УДК 651.73.06

Рей А. Р.

ПОВЫШЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В УЗЛЕ ГИДРОСВЯЗИ БАБ БЕСШАБОТНОГО МОЛОТА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ ПЛУНЖЕРОВ ПОСЛЕ УДАРА

Бесшаботные молоты являются самым мощным кузнечным оборудованием по производству штампованных поковок. На бесшаботных молотах производят поковки массой до 3000 кг. Долгое время бесшаботные молота приводились в движение паровым или пневматическим приводом [1], в последнее время пневматический привод вытесняется гидравлическим [2], [3], как более экономичным, позволяющим упростить конфигурацию нижней бабы приблизив её к конфигурации нижней бабы, что обеспечивает значительное повышение её долговечности. Общим для всех бесшаботных молотов является узел гидросвязи хода верхней и нижней бабы. Привод осуществляется приложение силы к одной из баб, передача движения которой осуществляется через упругую связь, включающую верхние амортизаторы, жидкость, размещенную в гидробаке, и амортизатор нижней бабы. После соударения бабы остановятся, их центр масс неподвижен. В это же время боковые и нижний плунжер имели скорости равные скоростям баб перед ударом. В соответствии с законом сохранения энергии кинетическая энергия плунжеров должна превратиться в потенциальную энергию деформации упругих связей, включающую верхний и нижний амортизаторы и жесткость жидкости в гидробаке узла гидросвязи. В технической литературе нет информации о процессах, происходящих в момент торможения плунжеров после удара.

Целью работы является разработка метода и определение повышения давления жидкости в гидробаке при торможении плунжеров после удара бесшаботного гидравлического молота.

После прямого холостого хода, который заканчивается ударом, бабы останавливаются вследствие равенства количеств движения верхней и нижней бабы, но плунжеры вследствие инерции продолжат своё движение в первоначальном направлении со скоростями равными скоростям баб к моменту удара. Физическая модель рис. 1 представляет собой двумассовую систему, соединенную посредством трех жесткостей (жесткости верхних амортизаторов, жесткости нижнего амортизатора и центральной – жесткости жидкости гидробака).

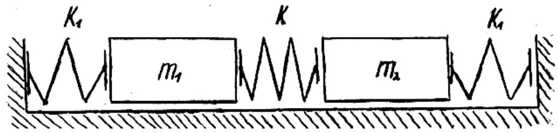

Рис. 1. Физическая модель движения плунжеров бесшаботного гидравлического молота до прохождения верхним плунжером положения статической деформации верхнего амортизатора

Запишем уравнение движения данной системы:

$$\begin{cases} X_1'' + \dfrac{k_1}{m_1}\cdot X_1 + \dfrac{k}{m_1}\cdot\left(X_1 - X_2\right) = 0; \\ X_2'' + \dfrac{k_1}{m_2}\cdot X_2 - \dfrac{k}{m_2}\cdot\left(X_1 - X_2\right) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где k_1 – жесткости амортизаторов верхней и нижней быбы соответственно;

k – жесткость жидкости в гидробаке;

m_1, m_2 – массы верхней и нижней быбы соответственно.

Согласно [4] решение примет вид:

$$\begin{cases} X_1 = A_{11}\cdot\sin(\omega_1\cdot t+\varphi_1)+A_{12}\cdot\sin(\omega_2\cdot t+\varphi_2)); \\ X_2 = \mu_1 A_{11}\cdot\sin(\omega_1\cdot t+\varphi_1)+\mu_2 A_{12}\cdot\sin(\omega_2\cdot t+\varphi_2)), \end{cases} \tag{2}$$

где $\mu_1 = \dfrac{k_1}{k+k_1-m_2\cdot\omega_1^2}$; $\mu_2 = \dfrac{k}{k+k_1-m_2\cdot\omega_2^2}$;

$$\omega^2{}_{1,2} = \frac{1}{2}\left(\frac{k_1+k}{m_1}+\frac{k_1+k}{m_2}\mp\sqrt{\left(\frac{k_1+k}{m_1}+\frac{k_1+k}{m_2}\right)^2-4\cdot\frac{k_1^2+2\cdot k_1\cdot k}{m_1\cdot m_2}}\right),$$

а A_{11}, A_{12}, φ_1, φ_2 – определяются из начальных условий.

Решение системы (1) было выполнено авторами [4] в общем виде, выполним его для молота с заданными параметрами.

$$k_1 = k_2 = 2{,}2\cdot10^8\ \frac{\text{Н}}{\text{м}},\quad k = 1{,}2\cdot10^8\ \frac{\text{Н}}{\text{м}},\quad m_1 = 6\cdot10^3\ \text{кг},\quad m_2 = 7\cdot10^3\text{кг}.$$

Подставив начальные условия в выражения для μ_1, μ_2 и $\omega_{1,2}$, получим их значения:

$$\omega_1 = 183\,c^{-1}, \omega_2 = 268\,c^{-1}, \mu_1 = 2{,}11, \mu_2 = -0{,}74 .$$

В начальный момент скорости плунжеров равны между собой и составляют v = 3 м/с, а начальное перемещение равно 0. Подставив эти начальные условия, а так же значения μ_1, μ_2 и $\omega_{1,2}$ в (2), найдем коэффициенты A_{11} и A_{12} из системы уравнений:

$$\begin{cases} A_{11}\cdot\sin(\varphi_1)+A_{12}\cdot\sin(\varphi_2)) = 0; \\ \mu_1 A_{11}\cdot\sin(\varphi_1)+\mu_2 A_{12}\cdot\sin(\varphi_2)) = 0; \\ \omega_1 A_{11}\cdot\cos(\varphi_1)+\omega_2 A_{12}\cdot\cos(\varphi_2)) = v; \\ \mu_1\omega_1 A_{11}\cdot\cos(\varphi_1)+\mu_2\omega_2 A_{12}\cdot\cos(\varphi_2)) = v, \end{cases} \tag{3}$$

так как $\mu_1 \ne \mu_2$, то можно сделать вывод, что $\sin(\varphi_1) = \sin(\varphi_2) = 0$, учитывая это условие, система уравнений (3) примет вид:

$$\begin{cases} \omega_1 A_{11} + \omega_2 A_{12} = v; \\ \mu_1\omega_1 A_{11} + \mu_2\omega_2 A_{12} = v. \end{cases} \tag{4}$$

Решим систему (4), используя правило Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \omega_1 & \omega_2 \\ \mu_1\omega_1 & \mu_2\omega_2 \end{vmatrix} = \omega_1\omega_2(\mu_2-\mu_1);$$

$$\Delta A_{11} = \begin{vmatrix} v & \omega_2 \\ v & \mu_2\omega_2 \end{vmatrix} = v\omega_2(\mu_2-1);$$

$$\Delta A_{12} = \begin{vmatrix} \omega_1 & v \\ \mu_1\omega_1 & v \end{vmatrix} = v\omega_1(1-\mu_1);$$

$$A_{11} = \frac{\Delta A_{11}}{\Delta} = \frac{v(\mu_2-1)}{\omega_1(\mu_2-\mu_1)},\ A_{12} = \frac{\Delta A_{12}}{\Delta} = \frac{v(1-\mu_1)}{\omega_2(\mu_2-\mu_1)}.$$

Уравнения перемещения и скоростей примут вид:

$$\begin{cases} X_1 = \dfrac{\nu(\mu_2-1)}{\omega_1(\mu_2-\mu_1)}\cdot\sin(\omega_1\cdot t)+\dfrac{\nu(1-\mu_1)}{\omega_1(\mu_2-\mu_1)}\cdot\sin(\omega_2\cdot t)); \\ X_2 = \mu_1\dfrac{\nu(\mu_2-1)}{\omega_1(\mu_2-\mu_1)}\cdot\sin(\omega_1\cdot t)+\mu_2\dfrac{\nu(1-\mu_1)}{\omega_1(\mu_2-\mu_1)}\cdot\sin(\omega_2\cdot t)); \\ X'_1 = \dfrac{\nu(\mu_2-1)}{(\mu_2-\mu_1)}\cdot\cos(\omega_1\cdot t)+\dfrac{\nu(1-\mu_1)}{(\mu_2-\mu_1)}\cdot\cos(\omega_2\cdot t)); \\ X'_2 = \mu_1\dfrac{\nu(\mu_2-1)}{(\mu_2-\mu_1)}\cdot\cos(\omega_1\cdot t)+\mu_2\dfrac{\nu(1-\mu_1)}{(\mu_2-\mu_1)}\cdot\cos(\omega_2\cdot t)). \end{cases} \quad (5)$$

Жесткость амортизаторов верхней бабы будет действовать на систему пока значение перемещения X_1 не достигнет значения статической деформации амортизатора верхней бабы:

$$\delta = \frac{m_1\cdot g}{k_1} = \frac{1{,}80\cdot 10^5\cdot 9{,}8}{2{,}2\cdot 10^8} = 0{,}8\ (\text{см}). \quad (6)$$

Физическая модель системы после прохождения плунжером верхней бабы положения статической деформации верхнего амортизатора представлена на рис. 2.

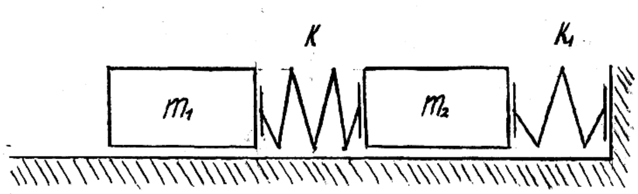

Рис. 2. Физическая модель системы после прохождения положения статической деформации верхнего амортизатора плунжером верхней бабы

Исходя из того, что $X_1 = \delta$, из системы (4) получим $X_2 = 0{,}89$ (см), $X_1^{'} = 2{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $X_2^{'} = 2{,}59\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Уравнения движения будет иметь вид:

$$\begin{cases} X_1^{''} + \dfrac{k}{m_1}\cdot\left(X_1 - X_2\right) = 0; \\ X_2^{''} + \dfrac{k_2}{m_2}\cdot X_2 - \dfrac{k}{m_2}\cdot\left(X_1 - X_2\right) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Решив систему уравнений (4) аналогично уравнению (1) при следующих начальных условиях: $X_{10} = 0{,}8\,(\text{см})$, $X_{20} = 0{,}89\,(\text{см})$, $X_{10}^{'} = 2{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $X_{20}^{'} = 2{,}59\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$, получим следующие уравнения движения системы:

$$\begin{cases} X_1 = 0{,}2\cdot 10^{-3}\cdot\sin(5{,}7\cdot 10^2\cdot t) + 0{,}4\cdot 10^{-3}\cdot\cos(5{,}7\cdot 10^2\cdot t) + \\ + 22\cdot 10^{-3}\cdot\sin(1{,}08\cdot 10^2\cdot t) + 8{,}4\cdot 10^{-3}\cdot\cos(1{,}08\cdot 10^2\cdot t); \\ X_2 = -1{,}6\cdot 10^{-3}\cdot\sin(5{,}7\cdot 10^2\cdot t) - 3{,}2\cdot 10^{-3}\cdot\cos(5{,}7\cdot 10^2\cdot t) + \\ + 15{,}4\cdot 10^{-3}\cdot\sin(1{,}08\cdot 10^2\cdot t) + 5{,}9\cdot 10^{-3}\cdot\cos(1{,}08\cdot 10^2\cdot t). \end{cases} \quad (8)$$

Разность перемещения X_1 и X_2 будет определяться как:

$$X_1 - X_2 = 1{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(5{,}7 \cdot 10^2 \cdot t) + 3{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(5{,}7 \cdot 10^2 \cdot t) + \\ + 6{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(1{,}08 \cdot 10^2 \cdot t) + 2{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(1{,}08 \cdot 10^2 \cdot t). \quad (9)$$

Преобразовав (9) используя формулу для синуса суммы, получим:

$$X_1 - X_2 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(5{,}7 \cdot 10^2 \cdot t + \varphi_1) + 7 \cdot 10^{-3} \cdot sin(1{,}08 \cdot 10^2 \cdot t + \varphi_2), \quad (10)$$

где $\varphi_1 = arctg(2)$, $\varphi_2 = arctg(0{,}38)$.

Это выражение представляет собой сумму двух колебаний с амплитудами $A_1 = 4 \cdot 10^{-3}$м, $A_2 = 7 \cdot 10^{-3}$м, так как период первого колебания значительно больше второго (в 5 раз), то максимальная амплитуда этих колебаний будет близка сумме A_1 и A_2:

$$A = A_1 + A_2 = 11 \cdot 10^{-3} \text{м}.$$

Максимальная величина деформации приведенной жесткости в гидробаке достигает значения $11 \cdot 10^{-3}$ì , что соответствует силе $P = k \cdot A = 13{,}2 \cdot 10^5$Н. Определим значение повышения давления в гидробаке для молота с массой баб *m* = 180 т и статическим давлением жидкости в гидробаке p_{cm} = 8 МПа.

Повышение давления в гидробаке составит $\Delta p = \dfrac{P}{f}$, где $f = \dfrac{m \cdot g}{p_{cm}}$, после подстановки получим:

$$\Delta p = \frac{13{,}2 \cdot 10^5}{0{,}21} = 62{,}8 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Снижения скачка давления после удара происходит при уменьшении массы плунжера верхней бабы и при увеличении жесткости верхнего амортизатора. Уменьшение массы плунжера можно добиться при полом их исполнении и при использовании титановых сплавов, такой метод позволил бы существенно сократить повышение давления в гидробаке после удара.

ВЫВОДЫ

Составлены физическая и математическая модели уравнения движения плунжеров верхней и нижней баб. Получены зависимости для определения значения повышения давления в гидробаке. Предложены рекомендации по снижению скачка давления после удара.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Живов Л. И. Кузнечно-штамповочное оборудование : учебник для вузов / Л. И. Живов, А. Т. Овчинников, Е. Н. Складчиков ; под ред. Л. И. Живова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2006. – 560 с.

2. Пат. 30386 Україна МПК B21j7/00. Безшаботний вертикальний гідравлічний молот / Рей А. Р. – № U200711894 ; заявл. 29.10.2007 ; опубл. 25.02.2008, Бюл № 4.

3. Пат. 41181 Україна МПК B21j7/00. Молот безшаботний вертикальний гідравлічний / Рей А. Р., Рей М. Р. – № U200814019 ; заявл. 05.12.2008 ; опубл. 12.05.2009, Бюл № 9.

4. Цзе Ф. С. Механические клебания / Ф. С Цзе, И. Е. Морзе, Р. Т. Хинкл. – М. : Машиностроение, 1975. – 248 с.

Рей А. Р. – аспирант ВНУ им. В. Даля.

ВНУ им. В. Даля – Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, г. Луганск.

E-mail: reyantt@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.12.2012 г.