УДК 531.31.15+669

Мороз В. В.,
к.ф.-м.н. Рубежанский В. И.,
к.т.н. Левченко Э. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОЦЕНКА И УТОЧНЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОДАЧИ АГЛОСПЕКА В РАБОЧУЮ ЗОНУ ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ

Приведены результаты аналитических исследований подачи агломерационного пирога в рабочее пространство одновалковой зубчатой дробилки горячего агломерата. Установлена зависимость перемещения агломерационного пирога от времени его сползания по направляющей поверхности срезающего ножа.

Ключевые слова: *аналитические исследования, одновалковая зубчатая дробилка, агломерационный пирог, перемещение, дифференциальные уравнения.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами.

Важнейшим приоритетным направлением повышения эффективности работы одновалковой зубчатой дробилки горячего агломерата и качественного фракционного состава сырья для доменной плавки является усовершенствование механического оборудования агломерационных цехов на базе их типовых конструкций, что позволяет с наименьшими материальными и временными затратами проводить модернизацию в условиях непрерывно действующего металлургического производства.

Согласно методике И.Д. Костогрызова и В.В. Горностаева (Магнитогорский горно-металлургический институт) [1] агломерационный пирог после спекания на агломерационной машине конвейерного типа поступает в одновалковую дробилку под действие зубьев звёздочек ротора с таким условием, что сначала осуществляется его излом пополам по длине, а затем оставшиеся части продавливаются через горизонтально расположенную колосниковую решётку. Однако данная методика не уточняет, на основании чего создаются такие условия в рабочей камере дробилки, так как математическое обоснование этого вопроса выражено недостаточно полно [2].

В работах [3, 4] сделана попытка математического описания процесса подачи аглоспёка под действие рабочих органов дробилки, однако оно требует некоторой проверки и уточнения на основе более чётких представлений о типовом технологическом процессе производства агломерата в реальных условиях.

Постановка задачи. Задачей аналитических исследований является уточнение условий подачи аглоспека в рабочую зону одновалковой зубчатой дробилки на основе составления и решения дифференциальных уравнений движения куска пирога после соскальзывания со спекательной тележки с целью определения величины перемещения внутрь зоны дробления по горизонтальным колосникам.

Изложение материала и его результаты. Расчётная схема движения агломерата после его соскальзывания со спекательной тележки агломерационной машины представлена в виде поверхности O_1OO_2 с изломом (рис. 1).

Характеристики поступательного движения на участке O_1O являются начальными условиями при его переходе в дальнейшем в плоскопараллельное движение.

При движении на первом участке конечную скорость пирога определится как

$$S_0 = \sqrt{2gl_{cn}\left(\sin\alpha - f\cos\alpha\right) + V_0^2}, \quad (1)$$

где V_0 — скорость в начале перемещения, принимаемая равной скорости движения спекательной тележки; $l_{сп}$ — длина сползания пирога; f — коэффициент трения материала аглоспека о поверхность направляющей; g — ускорение свободного падения, обычно принимаемое 9,81 м/с^2.

Пирог спечённого агломерата представляется в виде прямоугольного параллелепипеда, размеры которого в сечении равны: $AB = 2l$, $AE = 2h$.

Обозначим расстояние концов A и B до масс C через L: $\mathrm{AC} = \mathrm{BC} = L = \sqrt{l^2 + h^2}$. Пусть φ — угол плоскости АВ пирога к направляющей, остальные углы очевидны; обозначим угол $\mathrm{CAO} = \alpha + \varphi_0 - \varphi = \beta - \varphi$, где $\beta = \alpha + \varphi_0$.

Положение сечения (ABKE) пирога определяется положением центра масс координаты X_c, Y_c и углом поворота φ. Тогда дифференциальные уравнения плоского движения тела [5] запишутся в виде следующих выражений:

$$m\ddot{X}_C = N_B\left(\sin\alpha - f\cos\alpha\right) - fN_A, \quad (2)$$

$$m\ddot{Y}_C = N_B\left(\cos\alpha - f\sin\alpha\right) - N_A - mg, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} J_C\ddot{\varphi} = {} & N_A L\left[\cos\left(\beta - \varphi\right) - \right. \\ & \left. - f\sin\left(\beta - \varphi\right)\right] - \\ & - N_B L\left[\cos\left(\varphi + \varphi_0\right) + f\sin\left(\varphi + \varphi_0\right)\right], \end{aligned} \quad (4)$$

где N_A, N_B — реакции плоскостей, здесь принято, что $F_{тр}^A = fN_A$, $F_{тр}^B = fN_B$; J_C — момент инерции тела относительно главной центральной оси Z, проходящей через центр масс C.

Тело *(ABKE)* имеет одну степень свободы, следовательно, три уравнения (2)–(4) могут быть сведены к одному уравнению. Примем за независимую переменную перемещение S точки A по колоснику: *OA=S=S(t)*.

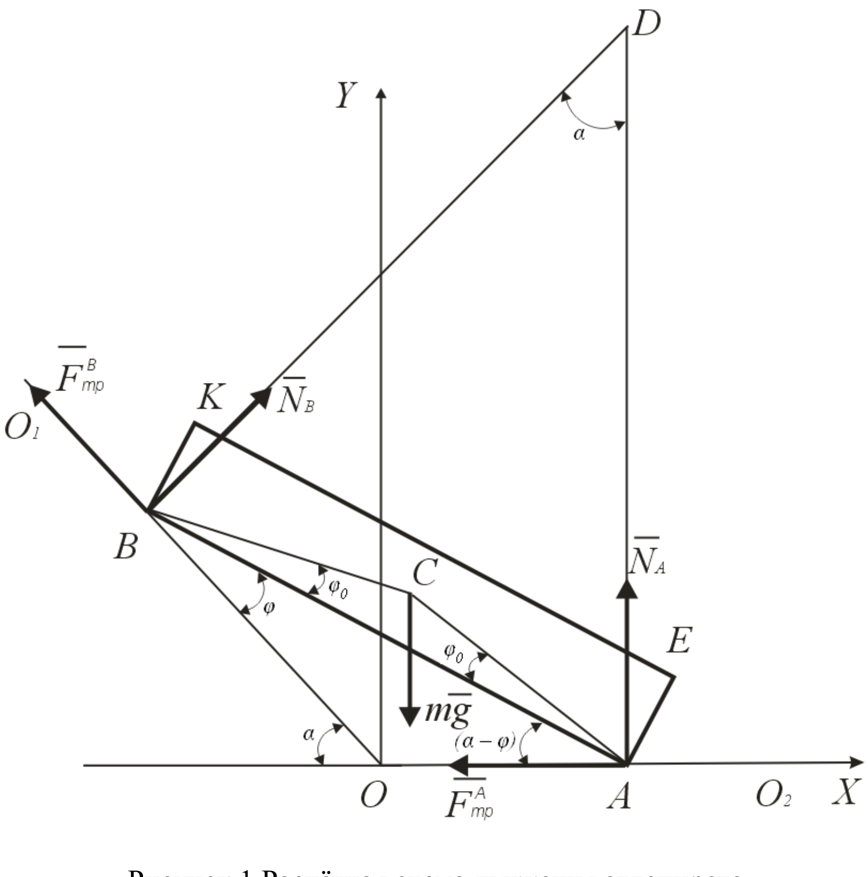

Рисунок 1 Расчётная схема движения аглопирога

Выражая координаты X_C, Y_C центра масс через угол φ, имеем:

$$X_C = S - L\cos(\beta - \varphi),$$

$$Y_C = S - L\sin(\beta - \varphi).$$

Найдём проекции ускорения центра масс на оси X, Y:

$$\ddot{X}_C = \ddot{S} - L\ddot{\varphi}\sin(\beta-\varphi) + L\dot{\varphi}^2\cos(\beta-\varphi), \quad (5)$$

$$\ddot{Y}_C = -L\ddot{\varphi}\cos(\beta-\varphi) - L\dot{\varphi}^2\sin(\beta-\varphi). \quad (6)$$

Определим угловую скорость поворота тела *(АВКЕ)* как функцию от скорости перемещения точки А, а именно

$$\omega = \dot{\varphi} = \frac{V_A}{AD}, \quad (7)$$

где точка D является мгновенным центром скоростей.

Используя теорему синусов, найдём $AD = \dfrac{2l\cos\varphi}{\sin\varphi}$, и дифференцирование по времени выражения (7) даёт

$$\ddot{\varphi} = \frac{\sin\alpha}{2l}\left[\frac{\ddot{S}}{\cos\varphi} + \frac{\dot{S}\dot{\varphi}\sin\varphi}{\cos^2\varphi}\right], \quad (8)$$

в котором

$$\sin\varphi = \frac{\sin\alpha}{2l}\cdot S,\ \ \cos\varphi = \sqrt{1 - \frac{\sin^2\alpha}{4l^2}\cdot S^2}, \quad (9)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\sin\alpha}{2l}\sqrt{1 - \frac{\sin^2\alpha}{4l^2}\cdot S^2}.$$

Подставляя $\dot{\varphi}$, sinφ, cosφ, записанные выше, в выражение (8), определим зависимость углового ускорения как второй производной от угла поворота $\ddot{\varphi}$ от независимой координаты S и её производных.

Для формирования окончательного уравнения движения заменим выражения реакций N_A и N_B в выражении (4), определяемые из уравнений (2) и (3). Представим данное выражение его с учётом математических соотношений зависимостей (5), (6), (8) в виде

$$\begin{gathered}\frac{H^2}{BL}\ddot{\varphi} = \left[A_1\left(\ddot{Y}_C + g\right) - A_2\ddot{X}_C\right]\times \\ \times\left[\cos(\beta-\varphi) - f\sin(\beta-\varphi)\right] - \\ -\left[f\cdot g + \ddot{X}_C + f\ddot{Y}_C\right]\times \\ \times\left[\cos(\varphi+\varphi_0) + f\cdot\sin(\varphi+\varphi_0)\right],\end{gathered} \quad (10)$$

где момент инерции J_C [2] равен

$$J_C = m\frac{(2l)^2 + [2h]^2}{12} = mH^2,$$

где

$$H^2 = m\frac{(2l)^2 + [2h]^2}{12},$$

$$B = \frac{1}{\left(1+f^2\right)\cdot\sin\alpha},$$

$$A_1 = \sin\alpha - f\cos\alpha,$$

$$A_2 = \cos\alpha + f\sin\alpha.$$

С математической точки зрения уравнение движения аглоспека в принятой постановке задачи является нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка относительно перемещения S. Причём нелинейность относится к разряду сильных нелинейностей, и, следовательно, его решение в квадратурах невозможно.

Для решения уравнения (10) проведём его линеаризацию. Такая линеаризация обеспечивается конструктивными особенностями серийно выпускаемых одновалковых зубчатых дробилок.

Считаем угол φ малой величиной, т. е. полагаем $\varphi = \delta\cdot f_1(t)$, $\dot{\varphi} = \delta\cdot f_2(t)$, где δ — малая величина, а $f_1(t)$, $f_2(t)$ — некоторые функции от времени, ограниченные вместе с их производными. Принимая $\sin\varphi=\varphi$ $\cos\varphi=1$ и отбрасывая в уравнении (10) величины, имеющие порядок δ^2 и выше, получим окончательное уравнение движения пирога

$$a\ddot{S}-C\cdot S=d, \qquad (11)$$

где

$$a=\frac{H^2}{BL}\cdot\frac{\sin\alpha}{2l}+\left(b_2\cdot d_1-a_2\cdot C_1\right),$$

$$C=\frac{\sin\alpha}{2l}+\left(a_1\cdot C_2-b_1\cdot d_2\right), \qquad (12)$$

$$d=a_1\cdot C_1-b_1\cdot d_1;$$

$$a_1=A_1\cdot g,$$

$$a_2=-A_1L\frac{\cos\beta\cdot\sin\alpha}{2l}- \qquad (13)$$

$$-A_2\left(1-\frac{L\sin\beta\cdot\sin\alpha}{2l}\right),$$

$$b_1=f\cdot g,$$

$$b_2=\left(1-\frac{L\sin\beta\cdot\sin\alpha}{2l}\right)-f\cdot L\frac{\cos\beta\cdot\sin\alpha}{2l};$$

$$\begin{aligned}C_1&=\cos\beta-f\cdot\sin\beta,\\C_2&=\sin\beta-f\cdot\cos\beta,\\d_1&=\cos\varphi_0-f\cdot\sin\varphi_0,\\d_2&=\sin\varphi_0-f\cdot\cos\varphi_0.\end{aligned} \qquad (14)$$

Учитывая сложный вид коэффициентов *a* и *c* в выражениях (12)–(14), оценку их значений (положительные или отрицательные) в общем виде зависимостей от α, φ_0, l, f провести невозможно.

Рассмотрим решение, соответствующее варианту рассматриваемой задачи с характеристиками практически используемых одновалковых зубчатых дробилок в аглоемрационном цеху филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис».

Общее решение уравнения (11) имеет вид

$$S=C_1\cdot e^{\lambda t}+C_2\cdot e^{-\lambda t}-\frac{d}{C}.$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 определяются при выполнении начальных условий: при $t=0$ правый торец тела *(ABKE)* находится в начале координат, т. е. $S=0$ и имеет скорость V_{AO}, зависящую от скорости движения V_1 по наклонной направляющей O_1O.

Проблема определения V_{AO} представлена ниже.

Выполнение начальных условий ($t=0$, $S=0$, $\dot{S}=V_{AO}$) даёт закон движения конца аглоспёка в виде

$$S=\frac{1}{2}\left(\frac{d}{c}+\frac{V_{AO}}{\lambda}\right)\cdot e^{\lambda t}+ +\frac{1}{2}\left(\frac{d}{c}-\frac{V_{AO}}{\lambda}\right)\cdot e^{-\lambda t}-\frac{d}{c}. \qquad (15)$$

Для определения начальной скорости в уравнении (15) будем считать, что на этапе перехода поступательного движения пирога агломерата на участке O_1A к плоскопараллельному в дальнейшем не происходит потеря [2] кинетической энергии, т. е.

$$\frac{mV_1^2}{2}=\frac{mV_C^2}{2}+\frac{J_C\omega_1^2}{2}. \qquad (16)$$

Из (16) следует, что в момент отрыва пирога от направляющей плоскости O_1A скорость $V_C\neq V_1$ и, естественно, $V_{AO}\neq V_1$.

Уравнение (16) позволяет определить начальную скорость V_{AO} для уравнения (15)

$$V_{AO}=\frac{2l}{\sin\alpha}\cdot\frac{V_1}{\sqrt{DC^2+H^2}}, \qquad (17)$$

где в момент отрыва расстояние $(DC)^2$ определяется по теореме косинусов:

$$(DC)^2=(BD)^2+(BC)^2- -2\cdot BD\cdot BC\cdot\cos\left(90^\circ-\varphi_0\right), \qquad (18)$$

где $BC=\alpha$, $BD=2l\cdot\mathrm{ctg}\alpha$.

При численных параметрах, удовлетворяющих условиям производства агломерата $\alpha=45^\circ$, $f=0{,}5$, $l_{cn}=2$ м, $V_0=0{,}0234$ м/с, $2l=1$ м, $2h=0{,}32$ м, дифференциальное уравнение движения аглоспека примет вид

$$0{,}766\ddot{S}-2{,}146\cdot S=-5{,}373.$$

Решение данного уравнения при принятых начальных условиях будет выглядеть таким образом:

$$S = 0,289 \cdot e^{1,674t} - \\ -2,789 \cdot e^{-1,674t} + 2,503. \qquad (19)$$

График зависимости перемещения правого конца агломерата при подаче на колосниковую решётку внутрь рабочей зоны одновалковой зубчатой дробилки представлен на рисунке 2.

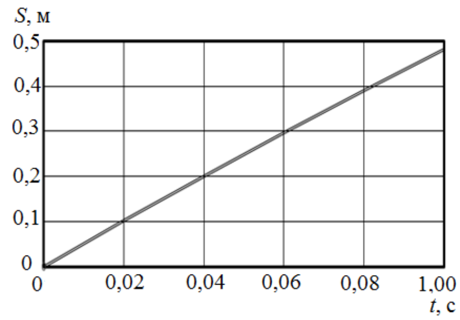

Рисунок 2 Зависимость перемещения пирога аглоспека

Таким образом, в результате аналитических исследований установлено, что величина перемещения агломерационного пирога внутрь рабочей камеры дробилки носит линейный характер.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Количественные результаты решения (19) подтверждают принятую линеаризацию дифференциального уравнения (10). При этом теоретически подтверждается возможность проникновения аглопирога на половину своей длины (0,5 м) за время, примерно равное 1 с, под действие зубьев звёздочек ротора.

Полученные решения позволяют прогнозировать вариации геометрических и кинематических характеристик агломерационной машины при подаче аглоспека в рабочую камеру дробилки.

Найденные решения являются необходимыми при согласовании процесса подачи агломерационного пирога на дробление и его контактирования с зубьями звёздочек ротора.

Библиографический список

1. *Жилкин, В. П. Производство агломерата, оборудование, автоматизация [Текст] / В. П. Жилкин, Д. Н. Доронин. — Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2004. — 292 с.*

2. *Мороз, В. В. Параметрический анализ одновалковой зубчатой дробилки [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко, О. А. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2016. — Вып. 46. — С. 161–168.*

3. *Левченко, О. О. Повышение эффективности дробления агломерата путём усовершенствования конструктивных параметров одновалковой зубчатой дробилки [Текст] : дис. … канд. техн. наук : 05.05.08 / Левченко Оксана Александровна. — Донецк, 2009. — 176 с.*

4. *Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата [Текст] : монография / О. А. Левченко и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 190 с.*

5. *Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики [Текст] / С. М. Тарг. — М. : Наука, 1972. — 478 с.*

6. *Фаворин, М. В. Моменты инерции тел [Текст] / М. В. Фаворин. — М. : Машиностроение, 1970. — 312 с.*

7. *Батуев, Г. С. Инженерные методы исследований ударных процессов [Текст] / Г. С. Батуев, Ю. В. Голубков, А. К. Ефремов и др. — М. : Машиностроение, 1977. — 240 с.*

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н., д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.

Статья поступила в редакцию 12.03.18.

Мороз В. В., к.ф.-м.н. Рубежанський В. І., к.т.н. Левченко Е. П. (*ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР*)

ОЦІНКА ТА УТОЧНЕННЯ УМОВ ПОДАННЯ АГЛОСПЕКУ У РОБОЧУ ЗОНУ ОДНОВАЛКОВОЇ ЗУБЧАСТОЇ ДРОБАРКИ

Наведено результати аналітичних досліджень подання агломераційного пирога у робочий простір одновалкової зубчастої дробарки гарячого агломерату. Встановлено залежність переміщення аглоспеку від часу його сповзання по напрямній поверхні ножа, що зрізає.

Ключові слова: *аналітичні дослідження, одновалкова зубчаста дробарка, агломераційний пиріг, переміщення, диференційні рівняння.*

Moroz V. V., PhD in Physics and Math Sciences Rubezhanskiy V. I., PhD Levchenko E. P. *(DonSTU, Alchevsk, LPR)*

ASSESSMENT AND REFINEMENT OF CONDITIONS FOR FEEDING THE SINTER CAKE INTO WORKING ZONE OF THE SINGLE-SPINDLE GEAR CRUSHER

There have been given the analytical research results for feeding the agglomerated cake to working area of the single-spindle gear hot agglomerate crusher. The dependence has been determined for agglomerated cake moving from its sliding time along the guide surface of share blade.

Key words: *analytical research, single-spindle gear crusher, agglomerated cake, moving, differential equations.*