

УДК 651.73.06

Рей А. Р.
Сумской В. И.

ПАРАМЕТРЫ ПРЯМОГО ХОЛОСТОГО ХОДА БЕСШАБОТНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОЛОТА ПРИ УВЕЛИЧЕННОЙ МАССЕ НИЖНЕЙ БАБЫ

Бесшаботные вертикальные молота относятся к наиболее мощному штамповочному оборудованию, которое использовалось в оборонной промышленности. По этой причине в технической литературе имеется ограниченная информация о подобных молотах. Так молоты с пневмаприводом описаны в работах Л. И. Живова, в том числе в последнем его учебном издании в 2006 г. [1]. Обоснование замены пневматического привода на гидравлический приведено Ю. А. Бочаровым в 1985 г. [2]. По известным причинам работы после 1990 г. по бесшаботным молотам публиковались редко. Новые технические решения, в том числе с участием автора, появились не так давно [3], [4]. В работе [5] рассмотрена кинематика вертикального бесшаботного гидравлического молота с верхним приводом и одинаковыми по массе бабами. В работе [6] показано, что реализация двустороннего привода для молотов с одинаковыми бабами может повысить эффективность работы молота. В работе [7] выполнен анализ вибрационной активности бесшаботного молота с односторонним приводом. Во всех рассмотренных случаях верхняя и нижняя бабы имеют одинаковую величину хода, что затрудняет обслуживание молота и уменьшает устойчивость его работы. Модель бесшаботного молота с приложением силы к верхней бабе и разновеликими массами баб показана на рис. 1.

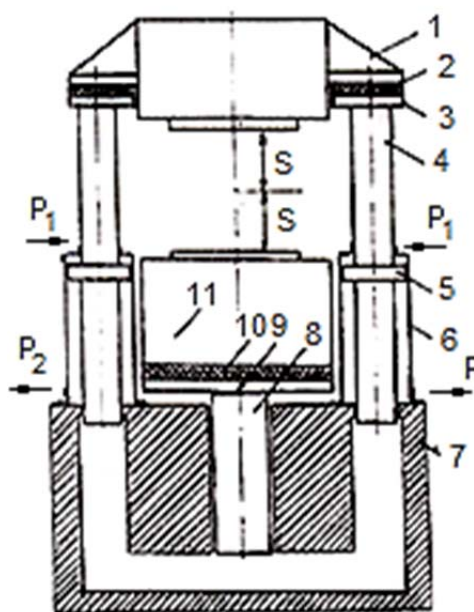


Рис. 1. Вертикальный гидравлический молот с верхним приводом:

1 – верхняя баба; 2 – боковые амортизаторы; 3 – переходные боковые плиты; 4 – боковые плунжеры; 5 – поршни; 6 – гидравлические приводные цилиндры; 7 – гидравлический бак; 8 – центральный плунжер; 9 – центральная переходная плита; 10 – центральный амортизатор; 11 – нижняя баба

Цель работы состоит в разработке метода расчета кинематических параметров бесшаботного вертикального гидравлического молота с увеличенной массой нижней бабы.

Запишем уравнения движения для бесшаботного гидравлического молота с односторонним приводом верхней бабы:

$$\begin{aligned} m_1 x_1'' + k_1 \cdot \left(x_1 - x_2 \cdot \frac{s_2}{s_1} \right) &= F_1; \\ m_2 x_2'' + k_2 \cdot \left(x_2 - x_1 \cdot \frac{s_1}{s_2} \right) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_1 – масса верхней бабы;

m_2 – масса нижней бабы;

x_1, x_2 – перемещения верхней и нижней бабы;

s_1, s_2 – площади плунжеров, на которых расположены бабы;

k_1, k_2 – приведенные жесткости жидкости под плунжерами и амортизаторов верхней и нижней баб.

Для решения уравнения (1) воспользуемся операционным исчислением [8]. Для этого в уравнение (1) введем единичную функцию Хевисайта $\eta(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$. Уравнение (1) примет вид:

$$\begin{aligned} m_1 x_1'' + k_1 \cdot \left(x_1 - x_2 \cdot \frac{s_2}{s_1} \right) &= F_1 \cdot \eta(t); \\ m_2 x_2'' + k_2 \cdot \left(x_2 - x_1 \cdot \frac{s_1}{s_2} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Переведем уравнение (2) в пространство изображений:

$$\begin{aligned} p^2 \cdot m_1 X_1 + k_1 \cdot \left(X_1 - X_2 \cdot \frac{s_2}{s_1} \right) &= F_1 \cdot \frac{1}{p}; \\ p^2 \cdot m_2 X_2 + k_2 \cdot \left(X_2 - X_1 \cdot \frac{s_1}{s_2} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Преобразовав (3), получим:

$$\begin{aligned} X_1 \cdot \left(m_1 p^2 + k_1 \right) - X_2 \cdot k_1 \cdot \frac{s_2}{s_1} &= F_1 \cdot \frac{1}{p}; \\ -X_1 \cdot k_2 \cdot \frac{s_1}{s_2} + X_2 \cdot \left(m_2 p^2 + k_2 \right) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Решим уравнение (4) относительно X_1 и X_2 , используя правило Крамера [8]:

$$\begin{aligned} \Delta &= m_1 \cdot m_2 \cdot p^4 + k_1 \cdot m_2 \cdot p^2 + k_2 \cdot m_1 \cdot p^2; \\ \Delta X_1 &= \frac{F_1}{p} \left(m_2 \cdot p^2 + k_2 \right); \\ \Delta X_2 &= \frac{F_1}{p} \cdot k_2 \cdot \frac{s_1}{s_2}. \end{aligned}$$

$$X_1 = \frac{\Delta X_1}{\Delta} = \frac{\frac{F_1}{p}(m_2 \cdot p^2 + k_2)}{m_1 \cdot m_2 \cdot p^2 + k_1 \cdot m_2 \cdot p^2 + k_2 \cdot m_1 \cdot p^2}; \quad (5)$$

$$X_2 = \frac{\Delta X_2}{\Delta} = \frac{\frac{F_1}{p} \cdot k_2 \cdot \frac{s_1}{s_2}}{m_1 \cdot m_2 \cdot p^2 + k_1 \cdot m_2 \cdot p^2 + k_2 \cdot m_1 \cdot p^2}.$$

Переведа (5) в пространство оригиналов, получим:

$$X_1 = \frac{F_1 \cdot k_2}{k_1 \cdot m_2 + k_2 \cdot m_1} \cdot \frac{t^2}{2} + \frac{F_1 \cdot k_1 \cdot m_2^2}{(k_1 \cdot m_2 + k_2 \cdot m_1)^2} \cdot (1 - \cos(\omega t)); \quad (6)$$

$$X_2 = \frac{s_1}{s_2} \cdot \frac{F_1 \cdot k_2}{k_1 \cdot m_2 + k_2 \cdot m_1} \cdot \frac{t^2}{2} - \frac{s_1}{s_2} \cdot \frac{F_1 \cdot k_2 \cdot m_2 \cdot m_1}{(k_1 \cdot m_2 + k_2 \cdot m_1)^2} \cdot (1 - \cos(\omega t)),$$

где $\omega = \sqrt{\frac{k_1 \cdot m_2 + k_2 \cdot m_1}{m_1 \cdot m_2}}$.

Определим значение изменения давления для молота с заданными параметрами.

Параметры бесшаботного молота:

$m_1 = 18 \cdot 10^3$ кг – масса нижней бабы;

$m_2 = 30 \cdot 10^3$ кг – масса верхней бабы;

$p = 16$ МПа – статическое давление в гидробаке.

По закону Паскаля давление в гидробаке одинаково как под верхними, там и под центральным плунжерами. Из этого следует, что:

$$\frac{m_1 \cdot g}{s_1} = \frac{m_2 \cdot g}{s_2} = p. \quad (7)$$

Определим площадь двух верхних и нижнего плунжеров:

$$s_1 = \frac{m_1 \cdot g}{p} = 0,011 \text{ м}^2; \quad s_2 = \frac{m_2 \cdot g}{p} = 0,018 \text{ м}^2.$$

Для примера рассмотрим бесшаботный молот с ходом нижней бабы, равным $h = 1$ м и объемом гидробака $V = 5h \cdot s_2 = 0,09 \text{ м}^3$.

Исходя из этих условий, определим жесткости жидкости под плунжерами верхней и нижней баб:

$$K_{1жс} = \frac{E \cdot s_1^2}{V} = 3 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}; \quad K_{2жс} = \frac{E \cdot s_2^2}{V} = 8 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}},$$

где $E = 2,2 \cdot 10^9$ Па – объемный модуль упругости воды.

Приведенные жесткости, на которые опираются верхняя и нижняя бабы, будут равны:

$$K_1 = \frac{C_в \cdot K_{1ж} \cdot C_н \cdot \frac{s_1}{s_2}}{C_в \cdot K_{1ж} + K_{1ж} \cdot C_н \cdot \frac{s_1}{s_2} + C_в \cdot C_н \cdot \frac{s_1}{s_2}};$$

$$K_2 = \frac{C_н \cdot K_{2ж} \cdot C_в \cdot \frac{s_2}{s_1}}{C_н \cdot K_{2ж} + K_{2ж} \cdot C_в \cdot \frac{s_2}{s_1} + C_в \cdot C_н \cdot \frac{s_2}{s_1}},$$
(8)

где $C_в = K_{1ж} = 3 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ – жесткость верхнего амортизатора;

$C_н = K_{2ж} = 8 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ – жесткость нижнего амортизатора.

Подставив $C_в$, $C_н$, $K_{1ж}$ и $K_{2ж}$ в (14), получим:

$$K_1 = 1,15 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}; K_2 = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Для того чтобы при движении плунжера верхней бабы она не отрывалась от верхних амортизаторов, необходимо чтобы её ускорение было меньше ускорения свободного падения. Зададим ускорение верхней бабы равно $a_1 = 0,9g$. Ускорение нижней бабы будет составлять $\frac{s_1}{s_2}$ ускорения верхней бабы и будет равно $a_2 = 0,55g$.

В этом случае сила привода будет равна $F = m_1 \cdot a_1 + m_2 \cdot a_2$.

При силе, приложенной к верхней бабе при прямом холостом ходе в гидробаке, будет наблюдаться повышение давления равно $\frac{m_2 \cdot a_2}{s_2} = 8,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Однако, вследствие гармонической составляющей в уравнении движения баб давление в гидробаке будет повышаться так же на величину, равную:

$$\Delta p = E \cdot \frac{\Delta V}{V}; \Delta p = \frac{E \cdot \left(X_1 \cdot s_1 \cdot \frac{K_1}{K_{1ж}} - X_2 \cdot s_2 \cdot \frac{K_2}{K_{2ж}} \right) (1 - \cos(\omega t))}{V}.$$
(9)

Множители $\frac{K_1}{K_{1ж}}$ и $\frac{K_2}{K_{2ж}}$ определяют долю деформации жидкости в общей деформации системы.

Максимальное значение повышения давления от гармонической составляющей будет достигаться при $\cos(\omega t) = -1$, при этих условиях оно составит величину $\Delta p_{\text{max}} = 23 \cdot 10^6 \text{ Па}$ (230 атм.). Максимальное повышение давления жидкости в гидробаке с учетом повышения давления, обеспечивающего равноускоренную составляющую движения, будет равно $\Delta p_{\text{max}} = 23 \cdot 10^6 + 8,8 \cdot 10^6 = 31,8 \text{ МПа}$ (318 атм.). Давление жидкости в гидробаке при прямом холостом ходе будет иметь постоянную составляющую равную 8,8 МПа, и переменную равную $11,5 \cdot (1 - \cos(\alpha)) \text{ МПа}$, то есть в любой момент времени давление в гидробаке будет определяться зависимостью $p = 8,8 + 11,5 \cdot (1 - \cos(\alpha)) \text{ МПа}$.

Определим энергию удара исследуемого бесшаботного молота. Для этого определим скорости баб в момент удара. Исходя из того, что величина хода нижней бабы составляет 1 м и гармоническая составляющая значительно меньше составляющей, обусловленной

равноускоренным движением, её скорость в момент удара составит $v \approx \sqrt{2h \cdot a_2} = 3,3 \text{ М/с}$. Скорость же верхней бабы будет в $\frac{a_1}{a_2}$ раз выше скорости нижней и составит $5,5 \text{ М/с}$. Энергию удара данного молота можно высчитать по формуле:

$$E = \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2}. \quad (10)$$

Подставив массы баб и их скорости в (17), получим энергию удара молота равную $E = 435,6 \text{ КДж}$. Что соответствует шаботному молоту со скоростью бабы в момент удара 6 М/с и массой бабы $24,2 \text{ т}$.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель уравнения движения баб, зависимости для определения приведенной жесткости узла гидросвязи. Показано, что перемещения баб описываются уравнением параболы, на которое накладывается гармоническая составляющая, содержащая \cos -функцию.

Показано, что повышение давления в гидробаке при прямом холостом ходе существенно зависит от площади плунжеров, которая определяется по принятому значению статического давления жидкости в гидробаке.

Показано, что бесшаботный молот с массой нижней бабы 30 т , верхней бабы 18 т составляет $E = 435,6 \text{ КДж}$ и соответствует энергии удара шаботного молота с массой соударяющихся частей: бабы $24,2 \text{ т}$, шабота $\leq 500 \text{ т}$.

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. Бочаров Ю. А. *Перспективы совершенствования кузнечно-прессовых машин ударного действия / Ю. А. Бочаров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 8. – С. 39–40.*
3. Пат. 30386 Україна МПК В21j7/00. *Безшаботний вертикальний гідравлічний молот / Рей А. Р. – № u200711894; заявл. 29.10.2007; опубл. 25.02.2008, Бюл № 4.*
4. Пат. 41181 Україна МПК В21j7/00. *Молот безшаботний вертикальний гідравлічний / Рей А. Р., Рей М. Р. – № u200814019; заявл. 05.12.2008; опубл. 12.05.2009, Бюл № 9.*
5. Рей Р. И. *Определение реакций подвижной системы бесшаботного молота / Р. И. Рей. // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1(19). – С. 339–341.*
6. Рей А. Р. *Влияние жесткости узла гидросвязи на некоторые параметры бесшаботного молота / А. Р. Рей, Р. И. Рей // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении : сб. науч. пр. – Луганськ : Вид-во СНУ им. В. Даля, 2009. – С. 177–182.*
7. Рей Р. И. *Бесшаботный вертикальный молот с повышенными надежностью и энергетической эффективностью / Р. И. Рей, В. И. Сумской // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2011. – № 2 (156). – Ч. 2. – С. 6–11.*
8. Корн Г. *Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука; гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 831 с.*

Рей А. Р. – аспирант ВНУ им. В. Даля;

Сумской В. И. – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой ЗНТУ.

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

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: reyantt@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10.10.2012 г.