

УДК 622:7

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.111>

РОЗПОДІЛ СИПКОВОГО МАТЕРІАЛУ В РЕШЕТІ З ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

¹Кобець А.С., ²Дирда В.І., ¹Науменко М.М., ¹Сокол С.П., ¹Філіпенко Д.В.,
¹Гуридова В.О.

¹Дніпровський аграрно-економічний університет, ²Інститут геотехнічної механіки ім.
М.С. Полякова НАН України

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В СИТЕ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

¹Кобец А.С., ²Дырда В.И., ¹Науменко Н.Н., ¹Сокол С.П., ¹Филиппенко Д.В.,
¹Гуридова В.А.

¹Днепровский аграрно-экономический университет, ²Институт геотехнической механики
им. Н.С. Полякова НАН Украины

DISTRIBUTION OF THE BULK MATERIAL IN THE SIEVE WITH HORIZONTAL ROTATION AXIS

¹Kobets A.S., ²Dyrda V.I., ¹Naumenko M.M., ¹Sokol S.P., ¹Filipenko D.V.,
¹Huridova V.O.

¹Dnipro State Agrarian and Economic University, ²Institute of Geotechnical Mechanics named by
N. Poljakov NAS of Ukraine

Анотація. Для очистки зерна від домішок використовують циліндричні решета, що обертаються навколо горизонтальної осі. Як показує практика, бажані такі режими сепарування, при яких зерновий ворох не обертається разом з решетою, а рухається окремо, проковзуючи по його поверхні. Можливі два такі режими. В першому суміш “зависає” в барабані, знаходячись в зрівноваженому стані під дією моменту сил ваги відносно осі обертання та моменту сил тертя, що виникають на поверхні взаємодії з решетою. Суміш, що потрапляє на вільну поверхню, рухається опускаючись по лінії укосу, а швидкість проковзування на контактній поверхні залишається сталою і таким чином створюються не найкращі умови для сепарування. Ефективнішим являється другий режим, при якому ворох здійснює коливання навколо осі обертання відносно свого зрівноваженого положення. У цьому випадку швидкість проковзування на контактній поверхні є змінною, що створює найсприятливіші умови для очистки зерна від домішок.

Досліджується форма перерізу зернового вороха при його очищенні в решеті, що обертається навколо горизонтальної осі. Розрахункова схема системи «зерновий ворох – решето» передбачає, що масив зернової суміші рухається як єдине ціле під дією сил взаємодії з решетою, які виникають на контактній поверхні, сил ваги та відцентрових сил, що виникають при обертанні. Приймається, що витрата суміші, що потрапляє в решето дорівнює сумарній витраті зерна при сепаруванні та домішок, які видаляються з масиву під час очистки. Передбачається, що при незначних кутових швидкостях зерновий ворох під дією сил взаємодії з решетою може знаходитись в зрівноваженому стані, або ж може здійснювати коливання навколо осі обертання відносно свого зрівноваженого положення. У цьому випадку швидкість проковзування на контактній поверхні є змінною, що створює найсприятливіші умови для очистки зерна від домішок.

Отримане диференціальне рівняння контуру перерізу при його обертанні навколо осі решета. Лінії укосу побудовані за допомогою табличного процесора EXCEL за даними чисельного інтегрування диференціального рівняння методом Рунге-Кутта.

Розглядається найбільш бажаний режим роботи решета, при якому зерновий ворох, проковзуючи по поверхні решета, буде здійснювати коливання, обертаючись навколо його осі. Аналіз результатів розв'язку рівняння виявив незначний вплив кутової швидкості на форму контуру, що дозволяє при дослідженні руху вороху представляти його переріз як сегмент решета. На підставі лабораторного експерименту прийняте припущення, що сегментом можна представляти форму перерізу суміші з будь-якого сипкого матеріалу.

Ключові слова: зерновий ворох, циліндричне решето, математична модель, очистка зерна, рівняння рівноваги, лінія укосу, контур перерізу

Зберігання зерна, яке не пройшло попередню очистку від домішок сприяє значній втраті його якості [6]. Одним із перспективних напрямків удосконалення

зерноочисних машин являється створення горизонтальних відцентрових очищувачів [7]. Як відомо з експлуатації циліндричного решета, що обертається навколо горизонтальної осі, призначеного для очистки зерна від домішок, якість очистки зерна в решеті і самого решета, а також від розмірів перерізу вороха в барабані.

Відомі дослідження, що стосуються аналізу взаємодії зернової суміші з поверхнею циліндричного решета, в якому вона знаходиться, проте єдиного підходу до розрахункової схеми системи «зерновий ворох – решето» не відомо. Зокрема, зерновий ворох іноді представляється як «псевдозріджене середовище» [1, 2], а іноді як сипкий матеріал [3, 4], для якого математична модель його руху створюється на основі дослідження руху окремої частини зернової суміші.

Мета роботи полягає у визначенні форми перерізу вороха зерна у барабані і дослідженні її залежності від кутової швидкості барабана та об'єму насінного матеріалу в ньому. Для аналізу взаємодії зерна з решетом використовується схема, що наведена на рис. 1.

На схемі площа перерізу суміші заштрихована. Припускається, що при повільному обертанні решета проти годинникової стрілки навколо горизонтальної осі (точка O на рис. 1), зернова суміш взаємодіє з решетом, проковзуючи в процесі очищення по лінії дуги решета AB . В околиці точки B зерно виштовхується на поверхню, опускається по ній до точки A і знову захоплюється решетом.

Враховуючи, що лінія поверхні AB являє собою лінію укусу, що формується силами ваги і силами інерції, розглянемо граничне положення довільної частинки, на яку діє сила ваги P , відцентрова сила інерції F^{in} , нормальна реакція N і сила тертя F_T .

Рівняння рівноваги розглянутої системи сил в системі координат xOy (рис. 1) мають вигляд

$$\begin{aligned} \sum F_{кx} &= F^{in} \sin \alpha - N \sin \beta + fN \cos \beta = 0; \\ \sum F_{ny} &= N \cos \beta + fN \sin \beta - F^{in} \cos \alpha - P = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де β – кут, який утворює нормаль до контура вороха з віссю Oy ; f – коефіцієнт тертя.

Сумісний розв'язок наведених рівнянь дає можливість прийти до виразу

$$F^{in} \sin \beta \sin \alpha - N \sin^2 \beta - N \cos^2 \beta + F^{in} \cos^2 \alpha \cos \beta + P \cos \beta = 0, \quad (2)$$

звідки

$$N = F^{in} \sin \beta \sin \alpha + F^{in} \cos \alpha \cos \beta + P \cos \beta. \quad (3)$$

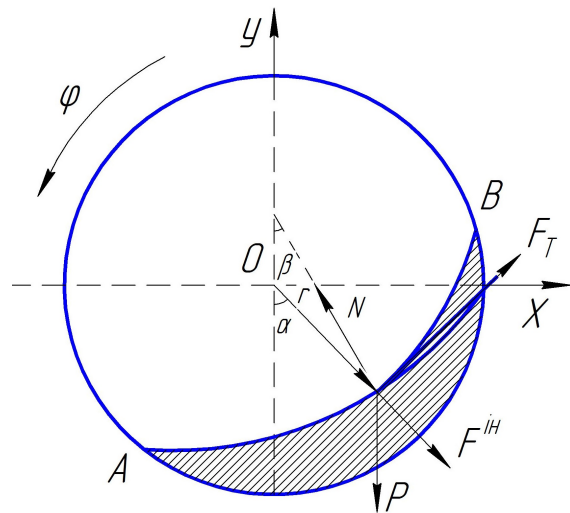


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на окрему частинку зернової суміші на поверхні перерізу вороха в решеті

Підставляючи вираз (3) в рівняння (1), отримаємо

$$F^{ih} \sin \alpha - F^{ih} \sin^2 \beta \sin \alpha - F^{ih} \cos \alpha \cos \beta \sin \beta - P \cos \beta \sin \beta + \\ + fF^{ih} \sin \beta \sin \alpha \cos \beta + fF^{ih} \cos \alpha \cos^2 \beta + fP \cos^2 \beta = 0,$$

або

$$F^{ih} \frac{\sin \alpha}{\cos^2 \beta} - F^{ih} \sin \alpha \operatorname{tg}^2 \beta - F^{ih} \cos \alpha \operatorname{tg} \beta - \\ - P \operatorname{tg} \beta + fF^{ih} \sin \alpha \operatorname{tg} \beta + fF^{ih} \cos \alpha + fP = 0.$$

Приймаючи до уваги, що $\frac{1}{\cos^2 \beta} = 1 + \operatorname{tg}^2 \beta$, прийдемо до виразу

$$F^{ih} \sin \alpha + (fF^{ih} \sin \alpha - fF^{ih} \cos \alpha - P) \operatorname{tg} \beta + fF^{ih} \cos \alpha + fP = 0.$$

Звідси

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{F^{ih} \sin \alpha + fF^{ih} \cos \alpha + fP}{F^{ih} \cos \alpha + P - fF^{ih} \sin \alpha}. \quad (4)$$

Враховуючи, що відцентрова сила

$$F^{ih} = m\omega^2 r,$$

де m – маса зерна; ω – кутова швидкість; r – радіус вектор довільної частинки, замість формули (4) отримаємо

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{m\omega^2 (r \sin \alpha + fr \cos \alpha) + fmg}{m\omega^2 (r \cos \alpha - fr \sin \alpha) + mg}.$$

Як видно з рис. 1, $r \cos \alpha = -y$; $r \sin \alpha = x$. Тоді враховуючи, що $\operatorname{tg} \beta = \frac{dy}{dx}$,

прийдемо до диференціального рівняння

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\omega^2 x - f\omega^2 y + fg}{-\omega^2 y - f\omega^2 x + g}. \quad (5)$$

На рис. 2 наведено схеми перерізів зернової суміші в решеті для різних кутових швидкостей обертання вороха. Знизу переріз обмежено контуром решета – 1, а зверху лініями укусу 2, 3 або 4, які відповідають кутовим швидкостям $\omega_2 = 0$, $\omega_3 = 2,61 \text{ с}^{-1}$ та $\omega_4 = 5,22 \text{ с}^{-1}$.

Лінії укусу побудовані за допомогою табличного процесора EXCEL за даними чисельного інтегрування диференціального рівняння (5) методом Рунге-Кута [5].

В наведених випадках площі поперечних перерізів обумовлені кутовими швидкостями ω_2 , ω_3 , і ω_4 та початковим значеннями змінної x , що приймалась як $x_0 = -0,15 \text{ м}$.

В реальних умовах можливий і бажаний режим роботи решета, при якому зерновий ворох, проковзуючи по поверхні решета, буде здійснювати коливання, обертаючись навколо його осі (рис. 1). Аналіз результатів визначення форми поперечного перерізу зернового матеріалу дозволяє вважати її незмінною і представляти її сегментом при дослідженні взаємодії вороха з решетом.

В лабораторних умовах проведені спостереження за взаємодією сипких матеріалів з циліндричним барабаном при його обертанні. Як показали досліди, форма перерізу матеріалу в барабані при незначних кутових швидкостях завжди має вигляд близький до сегмента. На рис. 3 наведена ілюстрація до цього припущення на прикладі, коли в барабані, що обертається за годинниковою стрілкою з кутовою швидкістю 2 рад/с, знаходиться пісок.

Висновки

Площа перерізу вороха і відповідно площа поверхні взаємодії вороха з решетом залежать від кутової швидкості вороха і можуть визначатись в залежності від неї.

Лінія укусу поперечного перерізу вороха при його обертанні з незначною кутовою швидкістю наближена до прямої лінії і переріз вороха можна вважати сегментом решета.

Отриманий результат може бути використаним для побудови математичної моделі взаємодії зернового вороха з решетом.

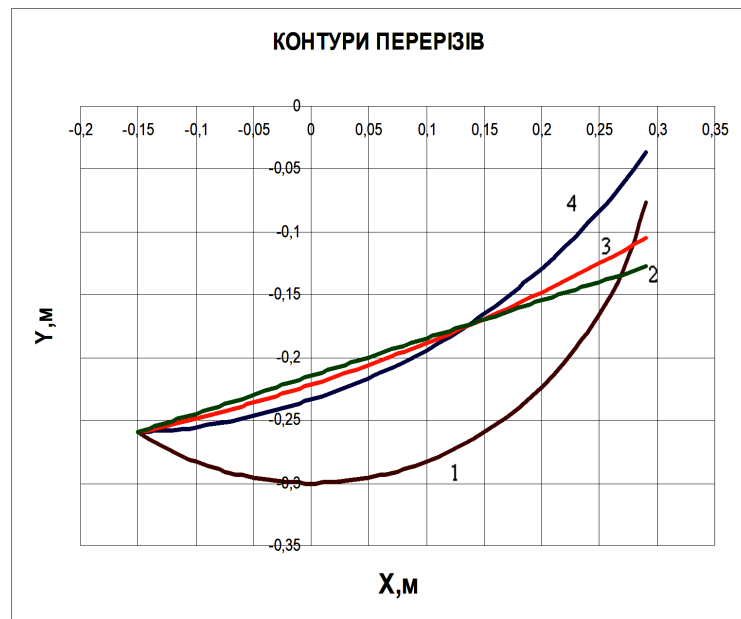


Рисунок 2 – Схеми контурів перерізів зернового вороха в решеті для різних кутових швидкостей

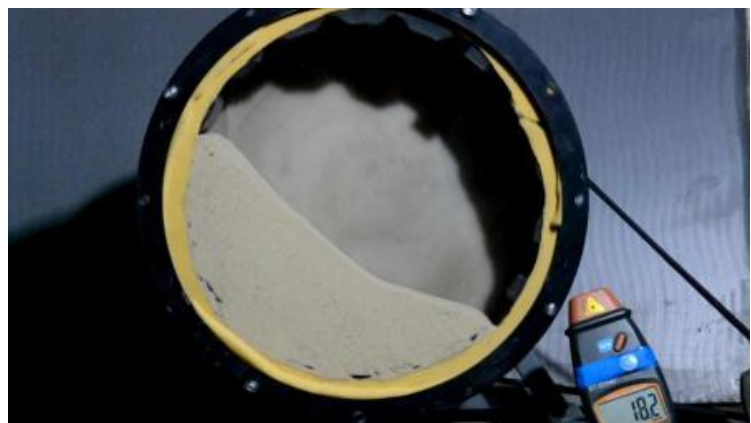


Рисунок 3 – Форма перерізу при обертанні з кутовою швидкістю $\omega = 2\text{с}^{-1}$ (матеріал – пісок)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Харченко С.А. К построению трехмерной гидродинамической модели пузырьковой псевдосжиженной зерновой схеме по структурному виброрешету. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь, 2014. Вип. 14. Т. 2. С. 80-85.
2. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Гидродинамика сепарирования зерна. Харьков: «Місьдрук», 2010. 174 с.
3. Першин В.Ф., Однолько В.Г., Першина С.В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. М.: Машиностроение, 2009. 220 с.
4. Романов А.А. Моделирование и оптимизация процесса в аппарате многоступенчатой сепарации зернистых материалов по технологии «Мультисег»: дис. ... канд. техн. наук. Тамбов, 2002. 147 с.
5. Бабушка И., Витасек Э., Прагер М. Численные методы решения дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1969. 368 с.
6. Липкович Э.И., Штейн Р.Э. Об оптимизации процесса послеуборочной обработки зерна. *Совершенствование средств механизации для заготовки и приготовления кормов*. Зерноград, 1981. С. 3-13.
7. Елизаров В.П., Матвеев А.С. Современные средства предварительной очистки зерна. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 1986. №8. С. 60-64.

REFERENCES

1. Kharchenko, S.A. (2014), "On the construction of a three-dimensional hydrodynamic model of a bubble fluidized grain scheme

- using a structural vibrates", *Trudy TDATU*, vol. 2, no. 14, pp. 80-85.
2. Tishchenko, L.N., Ol'shanskiy, V.P. and Ol'shanskiy, S.V. (2010), *Gidrodinamika separirovaniya zerna* [Hydrodynamics of grain separation], Miskdruk, Kharkov, Ukraine.
 3. Pershin, V.F., Odnol'ko V.G. and Pershina, S.V. (2009), *Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa* [Processing bulk materials in drum type machines], Mashinostroyeniye, Moscow, Russia.
 4. Romanov, A.A. (2002), "Modeling and optimization of the process in the apparatus of multi-stage separation of granular materials according to the technology "Multiseg", Ph. D. Thesis, Tambov, Russia.
 5. Babushka, I., Vitasek, E. and Prager M. (1969), *Chislennyye metody resheniya differentsial'nykh uravneniy* [Numerical methods for solving differential equations], Mir, Moscow, USSR.
 6. Lipkovich, E.I. and Shteyn, R.E. (1981), "On optimizing the process of post-harvest grain processing", *Sovershenstvovaniye sredstv mekhanizatsii dlya zagotovki i prigotovleniya kormov*, pp. 3-13.
 7. Yelizarov, V.P. and Matveev, A.S. (1986), "Modern means of preliminary cleaning of grain", *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*, no. 8, pp. 60-64.

Про авторів

Кобець Анатолій Степанович, доктор наук по державному управлінню, професор, ректор Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), Дніпро, Україна, info@dsau.ua

Дирда Віталій Ілларіонович, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу механіки еластомерних конструкцій гірничих машин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна, vita.igtm@gmail.com.

Науменко Микола Миколайович, кандидат технічних наук, професор Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), Дніпро, Україна, itfnn@ukr.net.

Сокол Сергій Петрович, кандидат технічних наук, доцент Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), Дніпро, Україна, info@dsau.dp.ua.

Філіпенко Дмитро Вікторович, викладач Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), Дніпро, Україна, dfilippenko@inbox.ru.

Гурідова Вікторія Олександрівна, старший викладач Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), Дніпро, Україна, guridova@ukr.net.

About the authors

Kobets Anatolii Stepanovych, Doctor of Public Administration, Professor, Rector, Dnipro State University of Agriculture and Economics, Dnipro, Ukraine, info@dsau.ua

Dyrda Vitalii Illarionovych, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, vita.igtm@gmail.com.

Naumenko Mikola Mykolaiovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Professor of the Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnipro, Ukraine, itfnn@ukr.net.

Sokol Sergii Petrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnipro, Ukraine, info@dsau.dp.ua.

Filipenko Dmytro Viktorovych, Lecturer of Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnipro, Ukraine, dfilippenko@inbox.ru.

Huridova Viktoriia Oleksandrivna, Senior Teacher of Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnipro, Ukraine, guridova@ukr.net.

Аннотация. Для очистки зерна от примесей используют цилиндрические решета, вращающиеся вокруг горизонтальной оси. Как показывает практика, желательны такие режимы сепарации, при которых зерновой ворох не вращается вместе с решетом, а движется отдельно, проскальзывая по его поверхности. Возможны два таких режима. В первом смесь «зависает» в барабане, находясь в уравновешенном состоянии под действием момента сил тяжести относительно оси вращения и момента сил трения, возникающих на поверхности взаимодействия с решетом. Смесь, попадающая на свободную поверхность, движется, опускаясь по линии откоса, а скорость проскальзывания на контактной поверхности остаётся постоянной, и таким образом создаются не лучшие условия для сепарирования. Более эффективным является второй режим, при котором ворох совершает колебания вокруг оси вращения относительно своего уравновешенного положения. В этом случае скорость проскальзывания на контактной поверхности является переменной, что создаёт благоприятные условия для очистки зерна от примесей.

Исследуется форма сечения зернового вороха при его очистке в решете, вращающемся вокруг горизонтальной оси. Расчётная схема системы «зерновой ворох - решето» предусматривает, что массив зерновой смеси движется как единое целое под действием сил взаимодействия с решетом, возникающих на контактной поверхности, сил тяжести и центробежных сил, возникающих при вращении. Принимается, что расход смеси, попадающей в решето равен суммарному расходу зерна при сепарировании и примесей, которые удаляются из массива во время очистки. Предполагается, что при незначительных угловых скоростях зерновой ворох под действием сил взаимодействия с решетом может находиться в уравновешенном состоянии, или же может совершать колебания вокруг

оси вращения относительно своего уравновешенного положения. В этом случае скорость проскальзывания на контактной поверхности является переменной, что создаёт благоприятные условия для очистки зерна от примесей.

Получено дифференциальное уравнение контура сечения при его вращении вокруг оси решета. Линии откоса построены с помощью табличного процессора EXCEL по данным численного интегрирования дифференциального уравнения методом Рунге-Кутты.

Рассматривается наиболее желаемый режим работы решета, при котором зерновой ворох, проскальзывая по поверхности решета, будет совершать колебания, вращаясь вокруг его оси. Анализ результатов решения уравнения выявил незначительное влияние угловой скорости на форму контура, что позволяет при исследовании движения вороха представлять его сечение как сегмент решета. На основании лабораторного эксперимента принято предположение, что сегментом можно представлять форму сечения смеси из любого сыпучего материала.

Ключевые слова: зерновой ворох, цилиндрическое сито, математическая модель, очистка зерна, уравнения равновесия, линия откоса, контур сечения

Abstract. To clean the grain from impurities using a cylindrical sieve, rotating around a horizontal axis. As practice shows, such separation regimes are desirable in which the grain heap does not rotate with the sieve, but moves separately, slipping along its surface. Two such modes are possible. In the first, the mixture “freezes” in the drum, being in a balanced state under the action of the moment of gravity with respect to the axis of rotation and the moment of friction arising on the surface of interaction with the sieve. The mixture falling on the free surface moves down along the slope line, while the slip rate on the contact surface remains constant, and thus not the best conditions for separation are created. More effective is the second mode, in which the pile oscillates around the axis of rotation relative to its balanced position. In this case, the slip rate on the contact surface is variable, which creates favorable conditions for cleaning the grain from impurities.

In this article, the form of cross-section of a grain heap was examined, when it is separated in a sieve that rotates around the horizontal axis. Scheme of the system “grain heap – sieve” assumes that an array of grain mix is moving as a whole under the action of the forces of interaction with the sieve, which arise on the contact surface, the forces of gravity and centrifugal forces that arise during rotation. It is assumed that the expenses of the mixture, that falls into a sieve, is equal to the total expenditure of grain during separation and impurities that are removed from the array during cleaning. It is assumed that at low angular velocities the grain heap under the action of the forces of interaction with the sieve can be in a balanced state, or may oscillate around the axis of rotation relative to its balanced position. In this case, the rate of slippage on the contact surface is variable, is a variable, which creates the most favorable conditions for the purification of grain from impurities.

The differential equation of the contour of the section with its rotation around the axis of the sieve Slope lines are constructed using the EXCEL table processor based on the data of numerical integration of a differential equation using the Runge-Kutta method.

The most desirable mode of operation of the sieve is considered, in which the grain heap, slipping on the surface of the sieve, will oscillate, rotating around its axis. Analysis of the results of the solution of equation found an insignificant effect of the angular velocity on the shape of the cross-sectional contour. This makes it possible to represent the cross section of a grain heap as a segment when studying its movement.

Keywords: grain heap, cylindrical sieve, mathematical model, grain cleaning, equilibrium equation, line of slope, contour of the section

Статья поступила в редакцию 03.02.2019

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко