

**АНАЛИЗ НАЖИМНЫХ И ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
УСТАНОВОК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РУЧНЫХ МАШИН
УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ**

А. И. ПАШНИН, В. Ф. ГОРБУНОВ, В. И. БАБУРОВ, А. Ф. КОЗЛОВ

(Представлена научным семинаром кафедры горных машин, рудничного транспорта
и горной механики)

Изучению вибрации пневматических машин ударного действия посвящено много работ. Однако общепризнанной методики испытания и экспериментального исследования этих машин пока нет. Разнообразие применяемых методов и аппаратуры исследований затрудняет анализ и обобщение результатов, получаемых исследователями, даже для машин одного и того же типа. Целью данной работы является разработка теоретических основ для создания единой методики исследований вибрационных свойств ручных машин ударного действия.

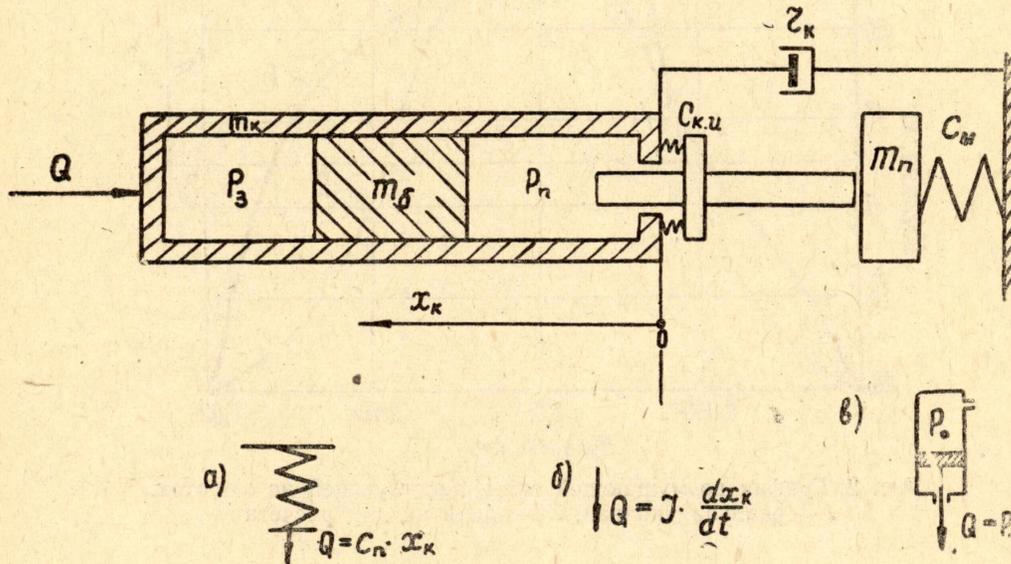


Рис. 1. Расчетная схема.

m_k — масса корпуса молотка; m_b — масса бойка; x_k — его виброремещение;
 p_z p_n — давление воздуха в задней и передней полостях молотка соответственно;
 m_n — масса поглотителя ударной мощности; C — жесткость поглотителя;
 Q — усилие нажатия: а) нажатие пружиной; б) ручное нажатие; в) нажатие пневмоподатчиком

Вибрационные параметры, например, пневматических молотков зависят от многих факторов (давления воздуха в сети, усилия нажатия, положения молотка, конструкции рабочего инструмента, свойств обрабатываемых материалов и т. д.). Но даже при одних и тех же условиях

и одинаковой измерительной аппаратуре результаты испытаний могут быть различны. Они зависят от вида применяемых нажимных устройств и поглотителей энергии ударов.

При стендовых испытаниях нажатие на пневматический молоток осуществляют несколькими способами: предварительно поджатой пружиной, пневматическим податчиком, грузом, рукой. Поглотители ударной мощности молотков имеют конструкции в виде пневматического буфера, фрикционной скалки, пружинного демпфера, специального инструмента, залитого в свинец или защемленного в дереве. Влияние конструкций нажимных устройств и поглотителей ударной мощности на вибрацию пневматических молотков можно оценить экспериментально или расчетным путем.

На корпус работающего молотка в общем случае действуют: инерционная сила; усилие нажатия; силы трения; силы, возникающие при соударении корпуса и инструмента; возбуждающая сила.

Расчетная схема, принятая для целей данной работы, представлена на рис. 1.

При расчете приняты следующие допущения:

а) упругие силы, возникающие при соударении корпуса и инструмента, а также силы сухого и вязкого трения не учитываются;

б) возбуждающая сила $S_b (P_3 - P_{II})$ в функции времени, описываемая сложным полигармоническим законом, заменяется косинусоидой, смещенной по оси ординат на величину ΔF (рис. 2);

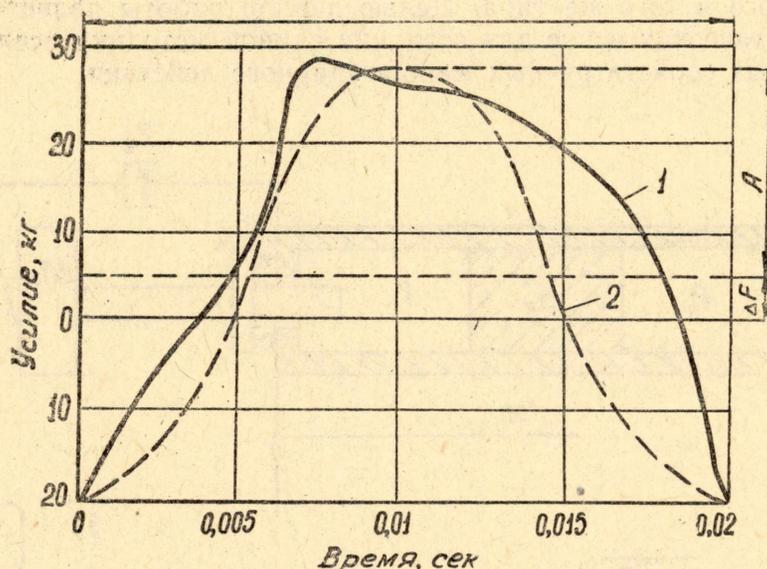


Рис. 2. График возмущающей силы, действующей на молоток.
1 — реальная кривая, 2 — принятая для расчета

в) в расчетах колебаний корпуса молотка при различных нажимных устройствах поглотитель энергии ударов применяется абсолютно жестким.

С л у ч а й 1. Нажимное устройство пружинного типа с коэффициентом жесткости пружины C_{II}

Усилие нажатия для этого случая (рис. 1,а):

$$Q = C_{II}x_k + Q_0, \text{ кг},$$

где Q_0 — величина предварительного поджатия пружины, кг. Уравне-

ние движения корпуса молотка описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка

$$m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} + C_n x_k = A \cos \omega t + F, \quad (1)$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T_n}$

T_n — время одного цикла,
 $F = \Delta F - Q_0$.

При решении этого уравнения накладывается ограничение $x_k > 0$
 Характеристическое уравнение имеет вид:

$$\kappa^2 + \frac{C_n}{m_k} = 0. \quad (2)$$

Корни уравнения (2)

$$\kappa_1, \kappa_2 = \pm i \sqrt{\frac{C_n}{m_k}} = if,$$

где f — собственная частота системы, масса корпуса — пружина, а общее решение линейного однородного уравнения

$$\bar{x} = C_1 \cos ft + C_2 \sin ft.$$

Частное решение ищем в виде

$$\tilde{x} = B \cos \omega t + D \sin \omega t + \varepsilon,$$

после дифференцирования и подстановок находим

$$B = \frac{A}{C_n(1 - 4\pi^2)}; D = 0; \varepsilon = \frac{F}{C_n}.$$

Итак, решение уравнения (1) будет:

$$\begin{cases} x_k = C_1 \cos ft + C_2 \sin ft + \frac{A}{C_n(1 - 4\pi^2)} \cdot \cos \omega t + \frac{F}{C_n}, \\ x_k > 0 \end{cases}$$

постоянные C_1 и C_2 находим из начальных условий;

$$\left. \begin{aligned} x_k &= 0 \\ x_k &= \xi \end{aligned} \right| t = 0$$

Исходя из полученного решения, вибросмещение корпуса будет зависеть от жесткости пружины, а именно, чем больше коэффициент жесткости C_n , тем меньше вибросмещение.

Случай 2. Ручное нажатие (рис. 1, б).

Сила нажатия в этом случае определится через импеданс руки человека I , который, по данным Шлобаха, равен $20 \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{м}$

$$Q = I \frac{dx_k}{dt} + Q_0, \text{ кг},$$

а уравнение движения корпуса молотка будет иметь вид

$$m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} + I \frac{dx_k}{dt} = A \cos \omega t + F \quad (3)$$

(обозначения те же).

Решая аналогичным способом уравнение (3), получим:

$$\begin{cases} x_k = C_1 e^{-\frac{\Gamma T}{m_k}} + \frac{AT_{II}^3 I}{(4\pi^2 m_k + I^2 T_{II}) 2\pi} \cdot \sin \omega t - \frac{Am_k T_{II}^2}{4\pi^2 m_k^2 + I^2 T_{II}^2} \cdot \cos \omega t \\ x_k > 0 \end{cases}$$

C_1 — находится из начальных условий.

Случай 3. Гажание пневмоподатчиком (рис. 1, в).

Усилие нажатия для данного случая (определено экспериментально)

$$Q = p_0 S_{II}.$$

Уравнение колебаний корпуса записывается:

$$m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} = A \cos \omega t + N, \quad (4)$$

где $N = \Delta F - p_0 \cdot S_{II}$.

Решение уравнения (4) находится путем двухкратного интегрирования

$$\begin{cases} x_k = -\frac{A}{\omega^2 m_k} \cdot \cos \omega t + \frac{F p_0 S_{II}}{2 m_k} \cdot t. \\ x_k > 0 \end{cases}$$

Как видно из полученных решений уравнений (1), (3) и (4), колебательное движение корпуса пневмомолотка существенно зависит от конструкции применяемого нажимного устройства.

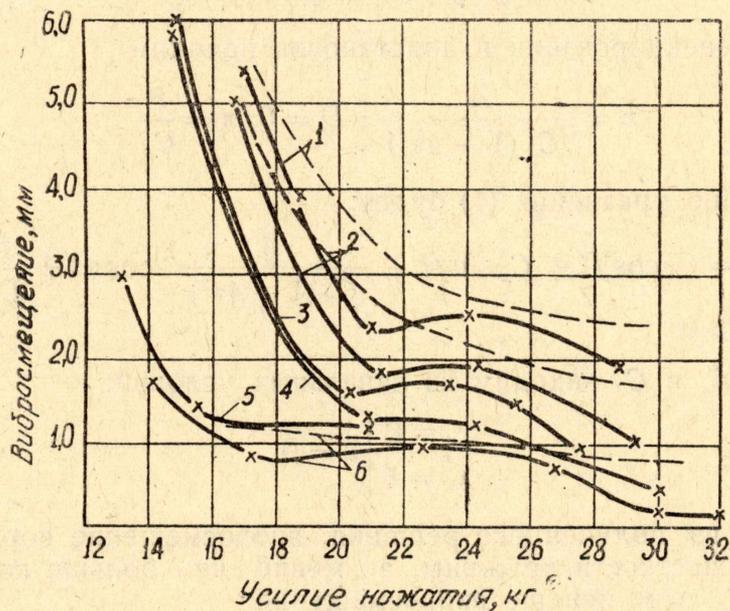


Рис. 3. Амплитудно-силовые зависимости молотка БСЗ-135 при различных нажимных устройствах.
1— $C_n = 1,8$ кг/мм, 2— $C_n = 1,3$ кг/мм, 3— $C_n = 0,5$ кг/мм,
4—ручное нажатие, 5— $C_n = 0,39$ кг/мм, 6—нажатие пневмоподатчиком

Подставив в решения уравнений (1), (3) и (4) значения постоянных конкретного пневматического молотка и задаваясь различными величинами предварительного поджатия, можно построить зависимость вибро смещения от усилия нажатия.

На рис. 3 показаны экспериментальные и теоретические зависимости вибрации от усилия нажатия для рубильного молотка БСЗ-135. Из

графиков видно, что характер экспериментальных (сплошных) кривых удовлетворительно совпадает с теоретическими (пунктирными) кривыми. Разница объясняется сделанными допущениями:

а) на теоретических кривых нет экстремальных значений, соответствующих плавающему и предельно основному режиму молотка, так как не учтены упругие силы, возникающие при посадке корпуса молотка на буртик инструмента;

б) теоретические кривые лежат несколько выше экспериментальных, так как при решении дифференциальных уравнений не учтены силы трения.

Точное решение уравнений колебаний корпуса молотка можно получить на счетно-решающей машине с учетом всех действующих сил.

Как видно из рис. 3, кривая 4, соответствующая вибро смещению корпуса молотка при ручном нажатии, находится между кривыми 3 и 6. Кривая 3 соответствует вибро смещению при нажатии пружиной с $C_n = 0,5 \text{ кг/мм}$, а кривая 6 — нажатие пневмоподатчиком. Оценка вибрации пневмомолотков в лабораториях должна соответствовать производственным условиям, то есть при нажатии рукой. Поэтому при лабораторных испытаниях ручных пневматических машин ударного действия этим требованиям удовлетворяют нажимные устройства пружинного типа с коэффициентом жесткости $0,3\text{--}0,5 \text{ кг/мм}$ или нажатие пневмоподатчиком.

Влияние поглотителей энергии ударов

Считаем, что для разных поглотителей нажатие осуществляется только пружиной. При нажатии пружиной $Q = C_n x_k$, а упругая сила, действующая через инструмент на корпус молотка

$$R = C_m \cdot x_k, \text{ при } x_k < 0,$$

где C_m — жесткость поглотителя энергии ударов, кг/см .

Это справедливо для случая, когда инструмент плотно прижат к корпусу. Тогда уравнение движения корпуса запишется в виде

$$m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} + (C_n - C_m) x_k = A \cos \omega t + F. \quad (5)$$

Рассмотрим некоторые из существующих поглотителей:

а) поглотитель энергии — металлическая болванка (стенд Г. С. Вильнера).

Осадку обрабатываемого материала можно найти из закона Гука

$$\Delta l = \frac{\Delta P l}{ES},$$

где l — толщина материала;

S — площадь контакта;

E — модуль упругости.

Считаем постоянными l и S , тогда $C_m = \frac{\Delta P}{\Delta l} = \frac{ES}{l}$, а решение уравнения (5) будет аналогично решению уравнения (1):

$$x_k = C_1 \cos \sqrt{\frac{IC_n - ES}{m_k l}} \cdot t + C_2 \sin \sqrt{\frac{IC_n - ES}{m_k l}} \cdot t + \frac{A}{\left(C_n - \frac{ES}{l}\right) (1 - 4\pi^2)} \cdot \cos \omega t + \frac{F}{C_n - \frac{ES}{l}};$$

б) поглотитель энергии—воздушный амортизатор (стенд С. И. Доброборского)

$$C_M = \frac{PS_{\Pi}}{x_K},$$

где S_{Π} — площадь поршня.

Так как процесс изотермический $P = \frac{p_0 V_0}{V_0 - S_{\Pi} x_K}$ и

$$C_M = \frac{p_0 V_0 S_{\Pi}}{x_K (V_0 - S_{\Pi} x_K)}, \text{ так как } x_K = 1,$$

$$\text{то } C_M = \frac{p_0 V_0 S_{\Pi}}{V_0 - S_{\Pi}}.$$

Решение уравнения (5) будет:

$$\begin{aligned} x_K = & C_1 \cos \sqrt{\frac{C_{\Pi}}{m_K} - \frac{p_0 V_0 S_{\Pi}}{(V_0 - S_{\Pi}) m_K}} \cdot t + \\ & + C_2 \sin \sqrt{\frac{C_{\Pi}}{m_K} - \frac{p_0 V_0 S_{\Pi}}{(V_0 - S_{\Pi}) m_K}} \cdot t + \\ & + \frac{A}{\left(C_{\Pi} - \frac{p_0 V_0 S_{\Pi}}{V_0 - S_{\Pi}}\right)} \cdot \cos \omega t + \frac{F}{C_{\Pi} - C_M}. \end{aligned}$$

Как видно из полученных решений, вибро смещение корпуса будет тем больше, чем больше модуль упругости или чем меньше давление

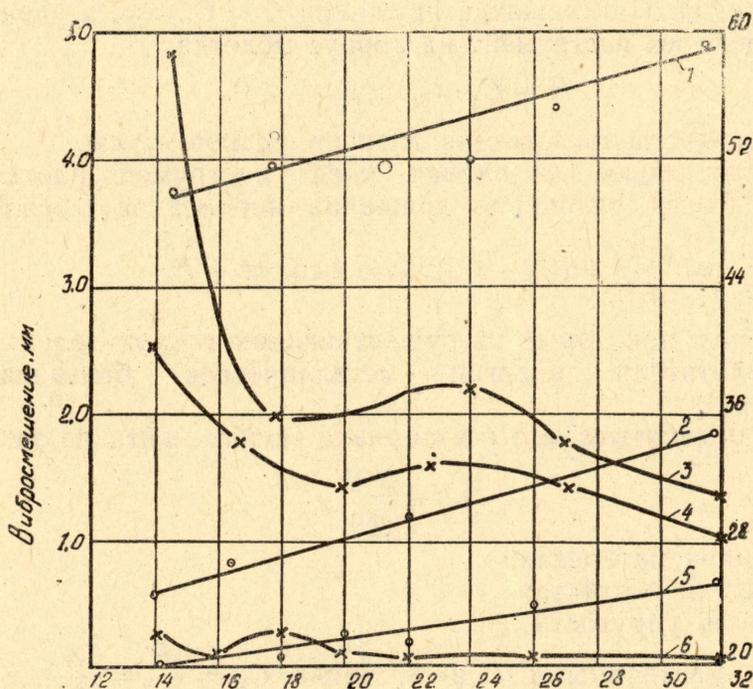


Рис. 4. Влияние усилия нажатия и свойств поглотителя энергии на величину вибрации молотка КЕ-16. 1, 2, 5 — виброускорение; 3, 4, 6 — вибро смещение при работе молотка соответственно на стенде ЭРД-3, при рубке чугуна и алюминия

воздуха под поршнем. Для проверки этих предположений были проведены исследования по замеру вибро смещения молотка КЕ-16. Молоток

устанавливался на стенде ЭРД-3, инструментом служило зубило со сферическим наконечником. Поглотителями энергии ударов были взяты: чугунная и алюминиевая болванки и поршневое пневматическое устройство.

Результаты испытаний приведены на рис. 4, они совпадают с результатами решения уравнения (5). Так как поглотители энергии ударов оказывают значительное влияние на величину вибро смещения, а результаты лабораторных испытаний должны совпадать с производственными, необходимо вести исследование с поглотителями энергии ударов из тех материалов, по которым ведется рубка или клепка пневмомолотками. При этом может представиться случай, когда измерительная аппаратура, вследствие малой чувствительности, небольшой зоны линейности или вследствие небольших размахов колебаний не позволяет измерять вибрационные параметры (смещение, скорость, ускорение). В этом случае рекомендуется использовать материалы с большим модулем упругости (каленая сталь $E = 2,2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$) или с меньшей упругостью (алюминий $E = 0,7 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$, свинец $E = 0,18 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$) или другой поглотитель энергии, а затем, используя полученное соотношение, пересчитать на исходный материал, т. е. применить метод физического моделирования.

Экспериментально установлено, что с увеличением усилия нажатия увеличивается виброускорение. Это видно из дифференциального уравнения движения корпуса молотка, так как с увеличением статического нажатия, а также упругости обрабатываемого материала должно расти виброускорение $\frac{d^2 x_k}{dt^2}$. Таким образом, оценку вибрации пневмомолотков можно вести не только по вибро смещению, но и по величине виброускорения, что сравнительно легко решается применением серийных приборов типа ПИУ-1, ПИУ-2.

Выводы

1. При лабораторном исследовании вибрации машин ударного действия необходимо, чтобы нажимное устройство обеспечивало такие вибро смещения молотка, какие наблюдаются в производственных условиях при нажатии рукой. Таким требованиям отвечают цилиндрические винтовые пружины с коэффициентом жесткости 0,3—0,5 кг/мм и пневматический податчик.

2. Для совпадения результатов лабораторных испытаний с производственными необходимо применять поглотители энергии ударов, изготовленные из материалов, по которым ведется технологический процесс (рубка, клепка). Если измерительная аппаратура не позволяет измерить вибрационные параметры (смещение, скорость, ускорение), то рекомендуется брать материал с меньшим модулем упругости (алюминий, свинец) и полученные данные пересчитать на исходный материал.

3. Экспериментально установлено, что с увеличением усилия нажатия и упругости поглотителя энергии увеличивается виброускорение рукоятки молотка. Таким образом, оценку вибрации ручных машин ударного действия можно производить по величине вибрационного ускорения.