

УДК 621.73.06

Рей А. Р.
Рей М. Р.**БЕСШАБОТНЫЙ МОЛОТ КАК ИСТОЧНИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ**

К основным достоинствам бесшаботных молотов, по сравнению с шаботными, относятся отсутствие вибраций, которые посредством фундамента передаются в окружающую среду. Так в работе [1], опубликованной в 1968 г., отмечено следующие: «Работа мощных молотов связана с сильным сотрясением грунта и зданий. Этому недостатка лишены бесшаботные молоты». В работе [2], опубликованной в 2006 г., Л. И. Живов отмечает, что у бесшаботных молотов деформация поковки производится при соударении двух подвижных масс, при таком ударе нагрузочный импульс не передается на грунт. В работе [3] показано, что движение каждой бабы бесшаботного молота при холостом ходе описывается уравнением параболы, на которое накладывается гармоническая составляющая, причем колебания баб происходят в противофазе, что приводит к пульсации давления в гидробаке и возникновению переменной силы действующей на гидробак узла гидросвязи в вертикальном направлении.

Целью работы является определение параметров колебаний фундамента. Для этого необходимо составить и решить уравнение его вынужденных колебаний и сравнить результаты с характеристиками вибраций фундамента шаботного молота.

Результаты исследования. В работе [3] показано, что для надежной работы молота усилие, приложенное со стороны привода к верхней бабе, не должно превышать:

$$P \leq g(m_1 + m_2)/2, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; m_1, m_2 – массы баб.

Согласно данным работы [3] разница в перемещениях баб опишется уравнением:

$$\Delta x = x_1 - x_2 = \frac{P}{(m_1 + m_2)} \left[\frac{1}{\omega^2} \left(\frac{m_2}{m_1} + 1 \right) (1 - \cos \omega t) \right]. \quad (2)$$

Изменение расстояния между бабами приводит к изменению деформации упругой связи баб и к каждой бабе будет приложено усилие, равное:

$$P_{\delta} = \Delta x \cdot k, \quad (3)$$

где k – эквивалентная жесткость узла гидросвязи баб.

Давление жидкости в гидробаке изменится на величину:

$$P_{жс} = \Delta x \cdot k / (2f_{\delta}), \quad (4)$$

где f_{δ} – площадь поперечного сечения каждого из двух боковых плунжеров.

Усилие, приложенное к гидробаку вдоль вертикальной оси, будет равно:

$$P_n = P_{жс} (2f_{\delta} + f), \quad \text{или} \quad P_n = P_{жс} \cdot 4f_{\delta} = 2k \cdot \Delta x, \quad (5)$$

где f – площадь центрального плунжера, $f = 2f_{\delta}$.

С учетом (1), (2), (4) и (5) – усилие, действующее вдоль вертикальной оси на гидробак и фундамент, определяется зависимостью:

$$P_u = \frac{gk}{\omega^2} \left(\frac{m_2}{m_1} + 1 \right) (1 - \cos \omega t).$$

Уравнение вынужденных колебаний фундамента представим в виде:

$$MX'' + k_o x = P_u, \quad (6)$$

где M – масса фундамента с закрепленными на нем узлами и деталями;
 k_o – жесткость грунта под основанием фундамента.

Подставив в (7) P_u из (6), поделив обе части уравнения на M и введя замену $k_o / m = \omega_o^2$, получим:

$$x'' + \omega_o^2 x = \frac{gk}{\omega^2 M} \left(\frac{m_2}{m_1} + 1 \right) (1 - \cos \omega t). \quad (7)$$

Приняв $\frac{gk}{\omega^2 M} \left(\frac{m_2}{m_1} + 1 \right) = B$ и выполнив преобразования уравнения (8) по Лапласу [4], получим:

$$S^2 X(S) + \omega_o^2 X(S) = B \left(\frac{1}{S} - \frac{S}{S^2 + \omega^2} \right). \quad (8)$$

Из (10) найдем зависимость для $X(S)$:

$$X(S) = \frac{B\omega^2}{S(S^2 + \omega_o^2)(S^2 + \omega^2)} \quad (9)$$

Размножим сомножитель при B из (10) на элементарные дроби по методу неопределенных коэффициентов:

$$\frac{\omega^2}{S(S^2 + \omega_o^2)(S^2 + \omega^2)} = \frac{a}{S} + \frac{bS + c}{S^2 + \omega_o^2} + \frac{dS + e}{S^2 + \omega^2}; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\omega^2}{S(S^2 + \omega_o^2)(S^2 + \omega^2)} = \\ & = \frac{a(S^2 + \omega^2)(S^2 + \omega_o^2) + S(bS + c)(S^2 + \omega_o^2) + S(dS + e)(S^2 + \omega^2)}{S(S^2 + \omega_o^2)(S^2 + \omega^2)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega^2 = & S^4(a + b + d) + S^3(c + e) + S^2(a(\omega^2 + \omega_o^2) + \\ & + b\omega_o^2 + d\omega^2) + S(c\omega_o^2 + e\omega^2) + a\omega^2\omega_o^2. \end{aligned}$$

Составим систему для нахождения a, b, c, d и e :

$$\left. \begin{aligned} a + b + d &= 0; \\ a(\omega^2 + \omega_o^2) + b\omega_o^2 + d\omega &= 0; \\ c\omega_o^2 + e\omega^2 &= 0; \\ c + e &= 0; \\ a\omega^2\omega_o^2 &= \omega^2. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Решив (11), найдем значения коэффициентов:

$$a = 1/\omega_o^2; \quad d = -1/(\omega_o^2 - \omega^2); \quad c = 0; \quad e = 0; \quad b = \omega/[(\omega_o^2 - \omega^2)].$$

Подставив эти значения в (10) и произведя соответствующую замену в правой части уравнения (9), получим:

$$X(S) = B\left(\frac{1}{\omega^2 S} - \frac{S}{(S^2 + \omega^2)(\omega_o^2 + \omega^2)} + \frac{\omega^2 S}{\omega_o^2(\omega_o^2 - \omega^2)(S^2 + \omega_o^2)}\right). \quad (12)$$

Выполнив обратное преобразование Лапласа [4] уравнения (12) и несложные алгебраические преобразования, получим уравнение колебаний фундамента молота в функции времени:

$$X = A\left[\frac{1}{\omega^2}(1 - \cos \omega t) - \frac{1}{\omega_o}(1 - \cos \omega_o t)\right], \quad (13)$$

где $A = \frac{gk}{M(\omega_o^2 - \omega^2)}\left(\frac{m_2}{m_1} + 1\right)$ и если учесть, что колебания фундамента проходят на

вынужденной частоте ω и собственной частоте ω_o , то можно представить амплитуду колебаний на вынужденной частоте как $A_g = A/\omega_o^2$, а на собственной частоте $A_c = A/\omega$ и уравнение колебаний фундамента представить в виде:

$$X = A_g(1 - \cos \omega t) - A_c(1 - \cos \omega_o t), \quad (14)$$

где A_g – амплитуда вынужденных колебаний фундамента;

A_c – амплитуда собственных колебаний фундамента.

Взяв первую производную уравнения движения фундамента, получим уравнение скорости:

$$X' = \omega A_g \sin \omega t - \omega_o A_c \sin \omega_o t. \quad (15)$$

Выполним анализ параметров колебаний фундамента бесшаботного молота с массами падающих частей $m_1 = m_2 = 40$ т ($4 \cdot 10^4$ кг). Такой молот по энергии удара эквивалентный шаботному молоту с массой падающих частей 20 т ($2 \cdot 10^4$ кг), у которого масса фундамента $M = 2,5 \cdot 10^6$ кг, жесткость опоры фундамента на грунт $k_o = 1,5 \cdot 10^{10}$ Н/м, частота собственных колебаний $\omega_o = 77$ с⁻¹, циклическая частота $f = 12,3$ Гц, амплитуда собственных колебаний $A = 2,4 \cdot 10^{-4}$ м, амплитудное значение виброскорости $A_v = 1,8 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Для сравнения параметров колебаний фундаментов бесшаботного и шаботного молотов предположим, что бесшаботный (молот с массой баб 40 т установлен на фундамент эквивалентного по энергии удара шаботного молота с массой падающих частей 20 т). Эквивалентную жесткость узла гидросвязи определим по зависимости (12) из [3]:

$$k = \left(\frac{g}{2\Delta v} \right) \frac{(m_1 + m_2)m_2}{m_1}, \quad (16)$$

где g – ускорение свободного падения;

Δv – допустимая разница в скоростях движения баб, принимают $\Delta v \leq 0,3$ м/с и после подставки в (16) числовых значений физических величин найдем значение эквивалентной жесткости узла гидросвязи баб $k = 2,13 \cdot 10^7$ Н/м.

При известной жесткости узла гидросвязи частота колебаний баб определяется как:

$$\omega = \sqrt{k(m_1 + m_2)/(m_1 \cdot m_2)}$$

и после подстановки числовых значений найдем: $\omega = 33$ рад/с.

Выполним анализ колебаний фундамента бесшаботного молота при следующих начальных условиях: $M = 2,5 \cdot 10^6$ кг; $m_1 = m_2 = 4 \cdot 10^4$ кг; $\omega_0 = 77$ с⁻¹; $\omega = 33$ с⁻¹.

Анализ уравнения (15) показывает, что амплитуда вынужденных колебаний фундамента бесшаботного молота составляет $A_6 = 0,66 \cdot 10^{-4}$ м, (у шаботного $A_6 = 2,4 \cdot 10^{-4}$ м), т. е. в 3,6 раза меньше, чем у шаботного, а амплитуда свободных колебаний $A_c = 1,1 \cdot 10^{-5}$ м.

Амплитудные значения виброскоростей равны:

вынужденных колебаний $V_6 = 0,21 \cdot 10^{-2}$ м/с;

свободных колебаний $V_c = 0,083 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Согласно ДСН [5] корректирование значения виброскорости определяется по зависимости:

$$\tilde{V} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i K_i)^2}, \quad (17)$$

где V_i – среднеквадратичное значение виброскорости в i -й частотной полосе;

n – количество частотных полос в 1/3 октавном частотном диапазоне;

k_i – весовой коэффициент для i -й частотной полосы.

Для вынужденных колебаний $f = 5,25$ Гц, $k_i = 0,63$; для свободных колебаний $f = 12,3$ Гц, $k_i = 1,0$.

После подстановки значений скоростей и весовых коэффициентов в (17) получим корректированное значение виброскорости фундамента $\tilde{V} = 0,16 \cdot 10^{-2}$ м/с, (90дБ) предельно допустимый уровень согласно ДСН [5] табл. 7, составляет $[V] = 0,2 \cdot 10^{-2}$ м/с, (92дБ).

Для производственных условий определяется эквивалентный корректированный уровень, который учитывает время воздействия вибрации по зависимости (см. ДСН [5] формула (5)):

$$V_{кор. экв.} = \tilde{V} + 10 \lg(t/t_{см}), \quad (18)$$

где t – время воздействия вибраций в течение смены;

$t_{см}$ – продолжительность рабочей смены.

В реальных условиях машинное время в течение смены не превышает 25 % от продолжительности смены. После подстановки в (18) получим эквивалентный уровень виброскорости:

$$V_{\text{кор. экв.}} = 90 + 10 \lg 0,25 = 84 \text{ дБ.}$$

Согласно ДСН [5] (см. табл. 7) предельно допустимый уровень эквивалентной скорректированной вибрации третьей категории (технологическая типа «а») по виброскорости составляет 92 дБ. Рассчитанное значение 84 дБ, что ниже предельно допустимого. Если же посмотреть скорректированный уровень (без учета времени воздействия) он составляет 90 дБ против 92 дБ предельно допустимых, т. е. практически находится на предельном уровне. При других соотношениях масс и жесткостей системы могут быть получены другие результаты, а это значит, что бесшаботные молоты при существующих принципиальных схемах следует отнести к вибрационно-активному оборудованию.

ВЫВОДЫ

При холостом ходе движение каждой бабы бесшаботного молота описывается уравнением параболы, на которое накладывается гармоническая составляющая, причем, колебания баб происходят в противофазе, что приводит к пульсации давления в гидробаке узла гидросвязи и возникновению переменной силы, действующей на гидробак и фундамент в вертикальном направлении.

Разработана математическая модель на основе, которой получены зависимости для определения параметров движения фундамента бесшаботного молота.

Расчет параметров колебаний фундамента бесшаботного молота с массой каждой бабы в 40 т дал скорректированные значения виброскорости 90 дБ, эквивалентное (с учетом времени воздействия вибраций) 84 дБ против 92 дБ – предельно допустимых согласно «Державних санітарних норм виробничої загальної локальної вібрації. ДСН 3.3.6–039.99», что позволяет отнести бесшаботные молоты к вибрационно-активному оборудованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щеглов В. Ф. Кузнечно-прессовые машины / В. Ф. Щеглов, Л. Ю. Максимов, В. П. Линц. – М. : Машиностроение, 1968. – 344 с.
2. Живов Л. И. Кузнечно-штамповочное оборудование : учебник для вузов / Л. И. Живов, А. Г. Овчинников, Е. Н. Складчиков. – М. : Из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 560 с. : ил.
3. Рей А. Р. Влияние жесткости узла гидросвязи на некоторые параметры бесшаботного вертикального молота / А. Р. Рей, Р. И. Рей // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском металів з машинобудування : зб. наук. пр. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2009. – С. 177–182.
4. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1984. – 832 с.
5. ДСН 3.3.6-039.99. Державні санітарні норми виробничої загальної локальної вібрації. – Київ, 1999.

Рей А. Р. – магистр ВНУ им. В. Даля;

Рей М. Р. – канд. техн. наук, ст. преп. ВНУ им. В. Даля.

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

E-mail: oomd@edu.snu.ua