

УДК 621.798.38

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).17-24](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).17-24)

О.В. Оришака, доц., канд. техн. наук, **В.І. Гуцул**, доц., канд. ф.-м. наук,
А.М. Артюхов, доц., канд. техн. наук
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький,
Україна*
e-mail: oryhsaka@gmail.com

Теоретичне дослідження руху сипкого матеріалу в постачальному пристрої установок безперервної дії

Отримані залежності швидкості руху сипкого матеріалу в постачальному пристрої установок безперервної дії від геометричних параметрів постачального пристрою, а також визначено діапазон зміни швидкості руху сипкого матеріалу в постачальному пристрої.
постачальний пристрій, сипкий матеріал

О.В. Орышака, доц., канд. техн. наук, **В.И. Гуцул**, доц., канд. ф.-м. наук, **А.Н. Артюхов**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина
Теоретическое исследование движения сыпучего материала в подающем устройстве установок непрерывного действия

Получены зависимости скорости истечения сыпучего материала в подающем устройстве установок непрерывного действия от геометрических параметров питающего устройства, а также определен диапазон изменения скорости истечения сыпучего материала в подающем устройстве.
питающее устройство, сыпучий материал

Постановка проблеми. Установки безперервної дії мають ряд переваг перед установками з циклічною подачею (низькі енергетичні витрати, висока продуктивність, менша матеріалоемність тощо) [1,2], тому вдосконалення установок безперервної дії є актуальною задачею. Постачальний пристрій сипкого матеріалу, як складова частина установок безперервної дії, потребує відповідних досліджень для обґрунтування та оптимізації параметрів конструкції установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами проведено дослідження конусного стабілізатора потоку сипкого матеріалу установки безперервної дії для завантаження сипких матеріалів [1] та регулятора витоку сипкого матеріалу [2].

Також авторами були проведені дослідження основних робочих органів установок безперервної дії, які дали можливість обґрунтувати: стабілізатор потоку сипкого матеріалу, регулятор витоку сипкого матеріалу, постачальний пристрій. Було визначено, що швидкість руху сипкого матеріалу в каналах патрубків постачального пристрою при його обертанні збільшується відносно його стаціонарного положення, що зменшує вірогідність утворення склепів і, таким чином, поліпшує технологічний процес завантаження сипкого матеріалу.

Результати досліджень процесу витоку сипкого матеріалу із бункера, як складової частини установки для завантаження сипких матеріалів, викладені у роботах дослідників [3-9].

Нові, перспективні конструкції постачальних пристроїв установок безперервної дії для завантаження сипких матеріалів можуть включати так званий стабілізуючий

скат, геометричні параметри якого впливають на швидкість руху сипкого матеріалу і, таким чином, на технологічний процес роботи установки для завантаження сипких матеріалів.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є дослідження впливу геометричних параметрів стабілізуючого скату постачальних пристроїв установок безперервної дії для завантаження сипких матеріалів на швидкість руху сипкого матеріалу і, таким чином, на технологічний процес роботи установки для завантаження сипких матеріалів..

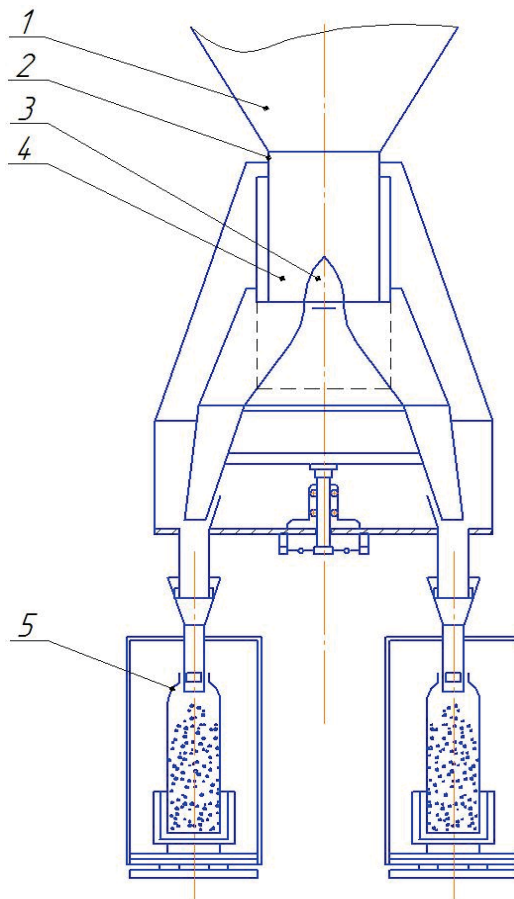
Виклад основного матеріалу. Постачальний пристрій установки безперервної дії (рис. 1) може включати так званий стабілізуючий скат, розрахункова схема якого зображена на рис. 2. Він представляє собою частину поверхні обертання дуги кола навколо хорди, яка відтинає цю дугу. В декартовій прямокутній системі координат Охуz рівняння вказаної поверхні можна представити у вигляді:

$$(\pm\sqrt{x^2 + y^2 + c})^2 + z^2 = R^2 \quad (1)$$

при умові, що

$$|x| \leq R - c, |y| \leq R - c, 0 \leq z \leq \sqrt{R^2 - c^2}, \quad (2)$$

де x, y, z – координати поверхні стабілізуючого скату по відповідним осям;
 $R = O_1B$, $R_1 = OB$, $c = O_1O = R - R_1$.



1 – бункер; 2 – матеріалопровід; 3 – стабілізуючий скат; 4 – кільцевий зазор; 5 – клапанний мішок

Рисунок 1 – Схема установки безперервної дії

Джерело: розроблено автором

Враховуючи умови (2) формулу (1) можна переписати наступним чином

$$\sqrt{x^2 + y^2} + c = \sqrt{R^2 - z^2} . \quad (3)$$

Нехай частинка матеріалу торкнулась поверхні стабілізуючого ската в точці M_0 , положення якої визначається кутом γ_0 (рис.2). Визначимо швидкість даної частинки в довільній точці M , яка характеризується кутом γ .

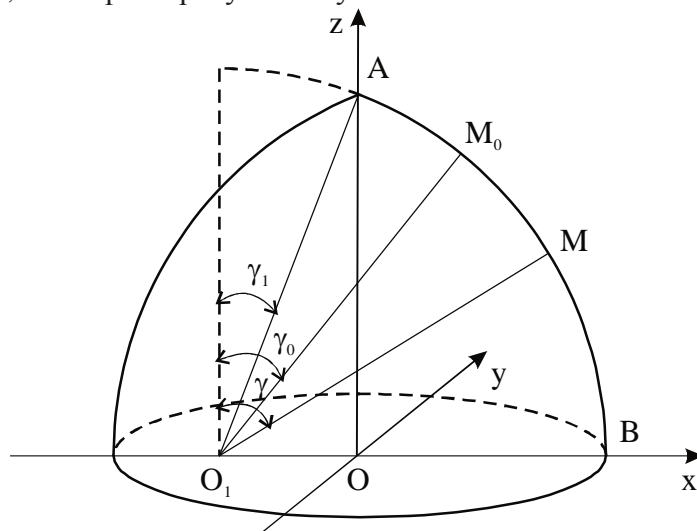


Рисунок 2 – Розрахункова схема стабілізуючого ската

Джерело: розроблено автором

Будемо вважати, що відцентрова сила при русі частинки матеріалу по поверхні стабілізуючого скату компенсуються дією стовпа матеріалу. Рух частинки у цьому випадку описується наступним диференціальним рівнянням:

$$m \frac{dV}{dt} = mg \sin \gamma - fmg \cos \gamma , \quad (4)$$

де V – швидкість;

m – маса частинки;

f – коефіцієнт тертя;

g – прискорення вільного падіння.

Останнє рівняння можна переписати у вигляді:

$$V \frac{dV}{d\gamma} = Rg (\sin \gamma - f \cos \gamma) . \quad (5)$$

Диференціальне рівняння (5) розв'язується при граничній умові $V(\gamma_0) = V_0$, де V_0 – дотична складова вхідної швидкості сипкого матеріалу. Маємо:

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2Rg [(\cos \gamma_0 - \cos \gamma + f(\sin \gamma_0 - \sin \gamma))] } . \quad (6)$$

Величина V_0 визначається наступним чином:

$$V_0 = \sqrt{V_{\sigma}^2 + 2g(H - R \cos \gamma_0) \sin \gamma_0}, \quad (7)$$

де V_{σ} – швидкість витікання матеріалу з бункера.

Розглянемо спочатку випадок, коли радіус вихідного отвору бункера r менший за радіус основи стабілізуючого скату R_1 (рис. 3). Найменше та найбільше значення кута γ_0 позначимо відповідно через γ_1 і γ_2 . Вказані величини визначаються за формулами:

$$\gamma_1 = \arcsin \frac{c}{R}, \quad \gamma_2 = \arcsin \frac{c+r}{R}. \quad (8)$$

Використовуючи залежність (6) можемо знайти швидкість частинок в точці С (рис. 3)

$$V_C = \sqrt{V_0^2 + 2Rg[(\cos \gamma_0 - \cos \gamma_2 + f(\sin \gamma_0 - \sin \gamma_2))]} \quad (9)$$

Ця швидкість залежить від місця падіння частинки на поверхню стабілізуючого ската, тобто $V_C = V_C(\gamma_0)$. Усереднене значення швидкості V_C по усіх точках, що попадають на поверхню стабілізуючого скату, яке позначимо як V_{cy} , може бути знайдено за формулою

$$V_{cy} = \frac{2}{r^2} \int_0^r x_0 V_C(x_0) dx_0. \quad (10)$$

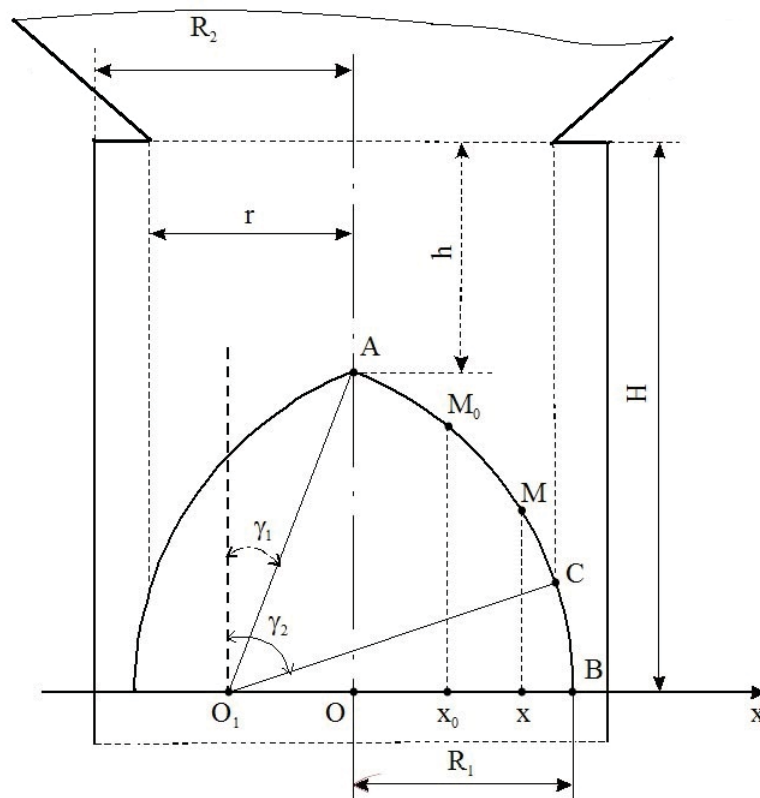


Рисунок 3 – Схема постачального пристрою установки безперервної дії
Джерело: розроблено автором

З врахуванням того, що $x_0 = R \sin \gamma_0 - c$, отримуємо

$$V_{Cy} = \frac{2R}{r^2} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \cos \gamma_0 (R \sin \gamma_0 - c) \sqrt{V_0^2 + 2Rg[(\cos \gamma_0 - \cos \gamma_2 + f(\sin \gamma_0 - \sin \gamma_2))]} d\gamma_0. \quad (11)$$

Відмітимо, що інтеграл у правій частині останньої формули в аналітичній формі не визначається. Чисельні розрахунки, які наведені нижче, виконані в системі MathCAD.

При русі частинки за межами ділянки AC (рис. 3), де немає стовпа падаючого матеріалу, необхідно враховувати дію відцентрової сили. Якщо $V^2 / R < g \cos \gamma$, то частинка продовжує рух по поверхні, а якщо $V^2 / R > g \cos \gamma$, то відцентрова сила відриває частинку від поверхні. Введемо позначення:

$$V_{кр} = \sqrt{Rg \cos \gamma_2}. \quad (12)$$

Якщо $V_{Cy} > V_{кр}$, то частинка злітає з поверхні.

На рис. 4 наведені результати обчислень, зроблених за формулами (9), (11) і (12). В обох випадках $V_{Cy} > V_{кр}$, тобто в точці С частинки відриваються від поверхні.

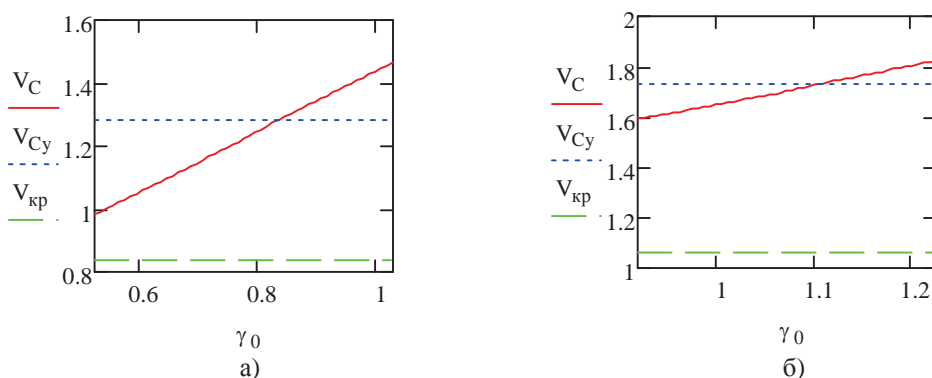


Рисунок 4 – Залежність швидкості V_C від величини кута γ_0 та значення швидкості V_{Cy} і $V_{кр}$ при $R_1 = 0,07$ м; $r = 0,05$ м; $f = 0,5$; $h = 0,1$ м; $V_0 = 0$ м/с; а) $R = 0,14$ м; б) $R = 0,34$ м
Джерело: розроблено автором

Розглянемо далі випадок, коли $R_1 \leq r \leq R_2$ (рис. 3). Величина γ_0 при вказаних умовах може змінюватися від γ_1 до $\pi/2$. На основі (6) отримуємо швидкість частинок в точці В

$$V_B = \sqrt{V_0^2 + 2Rg[(\cos \gamma_0 + f(\sin \gamma_0 - 1))]} . \quad (13)$$

Знайдемо усереднені значення швидкості V_B по усіх точках поверхні стабілізуючого ската

$$V_{B1} = \frac{2R}{R_1^2} \int_{\gamma_1}^{\pi/2} \cos \gamma_0 (R \sin \gamma_0 - c) \sqrt{V_0^2 + 2Rg[(\cos \gamma_0 + f(\sin \gamma_0 - 1))]} d\gamma_0. \quad (14)$$

Швидкість частини сипкого матеріалу, який не попав на приймаючу поверхню стабілізуючого ската і знаходиться в одній горизонтальній площині з точкою В ($R_1 < x \leq r$)

$$V_{B2} = \sqrt{V_{\sigma}^2 + 2gH} \quad (15)$$

Усереднене значення швидкості усього матеріалу, який рухається зі швидкостями V_{B1} і V_{B2} може бути знайдене за формулою

$$V_{By} = \frac{R_1^2}{r^2} V_{B1} + \frac{r^2 - R_1^2}{r^2} V_{B2} \quad (16)$$

На рис. 5 наведені результати обчислень, зроблених за формулами (13) - (16). Збільшення радіуса r прогнозовано тягне за собою зміщення усередненої швидкості V_{By} від V_{B1} до V_{B2} .

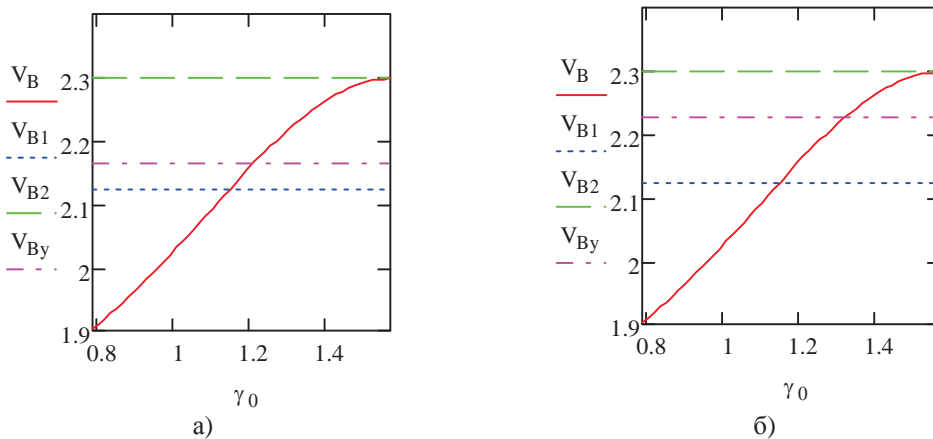


Рисунок 5 – Залежність швидкості V_B від величини кута γ_0 та значення швидкості V_{B1} , V_{B2} і V_{By} при $R_1 = 0,07$ м; $R = 0,24$ м; $f = 0,5$; $h = 0,1$ м; $V_{\sigma} = 0$ м/с; а) $r = 0,08$ м; б) $r = 0,11$ м

Джерело: розроблено автором

Висновки:

1. Швидкість сипкого матеріалу збільшується при збільшенні радіуса r (рис. 3) та кута γ_0 (рис. 2).

2. Визначено діапазон зміни швидкості (мінливості, межі варіювання) швидкості руху сипкого матеріалу в постачальному пристрої. При $R_1 = 0,07$ м; $R = 0,24$ м; $f = 0,5$; $h = 0,1$ м; $V_{\sigma} = 0$ м/с; $r = 0,08 \dots 0,1$ м. швидкість сипкого матеріалу змінюється в межах 2,11...2,3 м/с.

3. Отримані результати дозволяють визначити значення основних геометричних параметрів стабілізуючого скату постачальних пристроїв установок безперервної дії для забезпечення потрібних вихідних показників.

Список літератури

1. Оришак О.В., Гуцул В.І., Артюхов А.М. Теоретичне дослідження конусного стабілізатора потоку сипкого матеріалу установки безперервної дії для завантаження сипких матеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Кіровоград: КНТУ. 2016. Вип. 46. С. 175-181.

2. Оришак О.В., Гуцул В.І., Артюхов А.М. Теоретичне дослідження регулятора витoku сипкого матеріалу. *Техніка в с-г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Збірник наукових праць КНТУ*. Кропивницький: КНТУ. 2017. Вип. 30. С. 22-28.
3. Любин Н.В., Токарчук А.А. Закономерности истечения сыпучего материала через бункерные скребки трубчатых конвейеров на вертикальных участках трассы. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. Вінниця: ВНАУ. 2014. Вип. 85. С. 164-169.
4. Кирия Р.В., Максютенко В.Ю., Брагинец Д.Д., Мостовой Б.И. К вопросу об истечении сыпучего груза из бункера со щелевым отверстием. *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр.* Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. 2008. Вып. 80. С. 351–362.
5. Кирия Р.В., Брагинец Д.Д., Мостовой Б.И. Истечение сыпучего груза из бункера с боковым щелевым отверстием. *Сборник научных трудов НГУ*. Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. 2009. Вып. 32. С. 114–122.
6. Кирия Р.В. О коэффициенте внутренних потерь при движении сыпучей среды по элементам перегрузочных узлов ленточных конвейеров. *Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.* Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. 2003. Вып. 41. С. 159–167.
7. Кирия Р.В., Брагинец Д.Д., Мищенко Т.Ф. Истечение сыпучего груза из бункера с регулируемой боковой заслонкой. *Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.* Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. 2012. Вып. 101. С. 130-138.
8. Попков В.М. Основы теории расчета времени истечения сыпучих грузов из бункерных устройств. *Известия Петербургского университета путей сообщения*: Спб.: ФГБОУВО. 2005. Вып.2. С. 22-26.
9. Скудина А.А. Влияние сводоразрушающего устройства на работу бункера наибольшей пропускной способности. *ООО ИЦ Науковедение*. 2015. Том 7, №6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/66TVN615.pdf> (дата обращения: 11.12.2018).

References

1. Oryshaka, O.V., Hutsul, V.I. & Artiukhov, A.M. (2016). Teoretychne doslidzhennia konusnoho stabilizatora potoku sypkoho materialu ustanovky bezperervnoi dii dlia zavantazhennia sypkykh materialiv [Theoretical study of a conical stabilizer of flow of bulk material of installation of continuous action for loading of bulk materials]. *Zagaljnoderzhavnyj mizhvidomchij naukovy-tekhnichnyj zbirnyk. Konstruivannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil'sjkozhospodarsjkykh mashyn – National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 46. 175-181 [in Ukrainian].
2. Oryshaka, O.V., Hutsul, V.I. & Artiukhov, A.M. (2017). Teoretychne doslidzhennia rehuliatora vytku sypkoho materialu [Theoretical study of the regulator of leakage of bulk material]. *Tekhnika v s-h vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Zbirnyk naukovykh prats' KNTU – Collected works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in agricultural production, industry, machine building, automation*, 30. 22-28 [in Ukrainian].
3. Ljubin, N.V. & Tokarchuk, A.A. (2014). Zakonomernosti istechenija sypuchego materiala cherez bunkernye skrebki trubchatyh konvejerov na vertikal'nyh uchastkah trassy [Patterns of the outflow of bulk material through hopper scrapers of tubular conveyors on vertical sections of the route]. *Zbirnyk naukovykh prats' Vinnyts'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu – Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University*, 85. 164-169 [in Russian].
4. Kirija, R.V., Maksjutenko, V.Ju., Braginec, D.D., & Mostovoj, B.I. (2008). K voprosu ob istechenii sypuchego gruzha iz bunkera so shhelevym otverstiem [On the issue of the expiration of bulk cargo from a hopper with a slot hole]. *Geotekhnicheskaja mehanika: Mezhd. sb. nauch. tr. Dnepropetrovsk: IGTM NAN Ukrainy – Geotechnical mechanics: Bear. Sat. scientific tr. Dnepropetrovsk: IGTM NAS of Ukraine*, 80. 351–362 [in Russian].
5. Kirija, R.V., Braginec, D.D. & Mostovoj, B.I. (2009). Istechenie sypuchego gruzha iz bunkera s bokovym shhelevym otverstiem [The flow of bulk cargo from the hopper with a side slotted hole]. *Sbornik nauchnykh trudov NGU. Dnepropetrovsk: IGTM NAN Ukrainy – Collection of scientific works of NSU. Dnepropetrovsk: IGTM NAS of Ukraine*, 32. 114–122 [in Russian].
6. Kirija, R.V. (2003). O koefefficente vnutrennih poter' pri dvizhenii sypuchej sredy po jelementam peregruzochnykh uzlov lentochnykh konvejerov [On the coefficient of internal losses during the movement of granular medium along the elements of reloading units of belt conveyors]. *Geotekhnicheskaja mehanika: Mezhd. sb. nauchn. tr. Dnepropetrovsk: IGTM NANU – Geotechnical mechanics: Bear. Sat. scientific tr. Dnepropetrovsk: IGTM NAS of Ukraine*, 41. 159–167 [in Russian].

7. Kirija, R.V., Braginec, D.D. & Mishhenko, T.F. (2012). Istechenie sypuchego gruzha iz bunkera s reguliruemoy bokovoy zaslonkoj [Bulk cargo outflow from hopper with adjustable side flap]. *Geotekhnicheskaja mehanika: Mezhd. sb. nauchn. tr. Dnepropetrovsk: IGTM NANU – Geotechnical mechanics: Bear. Sat. scientific tr. Dnepropetrovsk: IGTM NAS of Ukraine, 101.* 130-138 [in Russian].
8. Popkov, V.M. (2005). Osnovy teorii rascheta vremeni istechnija sypuchih gruzov iz bunkernyh ustrojstv [Fundamentals of the theory of calculating the time of expiration of bulk cargo from bunker devices.]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija: Spb.: FGBOUVO – Proceedings of St. Petersburg University of Railway Transport: St. Petersburg: FGBOUVO, 2.* 22-26 [in Russian].
9. Skudina, A.A. (2015). Vlijanie svodorazrushajushhego ustrojstva na rabotu bunkera naibol'shej propusknoj sposobnosti [The influence of a demolition device on the operation of the bunker with the highest throughput]. *OOO IC Naukovedenie – Internet journal "Science of Science", Vol. 7, 6.* Retrieved from: <http://naukovedenie.ru/PDF/66TVN615.pdf> [in Russian].

Oleh Oryshaka, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Vasily Gutsul**, Assos. Prof., PhD phys.&math. sci., **Anatoly Artiuhov**, Assos. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Theoretical Investigation of the Movement of Free-flowing Material in the Supply Device of Continuous Operation

Continuous-action plants have several advantages over cycle-feed units (low energy costs, high productivity, lower material consumption, etc.), so improving continuous-action installations is an urgent task. The bulk material feeder, as an integral part of the continuous-action plants, requires appropriate research to substantiate and optimize the design parameters of the installation.

The purpose of this work is to investigate the influence of the geometrical parameters of the stabilizing slope of the delivery devices of the continuous-action installations for loading free-flowing materials on the speed of movement of the bulk material and, thus, the technological process of the installation for loading bulk materials.

The dependences of the velocity of the free-flowing material in the delivery device of the continuous devices on the geometric parameters of the supply device are determined, as well as the range of velocity variation of the bulk material movement in the feed device is determined.

Research findings.

- The velocity of loose material increases with increasing radius r (fig. 3) and angle (fig. 2).
- The range of variation in speed (variability, boundary limits) of the velocity of free-flowing material in the supplying device is determined. At $R_1 = 0,07 \text{ m}$; $R = 0,24 \text{ m}$; $f = 0,5$; $h = 0,1 \text{ m}$; $V_{\sigma} = 0 \text{ m/s}$; $r = 0,08 \dots 0,11 \text{ m}$, the velocity of the free-flowing material varies between $2,11 \dots 2,3 \text{ m/s}$.
- The obtained results allow to determine the values of the main geometric parameters of the supply device of the continuous devices to provide the required output indicators
- The results obtained allow us to determine the values of the basic geometric parameters of the stabilizing slope of the delivery devices of the continuous operation installations to provide the required output indicators.

feed device, free-flowing material

Одержано (Received) 22.01.2019

Прорецензовано (Reviewed) 23.05.2019

Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019