

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ БАРАБАННЫМ ОКОМКОВАТЕЛЕМ

Исаев Е. А., д.т.н., профессор, профессор кафедры судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, E-mail: ischeis938@mail.ru;

Чернецкая И. Е., д.т.н., профессор, профессор кафедры вычислительной техники Юго-Западного государственного университета (г. Курск, Российская Федерация), E-mail: white731@yandex.ru;

В статье рассмотрен процесс уплотнения сыпучих материалов на основе теории консолидации. Описание динамики уплотнения тонкоизмельченного материала, осуществляемое в фазе «течения» материала и связанное с этим явление формоизменения. Для описания процессов динамики уплотнения гранул использован закон Дарси с учетом переменности коэффициента фильтрации в зависимости от коэффициента пористости образца, а также нелинейной зависимости «напряжение – деформация», возникающей при приложении нагрузки. В результате исследования получено, что в начале процесса гранулообразования, когда гранулообразуемая масса представлена в основном исходной шихтой и определенным процентом зародышей, прирост массы гранул возрастает примерно в 4 раза, а условия воздействия на гранулообразующую среду могут быть увеличены порядка до 100 раз.

Ключевые слова: гранулообразование, полиномиальным методом, автоматическое управление.

Постановка проблемы. Основную нагрузку механического оборудования составляет динамическая нагрузка, связанная с ускорением и замедлением масс механизма в переходных процессах. Установлено, что может наступить автоколебательный режим работы оборудования при различных значениях жесткости механических характеристик электропривода и окомкователя ($\beta < \beta_B$). Это наблюдается при резком изменении производительности или скорости вращения барабана. Например, при увеличении угловой скорости вращения окомкователя, отражающей технологию процесса гранулообразования, объем сыпаемого материала уменьшается, а момент сопротивления вращению барабана M_{c2} , создаваемый массой комкуемого материала, увеличивается. При дальнейшем увеличении центробежные силы возрастают настолько, что объем сыпаемой части материала становится еще меньше объема восходящего потока. Эти специфические особенности, кроме указанного, определяются эффектом взаимодействия частиц при гранулообразовании и ростом размеров гранул. При этом существует тесная связь между угловой скоростью вращения окомкователя и производительностью по исходной шихте. Рассмотрим совокупность системы – барабанный окомкователь и электропривод с позиции двух массовой электромеханической системы, соединенные упругой механической связью.

В связи с тем, что момент сопротивления M_{c2} вносит основной вклад в дестабилизацию процесса формирования гранул, возникла необходимость исследования механической части системы управления барабанным окомкователем, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Характерной особенностью машин и механизмов, подобных приведенной на рис. 1, является наличие упругих механических звеньев в кинематических линиях, в результате чего возникают дополнительные динамические нагрузки привода, и процессы в действительности не соответствуют оптимальным значениям [1].

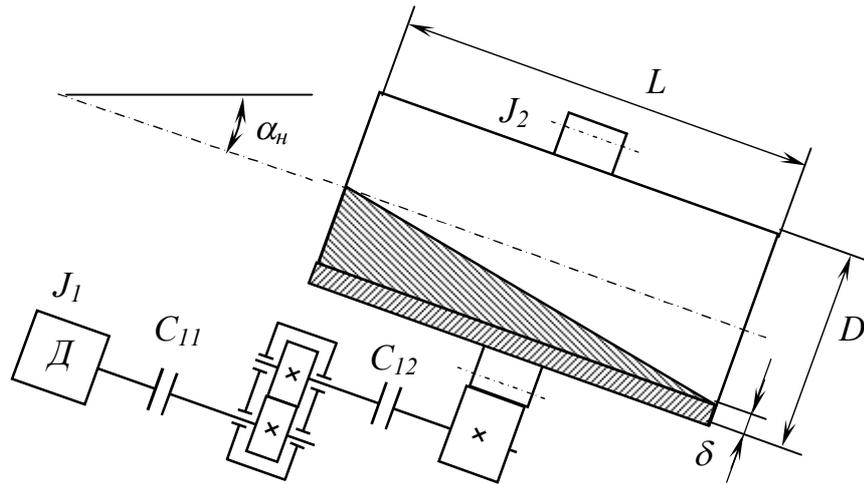


Рисунок 1 – Структурная схема механической части системы управления барабанным окомкователем

Для рис. 1. введены следующие обозначения: $Д$ – двигатель; J_2, J_1 – моменты инерции барабана с комкуемым материалом и двигателя соответственно, причем, $J_2=J_{\delta}+J_{cod}$ (сумма моментов инерции барабана и его содержимого, т.е. комкуемого материала); C_{11}, C_{12} – жесткость вала двигателя и барабанного окомкователя соответственно (жесткость упругих связей); L, D – длина и диаметр барабанного окомкователя соответственно; α_n – угол наклона барабанного окомкователя, относительно горизонта; δ – толщина гарнисажа (материал, налипающий на стенки барабанного окомкователя).

Преобразуем структурную схему рис. 1 в виде операторной схемы, представленной на рис. 2 [2]:

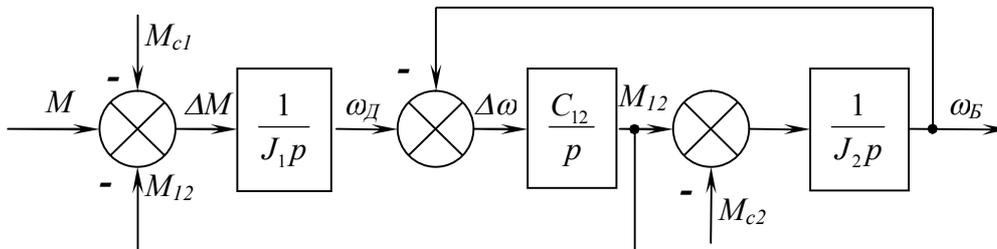


Рисунок 2 – Операторная схема механической части системы управления электроприводом барабанного окомкователя, где M, M_{c1}, M_{12} – электромагнитный момент вращения вала двигателя и моменты нагрузки; M_{c2} – момент сопротивления вращению барабана, создаваемый массой комкуемого материала; C_{12} – жесткость вала согласно рис. 1; ω_D и ω_B – угловая скорость вращения вала двигателя и барабана соответственно

Уравнения движения механической части согласно рис. 2:

$$M - M_{c1} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_D}{dt}; \quad M_{12} - M_{c2} = J_2 \frac{d\omega_B}{dt}; \quad \frac{dM_{12}}{dt} = C_{12}(\omega_D - \omega_B). \quad (1)$$

Расчет момента инерции содержимого производим предварительно выбрав примерные профили заполнения барабана. Предлагается для расчетов использовать следующий закон заполнения барабана:

$$\rho(\varphi, l) = \left(\frac{D}{2} - \delta \right) \left[1 - \frac{\sin \left(\varphi l - \pi \frac{l-1}{2 + \frac{1}{l}} \right)}{\varphi + \frac{l^2}{4}} \right], \quad (2)$$

где φ , l – параметры профиля заполнения барабанного окомкователя материалом.

Момент инерции пустого барабана, согласно рис. 1:

$$J_{\sigma} = \int_0^{\delta} \rho L \pi \left(\frac{D}{2} - \delta + r \right)^3 dr = \frac{\pi \rho L}{4} \left(\frac{D}{2} - \delta + r \right)^4 \Big|_0^{\delta} = \frac{\pi \rho L}{4} \left[\left(\frac{D}{2} \right)^4 - \left(\frac{D}{2} - \delta \right)^4 \right]. \quad (3)$$

Расчет момента инерции содержимого осуществляется по выражению:

$$J_{cod} = \iiint_D \rho^2 dm,$$

где $dm = \gamma_{нас.} \cdot dv$; $dv = \rho \cdot dl \cdot d\rho \cdot d\varphi$; $\gamma_{нас.}$ – насыпной вес материала:

$$J_{cod} = \iiint_D \gamma_{нас.} \cdot \rho^3 dl \cdot d\rho \cdot d\varphi. \quad (4)$$

Раскрывая выражение (4) получим:

$$J_{cod} = \gamma_{нас.} \int_1^{l+1} dl \int_{\pi \frac{l^2+l+1}{2l^2+l}}^{\pi \frac{l-1}{2l+1}} d\varphi \int_{\left(\frac{D}{2} - \delta \right) \left[1 - \frac{\varphi l - \pi \frac{(l-1)}{2 + \frac{1}{l}}}{\varphi + \frac{l^2}{4}} \right]}^{\frac{D}{2} - \delta} \rho^3 \cdot d\rho, \quad (5)$$

где $d\varphi$, dl , $d\rho$ – приращения угла поворота, длины барабана и степени заполнения материалом, соответственно.

Момент сопротивления вращению барабана определяется по выражению:

$$M_{c2} = \iiint_D \rho \sin \left(\varphi - \frac{\pi}{3} \right) g dm = g \iiint_D \gamma_{нас.} \cdot \sin \left(\varphi - \frac{\pi}{3} \right) \cdot \rho^2 dl \cdot d\rho \cdot d\varphi, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения.

Раскрывая приведенный интеграл (6) получим зависимость момента сопротивления вращению барабана M_{c2} , создаваемый массой материала, предназначенного для гранулообразования, от геометрических размеров барабанного окомкователя и параметров комкуемого материала:

$$M_{c2} = g \gamma_{нас.} \int_1^{L+1} dl \int_{\pi \frac{l^2+l+1}{2l^2+l}}^{\pi \frac{l-1}{2l+1}} \sin \left(\varphi - \frac{\pi}{3} \right) d\varphi \int_{\xi_1}^{\frac{D}{2} - \delta} \rho^2 \cdot d\rho, \quad \xi_1 = \left(\frac{D}{2} - \delta \right) \left[1 - \frac{\varphi l - \pi \frac{(l-1)}{2 + \frac{1}{l}}}{\varphi + \frac{l^2}{4}} \right]. \quad (7)$$

Преобразование системы дифференциальных уравнений (1) путем исключения M_{l2} и ω_D относительно ω_B осуществляем по методике [2].

В этом случае передаточная функция системы имеет вид:

$$W_3(p) = \frac{-M_{c2}J_1p^2 + J_1pC_{12} - M_{c2}C_{12}}{[J_1J_2p^3 - M_{c2}J_1p^2 + (J_2 + J_1)pC_{12} - M_{c2}C_{12}]J_1p} \quad (8)$$

Тогда зависимость скорости вращения барабана от момента M определяется выражением:

$$\omega_B = M \frac{-M_{c2}J_1p^2 + J_1pC_{12} - M_{c2}C_{12}}{[J_1J_2p^3 - M_{c2}J_1p^2 + (J_2 + J_1)pC_{12} - M_{c2}C_{12}]J_1p}, \quad (9)$$

или после простых преобразований, выражение, устанавливающее зависимость угловой скорости вращения барабана ω_B от момента двигателя M :

$$\omega_B = \frac{1}{J_1J_2} \left[\frac{J_2J_1(M - M_{c2})}{J_2 + J_1} - \frac{M_{c2}J_1^2 + J_2J_1M}{J_2 + J_1} \cos \left(\sqrt{\frac{(J_2 + J_1)}{J_2J_1}} C_{12} t \right) \right]. \quad (10)$$

Анализируя (10) отметим колебательный характер угловой скорости вращения барабана в функции соотношения моментов M и M_{c2} , и моментов инерции J_1 и J_2 , откуда следует, что ω_B изменяется во времени периодически, а амплитуда колебаний ω_B определяется M и M_{c2} (рис. 3, рис. 4). При незначительной разности M и M_{c2} , т. е. в установившемся режиме, возбуждаются колебания, амплитуда которых лежит в допустимых пределах. Если же разность моментов значительна, то в системе возникают низкочастотные колебания с большой амплитудой, что отрицательно сказывается на работе механизмов и нарушает нормальный ход процесса производства гранул [3]. Исходя из вышесказанного, для стабилизации угловой скорости вращения барабанного окомкователя целесообразна разработка системы автоматического управления гранулообразования [1].

Целью исследования является разработка и описание работы системы автоматического управления барабанным окомкователем.

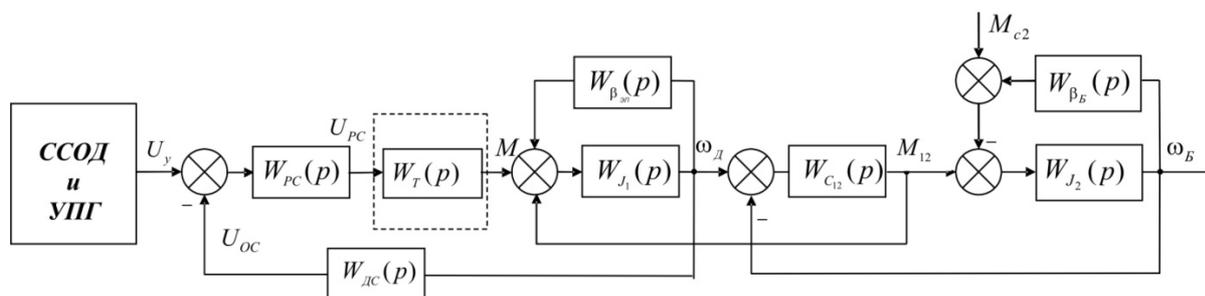


Рисунок 3 – Структурная схема регулирования скорости барабанного окомкователя

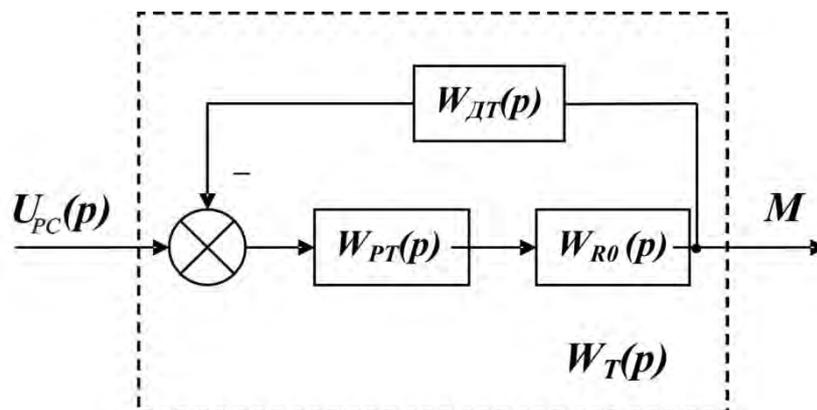


Рисунок 4 – Схема коррекции тока якоря двигателя

Основная часть. Основную нагрузку передач составляет динамическая нагрузка, связанная с ускорением и замедлением масс механизма в переходных процессах. Отметим, что механизм обладает большим приводным моментом инерции $J_2 > J_1$, $\gamma > 1$. Такая особенность работы барабанного окомкователя представлена нелинейной механической характеристикой.

Динамическая неустойчивость в двухмассовых системах с нелинейной механической характеристикой нагрузки рассмотрена, например, в [4].

Был проведен синтез полиномиальным методом передаточной функции регулятора скорости (РС) для двухмассовой системы с управляемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения в зоне оптимальной скорости вращения [5].

Поскольку в регуляторе тока (РТ) используется ПИ-регулятор, то передаточная функция:

$$W_{РТ} = \frac{K_{РТ}}{p} = \frac{K_y \cdot K_{кор}}{p},$$

где R_0 – суммарное сопротивление резисторов в цепи якоря; N – число зон (ступеней); $K_{РТ}$ – коэффициент передачи контура коррекции, представляющий долю проводимости токовой цепи в период коррекции; K_y , $K_{кор}$ – коэффициенты передачи усилителя и корректора, соответственно.

Передаточная функция резисторной цепи и датчика тока:

$$W_{R_0} = \frac{N}{R_0}; \quad W_{ДТ} = K_{ДТ}.$$

С учетом изложенного передаточная функция звена $W_T(p)$:

$$W_T(p) = \frac{K_{РТ} \cdot N}{(T_T p + 1) \cdot R_0} = \frac{\frac{K_{РТ} \cdot N}{p \cdot R_0}}{1 + \frac{K_{РТ} \cdot N \cdot K_{ДТ}}{p \cdot R_0}} = \frac{K_T}{T_T \cdot p + 1}, \quad (11)$$

где $K_{РТ}$ – общий коэффициент передачи регулятора тока; $K_T = K_{РТ} N$;

$T_T = \frac{R_0}{K_{РТ} \cdot N \cdot K_{ДТ}}$ – длительность управляющего импульса системы автоматического регулирования M двигателя в установившемся режиме.

Передаточная функция двухмассового электромеханического объекта, который является объектом для контура регулирования скорости (при $\beta_E < 0$ и $\beta < 0$) определяется:

$$W_{\omega}(p) = \frac{U_{\omega}(p)}{U_p(p)} = \frac{K \cdot \left(\frac{J_1}{C_{12}} p^2 - \frac{|\beta_E|}{C_{12}} + 1 \right)}{(T_T \cdot p + 1) \left(\frac{J_1 J_2}{C_{12} |\beta|} p^3 + \frac{1}{C_{12}} \left(J_2 - J_1 \frac{|\beta_E|}{|\beta|} \right) p^2 + \left(\frac{J_1 + J_2}{|\beta|} - \frac{|\beta_E|}{C_{12}} \right) p + \left(1 - \frac{|\beta_E|}{|\beta|} \right) \right)}, \quad (12)$$

где K – общий коэффициент передачи объекта:

$$K = K_T \cdot K_{ДС} / |\beta|.$$

Используем известные соотношения [6]:

$$\gamma = (J_1 + J_2) / J_1; \Omega_{12}^2 = C_{12} / J_2; T_m = (J_1 + J_2) / |\beta|. \quad (13)$$

Подставив (13) в (12) получим:

$$W_{\omega\omega}(p) = \frac{U_{\omega\omega}(p)}{U_p(p)} = \frac{K \cdot \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} + 1 \right)}{(T_T \cdot p + 1) \left(\frac{T_m}{\Omega_{12}^2} p^3 + \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|(\gamma-1)} \right) p^2 + \left(T_m - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) p + \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|} \right) \right)}. \quad (14)$$

В связи с тем, что при $|\beta| < |\beta_B|$ $W_{\omega\omega}(p)$ относится к группе неминимально-фазовых звеньев [7], поэтому для синтеза РС воспользуемся методом полиномиальных уравнений [8], применение которого позволило для создания статической системы регулирования скорости неустойчивой двухмассовой электромеханической системы в качестве регулятора скорости использовать ПИД-регулятор. Расчеты в системе управления скоростью вращения барабанного окомкователя были смоделированы в среде Matlab Simulink и представлены на рис. 5 и получены результаты ее работы (рис. 6).

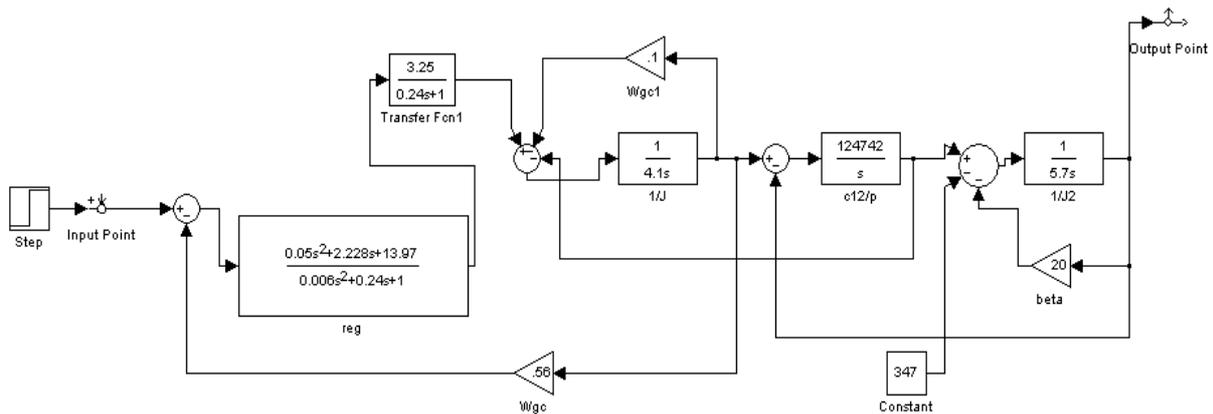


Рисунок 5 – Модель системы управления вращением барабанного окомкователя

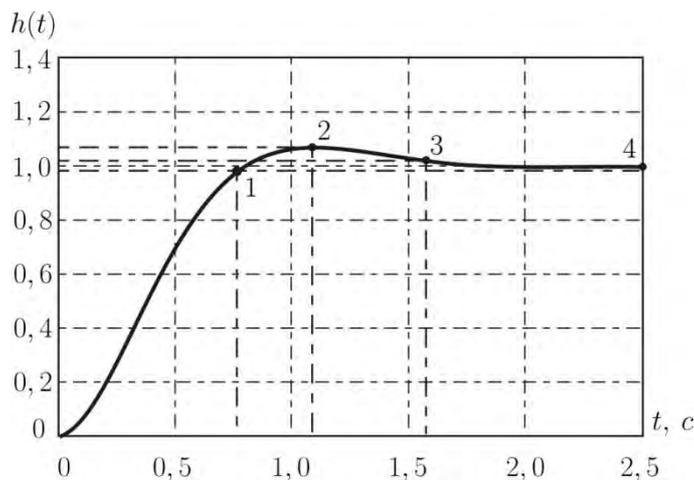


Рисунок 6 – Переходная характеристика процесса с двумя резисторами в цепи якоря двигателя электропривода

Выводы. В результате анализа полученной переходной характеристики, можно утверждать, что система управления барабанным окомкователем имеет незначительное перерегулирование 7%, время регулирования составляет 1,58 с при ошибке 0,3 %, что обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к работе электропривода барабанного окомкователя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернецкая И. Е. Исследование электропривода, включающего барабанный окомкователь как объект управления / И. Е. Чернецкая // Известия ЮЗГУ. Серия УИВТ. – 2011. – № 1. – С. 15–21.
2. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования / Г. Ф. Зайцев. – К. : Вища шк., 1989. – 431 с.
3. Чернецкая И. Е. Работа окомковательного оборудования с позиций электромеханической системы / И. Е. Чернецкая, Е. А. Исаев // Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы : материалы I международной научно-технической конференции («Диагностика – 09»). – Курск : Курск. гос. техн. ун-т, 2009. – С. 158–162.
4. Классен В. П. Основы техники гранулирования / В. П. Классен, И. Г. Гришаев. – М. : Химия, 1982. – 272 с.
5. Клепиков В. Б. Определение границ устойчивости электропривода с отрицательным вязким трением с учетом упругости кинематической цепи / В. Б. Клепиков, А. В. Осичев // Электричество. – 1989. – № 1. – С. 36–41.
6. Ключев В. И. Теория электропривода : учеб. для вузов / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
7. Бессекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. – М. : Наука, 1972. – 760с.
8. Чернецкая И. Е. Оптимизация управления электроприводом при окомковании сыпучих материалов / Е. А. Исаев, И. Е. Чернецкая // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический университет». – Харьков, 2002. – № 12, Том 2. – С. 502–503.

REFERENCES

1. Cherneckaya I. E. (2011). Issledovanie ehlektroprivoda, vklyuchayuthego barabanniy okomkovatelj kak objhekt upravleniya. *Izvestiya YuZGU. Seriya UIVT, 1*, 15–21.
2. Zayjcev G. F. (1989). *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya*. K. : Vitha shk.
3. Cherneckaya I. E., Isaev E. A. (2009). Rabota okomkovateljnogo oborudovaniya s pozicij ehlektromekhanicheskoyj sistemih. *Informacionno-izmeriteljnihe, diagnosticheskie i upravlyayuthie sistemih : materialih I mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoyj konferencii («Diagnostika – 09»)*. Kursk : Kursk. gos. tekhn. un-t, 158–162.
4. Klassen V. P., Grishaev I. G. (1982). *Osnovih tekhniki granulirovaniya*. M. : Khimiya.
5. Klepikov V. B., Osichev A. V. (1989). Opredelenie granic ustojchivosti ehlektroprivoda s otricateljnihm vyazkim treniem s uchetom uprugosti kinemacheskoyj cepi. *Ehlektrichestvo, 1*, 36–41.
6. Klyuchev V. I. (1998). *Teoriya elektroprivoda : ucheb. dlya vuzov* M. : Ehnergoatomizdat.
7. Bessekerskiyj V. A., Popov E. P. (1972). *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya*. M. : Nauka.
8. Isaev E. A., Cherneckaya I. E. (2002). Optimizaciya upravleniya ehlektroprivodom pri okomkovanii sihpuchikh materialov. *Vestnik nacionaljnogo tekhnicheskogo universiteta «Kharjkovskiy politekhnicheskij universitet», 12, Tom 2*. Kharjkov, 502–503.

Ісаєв Є. О., Чернецька І. Є. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БАРАБАННИМ ОКОМКОВАТЕЛЕМ

У статті розглянутий процес ущільнення сипких матеріалів на основі теорії консолідації. Опис динаміки ущільнення тонкоподрібненого матеріалу, який здійснюється у фазі «течії» матеріалу та пов'язане з цим явище зміни форми. Для опису процесів динаміки ущільнення гранул використаний закон Дарсі з урахуванням змінни коефіцієнта фільтрації залежно від коефіцієнта пористості зразка, а також нелінійної залежності «напруга-деформація», що виникає при навантаженні. В результаті дослідження отримано, що на початку процесу гранулоутворення, коли гранулоутворююча маса представлена в основному початковою шихтою і певним відсотком зародків, приріст маси гранул зростає приблизно в 4 рази, а умови дії на гранулоутворююче середовище можуть бути збільшені у порядку до 100 разів.

Ключові слова: гранулоутворення, динаміка ущільнення, динамічне навантаження.

Isaev E. A., Chernetskaya I. E. DYNAMICS OF COMPRESSION OF ELEMENTARY VOLUME OF FRIABLE MATERIAL

In the article the process of compression of friable materials is considered on the basis of theory of consolidation. Description of dynamics of compression of fine-divided material, carried out in the phase of «flow» of material and the phenomenon of формозменення related to it. For description of processes of dynamics of compression of granules the law of Darcy is used taking into account changeability of coefficient of filtration depending on the coefficient of porosity of standard, and also nonlinear dependence «tension-deformation», arising up at an appendix loading. It is got as a result of research, that at the beginning of process of гранулообразования, when гранулообразуемая mass is presented mainly by an initial charge and certain percent of embryos, the increase of mass of granules increases approximately in 4 times, and affecting terms гранулообразующую environment can be megascopic order to 100 times.

Keywords: гранулообразование, dynamics of compression, dynamic loading.

© Ісаєв Є. О., Чернецька І. Є.

Статтю прийнято
до редакції 7.05.2016