

УДК 004.942

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.29.2.024](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.29.2.024)

Математическая модель процесса усреднения свойств сыпучих материалов при их истечении

К.А. Мелехина¹, А.П. Ананьев¹, А.В. Плотникова¹, С.А. Шестак²

¹Ассоциация субъектов инновационной деятельности в горной отрасли «Инновационные горные технологии», Москва, Россия

²Акционерное общество «Кольская горно-металлургическая компания» (АО «Кольская ГМК»), Заполярный, Россия

Резюме: Цель – прогнозирование свойств сыпучего материала, вытекающего из бункерного устройства. Актуальность исследования обусловлена недостатком входных данных для управления процессом усреднения на обогатительных фабриках. В связи с этим, данная статья направлена на выявление передаточной функции бункерного устройства и времени задержки между подачей и истечением материала, которая позволит спрогнозировать свойство сыпучего материала, а значит получить исходные данные для процесса усреднения, которые не всегда имеются. В данной статье представлен анализ существующих режимов истечения сыпучих материалов при истечении из бункерного устройства с одним и несколькими отверстиями, выведены уравнения, описывающие передаточную функцию бункерного устройства, а также временную задержку между подачей слоя и его истечением. На основе этих уравнений была построена математическая модель управления процессом усреднения, которая связывает относительные колебания и частоту смены свойства рудного материала, поступающего в бункер. Составленная математическая модель дает резервы для снижения относительных колебаний на фабрике. Материалы статьи представляют практическую ценность для управления процессом усреднения рудного материала на обогатительных фабриках.

Ключевые слова: математическое моделирование, передаточная функция, усреднение свойств, сыпучие материалы, истечение.

Для цитирования: Мелехина К.А., Ананьев П.П., Плотникова А.В., Шестак С.А.

Математическая модель процесса усреднения свойств сыпучих материалов при их истечении.

Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020;8(2). Available from:

https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/05/MelekhinaSoavtors_2_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.024 (In Russ).

Mathematical model of the process of averaging the properties of bulk materials at their expiration

K.A. Melekhina¹, P.P. Anan'ev¹, A.V. Plotnikova¹, S.A. Shestak²

¹Association of subjects of innovative activity in the mining industry "Innovative mining technologies", Moscow, Russia

²Kola Mining and Metallurgical Company, Zapolyarny, Russia

Abstract: The goal is to predict the properties of bulk material flowing from the hopper device. The relevance of the study is due to the lack of input data for controlling the averaging process at processing plants. In this regard, this article is aimed at identifying the transfer function of the hopper device, and the delay time between the feed and the expiration of the material, which will allow you to predict the property of the bulk material, and therefore get the initial data for the averaging process, which is not always available. This article presents an analysis of the existing flow modes of bulk materials when

they flow out of a hopper device with one or more holes, the equations describing the transfer function of the hopper device, as well as the time delay between the layer feed and its expiration, are derived. Based on these equations, a mathematical model for controlling the averaging process was constructed, which relates the relative fluctuations and frequency of change in the properties of the ore material entering the hopper. The compiled mathematical model provides reserves for reducing relative fluctuations in the factory. The materials of the article are of practical value for managing the process of averaging ore material at processing plants.

Keywords: mathematic modeling, transfer-function coefficient, averaging out of behavior, granular material, fluxion.

For citation: Melekhina. K.A., Anan'ev P.P., Plotnikova A.V., Shestak S.A. Mathematical model of the process of averaging the properties of bulk materials at their expiration.

Modeling, Optimization and Information Technology. 2020;8(2). Available from:

https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/05/MelekhinaSoavtors_2_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.29.2.024(In Russ).

Введение

На данный момент существует проблема со стабилизацией свойств сыпучих материалов, подаваемых на переработку. Неоднородность комплекса свойств, как правило, вызывает потери в технологическом процессе получения готовой продукции из сыпучих материалов. Стабилизация свойств сыпучих материалов может быть достигнута за счет создания специализированных усреднительных складов. Но такой подход весьма затратен, так как требует выполнение большого объема погрузочно-разгрузочных работ при формировании усреднительных штабелей. Создание усреднительных складов не всегда возможно, в этом случае осуществляют шихтование сыпучих материалов, подаваемых на переработку, путем поочередной подачи компонентов шихты, имеющих отличающийся друг от друга комплекс свойств. В настоящий момент отсутствуют модели стабилизации свойств шихты при таком подходе, что затрудняет процесс управления переработкой из-за циклического характера свойств шихты, подаваемой на переработку. Наиболее остро проблема стабилизации свойств сыпучих материалов проявляется при переработке руды. Исходное рудное сырье имеет широкий диапазон технологических свойств даже в пределах одного месторождения. Основные свойства, влияющие на качественно-количественные показатели рудоподготовки и обогащения содержание полезного компонента, размер зерен минералов полезного компонента, физико-механические свойства и др. Прогнозирование свойств рудной шихты при истечении ее из бункерных устройств может дать резервы для управления процессом усреднения непосредственно на обогатительной фабрике для повышения показателя извлечения полезного компонента. Установлено, что одним из способов повышения извлечения является усреднение руды на стадиях рудоподготовки. Для того чтобы управление процессом усреднения руд было эффективным, необходимо наличие исходных данных о свойствах компонентов рудной шихты. Проблему отсутствия входных данных при управлении процессом усреднения рудной шихты можно решить за счет математического моделирования истечения сыпучих материалов из бункеров. Разработка и решение системы уравнений движения слоев компонентов шихты, истекающих из бункера, позволит найти область оптимального управления процессом усреднения свойств рудного материала, подаваемого из бункера на переработку.

Основная задача настоящей работы заключается в составлении передаточной функции в виде отношения модулей амплитуды колебаний свойств на выходе из бункера к амплитуде колебаний на входе в бункер, а также в определении сдвига фазы,

характеризующего временную задержку. При составлении уравнений движения компонентов шихты необходимо учитывать комплекс их физико-механических свойств и известные закономерности движения сыпучих материалов.

Истечение сыпучих материалов имеет существенную разницу в отличие от истечения жидкостей из сосудов. Истечение сыпучих материалов происходит неравномерно. Сыпучесть материала – один из основных факторов, которые оказывают влияние на точность дозирования.

Сыпучесть – это состояние материала, характеризующееся отсутствием сплошной материальной связи между частицами. Сыпучесть чаще всего рассматривают как комплекс физико-механических свойств материала. Степень сыпучести характеризуется количеством материала, проходящего через единицу площади выпускного отверстия в единицу времени. На степень сыпучести материала влияют не только физико-механические свойства материала, но параметры воронки, размер выпускного отверстия и высота засыпки.

Бункер, как правило, представляет собой или конический сосуд, или цилиндрический сосуд с коническим днищем, или сосуд в форме усеченной пирамиды.

В отличие от истечения жидкостей и флюидов, сыпучие материалы по поперечному сечению бункера двигаются неравномерно, это приводит к тому, что в центре бункера образуется воронка, которая постепенно достигает стенок аппарата. Впоследствии воронки обрушаются по мере выгрузки сыпучего материала через нижнее отверстие стенки [1].

Материалы и методы

Методы, использованные для построения передаточной функции процессов усреднения сыпучих материалов в бункерных устройствах, основываются на анализе механизма движения последовательно подаваемых слоев компонентов рудной шихты [2,3].

Бункера – саморазгружающиеся емкости, имеющие возможность для заполнения в течение длительного времени.

Сыпучий материал имеет способность сохранять состояние равновесия в пределах, обусловленных силами внутреннего трения. При открытии выпускного отверстия материал остается без опоры, одновременно с этим нарушается равновесное состояние частиц материала в емкости [4]. Частицы сыпучего материала, которые примыкают к выпускному отверстию бункера, начинают перемещаться. В это время частицы сыпучего материала, находящиеся в слоях, расположенных выше, двигаются к выгрузному отверстию, потеряв опору. Этому процессу сопутствует колебание давления в потоке сыпучего материала. Над выгрузным отверстием бункера расположена зона А (рисунок 1). Для зоны А характерно свободное падение частиц. Зона В на высоте засыпки ограничена размерами выпускного отверстия. Зона В характеризуется ускоренным движением частиц в емкости [5]. Движение сыпучего материала к выгрузному отверстию сопровождается смещением по верхней границе зоны С с зонами Д, передвижение которых осложнено неподвижностью зон Е. Нарушение равновесного состояния слое происходит последовательно от нижних слоев к верхним, что позволяет обеспечить непрерывное движение потока в выгрузном отверстии емкости. После чего происходит изменение физико-механических свойств и давления по высоте емкости, данные изменения приводят к сводообразованию, а иногда и к сегрегации сыпучего материала [6]. В массе материала происходят явления, вызванные прерывистым характером и пульсацией потока. Движение частиц сопровождается трением, столкновением и соударением между собой при непрерывном изменении структуры сыпучего материала

[7]. При истечении сыпучих материалов из емкостей отмечается особенность – наличие неподвижных зон, выгрузка придонных слоев в таких зонах осуществляется в последнюю очередь. Размер неподвижных зон зависит от физико-механических свойств сыпучего материала и параметров емкости.

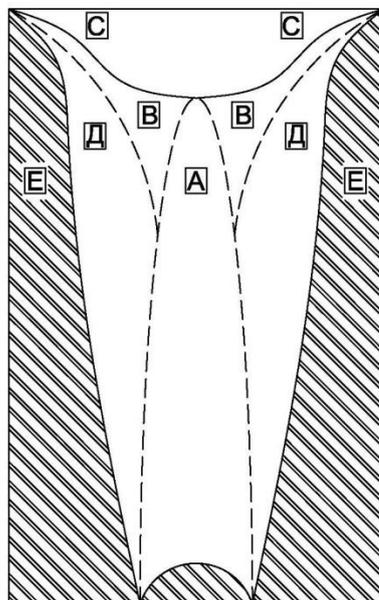


Рисунок 1 – Зоны истечения сыпучего материала из емкости
 Figure 1 - Zones of discharge of bulk material from the container

Иногда бывают отклонения от принципа, описанного выше, которое характеризуется тем, что после открытия выпускного отверстия почти вся масса сыпучего приходит в движение и в течение длительного времени опускается равномерно [8]. Такой механизм истечения сыпучего материала называется гидравлическим.

Площадь отверстия истечения принимают уменьшенной на величину типичного куска насыпного груза a .

Для круглого отверстия диаметром D :

$$F = \frac{\pi(D-a)^2}{4}. \quad (1)$$

Для квадратного отверстия со стороной A :

$$F = (A-a)^2. \quad (2)$$

Для прямоугольного отверстия со сторонами A и B :

$$F = (A-a)(B-a). \quad (3)$$

При нормальном истечении, когда перемещают легкосыпучие грузы, скорость истечения находится следующим образом:

$$v = \lambda \sqrt{3,3gR}, \quad (4)$$

где $R = \frac{F}{L}$ – гидравлический радиус выпускного отверстия, м; F – площадь выпускного отверстия, м²; L – периметр выпускного отверстия, м; λ – коэффициент истечения

колеблется в пределах 0,2-0,65, причем более высокое значение принимается для сухих хорошосыпучих материалов и меньшее – для влажных, кусковых плохосыпучих.

Скорость истечения связных насыпных грузов находится следующим образом:

$$v = \lambda \sqrt{2gR(1,6 - \frac{\tau}{\gamma \cdot f})}, \quad (5)$$

где τ – величина, характеризующая силу сцепления частиц груза между собой, Н/м²; f – коэффициент внутреннего трения насыпного груза; γ – объемная масса; λ – коэффициент истечения колеблется в пределах 0,2-0,65.

Скорость истечения при боковой разгрузке:

$$v_u = v_0 \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

где v_0 – скорость нормального истечения груза, м/с; α – угол наклона стенок бункера, град.

При нормальных выпускных отверстиях и равномерном потоке груза пропускная способность бункера, т/час

$$v_u = v \cdot \sin \alpha, \quad (7)$$

где v – скорость истечения груза через отверстие, м/с, α – угол наклона стенок бункера, град.

В любом поперечном сечении бункера скорость и ускорение сыпучего тела определяются выражениями 8 и 9:

$$g = \frac{q}{S'(x)}, \quad (8)$$

где $S(x)$ – площадь текущего поперечного сечения бункера, м²; q – объемный расход сыпучего, м³/с.

Ускорение сыпучего материала в этом поперечном сечении бункера находится следующим образом:

$$a = \frac{d^2 q}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dq}{dt} \right) \quad (9)$$

Выражение 8 и 9 позволяют составить дифференциальные уравнения истечения, определяющие соотношение между объемным расходом и объемным ускорением сыпучего тела в случае, если рассматриваемое сечение x будет служить выпускным отверстием бункера. При этом величина ускорения принимается равной ускорению свободного падения.

$$\frac{dq}{dt} - \frac{S'(x)}{S(x)^2} \cdot q^2 = g \cdot S(x) \quad (10)$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$q = S(x) \cdot \left(-\frac{g \cdot S(x)}{S'(x)} \right)^{0,5} \cdot th \left(-\frac{g S'(x)}{S'(x)} \right)^{0,5} \cdot t \quad (11)$$

$$\frac{dq}{dt} = g \cdot S(x) \cdot \left[1 - th^2 \left(-\frac{g \cdot S'(x)}{S'(x)} \right)^{0,5} \right] \cdot t \quad (12)$$

Истечение сыпучего материала из отверстия характеризует эллипсоидом выпуска. Истечение материала из выпускного отверстия происходит из эллипсоида выпуска, который напоминает по своей форме эллипсоид вращения с вытянутой вертикальной осью. Рост коэффициента вытянутости происходит при увеличении роста объема эллипсоида и сил сцепления и трения.

Геометрические описания базируются на эмпирических данных. Соотношение осей эллипсоида выпуска для одиночного отверстия:

$$\frac{H}{D} = \sqrt{mH} , \quad (13)$$

где H/D - коэффициент вытянутости эллипсоида; H – высота эллипсоида, м; D – диаметр (наибольший горизонтальный), м; m – эмпирический коэффициент, зависящий от сыпучих свойств руды, m^{-1} .

Значение коэффициента m лежит в пределах от 0,4 до 1,7 в зависимости от физико-механических свойств сыпучих материалов, их гранулометрического состава и коэффициента внутреннего трения [9]. Так на примере рудных материалов минимальное значение коэффициента m характерно для крепких руд при нормальном разрыхлении, а максимальное значение коэффициента m характерно для руд средней крепости при умеренном разрыхлении.

На основе выражения 9 определяется объем выпуска:

$$V_e \approx 0,5mD^4 \quad (14)$$

Пространство, освобождающееся от сыпучего материала, заполняется другими частицами, находящимися в окрестностях эллипсоида выпуска, за счет чего в определенной зоне наблюдается вторичное разрыхление [10,11].

Форма объема зоны вторичного разрыхления называется эллипсоидом разрыхления [12]. Форма эллипсоида разрыхления подобна эллипсоиду выпуска.

Связь между объемом выпуска V_e и разрыхления V_p выглядит следующим образом:

$$k_p = \frac{V_p}{V_p - V_e} \quad (15)$$

Коэффициент вторичного разрыхления k_p находится следующим образом:

$$k_p = \frac{k_{p2}}{k_{p1}} , \quad (16)$$

где k_{p1} – коэффициент разрыхления руды до выпуска; k_{p2} – коэффициент разрыхления руды после выпуска в зоне вторичного разрыхления [8].

Для кусковых руд $k_{p1} = 1,3 - 1,4$; $k_{p2} = 1,45 - 1,55$; $k_p = 1,07 - 1,1$; $V_p = (10-15) V_e$

Для уплотненной руды $k_{p1} = 1,2$; $k_{p2} = 1,45$; $k_p = 1,2$; $V_p \approx 5 V_e$

В процессе выпуска постоянно образовывается и тут же разрушается свод динамического равновесия – происходит пульсация потока руды.

Сводообразование имеет место быть при истечении сыпучих материалов. Из источника [13] стало ясно, что вследствие возникновения явления сводообразования отмечается нарушение процессов истечения сыпучих материалов.

Режим истечения сыпучего материала из емкости с несколькими отверстиями сложно отнести к гидравлическому режиму истечения. Выпуск сыпучего материала из емкости при малом соотношении площади сечения емкости и разгрузочного отверстия происходит по смешанной форме движения сыпучего со смещением его к нормальной [14]. Движение материалов с несколькими выпускными отверстиями показано на рисунке 2.

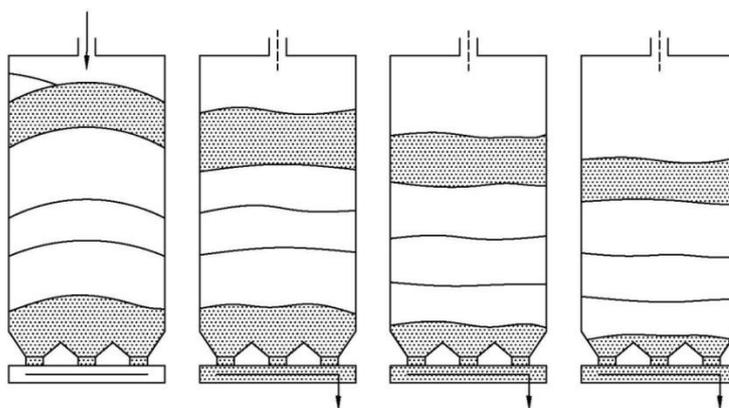


Рисунок 2 – Движение материала в бункере с несколькими выгрузными отверстиями
 Figure 2 – Movement of material in a hopper with multiple discharge holes

Результаты

В результате написания данной работы, был исследован процесс истечения руды из бункера при гидравлическом режиме истечения. В данном случае слои вытекают равномерно и не перемещаются, а значит, эллипсоид выпуска отсутствует. На рисунке 3 изображен гидравлический процесс истечения. Гидравлический режим характеризуется тем, что слои вытекают равномерно.

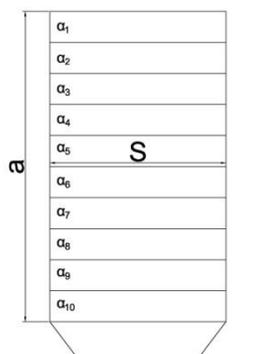


Рисунок 3 – Истечение сыпучего материала из бункеров при гидравлическом режиме истечения

Figure 3 - Flow of bulk material from bins in hydraulic flow mode

Свойство материала на входе в бункер при гидравлическом режиме истечения, изображённом на рисунке 3 в текущий момент времени τ вычисляется следующим образом:

$$\alpha_{вх} = \alpha_{ср} + \Delta\alpha \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \tau, \quad (17)$$

где T – период колебаний свойства материала на входе, $\Delta\alpha$ – относительные колебания свойства материала, τ – время от начала засыпки верхнего слоя в бункере до момента истечения из него.

Руда при гидравлическом режиме истечения от верхней точки дойдет до точки при координате Z через время τ^* , где τ^* определяется следующим образом:

$$\tau^* = \frac{h_0 - Z}{g}, \quad (18)$$

где h_0 – высота заполненной части бункера, м, g – средняя скорость движения материала в эллипсоиде выпуска в вертикальном направлении, м/сек.

Средняя скорость движения материала в эллипсоиде выпуска в вертикальном направлении находится следующим образом:

$$g = \frac{Q}{S}, \quad (19)$$

где Q – производительность питателя (расход), м³/сек, S – средняя площадь поперечного сечения, м².

Свойство материала в точке Z в текущий момент времени τ вычисляется следующим образом:

$$\alpha_Z = \alpha_{ср} + \Delta\alpha \cdot \sin \frac{2\pi}{T} (\tau - \tau^*) = \alpha_{ср} + \Delta\alpha \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \left(\tau - \frac{h_0 - Z}{g} \right) \quad (20)$$

Если $Z = 0$, то $\alpha_Z = \alpha_{ввых}$, $\alpha_{ввых}$ находится следующим образом:

$$\alpha_{ввых} = \alpha_{ср} + \Delta\alpha \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) \quad (21)$$

Так же был рассмотрен режим, когда эллипсоид выпуска присутствует и слои смешиваются неравномерно, режим истечения не является гидравлическим, процесс прогнозирования свойств вытекающего материала является сложным. Для удобства заменим эллипсоид выпуска на прямоугольник. Так как долевые участия каждого рудного материала в бункере равны. Схема для расчёта представлена на рисунке 4.

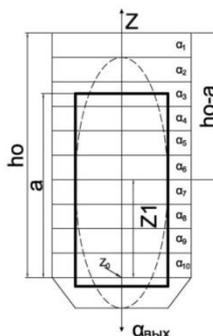


Рисунок 4 – Эллипсоид выпуска сыпучего из бункера
 Figure 4 - ellipsoid of bulk release from the bins

Основная задача настоящей работы заключается в составлении передаточной функции в виде отношения модулей амплитуды колебаний свойств на выходе из бункера к амплитуде колебаний на входе в бункер, представлена формулой 27, а также в определении сдвига фазы, характеризующего временную задержку, представлена в формуле 25. Амплитуда колебаний, такая же как и при гидравлическом, но отмечается сдвиг фазы на $\frac{h_0}{g}$.

Долевое участие слоев при режиме истечения, показанном на рисунке 4, находится следующим образом:

$$q = \frac{1}{a} \quad (22)$$

Свойство материала на выходе будет находиться следующим образом:

$$\begin{aligned} a_{\text{вых}} &= \int q \cdot a_z dz = \frac{1}{a} \int_0^a a_z dZ = \frac{1}{a} \int_0^a a_{cp} + \Delta a \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{T} \left(\tau - \frac{h_0 - Z}{g} \right) \right] dZ \\ &= a_{cp} + \frac{\Delta a}{a} \int_0^a \sin \left[\frac{2\pi}{T} \left(\left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) + \frac{Z}{g} \right) \right] dZ = a_{cp} + \frac{\Delta a \cdot g}{a} \int_0^a \sin \left[\frac{2\pi}{T} \left(\left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) + \frac{Z}{g} \right) \right] d \left(\frac{Z}{g} \right) \\ &= a_{cp} + \frac{\Delta a \cdot g}{a} \cdot \frac{T}{2\pi} \int_0^a \sin \left[\frac{2\pi}{T} \left(\left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) + \frac{2\pi Z}{T g} \right) \right] d \left(\left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) + \frac{2\pi Z}{T g} \right) = a_{cp} + \frac{\Delta a \cdot g}{a} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot (-1) \cdot \cos \left[\left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) + \frac{2\pi Z}{T g} \right]_0^a \\ &= a_{cp} + \frac{\Delta a \cdot g}{a} \cdot \frac{T}{2\pi} \left\{ \cos \left[\frac{2\pi}{T} \left(\left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) - \frac{2\pi a}{T g} \right) \right] - \cos \left[\frac{2\pi}{T} \left(\left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) - 0 \right) \right] \right\} = \\ &= a_{cp} + \frac{\Delta a \cdot g}{a} \cdot \frac{T}{2\pi} \left\{ -2 \cdot \sin \frac{\left[\frac{2\pi}{T} \left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) - \frac{2\pi a}{T g} \right] + \left[\frac{2\pi}{T} \left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) \right]}{2} \cdot \sin \frac{\left[\frac{2\pi}{T} \left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) - \frac{2\pi a}{T g} \right] - \left[\frac{2\pi}{T} \left(\tau - \frac{h_0}{g} \right) \right]}{2} \right\} \\ &= a_{cp} + \frac{\Delta a \cdot g}{a} \cdot \frac{T}{2\pi} \left\{ -2 \cdot \sin \frac{\left[\frac{4\pi\tau}{T} + \frac{2\pi a}{Tg} \right]}{2} \cdot \sin \frac{\left[\frac{2\pi a}{Tg} \right]}{2} \right\} = a_{cp} + \frac{\Delta a \cdot g}{a} \cdot \frac{T}{2\pi} \left\{ -2 \cdot \sin \frac{\left[\frac{2\pi}{T} \left(2\tau + \frac{a}{g} \right) \right]}{2} \cdot \sin \frac{\left[\frac{2\pi a}{Tg} \right]}{2} \right\} \\ &= a_{cp} + \frac{\Delta a \cdot g}{a} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot (-2) \cdot \sin \left[\frac{\pi}{T} \left(2\tau + \frac{a}{g} \right) \right] \cdot \sin \left[\frac{\pi a}{Tg} \right] \quad (23) \end{aligned}$$

Сдвиг фазы на входе будет находиться следующим образом:

$$\varphi = \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \tau \quad (24)$$

Сдвиг фазы на выходе будет находиться следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi &= -\sin \left[\frac{2\pi \cdot \tau}{T} + \frac{\pi \cdot a}{T \cdot g} \right] = \sin \left[\frac{2\pi \cdot \tau}{T} - \pi + \frac{\pi \cdot a}{T \cdot g} \right] \\ \varphi &= \frac{\pi \cdot a}{T \cdot g} \quad (25) \end{aligned}$$

Передаточная функция – отношение относительных колебаний на входе к относительным колебаниям свойства материала на выходе в данном случае будет находиться следующим образом:

$$A = \frac{\Delta a_{\text{вых}}}{\Delta a_{\text{вх}}} = \frac{\frac{\Delta a \cdot g}{a} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot (-2) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot a}{T \cdot g}\right)}{\Delta a} = 2 \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{g}{a} \cdot \sin \frac{\pi a}{Tg} \quad (26)$$

Обозначим $\frac{\pi a}{Tg} = c$, тогда:

$$A = \frac{\Delta \alpha_{\text{вых}}}{\Delta \alpha_{\text{вх}}} = \frac{1}{c} \cdot \sin c \quad (27)$$

Примем, что $A = 0$, тогда:

$$c = 0 + \pi k \quad (28)$$

$$\pi \cdot k = \frac{\pi \cdot a}{T \cdot g} \quad (29)$$

$$k = \frac{a}{T \cdot g} \quad (30)$$

$$k = 1, 2, 3, 4, \dots n$$

С помощью выявления передаточной функции была получена модель управления процессом усреднения, его изображение представлено на рисунке 5 и 6. На рисунке 5 представлена математическая модель управления процессом усреднения, на рисунке 6 изображена модель со значениями, взятыми по модулю.

Цель процесса усреднения – снижение относительных колебаний, что позволит стабилизировать процесс переработки руды на обогатительной фабрике.



Рисунок 5 – Математическая модель управления уровнем заполнения

Figure 5 - Mathematical model of filling level control

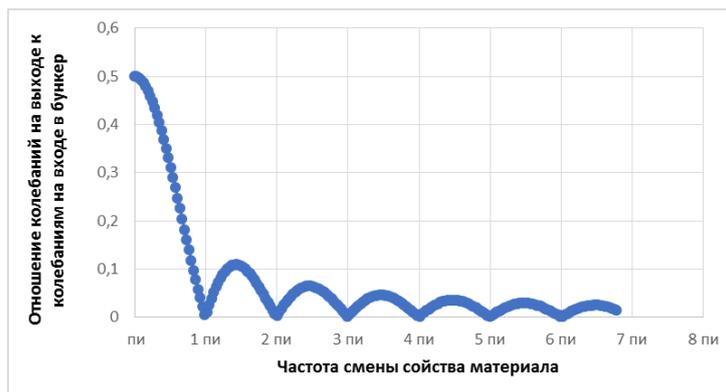


Рисунок 6 – Математическая модель управления уровнем заполнения со значениями по модулю

Figure 6 - Mathematical model of filling level control with modulus values

Из рисунка 6 можно увидеть, что отсутствие колебаний можно достигнуть тогда, когда k -целое число, равное 1, 2, 3, 4 и т.д. Показатель k на фабрике это частота смены свойства руд. Это значит, что для эффективного процесса усреднения необходимо менять свойство рудного материала каждый час.

Обсуждение

В проанализированных статьях, были описаны разные режимы и механизмы истечения руды. Также наблюдаются существенные отличия при истечении руды из нескольких отверстий. Данная математическая модель, полученная с помощью выявления передаточной функции, может быть применима для бункеров с режимами истечения, отличающихся от гидравлического. Недостаток данных создает существенные сложности в управлении процессом усреднения. Математическая модель, представленная в данной статье, позволит решить проблему с недостатком данных о руде, истекающей из бункера.

Заключение

В ходе написания работы, был исследован процесс истечения сыпучих материалов из бункеров при различных режимах истечения. Это позволило в дальнейшем истечения найти передаточную функцию бункерного устройства, а также временную задержку. Данные зависимости позволят спрогнозировать свойство сыпучего материала, вытекающего из бункера. Это позволит сделать процесс усреднения наиболее эффективным. Так как при решении задач усреднения существует проблема недостатка исходных данных.

Выражения, полученные в данной статье, позволили создать математическую модель управления процессом усреднения, которая показала, что управлять процессом усреднения можно за счет изменения частоты подачи рудного сыпучего материала на склад. Это позволит снизить относительные среднесуточные колебания на фабрике и стабилизировать процесс переработки руд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плут М.Н., Чихачев А.В., Губская О.А. Модель процесса управления системой технического обслуживания техники связи и автоматизированных систем управления. *Сборник материалов I Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией С.С. Чернова.* 2017:61-68.
2. Осипов О.Ю., Осипов Ю.М., Мещеряков Р.В. Активная карданная передача как элемент киберфизической системы. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* 2016;59(11):934-938.
3. Chueshev A., Melekhova O., Meshcheryakov R. Cloud Robotic Platform On Basis Of Fog Computing Approach. *Lecture Notes in Computer Science.* 2018;11097 (LNAI):34-43.
4. Варламов А.В. Исходные предпосылки к составлению обобщенной математической модели динамической системы «бункерное устройство с сыпучим материалом – сводообразование – механизм разрушения сводообразования». *Вестник СамГУПС.* 2011;2:79-88.
5. Xiufeng Zhang, Ganqiang Tao, Zhonghua Zhu. Laboratory study of the influence of dip and ore width on gravity flow during longitudinal sublevel caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* March 2018;103:179-185
6. Паук Л.Г., Джюева А.К. Методика определения показателей выпуска руды под обрушенными породами. *Вестник МГТУ им. Г.И.Носова.* 2008;2:15-19.
7. Qunlei Zhang, Jinchao Yue, Chuang Liu, Chun Feng, Huamin Li. Study of automated top-coal caving in extra-thick coal seams using the continuum-discontinuum element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* Volume. October 2019;122(104033)
8. Ермакова И.А. Изменение механизма истечения сыпучего материала из бункера при использовании конических разделителей потока. *Вестник Кузбасского государственного технического университета.* 2003;3:33-36.
9. Ляшенко А.С. Аналитическое определение формы образующей конического бункера наибольшей пропускной способности сыпучих материалов. *Инженерный вестник Дона.* 2014;2:35.
10. Ермакова И.А. *Устройство для выгрузки сыпучих материалов.* Решение о выдаче патента РФ на изобретение, заявка №2001126624/13(028321) МПК 7 B65D 88/64, B65G 65/30. Заявлено 01.10.2001 г.
11. Варламов А.В. *Конструкция и динамика механизмов предотвращения и устранения сводообразований в бункерах хранения и выпуска сыпучих материалов: монография.* - Самара: СНЦ РАН, 2010.
12. Куликов В.В. *Выпуск руды.* - М.: Недра, 1980.
13. Савенков Д.Н. *Бункер для сыпучих материалов.* Решение о выдаче патента РФ на изобретение, заявка №2014153426/12(155871) МПК 7 B65D 88/26, B65D 90/54. Заявлено 29.12.2014 г.
14. Dan Li, Lin Wang, Qiang Wang, Guodong Liu, Muhammad Hassan. Simulations of dynamic properties of particles in horizontal rotating ellipsoidal drums. *Applied Mathematical Modelling.* September 2016;40:7708-7723.

REFERENCES

1. Plut M.N., Chihachev A.V., Gubskaya O.A. Model' Processa Upravleniya Sistemoy Tekhnicheskogo Obsluzhivaniya Tekhniki Svyazi I Avtomatizirovannyh Sistem Upravleniya. *Sbornik materialov I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Pod obshchej redakciej S.S. Chernova.* 2017;61-68.
2. Osipov O.YU., Osipov YU.M., Meshcheryakov R.V. Aktivnaya kardannaya peredacha kak element kiberfizicheskoy sistemy. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie.* 2016;59(11):934-938.
3. Chueshev A., Melekhova O., Meshcheryakov R. Cloud Robotic Platform On Basis Of Fog Computing Approach. *Lecture Notes in Computer Science.* 2018;11097(LNAI):34-43.
4. Varlamov A.V. Iskhodnye predposylki k sostavleniyu obobshchennoj matematicheskoy modeli dinamicheskoy sistemy «bunkernoe ustrojstvo s sypuchim materialom – svodoobrazovanie – mekhanizm razrusheniya svodoobrazovaniya». *Vestnik SamGUPS.* 2011;2:79-88.
5. Xiufeng Zhang, Ganqiang Tao, Zhonghua Zhu. Laboratory study of the influence of dip and ore width on gravity flow during longitudinal sublevel caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* March 2018;103:179-185
6. Pauk L.G., Dzhioeva A.K. Metodika opredeleniya pokazatelej vypuska rudy pod obrushennymi porodami. *Vestnik MGTU im. G.I.Nosova.* 2008;2:15-19.
7. Qunlei Zhang, Jinchao Yue, Chuang Liu, Chun Feng, Huamin Li. *Study of automated top-coal caving in extra-thick coal seams using the continuum-discontinuum element method.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Volume. October 2019;122(104033).
8. Ermakova I.A. Izmenenie mekhanizma istecheniya sypuchego materiala iz bunkera pri ispol'zovanii konicheskikh razdelitelej potoka. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2003;3:33-36.
9. Lyashenko A.S. Analiticheskoe opredelenie formy obrazuyushchej konicheskogo bunkera naibol'shej propusknoy sposobnosti sypuchih materialov. *Inzhenernyj vestnik Dona.* 2014;2: 35.
10. Ermakova I.A. *Ustrojstvo dlya vygruzki sypuchih materialov. Reshenie o vydache patenta RF na izobrenie, zayavka №2001126624/13(028321) MPK 7 V65D 88/64, V65G 65/30. Zayavleno 01.10.2001 g.*
11. Varlamov A.V. *Konstrukciya i dinamika mekhanizmov predotvrashcheniya i ustraneniya svodoobrazovaniy v bunkerah hraneniya i vypuska sypuchih materialov: monografya. - Samara: SNC RAN, 2010.*
12. Kulikov V.V. *Vypusk rudy. - M: Nedra, 1980.*
13. Savenkov D.N. *Bunker dlya sypuchih materialov. Reshenie o vydache patenta RF na izobrenie, zayavka №2014153426/12(155871) MPK 7 V65D 88/26, V65D 90/54. Zayavleno 29.12.2014 g.*
14. Dan Li, Lin Wang, Qiang Wang, Guodong Liu, Muhammad Hassan. Simulations of dynamic properties of particles in horizontal rotating ellipsoidal drums. *Applied Mathematical Modelling.* September 2016;40:7708-7723.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мелехина Кристина Андреевна, лаборант-исследователь Ассоциации субъектов инновационной деятельности в горной отрасли Инновационные горные технологии, Москва, Российская Федерация.

Kristina A. Melekhina, Research Assistant Of The Association Of Subjects Of Innovative Activity In The Mining Industry Innovative Mining Technologies, Moscow, Russian Federation.

e-mail: k.melekhina@mail.ru

Ананьев Павел Петрович, кандидат технических наук, Генеральный директор Ассоциации субъектов инновационной деятельности в горной отрасли Инновационные горные технологии, Москва, Российская Федерация

e-mail: cigt@mail.ru

Плотникова Анна Валериевна, заместитель генерального директора Ассоциации субъектов инновационной деятельности в горной отрасли «Инновационные горные технологии», Москва, Российская Федерация

e-mail: cigt@mail.ru

Шестак Сергей Анатольевич, главный специалист технического отдела технического управления АО «Кольская ГМК», Заполярный, Российская Федерация

e-mail: schestaksa@kolagmk.ru

Pavel P. Ananyev, Ph.D, General Director Of The Association Of Subjects Of Innovative Activity In The Mining Industry Innovative Mining Technologies, Moscow, Russian Federation

Anna V. Plotnikova, Deputy General Director Of The Association Of Subjects Of Innovative Activity In The Mining Industry Innovative Mining Technologies, Moscow, Russian Federation

Sergey A. Shestak, Chief Specialist Of The Technical Department Of The Technical Management Of Kola Mining And Metallurgical Company, Zapolyarny, Russian Federation