

Ханин С.И., д-р техн. наук, проф.,
Старченко Д.Н., канд. техн. наук, доц.,
Мордовская О.С., канд. техн. наук, доц.,
Харин Н.П., инж.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КЛАССИФИЦИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ*

dh@intbel.ru

Конструктивное совершенствование классифицирующих устройств позволяет повысить производительность шаровых мельниц, снизить удельные энергозатраты на процесс помола материала. Актуальной является разработка методики расчета, позволяющей установить величину и направления приложения нагрузок на конструкцию устройства. В статье приводится описание математической модели процесса пространственного движения мелющих тел, их взаимодействия с бронифутеровкой, друг другом в конусообразной и цилиндрической камерах мельницы. Рассматривается, основанная на математической модели, методика расчета нагрузок на классифицирующие устройства от действия мелющих тел. Приведены результаты расчета действующих на цилиндрическое классифицирующее устройство промышленной мельницы нагрузок, напряжений и деформаций в его конструкции, полученные с использованием систем автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: шаровая мельница, классифицирующее устройство, мелющее тело, математическая модель процесса, методика, нагрузка, деформация.

Введение. Шаровые мельницы распространены в различных отраслях промышленности для грубого и тонкого помола различных материалов. Эти мельницы имеют относительную простоту конструкции и эксплуатации. Их универсальность позволяет использование в условиях сухого и мокрого способа измельчения как однокомпонентных, так и многокомпонентных шихт и шламов, обеспечивая достаточно высокую однородность распределения частиц в измельченном продукте по их крупности и составу. Нерациональность процессов движения шароматериальной загрузки, выделения из ее среды кондиционных частиц материала приводит к невысокой эффективности процесса помола, следствием чего является снижение производительности и повышение удельного расхода электроэнергии. Это ограничивает преимущества шаровых мельниц перед аналогичными помольными агрегатами [1–5]. Эволюционное совершенствование шаровых мельниц осуществляется на протяжении всей истории их существования. Одним из направлений их модернизации является изменение конструкций внутримельничных устройств, позволяющих осуществлять процесс выделения из шароматериальной загрузки частиц материала, достигших определенной крупности, и подавать на последующее доизмельчение или направлять в готовый продукт [6]. Это значительно снижает нерациональное переизмельчение мелких

частиц и их демпфирующее воздействие на мелющие тела при разрушении крупных, что повышает эффективность процесса помола.

Внутримельничные устройства при вращении корпуса мельницы испытывают достаточно высокие динамические нагрузки со стороны мелющих тел, меняющиеся как по величине, так и по направлению. В результате взаимодействия с шароматериальной загрузкой происходит их износ, что снижает прочностные параметры. Установление точных значений этих параметров позволяет, с использованием современных программных продуктов, разработать конструкцию устройства с возможностью длительной его эксплуатации при достаточно стабильных технологических характеристиках помольного агрегата.

Решению этой проблемы посвящено достаточно много работ. Рассматриваемые в них методики носят преимущественно индивидуальный характер, предполагают использование достаточно серьезных допущений при определении места, направления и величин приложения действующих на внутримельничные устройства нагрузок.

Так, в работе [7] предлагается методика расчета сил, действующих на элементы цилиндрического классифицирующего устройства, основанная на графоаналитическом методе [8].

$$F_k^i = L \frac{\gamma_{шм} \omega^2}{3g} (\rho_{0_k}^3 - \rho_{1_k}^3) \Delta v_k, \quad (1)$$

где L – длина k -го сектора классифицирующего устройства, м; i – номер сектора контура загрузки ($i = 1, 2, 3$), $\gamma_{шм}$ – объемный вес шароматериальной загрузки, Н/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_{0k} и ρ_{1k} – радиусы, ограничивающие контур мелющей загрузки, м; $\Delta\nu_k$ – угловой сектор, рад.

Автором в основу методики взято движение отдельного мелющего тела, не учитываются его размеры, вращение, проскальзывание по футеровке корпуса мельницы, перемещение в рядом находящиеся слои мелющих тел. Параметры движения рассматриваемого мелющего тела распространяются на другие мелющие тела. Методика разработана для каскадного режима движения мелющей загрузки, хотя для эффективного протекания процесса измельчения материала в устройстве целесообразен смешанный. Приведённые особенности подхода к разработке методики расчета свидетельствуют о том, что ее применение может привести к достаточно серьезным погрешностям вычислений.

Методика. Заслуживает особого интереса дискретно-событийный подход к процессу движения мелющих тел [9–13]. В рамках этого подхода разработана математическая модель, адекватно описывающая протекающие в цилиндрической или конусообразной камере шаровой мельницы процессы пространственного движения мелющих тел, взаимодействия с бронифутеровкой и друг другом. В основу математической модели положено движение отдельно взятого сферического мелющего тела, которое последовательно взаимодействует с другими мелющими телами сферической формы, а также бронифутеровкой камеры и ограничивающих ее перегородок или днищ. Взаимодействия сферических мелющих тел с бронифутеровкой и друг с другом рассматриваются как мгновенные и вызывают изменения скоростей, которые изменяются также мгновенно. Мелющие тела на интервалах времени между соударениями движутся под действием силы тяжести по параболическим траекториям.

Время движения мелющего тела до бронифутерованной конусообразной поверхности камеры определяется из уравнения:

$$\left(\frac{g^2}{4}\right)t^4 - (V_{ix}' + g)t^3 + [V_{ix}'^2 + V_{iy}'^2 - y_i' \cdot g - tg^2\theta_m \cdot V_{iz}'^2] \cdot t^2 + 2 \cdot [x_i' \cdot V_{ix}' + y_i' \cdot V_{iy}' + \left(\frac{D_{1m}}{2} - \frac{r_{si}}{\cos\theta_m} - tg\theta_m \cdot z_i'\right) \cdot tg\theta_m \cdot V_{iz}'] \cdot t + \left[x_i'^2 + y_i'^2 - \left(\frac{D_{1m}}{2} - \frac{r_{si}}{\cos\theta_m} - tg\theta_m \cdot z_i'\right)^2\right] = 0. \quad (2)$$

где x_i', y_i', z_i' и $V_{ix}', V_{iy}', V_{iz}'$ – координаты центра масс мелющего тела в момент начала отсчета времени и проекции скорости на оси координат, соответственно, м; D_{1m} – диаметр конусообразной камеры

у большего основания, м; θ_m – угол между образующей и продольной m -го конуса, рад; r_{si} – радиус i -го мелющего тела, м.

При приравнении угла θ_m к нулю уравнение (2) позволяет определить время движения мелющего тела до бронифутерованной цилиндрической поверхности камеры.

Введем следующие обозначения. I_z – момент инерции корпуса мельницы относительно оси Z (рисунок 1); x_s, y_s – координаты точки взаимодействия; S_x, S_y, S_z – проекции импульса взаимодействия на соответствующие оси; $n_x, n_y, n_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z, b_x, b_y, b_z$ – проекции единичных векторов локальной системы координат (рис. 2); S_n, S_τ, S_b – проекции импульса взаимодействия на соответствующие оси локальной системы координат; f – коэффициент трения скольжения; k – коэффициент восстановления при ударном взаимодействии; для i -го сферического тела: m_i – масса, I_i – момент инерции, V_{in}, V_{it}, V_{ib} и ω_i – проекции скорости центра масс и угловой скорости на соответствующие оси. За локальную принята система координат с началом в точке взаимодействия и направлением осей: n – вдоль нормали взаимодействия, τ – вдоль вектора относительной скорости, b – перпендикулярно осям n и τ . При изменении положения места взаимодействия происходит изменение проекций единичных векторов ($n_x, n_y, n_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z, b_x, b_y, b_z$) локальной системы координат и координат точки взаимодействия (x_s и y_s).

Обозначим индексы параметров следующими цифрами: 0 и 2 – до и после взаимодействия; 1 – в момент, когда сила трения обращается в ноль.

Импульсы взаимодействия мелющего тела с бронифутеровкой камеры мельницы и эффективный коэффициент трения скольжения η определяются следующими выражениями:

$$S_n = \frac{-(1+k)(V_{i0n} - \Omega_0(x_s \cdot n_y - y_s \cdot n_x))}{\frac{1}{m_i} - \frac{(x_s n_y - y_s n_x)^2}{I_z} - \eta \frac{(x_s \tau_y - y_s \tau_x)}{I_z} (x_s \cdot n_y - y_s \cdot n_x)}, \quad (3)$$

$$S_\tau = \eta \cdot S_n, \quad (4)$$

$$\eta = \min \left\{ f, \frac{V_\tau \left[\frac{1}{m_i} - \frac{(x_s n_y - y_s n_x)^2}{I_z} \right] + V_n \left[\frac{(x_s n_y - y_s n_x)}{I_z} (x_s \cdot \tau_y - y_s \cdot \tau_x) \right]}{V_n \left[\frac{7}{2} \cdot \frac{1}{m_i} - \frac{(x_s \tau_y - y_s \tau_x)^2}{I_z} \right] + V_\tau \left[\frac{(x_s \tau_y - y_s \tau_x)}{I_z} (x_s \cdot n_y - y_s \cdot n_x) \right]} \right\}, \quad (5)$$

Где

$$V_\tau = V_{i0\tau} + r_{si} \omega_{i0n} - \Omega_0(\tau_y x_s - \tau_x y_s); V_n = (1+k)(V_{i0n} - \Omega_0(x_s n_y - y_s n_x)) \cdot$$

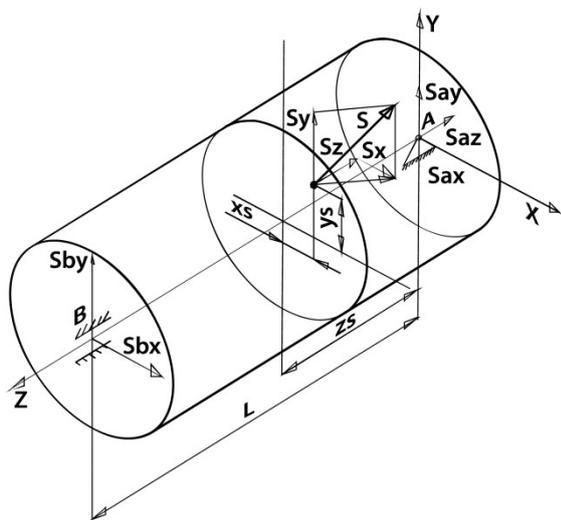


Рис. 1. Бронефутерованная камера в абсолютной системе координат

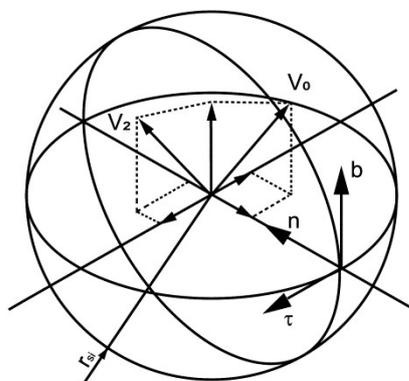


Рис. 2. Мелющее тело в локальной системе координат

Нагрузка от воздействия мелющих тел с силой F на фрагмент поверхности бронефутеровки камеры площадью Q вычисляется как $q' = F / Q$. Касательная F_τ и нормальная F_n составляющие силы F рассчитываются как:

$$F_\tau = \left(\sum_{i=1}^n S_{i\tau} \right) / \Delta t; \quad F_n = \left(\sum_{i=1}^n S_{in} \right) / \Delta t. \quad (6)$$

Здесь Δt – период времени, за которое устанавливается нагрузка; n – количество взаимодействий с мелющими телами за период времени Δt ; $S_{i\tau}$ и S_{in} – касательный и нормальный импульсы i -го взаимодействия.

Бронефутерованные поверхности цилиндрической или конусообразной (рис. 3) камер разделяются на N_l участков в направлении оси вращения Z и на N_α секторов в поперечных сечениях. Определим номер участка на бронефутерованной поверхности конусообразной камеры, взаимодействующего с мелющим телом в точке, имеющей координаты (x_s, y_s, z_s) . Конусообразная ка-

мера характеризуется: углом θ_m наклона образующей, длиной L_m , диаметром D_{1m} у большего основания.

Длина Δl участка (рис. 3), при их количестве N_l , равна:

$$\Delta l = L_m / N_l. \quad (7)$$

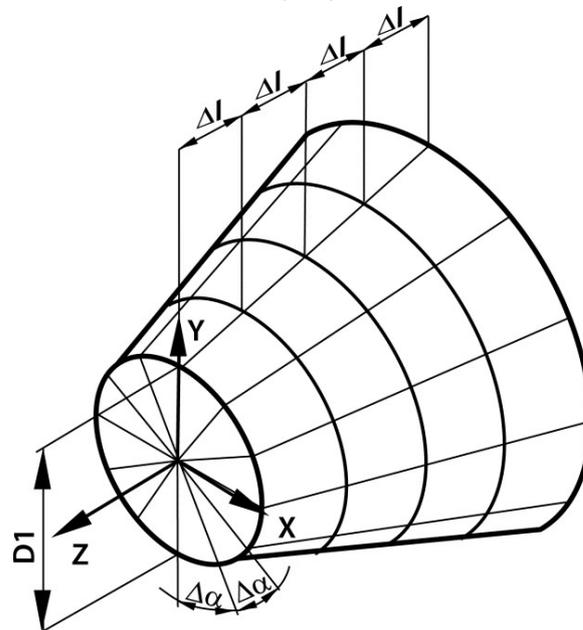


Рис. 3. Схема к разделению конусообразной камеры на участки

Его номер (в направлении оси Z):

$$N_{sl} = z_s / \Delta l. \quad (8)$$

Угол между ограничивающими сектор радиусами:

$$\Delta \alpha = 2\pi / N_\alpha. \quad (9)$$

Номер этого сектора:

$$N_{s\alpha} = \alpha_s / \Delta \alpha. \quad (10)$$

где α_s – угол между радиус-вектором точки взаимодействия и осью OX .

$$\alpha_s = \arctg \frac{y_s}{x_s}. \quad (11)$$

Развёртка выделяемого фрагмента поверхности бронефутеровки камеры представляет форму трапеции. Её высота вычисляется как $h = \Delta l / \cos \theta_m$, а размеры оснований – нижнего H_1 и верхнего H_2 :

$$H_1 = \Delta \alpha \left(\frac{D_{1m}}{2} - N_{sl} \cdot \Delta l \cdot \tg \theta_m \right). \quad (12)$$

$$H_2 = \Delta \alpha \left(\frac{D_{1m}}{2} - (N_{sl} + 1) \cdot \Delta l \cdot \tg \theta_m \right). \quad (13)$$

Площадь выделяемого фрагмента поверхности в форме трапеции:

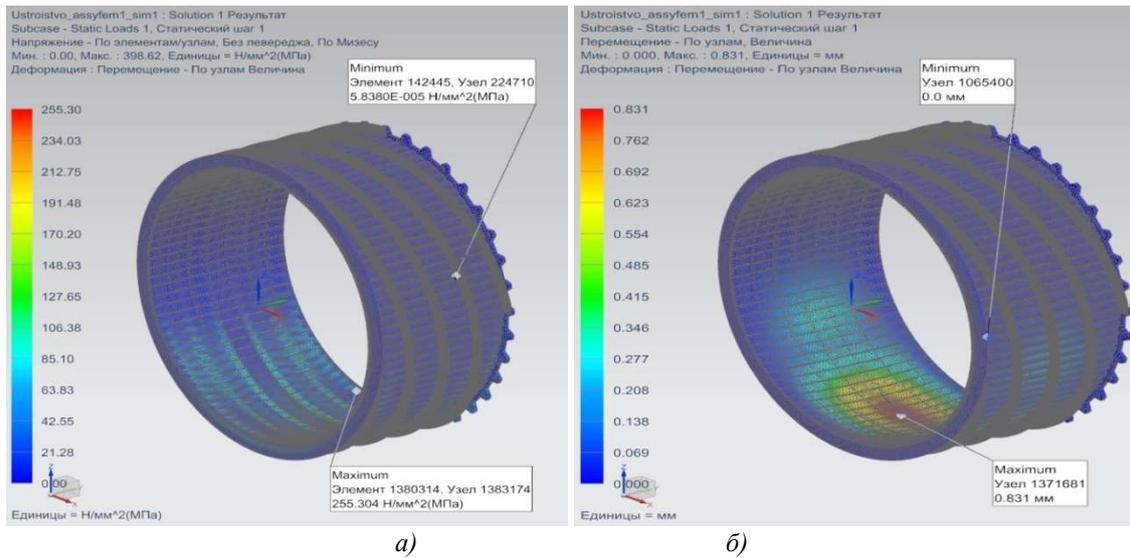


Рис. 4. Распределение напряжений и деформаций в конструкции цилиндрического классифицирующего устройства мельницы $D \times L = 2 \times 10,5$ м: а) напряжения, б) деформации

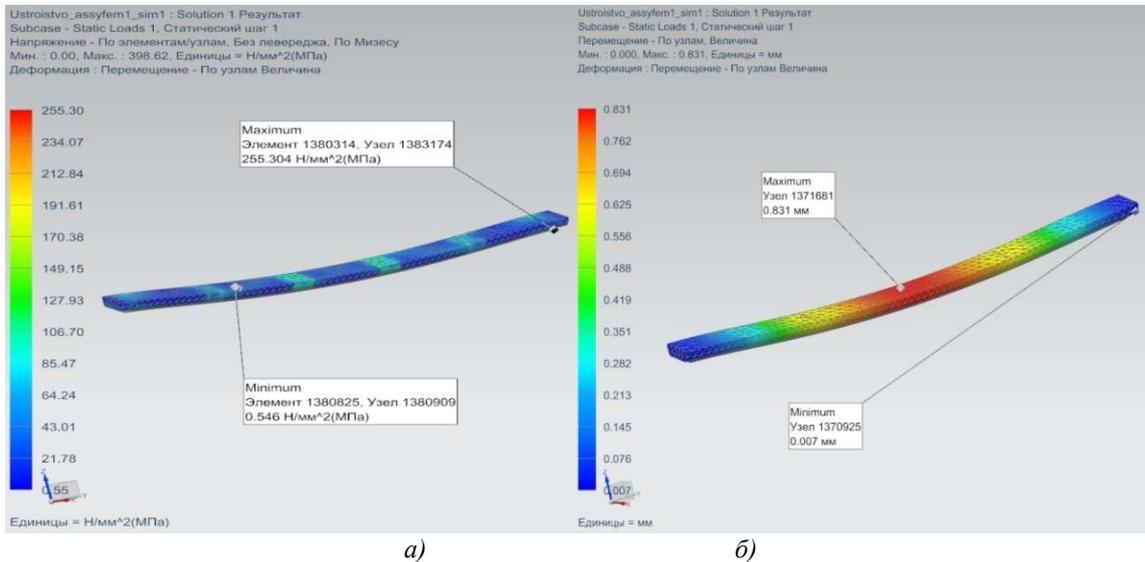


Рис. 5. Распределение напряжений и деформаций в стержне цилиндрического классифицирующего устройства мельницы $D \times L = 2 \times 10,5$ м: а) напряжения, б) деформации

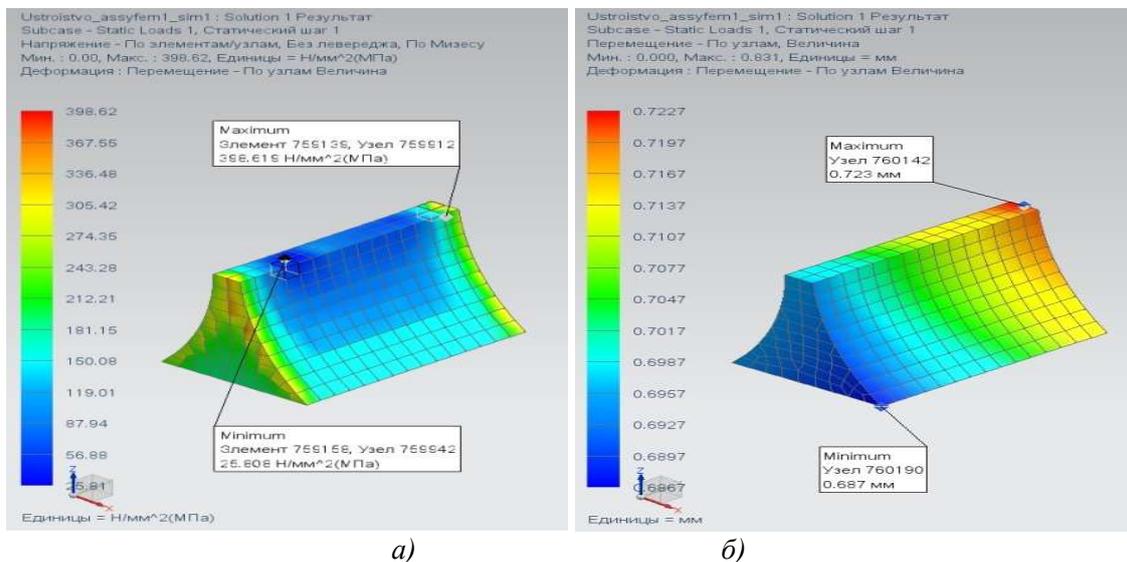


Рис. 6. Распределение напряжений и деформаций в дистанционной вставке цилиндрического классифицирующего устройства мельницы $D \times L = 2 \times 10,5$ м: а) напряжения, б) деформации

В рассматриваемом случае принята сварная конструкция цилиндрического классифицирующего устройства, для чего была принята легко свариваемая низколегированная сталь, позволяющая обеспечить надежное соединение элементов конструкции в условиях повышенных динамических нагрузок. Для увеличения длительности эксплуатации устройства в условиях высокого абразивного износа необходима периодическая наплавка рабочих поверхностей твердым сплавом.

Выводы. Получена математическая модель, описывающая параметры процессов движения мелющего тела в конусообразной и цилиндрической камерах шаровой мельницы, взаимодействия с их бронефутеровкой и друг другом. Использование математической модели позволяет осуществлять компьютерную реализацию рассматриваемых процессов в камерах мельницы для всей мелющей загрузки в совокупности и устанавливать характеризующие их параметры. Разработана методика расчета нагрузок от воздействия мелющих тел на фрагменты поверхности бронефутеровки камер. С использованием разработанного программного обеспечения выполнен расчет нагрузок, действующих на цилиндрическое классифицирующее устройство промышленной шаровой мельницы. В программной среде CAD/CAM/CAE системы Unigraphics NX рассчитаны напряжения и деформации в конструкции устройства.

**Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романович А.А. Энергосберегающие агрегаты для измельчения материалов цементного производства с анизотропной структурой: Автореф. дис. д-ра. техн. наук: Белгород. 2014. 43 с
2. Науменко Ю.В. Основи теорії режимів роботи барабанних млинів. Рівне.: СПД Зелент О.І., 2009. 282 с.
3. Йоргенсен. С.В. Помол цемента. Сравнительный анализ вертикальной валковой и шаровой мельниц // Цемент и его применение. 2006.

Информация об авторах

Ханин Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования.

E-mail: dh@intbel.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Старченко Денис Николаевич, кандидат технических наук, начальник отдела подготовки электронных дидактических средств.

E-mail: crovin@mail.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

№ 6. С. 39–44.

4. Севостьянов В.С. Энергосберегающие помольные агрегаты. Белгород. 2006. 435 с.

5. Хардер Й. Развитие одноэтапных процессов измельчения в цементной промышленности // Цемент. Известь. Гипс. 2006. № 1. С. 24-38.

6. Пат. 2236298 Российская федерация, МПК ВО2С 17/06. Трубная мельница / С.И. Ханин, В.В. Кайдаш, А.В. Чалов, Д.Н. Солодовников, О.С. Ханина; заявитель и патентообладатель Белгор. гос. технолог. акад. строит. материалов. – №2003113249/22; заявл. 05.05.03; опубл. 20.09.04, Бюл. №26. 6 с.

7. Солодовников Д.Н. Цилиндрическое внутримельничное классифицирующее устройство трубной мельницы: дис... канд. техн. наук. Белгород, 2009. 162 с.

8. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц. М.: Машиностроение, 1965. 184с.

9. Brilliantov N.V., Spahn F., Hertzsch Jan-Martin, Thorsten Poschel Model for collisions in granular gases // Physical review E. 1996. Vol. 53. № 5. P. 5382–5392.

10. R. Reichardt and W. Wiechert / Event driven simulation of a high energy ball mill. In Proceedings ASIM 2003, page 249. ASIM 2003.

11. Rosa Ramirez, Thorsten Pöschel, Nikolai V. Brilliantov, Thomas Schwager // Physical review e. 1999. Vol. 60. № 4. P.4464-4472.

12. Schwager T., Poschel T. Coefficient of restitution for viscoelastic spheres: The effect of delayed recovery // Physical review e. 2008. Vol. 78. № 5. P. 1304–1316.

13. Thorsten Pöschel Thomas Schwager // Computational granular dynamics. Models and algorithms. Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2005. P. 322.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012615855. Система расчёта и визуализации параметров движения мелющих тел в корпусе шаровой барабанной мельницы / Старченко Д.Н., Ханин С. И., Трухачев С.С.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; №2012613407, заявлено 27.04.2012; зарегистрировано. 27.06.2012.

15. Ельцов М.Ю., Козлов А.А., Седойкин А.В., Широкова Л.Ю. Проектирование в NX под управлением Teamcenter. 2010. 783 с.

Мордовская Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования.

E-mail: unique.ox@gmail.com.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Харин Никита Петрович, инженер кафедры механического оборудования.

E-mail: bigpandanick@yandex.ru

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в октябре 2017 г.

© Ханин С.И., Старченко Д.Н., Мордовская О.С., Харин Н.П., 2017

Hanin S.I., Starchenko D.N., Mordovskaya O.S., Harin N.P.
**COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM APPLICATION FOR CALCULATION
PARAMETERS OF STRENGTH OF BALL MILL CLASSIFICATION DEVICES**

Constructive improvement of the classification devices allows increasing capacity of ball mills, to reduce the specific energy consumption for the grinding process of the material. Developing methods of calculation that allows you to determine the magnitude and direction of applying loads to the design of the device is actual. The article describes the mathematical model of the process of the spatial motion of grinding media, their interaction with shell liners, and each other in the cone-shaped and cylindrical chambers of the mill. The method of calculating loads on classifying devices from the action of grinding media is considered based on a mathematical model. The results of calculation loads, strains and deformations acting on the cylindrical classifier of the industrial using mill in its design obtained using computer-aided design systems are presented.

Keywords: ball mill, classification device, grinding media, mathematical model of the process, methods, load, deformation.

Information about the authors

Hanin Sergey Ivanovich, PhD, Professor.

E-mail: dh@intbel.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Starchenko Denis Nikolaevich, PhD, Assistant professor.

E-mail: crovin@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Mordovskaya Olga Sergeevna, PhD, Assistant professor.

E-mail: unique.ox@gmail.com.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Harin Nikita Petrovich, Engineer.

E-mail: bigpandanick@yandex.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in October 2017

© Hanin S.I., Starchenko D.N., Mordovskaya O.S., Harin N.P., 2017
