

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОТБОЙНЫХ МОЛОТКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ

Корнеев С.В., Вишневский Д.А., Мулов Д.В.

*Донбасский государственный технический институт,
Луганская Народная Республика, г. Алчевск*

Ключевые слова: молоток отбойный, рукоятка управления, ударник, инструмент, расчетная схема, математическая модель, индикаторная диаграмма, виброускорение, виброскорость.

Аннотация. Разработаны расчетная схема системы «рука человека – молоток отбойный пневматический – разрушаемый объект», соответствующая математическая модель и компьютерная программа, позволяющие проводить всесторонние исследования динамических, термо- и газодинамических процессов, в том числе вибраций, в пневматических отбойных молотках серии МО для их совершенствования.

SIMULATION OF THE PNEUMATIC JACKHAMMERS OPERATION FOR VIBRATION RESEARCH

Korneev S.V., Vishnevsky D.A., Mulov D.V.

Donbass State Technical Institute, Lugansk People's Republic, Alchevsk

Keywords: jackhammer, control handle, hammer, tool, calculation scheme, mathematical model, indicator chart, vibration acceleration, vibration velocity.

Abstract. Calculation scheme of the «human hand – pneumatic jackhammer – destructible object» system, a corresponding mathematical model and a computer program allowing to carry out extensive research of dynamic, thermo- and gas-dynamic processes, as well as vibrations, in pneumatic jackhammers of the MO series for their improvement have been developed.

Широкое распространение в строительной, горной и др. отраслях производства получили пневматические отбойные молотки (МО). Несмотря на большое разнообразие конструктивных параметров МО, процесс их совершенствования еще не завершен, поскольку, по-прежнему, при весьма низком КПД, остаются высокие уровни вибрации и шума, представляющие опасность для человека [1].

Известны различные математические модели МО, отличающиеся в зависимости от поставленных целей степенью детализации, объемом учитываемых исходных данных, представлением руки оператора и разрушаемого объекта [2-5]. Вместе с тем, полная математическая модель, в которой в полной мере учитывались бы физико-механические свойства МО, рабочего тела (воздуха), окружающей среды и разрушаемого объекта, необходимые для исследования вибраций, а также возросшие возможности компьютерных технологий, в настоящее время не разработана.

Цель работы – разработка математической модели пневматического отбойного молотка, позволяющей исследовать вибрации рукоятки.

Расчетная схема системы «рука человека – молоток отбойный пневматический серии МО – разрушаемый объект» представлена на рисунке 1. При составлении модели основные элементы молотка представлялись в виде твердых тел, соединенных связями в виде элементов Гука, связи молотка с рукой и разрушаемой средой представляются элементами Кельвина-Фойгта.

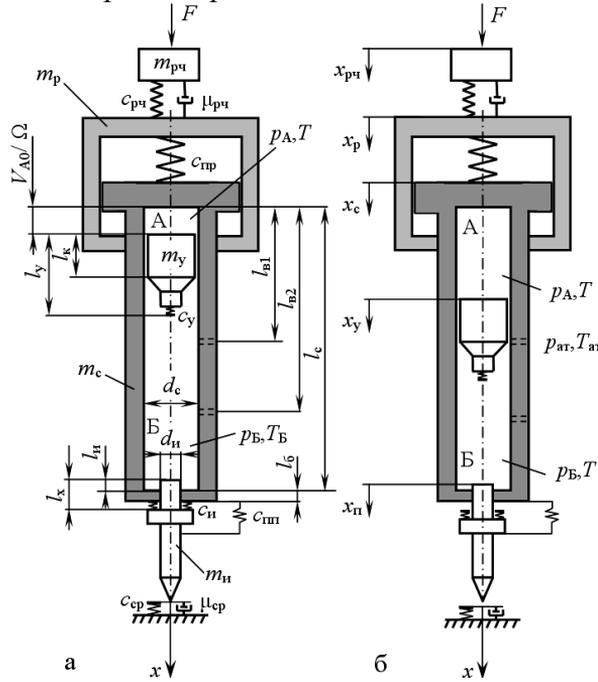


Рис. 1. Расчетная схема системы «рука человека – молоток отбойный пневматический – разрушаемый объект»: а – в первоначальном состоянии; б – в процессе работы

Математическая модель молотка представлена в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases}
 m_{рч} \ddot{x}_{рч} = F - F_p; \\
 m_p \ddot{x}_p = F_p - R_n + m_p g \cos \beta; \\
 m_c \ddot{x}_c = R_n - F_{pA} + P_c - F_n + F_{пн} + m_c g \cos \beta; \\
 m_y \ddot{x}_y = F_{pA} - F_{pB} - F_y + m_y g \cos \beta; \\
 m_n \ddot{x}_n = F_y + P_n - F_{cp} + F_n - F_{пн} + m_n g \cos \beta; \\
 \frac{dp_A}{dt} = \frac{k}{V_A} [(RT_M G_{AM} + RT_B G_{By} - RT_A (G_{An} + G_{Ay}) - p_A \Omega (\frac{dx_y}{dt} - \frac{dx_c}{dt})]; \\
 \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{V_B} \left[\begin{array}{l} RT_M G_{BM} + RT_A G_{Ay} - RT_B (G_{Bn} + G_{By}) + p_B \Omega (\frac{dx_y}{dt} - \frac{dx_c}{dt}) - \\ - p_B \Omega_n (\frac{dx_n}{dt} - \frac{dx_c}{dt}) \end{array} \right];
 \end{cases} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l}
\text{если } G_{AM} > 0, \text{ то} \\
\frac{dT_A}{dt} = \frac{T_A}{p_A V_A} \left[\begin{array}{l} (k - \frac{T_A}{T_M})RT_M G_{AM} + (k - \frac{T_A}{T_B})RT_B G_{By} - (k-1)Rk_{G_{Ai}} G_{Ai} - \\ -(k-1)RT_A G_{Ay} - (k-1)p_A \Omega \left(\frac{dx_y}{dt} - \frac{dx_c}{dt} \right) \end{array} \right]; \\
\text{если } G_{AM} \leq 0, \text{ то} \\
\frac{dT_A}{dt} = \frac{T_A}{p_A V_A} \left[\begin{array}{l} (k - \frac{T_M}{T_A})RT_A G_{AM} + (k - \frac{T_A}{T_B})RT_B G_{By} - (k-1)Rk_{G_{Ai}} G_{Ai} - \\ -(k-1)RT_A G_{Ay} - (k-1)p_A \Omega \left(\frac{dx_y}{dt} - \frac{dx_c}{dt} \right) \end{array} \right]; \\
\text{если } G_{BМ} > 0, \text{ то} \\
\frac{dT_B}{dt} = \frac{T_B}{p_B V_B} \left[\begin{array}{l} (k - \frac{T_M}{T_B})RT_M G_{BМ} + (k - \frac{T_B}{T_A})RT_A G_{Ay} - (k-1)Rk_{G_{Bi}} G_{Bi} - (k-1)RT_B G_{By} + \\ +(k-1)p_B \Omega \left(\frac{dx_y}{dt} - \frac{dx_c}{dt} \right) - p_B \Omega_{и} \left(\frac{dx_{и}}{dt} - \frac{dx_c}{dt} \right) \end{array} \right]; \\
\text{если } G_{BМ} \leq 0, \text{ то} \\
\frac{dT_B}{dt} = \frac{T_B}{p_B V_B} \left[\begin{array}{l} (k - \frac{T_B}{T_M})RT_B G_{BМ} + (k - \frac{T_B}{T_A})RT_A G_{Ay} - (k-1)Rk_{G_{Bi}} G_{Bi} - (k-1)RT_B G_{By} + \\ +(k-1)p_B \Omega \left(\frac{dx_y}{dt} - \frac{dx_c}{dt} \right) - p_B \Omega_{и} \left(\frac{dx_{и}}{dt} - \frac{dx_c}{dt} \right) \end{array} \right],
\end{array} \right\}$$

где (см. также рис. 1) p_A и p_B – давления в камерах А и Б; $p_{ат}$ – атмосферное давление; V_A , V_B – объемы воздуха в камерах А и Б; T_A , T_B , T_M и $T_{ат}$ – абсолютная температура воздуха в камерах А, Б, в магистрали и в атмосфере; β – угол отклонения продольной оси молотка от вертикали; F_p – реакция рукоятки на воздействие оператора; $R_{п}$ – сила сжатия амортизирующей пружины, установленной в рукоятке управления; g – ускорение свободного падения; F_{pA} и F_{pB} – силы давления воздуха на ударник в камерах А и Б ствола; P_c и $P_{и}$ – силы давления воздуха в камере Б на днище ствола (с) и на инструмент (и); F_y – сила соударения ударника с инструментом; $F_{и}$ – сила взаимодействия инструмента со стволом; $F_{пп}$ – сила растяжения пружины, удерживающей инструмент; $F_{ср}$ – реакция среды на воздействие инструмента; k – показатель адиабаты; R – газовая постоянная воздуха; G_{AM} , $G_{BМ}$ – расход воздуха, поступающего из магистрали в камеру А и в камеру Б, соответственно; G_{Ai} , G_{Bi} – расход воздуха, истекающего в атмосферу из камер А и Б, соответственно; $k_{G_{Ai}}$ и $k_{G_{Bi}}$ – логические коэффициенты,

$$k_{G_{Ai}} = \begin{cases} T_A, & \text{если } G_{Ai} \geq 0; \\ T_{ат}, & \text{если } G_{Ai} < 0; \end{cases} \quad k_{G_{Bi}} = \begin{cases} T_B, & \text{если } G_{Bi} \geq 0; \\ T_{ат}, & \text{если } G_{Bi} < 0; \end{cases}$$

G_{Ay} , G_{By} – расходы воздуха, перетекающего через зазор между стволом и ударником, соответственно, из камеры А в камеру Б и наоборот; $\Omega_{и}$ – площадь торца хвостовика инструмента.

В начальный момент времени перемещения и скорости всех масс полагаем равными нулю, $p_A=k_1p_M$, $p_B=k_2p_{ат}$, $T_A=T_M$, $T_B=T_{ат}$, k_1 , и k_2 – коэффициенты снижения давления в камерах А и Б.

Логика миграции воздуха из магистрали в камеры определяется соотношением в них давлений, а также при начавшемся движении воздуха продолжительностью времени τ переключивания клапана.

Расходы воздуха, поступающего из магистрали в камеры или истекающего из камер в атмосферу, определяются по формулам Сен-Венана.

На рисунках 2 и 3, в качестве примера, отражены результаты моделирования молотка МО-2Б, который производится на ТЭМЗ имени В.В. Вахрушева. На диаграммах наблюдается ожидаемая периодичность (с частотой 22,5 Гц) изменения исследуемых параметров. Скорость ударника (см. рис. 2, а) на участках рабочего хода при отсутствии противодействующего давления линейно возрастает по модулю, причем на участке холостого хода со значительно большим ускорением.

Давление в каждой камере (см. рис. 2, б) резко увеличивается при ее заперении и последующем в процессе переключивания клапана поступлении в нее воздуха из магистрали. Давление в камере падает при открывании ударником выхлопных отверстий, после чего при поступлении воздуха из магистрали поддерживается на некотором постоянном уровне или при прекращении поступления воздуха из магистрали становится, практически, равным атмосферному давлению.

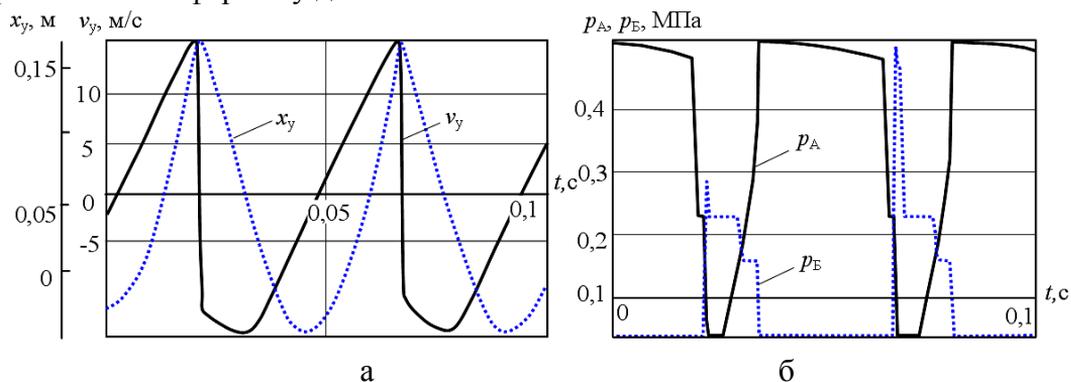


Рис. 2. Диаграммы перемещения x_y , скорости v_y ударника (а) и индикаторная диаграмма отбойного молотка (б)

На рисунке 3 приведены диаграммы виброскорости и виброускорения рукоятки управления молотка для установившегося режима работы, полученные на частоте нанесения ударов поршнем-ударником по рабочему инструменту. Параметры вибрации по виброскорости и виброускорению на молотке МО-2Б превосходят нормативные значения, т.е. предельно допустимые значения. Работа в условиях воздействия вибрации с уровнями,

превышающими санитарные нормы, более чем на 12 дБ в какой-либо октавной полосе не допускается.

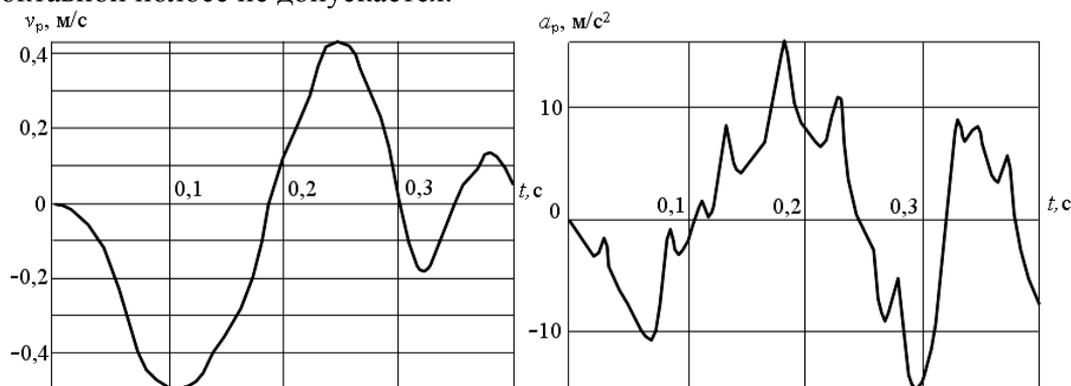


Рис. 3. Диаграммы виброскорости (v_p) и виброускорения (a_p) рукоятки управления

Вибрация рукоятки молотка МО-2Б удовлетворяет требованиям безопасности лишь в узком диапазоне усилий нажатия – 186...196 Н и достигает 123...124 дБ. Приложение к рукоятке усилий, больших 200 Н, запрещено по ГОСТ 17770-86, а при усилиях ниже 186 Н вибрация превышает 124 дБ, и такую машину, согласно действующим санитарным нормам, эксплуатировать запрещено.

Приведенные факты не противоречат известным опытным данным [6].

Итак, разработанная модель позволяет исследовать динамические процессы, в том числе и вибрации, отбойных молотков серии МО, а также наметить пути снижения вибраций.

Список литературы

1. Тимофеева И.Г. Безопасность труда на виброопасных технологических процессах. – Улан-Удэ: ВСГТУ, 2003. – 95 с.
2. Герц Е.В. Динамика пневматических приводов автоматов / Е.В. Герц, Г.В. Крейнин. – М.: Машиностроение, 1964. – 234 с.
3. Дроздов А.Н. Математическое моделирование ручных машин для строительномонтажных работ с примерами реализации: учебное пособие / А.Н. Дроздов, В.В. Степанов. Под ред. Б.Г. Гольдштейна. – М.: НИУ МГСУ, 2016. – 152 с.
4. Горбунов В.Ф. Исследование виброизоляции рукояток ручных пневматических молотков методом математического моделирования / В.Ф. Горбунов, А.В. Триханов // Известия Томского политехнического института. – 1966. – Т. 146: Механика и машиностроение. – С. 66-74.
5. ГОСТ 55162 – 2012 Оборудование горно-шахтное. Молотки отбойные пневматические. Требования безопасности и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 28 с.
6. Ямпольский Д.З. О переброске клапана пневматической ударной машины / Д.З. Ямпольский, В.Б. Соколинский, В.А. Кашаев // Научн. сообщ. Нац. науч. центра горн. пр-ва. – 2010. – №336. – С. 222-235.

References

1. Timofeeva I.G. Labor safety in vibration-hazardous technological processes. – Ulan-Ude: ESSTU, 2003. – 95 p.

2. Hertz E.V. Dynamics of the automatic machines pneumatic drives / E.V. Hertz, G.V. Kreinin. – M.: Mechanical Engineering, 1964. – 234 p.
3. Drozdov A.N. Mathematical modeling of manual machines for construction and installation works with examples of implementation: textbook / A.N. Drozdov, V.V. Stepanov. Edited by B.G. Goldstein. – M.: NRU MGSU, 2016. – 152 p.
4. Gorbunov V.F. The study of vibration isolation of the manual pneumatic hammers handles by mathematical modeling / V.F. Gorbunov, A.V. Trikhanov // Proceedings of the Tomsk Polytechnic Institute. – 1966. – Vol. 146: Mechanics and Mashine-building. – P. 66-74.
5. State Standard 55162 – 2012 Mining equipment. Pneumatic jackhammers. Safety requirements and test methods. – M.: Standartinform, 2014. – 28 p.
6. Yampolsky D.Z. On the transfer of the valve of a pneumatic impact machine / D.Z. Yampolsky, V.B. Sokolinsky, V.A. Kashaev // Scientific. commun. of the Nat. Scientific Center of Mining. – 2010. – No. 336. – P. 222-235.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Корнеев Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горной энергомеханики и оборудования	Korneev Sergey Vasilyevich – doctor of technical sciences, professor, head of the department of Mining Power Mechanics and Equipment
Вишнеvский Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, ректор, заведующий кафедрой машин металлургического комплекса, dimavish.79@mail.ru	Vishnevsky Dmitry Alexandrovich – candidate of technical sciences, associate professor, rector, head of the department of the Metallurgical Complex Machinery, dimavish.79@mail.ru
Мулов Дмитрий Валерьевич – старший преподаватель кафедры горной энергомеханики и оборудования, магистр	Mulov Dmitry Valerievich – senior lecturer of the department of Mining Power Mechanics and Equipment, Master's degree
Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, Луганская Народная Республика	Donbass State Technical Institute, Alchevsk, Lugansk People's Republic

Получена 25.10.2021