=1}^n \Delta\tau_{н\sigma(i)}^j + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\tau_{м\sigma(i,i+1)}^j \quad (4)$$

$$\Delta Q^j = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i^j = \sum_{i=1}^n \int_0^{\tau_u^j} (q_i^{3j} - q_i^{6j}) d\tau^j, \quad (1)$$

де  $\Delta Q^j$  – кількість сипких матеріалів у бункерах на  $j$ -ому циклі,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta Q_i^j$  – кількість матеріалу у  $i$ -му бункері на  $j$ -ому циклі,  $\text{м}^3$ ;  $\int_0^{\tau_u^j} (q_i^{3j} - q_i^{6j}) d\tau^j$  – кількість сипких матеріалів, що завантажують до бункерів та вивантажують з них, за час  $\tau_u^j$  на  $j$ -ому циклі,  $\text{м}^3$ ;  $\tau_u^j$  – час повного циклу руху автостели, с;  $i = 1 \dots n$  – кількість приймальних бункерів.

Знаючи продуктивність РЗП, виконують розрахунок кількості матеріалу, що завантажують на  $j$ -му циклі в  $i$ -ий бункер:

$$Q_i^{3j} = Q_i^{n,j} + \int_{\tau=0}^{\Delta\tau_{н\sigma(i)}^j} q_i^{PPj} d\tau^j, \quad (5)$$

де  $Q_i^{3j}$  – кількість матеріалу, що завантажують на  $j$ -му циклі у  $i$ -ий бункер,  $\text{м}^3$ ;  $Q_i^{n,j}$  – поточна кількість матеріалу в  $i$ -му бункері на  $j$ -му циклі,  $\text{м}^3$ ;  $q_i^{PPj}$  – продуктивність РЗП,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Після завантаження приймального бункера починають процес його розвантаження та постачання шихти до агломераційної машини. Процес розвантаження відбувається до моменту подачі нової порції шихти у бункер. Кількість матеріалу, що залишається у бункері на момент початку його завантаження, обчислюють за формулою:

$$Q_i^{3aj} = Q_i^{n,j} = Q_i^{3j} - \int_{\tau=0}^{\tau_u^j} q_i^{6j} d\tau^j = Q_i^{3j} - \int_{\tau=0}^{\tau_u^j} q_i^{жсj} d\tau^j, \quad (6)$$

де  $Q_i^{maxj}$  – кількість матеріалу в бункері на момент початку його завантаження,  $m^3$ ;  $\int_{\tau=0}^{\tau_i^j} q_i^{mcj} d\tau^j$  – кількість матеріалу, що вивантажують живильником з бункера за час  $\tau_i^j$ ,  $m^3$ ;  $q_i^{mcj}$  – продуктивність живильника  $i$ -го бункера,  $m^3/c$ .

Для оцінки коливання кількості шихти у бункері розраховують відхилення поточної кількості сипких матеріалів ( $Q_i^n$ ) від максимально допустимої ( $Q_i^{max}$ ):

$$\Delta Q_i\% = \frac{Q_i^{max} - Q_i^n}{Q_i^{max}} \cdot 100\% . \quad (7)$$

Розроблена структура математичної моделі складається з блоків вхідних та вихідних даних, а також блоку обробки інформації.

Як вхідні дані у моделі використовують продуктивність РЗП ( $q^{PII}$ ) та живильників кожного з бункерів ( $q_i^{mc}$ ), допустимі максимальне ( $Q_i^{max}$ ) та мінімальне ( $Q_i^{min}$ ) значення кількості шихти у бункерах і діаметр бункера ( $D_i$ ).

У блоці обробки інформації здійснюють перевірку поточної кількості шихти у кожній ємності, імітацію процесів завантаження та розвантаження бункерів, підрахунок часу переїзду та положення РЗП щодо бункерів.

За результати роботи математичної моделі блоком вихідних даних формується положення РЗП (ПЗП) щодо приймальних бункерів, розраховує поточну кількість шихти у кожній ємності ( $\Delta Q_i^j$ ) та відхилення її значення від  $Q_i^{max}$  ( $\Delta Q_i\%$ ).

Програмну реалізацію математичної моделі виконували за допомогою пакета «MatLab» та додатків «Simulink» і «Stateflow». Дані програмні середовища дозволяють моделювати роботу гібридних об'єктів (систем), що включають як аналогову, так і дискретну складову та мають вбудовану бібліотеку математичних функцій.

Основну логіку роботи приймальних бункерів описували за допомогою «Stateflow-діаграм». Оскільки кожний бункер можна розглядати як окремий технологічний об'єкт, то у програмі було створено шість станів, які працюють паралельно та разом імітують роботу ділянки приймальних бункерів агломераційної фабрики.

Роботу кожної ємності описують за допомогою десяти станів (рис. 2). Перед початком завантаження бункерів виконують перевірку кількості залишку в них агломераційної шихти «Pro-

verka\_Bun1», після чого починають їх завантаження «Zagruzka\_Bun1». Як тільки кількість матеріалу в першій ємності досягає максимально допустимого рівня, у передпусковому режимі здійснюють очікування завантаження інших бункерів. Про завантаження всіх ємностей свідчить умова «Vug ni=1». Після досягнення матеріалом максимального рівня в останньому  $n$ -му бункері, формується сигнал управління на дозвіл видавання шихти з усіх ємностей «Vuguz\_Bun1».

Під час розвантаження бункерів постійно виконують перевірку на наявність у них шихти. У разі виконання умови  $Q^n < Q^{max}$ , відбувається цикл проходження РЗП над бункерами та розраховується час на його переїзд від одного бункера до іншого «Rasstoyanie2\_Bun1» і «Predvigenie2\_AS1». Як тільки РЗП доїжджає до бункера, виконують його завантаження до максимально допустимого рівня «Zagruzka3\_Bun1», після чого визначають подальший шлях РЗП відповідно до обраного алгоритму «Ojidanie2\_Bun1». У разі досягнення сипким матеріалом у бункері мінімально допустимого рівня і за відсутності РЗП над даним бункером, продовжують вивантаження шихти. За умови  $Q_i^n = 0$  фіксують час повного спустошення ємності та розраховують час простоювання відповідної агломераційної машини.

Під час виконання чисельних експериментів за допомогою розробленої моделі як вхідні дані прийнято продуктивність РЗП ( $q^{PII} = 152$  кг/с), швидкість його пересування ( $v = 0,35$  м/с), об'єм приймальних бункерів ( $V = 175$   $m^3$ ), відстань між бункерами ( $l_i = 6$  м), максимальна продуктивність агломераційної машини  $q^{a.m.} = 32,7$  кг/с [7,8].

Для оцінки ефективності застосування циклічного режиму РЗП під час завантаження приймальних бункерів агломераційних машин розглядали різні умови виробництва. Експерименти виконували для підприємств, де функціонує від трьох до шести агломераційних машини продуктивністю 60-100 %, продуктивність автостели змінювали у діапазоні 152-500 кг/с; швидкість її руху встановлювали від 0,2 м/с до 0,4 м/с. Значення кількості агломераційної шихти у бункерах, при якому починали процес їх завантаження встановлювали у діапазоні 50-80 % від обсягу ємності.

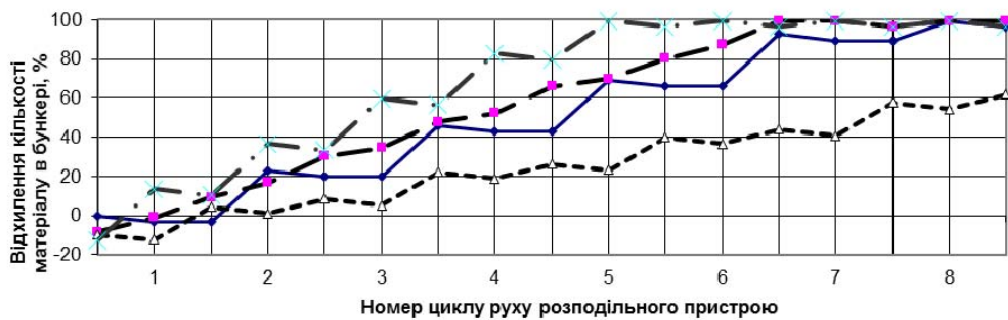




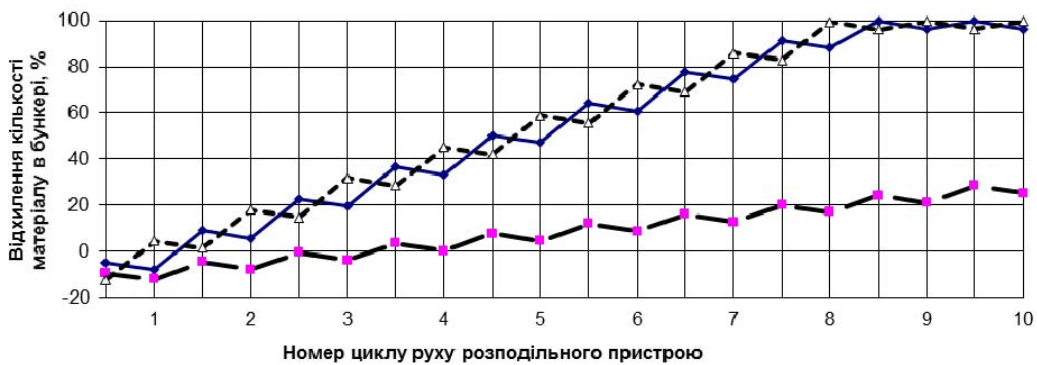
a)



б)



в)



г)

◆ Бункер 1    ■ Бункер 2    -Δ- Бункер 3    ✕ Бункер 4    \* Бункер 5    ● Бункер 6

**Рисунок 3** – Коливання кількості шихти у приймальних бункерах спікального відділення, до складу якого входять шість (а), п'ять (б), чотири (в) та три (г) агломераційні машини

З результатів експериментів випливає, що у спікальному відділенні, яке складається з шести

агломераційних машин, за максимально допустимої продуктивності РЗП 500 кг/с і його швид-

кості 0,4 м/с безперервне надходження сипкого матеріалу спостерігають лише під час перших трьох циклів роботи автостели. За зменшенням її продуктивності до 152 кг/с завантаження агломераційних машин переривається вже на третьому циклі роботи розподілювача. За аналогічних значень параметрів автостели у спікальному відділенні, де функціонують п'ять агломераційних машин (рис. 3,б), спостерігають спустошення ємкостей на четвертому циклі її руху.

На виробництві, де функціонує чотири агломераційні машини з використанням розподільного пристрою, що має продуктивність 500 кг/с та швидкість 0,4 м/с (рис. 3,в) спостерігають менші коливання кількості шихти у приймальних ємностях ніж у попередніх випадках (рис. 3,а-б). Але умови підтримання стабільної кількості шихти у бункерах не досягаються. Спустошення крайніх бункерів відбувається на 5-8 циклі руху автостели. Мінімальні коливання кількості шихти за даних виробничих умов спостерігають у третьому бункері.

Використання на виробництві трьох агломераційних машин (рис. 3,г) характеризується більш повільним зменшенням запасів шихти у бункерах. За максимальної продуктивності та швидкості руху РЗП у циклічному режимі та за умов роботи усіх агломераційних машин на рівні 100 % продуктивності бункери не спустошуються протягом дев'яти циклів роботи автостели. Під час зменшення продуктивності агломе-

раційних машин можна спостерігати коливання кількості шихти у приймальних бункерах не вище 30 %. З рис. 3,г видно, що найбільші коливання кількості шихти зафіксовано для крайніх бункерів.

*Висновки.* Таким чином, розроблена математична модель системи управління роботою приймальних бункерів дозволяє виконувати аналіз ефективності застосування циклічного режиму роботи РЗП як на етапі його вибору під час проектування виробництва так і за змінюванням значень технологічних параметрів у реальному часі під час управління даною ділянкою. З результатів виконаних досліджень видно, що застосування автостели у циклічному режимі краще за все підходить для виробництв, де продуктивність РЗП буде дорівнювати сумарній продуктивності агломераційних машин, що дозволить своєчасно забезпечувати постачання шихти з шихтового відділення до всіх приймальних бункерів зазначених машин. Коливання кількості шихти в бункерах у такому разі буде спостерігатися за умови змінювання продуктивності агломераційних машин. На діючих підприємствах у разі використання автостели як РЗП для мінімізації збоїв у постачанні шихти до агломераційних машин, що розташовані послідовно, слід розподіляти їх продуктивність наступним чином: крайні машини повинні мати продуктивність нижчу за машини, що розташовані у центрі.

### Бібліографічний список

1. **Жилкин, В. П.** Производство агломерата. Технология, оборудование, автоматизация [Текст] / В. П. Жилкин, Д. Н. Доронин; под общ. ред. Г. А. Шалева. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. – 291 с. – ISBN 5-85247-034-1.
2. **Шаповаленко, В. В.** Улучшение технологии загрузки железосодержащих сыпучих материалов в бункеры [Текст] / В. В. Шаповаленко // *Металлургия : Научные труды Запорожской государственной инженерной академии.* – Запорожье : РИО ЗГИА, 2003. – Вып. 8. – С. 24-28.
3. **Пожуев, В. І.** Моделивання структурних змін шихти при русі в проміжному бункері агломераційних машин [Текст] / В. І. Пожуєв, Ю. М. Пазюк // *Металлургия : Научные труды Запорожской государственной инженерной академии.* – Запорожье: РИО ЗГИА, 2001. – Вып. 4. – С. 15-19.
4. **Шаповаленко, В. В.** Управление загрузкой приемных бункеров агломерационных и обжиговых машин [Текст] / В. В. Шаповаленко // *Металлургия : Научные труды Запорожской государственной инженерной академии.* – Запорожье : РИО ЗГИА, 2002. – Вып. 6. – С. 22-25.
5. **Пазюк, М. Ю.** Управление поточно-транспортными системами железорудных материалов [Текст] / М. Ю. Пазюк, А. А. Полещук. – Запорожье : РИО ЗГИА, 1995. – 121 с.
6. **Пазюк, Ю. М.** Применение балансового метода для исследования и моделирования процессов подготовки рудного сырья к окискованию [Текст] / Ю. М. Пазюк, М. Ю. Пазюк, Н. А. Міняйло // *Металургія : Наукові праці Запорізької державної інженерної академії.* – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2013. – Вып. 1(29). – С. 5-11.
7. **Міняйло, Н. О.** Моделивання систем управління розподілом шихти між приймальними бункерами агломераційних машин [Текст] / Н. О. Міняйло, М. Ю. Пазюк, О. І. Дузенко // *Металургія : Наукові праці Запорізької державної інженерної академії.* – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2013. – Вып. 2 (30). – С. 9-15.
8. **Міняйло, Н. О.** Моделивання системи управління роботою бункерів за умов утворення склепін сипкими матеріалами [Текст] / Н. О. Міняйло, М. Ю. Пазюк, Ю. М. Завальна // *Металургія: Наукові праці Запорізької державної інженерної академії.* – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2014. – Вып. 2 (32). – С. 168-175.

**ПАЗЮК Михаил Юрьевич**, доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: kafedra\_autp@ukr.net

**МИНЯЙЛО Наталья Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: kafedra\_autp@ukr.net

**ЗАВАЛЬНАЯ Юлия Михайловна**, инженер-математик отдела автоматизированных систем управления технологическими процессами, ПАО «Металлургический комбинат «Запорожсталь», (Запорожье, Украина). E-mail: jul\_zavalna@ukr.net

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БУНКЕРОВ ПРИ ИХ ЗАГРУЗКЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ**

Рассмотрены особенности применения циклического режима движения распределительного устройства при загрузке сыпучими материалами последовательно расположенных бункеров. На основе разработанной модели выполнены исследования влияния расположения бункеров, скорости передвижения распределительного устройства и его производительности на обеспечение заданного уровня материалов в технологических емкостях. Приведены рекомендации по применению данного режима работы распределительного устройства в производственных условиях.

Ключевые слова: бункер, сыпучий материал, распределительное устройство, циклический режим, моделирование

**PAZYUK Michajlo**, Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Automated Control System by Flow Processes, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: kafedra\_autp@ukr.net

**MINIAILO Nataliia**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Automated Control System by Flow Processes, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: kafedra\_autp@ukr.net

**ZAVAL'NA Yuliya**, Engineer-Mathematician of Department of Automated Control System by Technological Processes, JSC «Metallurgical combine «Zaporozhstal'» (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: jul\_zavalna@ukr.net

## **MODELING OF HOPPER'S WORK AT THEM LOADING DISTRIBUTIVE DEVICE IN CYCLIC MODE**

The features of application of distributive device motion cyclic mode at loading by friable materials of the consistently located hoppers are considered. On the basis of the worked out model researches are executed for influence of location of bunkers, speeds of movement of distributive device and its productivity on providing of the set level of materials in technological capacities. Recommendation on application of this mode of work of distributive device in productive conditions are resulted.

Keywords: hopper, friable material, distributive device, the cyclic mode, modeling

Стаття надійшла до редакції 21.10.2017 р.  
Рецензент, проф. А.М. Ніколаєнко

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>