

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.23.05

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ЗАМЫКАНИЯ УПРУГОГО КЛАПАНА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПНЕВМОМОЛОТА

В. В. Червов, И. В. Тищенко

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: chervov@misd.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрено влияние радиального смещения ударника в корпусе на систему воздухораспределения пневмомолота с кольцевым упругим клапаном. Рассчитан минимально допустимый объем камеры обратного хода при контакте ударника с наковальной в крайнем переднем его положении с учетом ограничения максимального давления в передней камере в момент удара. В качестве критерия работоспособности пневмомолота предложена длина механического замыкания упругого клапана, компенсирующая поворот ударника в корпусе вследствие увеличенного радиального зазора между этими деталями. Проведена оценка параметров системы воздухораспределения всего типоразмерного ряда пневмомолотов с механическим замыканием кольцевого упругого клапана.

Пневмомолот, упругий клапан, давление воздуха, объем камеры, зазор, ход ударника, диаметр камеры

DOI: 10.15372/FTPRPI20170507

Пневмомолоты и вибропогружатели [1] широко используются в строительных работах, связанных с погружением в грунт стальных труб, профилей и продольных элементов при бесшланговой прокладке подземных коммуникаций, устройстве подпорных стен, креплении откосов насыпей и котлованов.

Создание в 90-х гг. прошлого века пневматических молотов серии “Тайфун” с переменной структурой ударной мощности привело к расширению применения машин данного типа в подземном строительстве [2, 3] и к разработке типоразмерного ряда пневмомолотов с разными массогабаритными характеристиками. Каждый из них, в сравнении с аналогами, обладает более высокими энергетическими показателями при сниженном удельном расходе воздуха [4, 5], надежным запуском и устойчивой работой независимо от протяженности воздухоподводящей магистрали. Важным достоинством пневмомолотов является переменная структура ударной мощности, которая дает возможность изменять частотную компоненту и расходную характеристику при постоянном значении энергии единичного удара [6]. Это позволяет согласовывать режим работы таких устройств с выходными параметрами компрессорных станций, эффективно применять оборудование для вертикального забивания стальных труб без использования копровых установок, вести работы на склонах оврагов и насыпей, в пойменных и заболоченных местах, по берегам рек и водоемов при наличии подходящего грузоподъемного крана.

Надежность работы пневмомолота обеспечивается правильным выбором основных конструктивных параметров воздухораспределительной системы, главным элементом которой является кольцевой упругий клапан, расположенный на ударнике и управляющий выхлопом из камеры обратного хода [7, 8]. Размеры клапана и окружающих его контактных поверхностей определяют настройку системы воздухораспределения, которая осуществляется изменением сечения (диаметра) жиклера, влияющего на расход сжатого воздуха, поступающего из камеры прямого в камеру обратного хода по каналу в ударнике [9].

Для оценки влияния длины хода ударника на изменение частоты ударов введено понятие [10] коэффициента K_x — отношения длины рабочего хода x_p пневмомолота к диаметру камеры прямого хода D_1 :

$$K_x = x_p / D_1. \quad (1)$$

Этот коэффициент также характеризует соотношение габаритных размеров и условно подразделяет пневмомолоты на две группы: короткоходовые ($K_x \leq 1$) и длинноходовые ($K_x > 1$). Внешней отличительной особенностью устройств первой группы по сравнению со второй является существенно меньшая длина корпуса при одинаковых поперечных размерах.

Особенностью конструкции пневмомолота с кольцевым упругим клапаном является увеличенный на порядок посадочный зазор Δ между ударником и корпусом (рис. 1, 2) по сравнению с пневмопробойником [11], что в значительной мере снижает требования к точности обработки поверхностей и упрощает изготовление деталей. Большой зазор в сопряжении ударника и корпуса практически исключает возможность их взаимного заклинивания при попадании во внутреннюю полость твердых посторонних частиц и снижает риск остановки при обмерзании. Это повышает надежность работы пневмомолота в сложных эксплуатационных условиях и при действии внешних отрицательных температур окружающего воздуха [12].

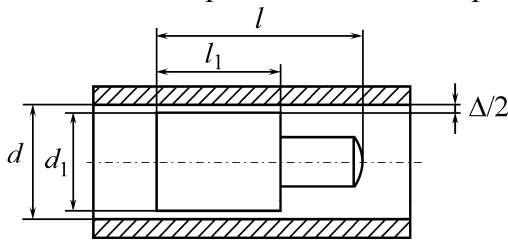


Рис. 1. Идеальное расположение ударника в корпусе: оси вращения (симметрии) деталей совпадают: l — длина ударника; l_1 — длина направляющей ударника; d — диаметр направляющего отверстия; d_1 — диаметр направляющей ударника

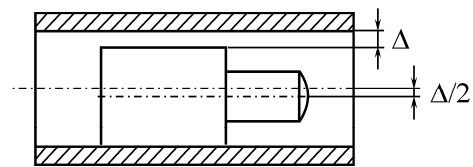


Рис. 2. Параллельное смещение ударника в корпусе при горизонтальном положении пневмомолота: Δ — зазор по направляющей

При горизонтальном расположении пневмомолота оси симметрии корпуса и ударника параллельны друг другу (рис. 2) и имеют максимальное смещение относительно друг друга, равное $\Delta/2$.

Угол ω поворота ударника в одну сторону до упора из положения параллельного смещения при $l_{db} = l_1$ (рис. 3) составит:

$$\omega = \arctg(\Delta/l_1). \quad (2)$$

При этом полная амплитуда углового отклонения ω_{\max} будет находиться в пределах

$$\omega_{\max} = 2\omega = 2\arctg(\Delta/l_1). \quad (3)$$

Поперечное смещение δ центра сферы передней головной части ударника относительно наковальни, соединенной с корпусом, определяется из выражения

$$\delta = l_{ca} \tan \omega, \quad (4)$$

где $l_{ca} = l - l_1/2$ (рис. 1, 3).

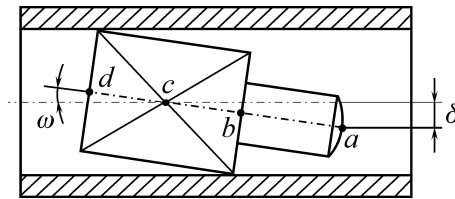


Рис. 3. Поворот (в одну сторону) ударника в корпусе до упора

Максимальный или суммарный разворот ударника в корпусе представляет собой его дрейф в пределах радиального зазора ходовой посадки деталей, который складывается из перемещений переднего торца ударника при повороте до упора в одну сторону (по часовой стрелке) и в другую (против часовой стрелки), поэтому при перемещении точки a из одного крайнего положения в другое максимальное поперечное смещение относительно наковальни будет равно $\delta_{\max} = 2\delta$.

Поперечное смещение δ передней части ударника относительно наковальни в пределах радиального зазора ходовой посадки деталей может привести к образованию зазора между кольцевым упругим клапаном и конической поверхностью наковальни и тем самым нарушить герметичность камеры обратного хода. В этом случае сжатый воздух через зазор будет выходить в атмосферу. Давление в камере обратного хода не повысится, и ударник не совершит обратный ход. Для обеспечения надежной работы пневмомолота необходимо скомпенсировать дрейф ударника за счет увеличенного смятия периферийного края кольцевого упругого клапана при перемещении ударника вперед на длину замыкания x_0 (рис. 4).

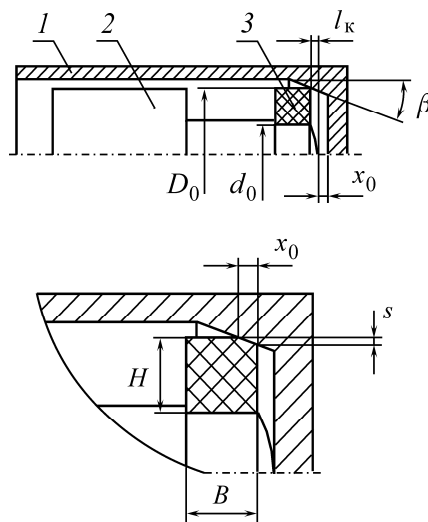


Рис. 4. Смятие кольцевого упругого клапана при замыкании камеры обратного хода: 1 — наковальня (корпус); 2 — ударник; 3 — кольцевой упругий клапан

Фактическое поперечное смещение δ' кольцевого упругого клапана будет меньше из-за его расположения на расстоянии l_k от переднего торца ударника (рис. 4):

$$\delta' = \frac{\delta(l - l_2 / 2 - l_k)}{l - l_2 / 2}. \quad (5)$$

Условие надежного (полного) замыкания может быть достигнуто за счет достаточного радиального смятия s края кольцевого упругого клапана пневмомолота:

$$s > \delta',$$

где $s = x_0 \tan \beta$ — радиальное смятие кольцевого упругого клапана.

Длина замыкания x_0 или осевое смятие должна быть больше, чем $\delta' / \tan \beta$. Угол замыкания β является углом наклона образующей конической поверхности наковальни. Для всех пневмомолотов он получен опытным путем и равен 10° [8].

Степень радиального смятия η_H (%) кольцевого упругого клапана зависит от толщины сечения H , т. е. наружного D_0 и внутреннего d_0 диаметров (рис. 4):

$$H = \frac{D_0 - d_0}{2}, \quad \eta_H = 100 \cdot s / H. \quad (6)$$

Степень осевого смятия η_B (%) кольцевого упругого клапана определяется шириной сечения B :

$$\eta_B = 100 \cdot x_0 / B. \quad (7)$$

Паразитный или “мертвый” объем передней камеры v_0 образуется поверхностями ударника, наковальни (корпуса) и кольцевого упругого клапана (рис. 4) в тот момент, когда ударник наносит удар по наковальне. В конце прямого хода перед ударом на расстоянии x_0 от поверхности соударения происходит касание внутренней конической поверхности наковальни упругим кольцевым клапаном и отсечка камеры обратного хода от выхлопного тракта, давление в котором равно атмосферному p_0 . При дальнейшем движении ударника до крайнего переднего положения происходит уменьшение объема камеры обратного хода на Δv_2 , и в ней в момент удара повышается давление до максимального $p_{2\max}$. Значение предударной скорости перемещения ударной массы находится в диапазоне 4–4.5 м/с [12, 13].

Давление $p_{2\max}$ не должно быть больше, чем давление сжатого воздуха в камере прямого хода p_1 (в магистрали), из которой по каналу в ударнике воздух поступает в камеру обратного хода $p_{2\max} \leq p_1$. В случае превышения давления воздух по каналу в ударнике будет возвращаться в магистраль. Кроме того, произойдет уменьшение предударной скорости и снижение энергии удара. При большом подъеме давления $p_{2\max}$ энергоносителя и сильном торможении ударника эффект соударения может полностью исчезнуть.

Максимальное давление $p_{2\max}$ находится в прямой зависимости от степени сжатия ε камеры обратного хода:

$$\varepsilon = 1 + \frac{\Delta v_2}{v_0}, \quad \Delta v_2 = \frac{\pi D_0^2}{4} x_0. \quad (8)$$

Так как $p v^n = \text{const}$, то

$$\varepsilon = \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{1/n}.$$

При $n = 1.25$ $p_1 = 0.7$ МПа, $p_0 = 0.1$ МПа, $\varepsilon = 4.74$.

Из формул (8) минимальный паразитный (“мертвый”) объем камеры обратного хода

$$v_0 = 4.76 x_0 D_0^2. \quad (9)$$

По формулам (1)–(4) для всего типоразмерного ряда пневмомолотов [14] выполнен расчет коэффициента K_x длины рабочего хода, угла ω поворота ударника и поперечного смещения δ передней части ударника относительно наковальни, которая наносит удар (табл. 1), а по формулам (5)–(7) и (9) — расчет фактического поперечного смещения δ' , толщины сечения H , степени радиального η_H и осевого η_B смятия, минимального паразитного объема v_0 камеры обратного хода (табл. 2).

ТАБЛИЦА 1. Конструктивные параметры пневмомолота по формулам (1)–(4)

Пневмомолот	X_p , мм	D_1 , мм	K_x	l , мм	l_1 , мм	d , мм	d_1 , мм	ω , град	δ , мм
T-4	53	38	1.39	355	240	53.1	52.85	0.06	0.24
T-8	65	55	1.18	375	318	78.1	77.7	0.07	0.27
T-40	120	95	1.26	530	315	135.1	134.65	0.08	0.53
T-70	137	95	1.44	950	663	135.1	134.65	0.04	0.42
T-100	119	150	0.79	620	400	210.2	209.6	0.09	0.63
T-130	149	150	0.99	800	500	210.2	209.6	0.07	0.63
T-140	110	175	0.63	660	389	240.1	239.5	0.09	0.73
T-150	76	150	0.50	665	419	240.1	239.5	0.08	0.66
T-190	180	150	1.20	1095	754	210.2	209.6	0.05	0.57
T-300	150	220	0.68	740	366	340.1	339.15	0.15°	1.45
T-320	231	175	1.32	1380	989	240.1	239.5	0.04	0.55
T-500	210	220	0.95	1195	750	340.1	339.15	0.07	1.04
T-740	270	220	1.23	1730	1250	340.1	339.15	0.04	0.84

Примечание. Здесь и в табл. 2 число в маркировке пневмомолота означает массу ударника в кг; жирным шрифтом выделены короткоходовые пневмомолоты при $K_x \leq 1$.

Длина замыкания x_0 для всего типоразмерного ряда пневмомолотов с широким диапазоном значений масс ударника от 4 до 740 кг варьирует от 1.23 до 6.29 мм (табл. 2). У длинноходовых пневмомолотов этот диапазон в среднем имеет меньшие значения: 1.23–4.20 мм, у короткоходовых находится в пределах 2.93–6.29 мм. Это обусловлено фактическим поперечным смещением δ' упругого клапана в результате дрейфа ударника в корпусе пневмомолота.

ТАБЛИЦА 2. Конструктивные параметры пневмомолота по формулам (5)–(7) и (9)

Пневмомолот	l_k , мм	δ' , мм	x_0 , мм	H , мм	η_H , %	B , мм	η_B , %	d_0 , мм	v_0 , см ³
T-4	27	0.22	1.23	6	3.6	6	20	42	0.45
T-8	42	0.22	1.97	10	2.2	8	16	62	1.00
T-40	79	0.42	2.38	17	2.5	13	18	112	6.25
T-70	73	0.37	2.10	17	2.2	13	16	112	5.52
T-100	56	0.55	3.10	25	2.2	19	16	175	19.88
T-130	101	0.54	3.06	25	2.2	19	16	175	19.62
T-140	109	0.56	3.17	29.5	1.9	25	13	204	27.21
T-150	101	0.52	2.93	25	2.1	19	15	175	18.48
T-190	116	0.48	2.72	25	2.7	19	14	175	17.44
T-300	130	1.11	6.29	40	2.8	40	16	264	91.84
T-320	110	0.48	2.71	29.5	1.6	25	11	204	23.28
T-500	130	0.87	4.96	40	2.2	40	12	264	72.42
T-740	130	0.74	4.20	40	1.9	40	11	264	61.40

Значения радиального смятия η_H имеют пределы 1.6–3.6%, осевого смятия η_B — 11–20% деформации кольцевого упругого клапана. Это свидетельствует о нормальных условиях работы кольцевого упругого клапана в реальных машинах, что подтверждается его надежностью в результате длительной эксплуатации всех пневмомолотов на строительных объектах [14]. При одинаковых размерах D_0 кольцевого упругого клапана самые большие “мертвые” объемы требуются короткоходовым пневмомолотам.

В качестве примера влияния степени сжатия ε камеры обратного хода на максимальное давление на рис. 5 представлены индикаторные диаграммы давлений p_1 (в камере прямого хода) и p_2 (в камере обратного хода) опытного образца пневмомолота Т-4 при его работе на стенде. Данные диаграммы повторяют общий характер изменения давления любого пневмомолота из типоразмерного ряда [10].

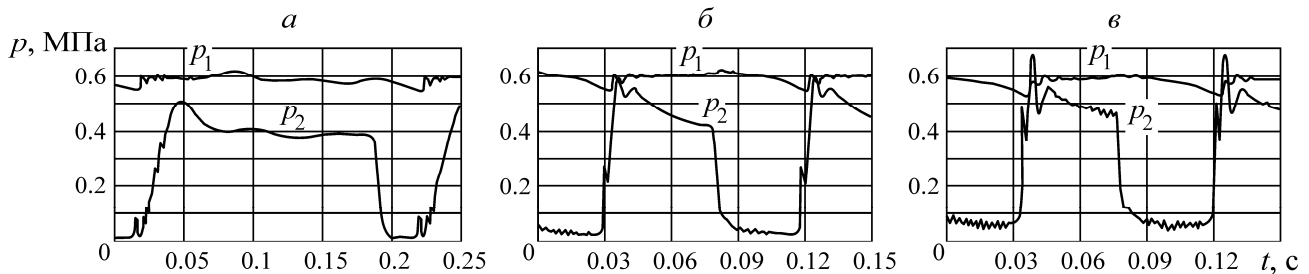


Рис. 5. Индикаторные диаграммы давления при частоте ударов: *a* — минимальной ($f=4.62$ Гц, диаметр 2 мм); *б* — средней ($f=11.31$ Гц, диаметр 4 мм); *в* — максимальной ($f=11.52$ Гц, диаметр 5 мм)

Фактический (измеренный) “мертвый” объем камеры обратного хода пневмомолота Т-4 равен 7.47 см^3 , что значительно больше расчетного минимально допустимого значения $v_0 = 0.45 \text{ см}^3$. Следовательно, фактическая степень сжатия будет существенно меньше $\varepsilon = 1.23$, что обеспечит нормальное воздухораспределение на всех настройках пневмомолота в широком диапазоне изменения частоты ударов. При малой частоте ударов $f = 4.62$ Гц давление p_2 не достигает p_1 (рис. 5*a*). При увеличении диаметра жиклера до 4–5 мм усиливается подпитка камеры обратного хода и p_2 достигает p_1 (рис. 5*б*). Давление в камере обратного хода в момент удара немного превышает давление в камере прямого хода (рис. 5*в*). Дальнейший рост диаметра жиклера, несмотря на большой расход воздуха, не увеличивает частоту ударов. Таким образом, жиклер диаметром 4 мм соответствует режиму насыщения пневмомолота с массой ударника 4 кг.

ВЫВОДЫ

Значительное радиальное смятие периферийного края упругого кольцевого клапана за счет его осевого смятия позволяет применять в пневмомолоте увеличенные зазоры ходовой посадки ударника в корпусе. Это гарантирует надежную работу пневмомолота при больших зазорах, которые появляются из-за износа основных деталей в результате трения. Большой зазор препятствует заклиниванию ударника в корпусе вследствие обмерзания в условиях отрицательных температур окружающего воздуха или при случайном попадании твердых частиц (песка) в зазор.

Увеличенный зазор в сопряжении и отсутствие влияния износа деталей на работу пневмомолота дает возможность существенно уменьшить твердость контактируемых поверхностей ударника и корпуса, отказаться от их цементации и ограничиться простым улучшением структуры металла для повышения их объемной прочности.

Нормальные условия работы кольцевого упругого клапана в машинах обеспечиваются при минимальных значениях радиального смятия, которые находятся в пределах 1.6–3.6%. Надежность работы машин определяется большими допустимыми значениями осевого смятия кольцевого упругого клапана в диапазоне 11–20%, которая подтверждена длительной и экономичной эксплуатацией всех пневмомолотов на строительных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В., Червов В. В., Гилета В. П., Ванаг Ю. В.** Резервы повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных элементов в технологиях специальных строительных работ // ФТПРПИ. — 2008. — № 5. — С. 72–80.
2. **Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В., Червов В. В.** Перспективы совершенствования пневмомолотов для специальных строительных работ // ФТПРПИ. — 2009. — № 4. — С. 65–75.
3. **Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Трубицын В. В., Тищенко И. В., Вебер И. Э.** Новые пневмоударные машины “Тайфун” для специальных строительных работ // Механизация строительства. — 1997. — № 7. — С. 12–17.
4. **Смоляницкий Б. Н., Червов В. В.** Повышение эффективности использования энергоносителя в пневмомолотах для подземного строительства // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 157–168.
5. **Червов В. В.** Энергия удара пневмомолота с упругим клапаном в камере обратного хода // ФТПРПИ. — 2004. — № 1. — С. 80–89.
6. **Тищенко И. В., Червов В. В., Смоляницкий Б. Н.** Обоснование конструктивной схемы пневмомолота с плавной регулировкой частоты ударных импульсов // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 110–117.
7. **Пат. 2462575 РФ.** Устройство ударного действия / В. В. Червов, Б. Н. Смоляницкий, В. В. Трубицын, А. В. Червов, И. В. Тищенко // Опубликовано в БИ. — 2012. — № 27. — 16 с.
8. **Червов В. В., Червов А. В.** Определение условий работоспособности кольцевого упругого клапана пневмомолота с переменной структурой ударной мощности // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 72–79.
9. **Червов В. В.** Управление впуском воздуха в камеру обратного хода пневмоударного устройства // ФТПРПИ. — 2003. — № 1. — С. 74–82.
10. **Червов В. В., Смоляницкий Б. Н.** Экспериментальная оценка диапазона изменения энергетических параметров пневмомолота с механическим замыканием упругого клапана // ФТПРПИ. — 2016. — № 5. — С. 92–98.
11. **Гурков К. С., Климашко В. В., Костылев А. Д., Плавских В. Д., Русин Е. П., Смоляницкий Б. Н., Тупицын К. К., Чепурной Н. П.** Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990. — 213 с.
12. **Червов В. В., Червов А. В.** Температура сжатого воздуха и выхлопа в пневмомолоте с упругим кольцевым клапаном // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2014. — № 1. — Т. 2. — С. 192–198.
13. **Тищенко И. В., Червов В. В.** Влияние энергетических параметров генераторов ударных импульсов на амплитуду и скорость внедрения трубы в грунт // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 75–86.
14. **Червов В. В.** Результаты промышленных испытаний пневмомолотов “Тайфун” при проведении специальных строительных работ // Механизация строительства. — 2011. — № 6. — С. 6–10.

Поступила в редакцию 4/VII 2017