

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.23.05

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДИАПАЗОНА ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОМОЛОТА С МЕХАНИЧЕСКИМ ЗАМЫКАНИЕМ УПРУГОГО КЛАПАНА

В. В. Червов, Б. Н. Смоляницкий

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

Приведены и обсуждаются результаты экспериментальной оценки реального диапазона изменения параметров пневмомолота с кольцевым упругим клапаном в выхлопном тракте камеры обратного хода ударника для ее механического замыкания при различных значениях хода ударника до выхлопа и с учетом особенностей выхлопа у нижней границы частотного диапазона. Установлены диапазоны изменения сечения дроссельного канала, обеспечивающие устойчивую работу пневмомолота и минимальный или близкий к нему удельный расход воздуха независимо от массы ударника, расположения пневмомолота (вертикальное или горизонтальное) и отношения длины рабочего хода ударника к диаметру камеры его рабочего хода.

Пневмомолот, упругий клапан, удельный расход воздуха, частота ударов, дроссельный канал, ход ударника

Энергия удара является основной составляющей ударной мощности пневмомолота, обуславливающей максимальную длину и перемещение под действием одного удара забиваемого в грунт конструктивного элемента — трубной плети при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций, двутавра, швеллера или шпунта при сооружении подпорных стен [1]. При достижении энергии удара, обеспечивающей достаточное перемещение забиваемого в грунт конструктивного элемента за один удар, скорость проходки при прочих равных условиях определяется второй составляющей ударной мощности — частотой ударов [2, 3].

В работе [4] показано, что в пневмомолоте “Тайфун” с упругим клапаном, устанавливаемым в выхлопном тракте камеры обратного хода ударника и осуществляющим ее механическое замыкание, регулирование частоты ударов достигается путем изменения сечения дроссельного канала, сообщающего рабочие камеры, при неизменном ходе ударника до выхлопа. В этом случае в процессе изменения частоты ударов энергия удара сохраняется на постоянном уровне.

Экспериментально установлено, что при увеличении площади сечения дроссельного канала сначала наблюдается интенсивное повышение частоты ударов, затем происходит замедление ее роста и стабилизация практически на одном уровне, являющемся верхней границей частотного диапазона пневмомолота.

При достижении предельной частоты ударов пневмомолота за счет увеличения сечения жиклера основное средство ее дальнейшего повышения — уменьшение рабочего хода ударника, так как дальнейшее увеличение сечения жиклера вызывает только увеличение расхода воздуха без изменения частоты ударов [4].

Уменьшение рабочего хода ударника приводит к пропорциональному снижению энергии единичного удара. Для ее сохранения необходимо увеличить магистральное давление [5] или при отсутствии такой возможности — площадь поперечного сечения ударника со стороны камеры прямого хода. Однако при увеличении частоты и неизменной энергии удара возрастет расход воздуха, поэтому при ограниченном расходе воздуха повышение частоты ударов достигается только за счет снижения энергии удара.

По результатам проведенных исследований в лаборатории механизации горных работ ИГД СО РАН разработан и изготовлен пневмомолот “Тайфун-300” с ударной частью массой 300 кг (рис. 1), особенностью которого является сниженный рабочий ход и увеличенная площадь сечения камеры прямого хода.



Рис. 1. Пневмомолот “Тайфун-300” на вертикальном стенде

Другим реализованным вариантом пневмомолота, в котором повышение частоты ударов достигнуто за счет применения более высокого магистрального давления воздуха, служит полноразмерный опытный образец пневмомолота “Тайфун-150” с ударной массой 150 кг. Его особенность — уменьшенный рабочий ход ударника при сохранении площади со стороны камеры прямого хода. Это первые высокочастотные пневмомолоты с упругим клапаном и значительной массой ударника, позволяющие проводить работы по бестраншейной прокладке трубопроводов и забиванию в грунт вертикально расположенных конструктивных элементов при подземном строительстве.

С целью обоснования рациональной настройки рабочего цикла и подтверждения отмеченных результатов проведено экспериментальное исследование пневмомолотов “Тайфун-300”, “Тайфун-500” и “Тайфун-740” с одинаковым диаметром корпуса, но с разным ходом ударника до выхлопа — 0.15, 0.21 и 0.27 м и его массой — 300, 500 и 740 кг соответственно. Каждый из пневмомолотов устанавливался в стенде (рис. 1) вертикально и прижимался к энергопоглотителю пневматическим стяжным устройством. Энергопоглотитель расположен в нижней части стенда и представляет собой поршневую камеру, заполненную уплотненной деревянной стружкой. Параметры каждого из пневмомолотов определялись на вертикальном и горизонтальном стенде (рис. 2). В ходе экспериментов изменялось сечение дроссельного канала ударника путем последовательной установки жиклеров диаметром 0.01, 0.013 и 0.015 м и записывались индикаторные диаграммы давления воздуха в камерах прямого и обратного хода, по которым определялись энергия и частота ударов [6]. Дополнительно регистрировался расход воздуха.

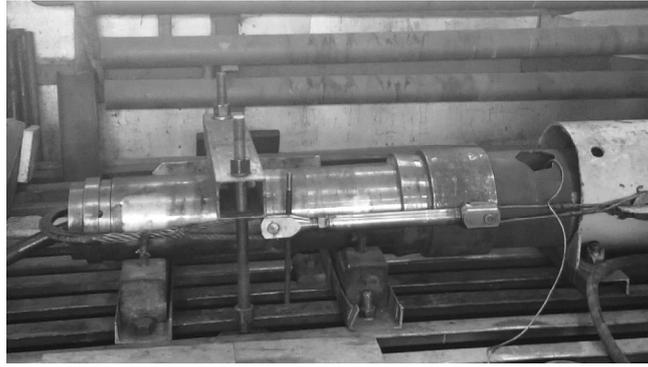


Рис. 2. Пневмомолот “Тайфун-300” на горизонтальном стенде

На рис. 3а показана диаграмма изменения давлений в рабочих камерах пневмомолота “Тайфун-300” с жиклером диаметром 0.010 м. Она свидетельствует о том, что при достаточно малом сечении жиклера работа устройства временами стабильна с постоянной частотой ударов $f = 1.2$ Гц. Однако наблюдалось и нарушение ритмичной работы пневмомолота.

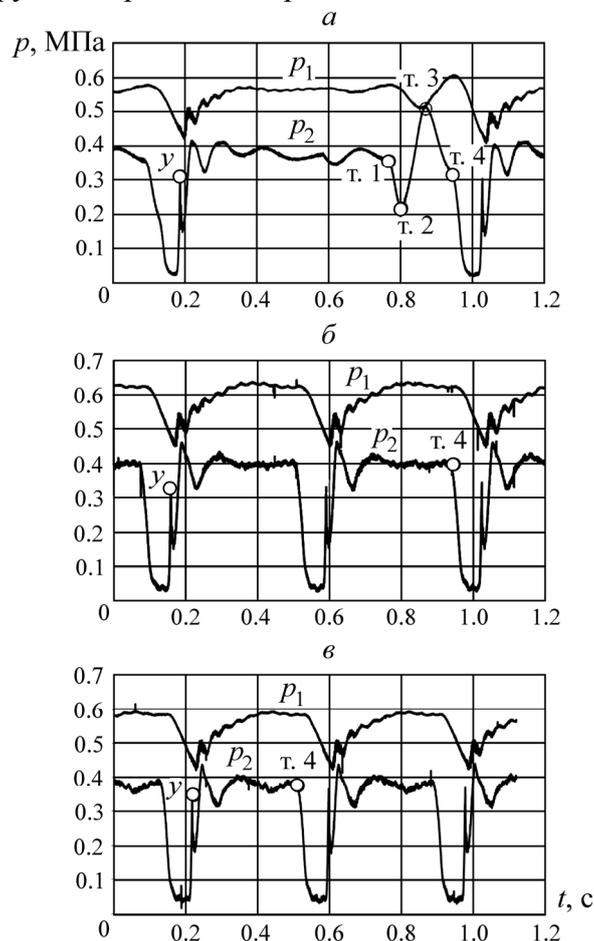


Рис. 3. Индикаторные диаграммы рабочего цикла пневмомолота “Тайфун-300” с жиклером диаметром 0.010 м (а); 0.013 м (б) и 0.015 м (в); точка у — момент удара

Это можно объяснить тем, что в т. 1 происходило падение давления p_2 в камере обратного хода ударника (рис. 3а) вследствие ее разгерметизации, совпадающей с началом открытия выхлопных пазов. Из-за уменьшения p_2 нарушался баланс сил, действующих на ударник, и он

под действием давления p_1 останавливался и начинал перемещаться вперед. При этом происходило закрытие выхлопных пазов и прекращение начавшегося выхлопа воздуха в атмосферу. Падение p_2 прекращалось в т. 2, и ударник двигался вперед, сжимая воздух в камере обратного хода, до своей остановки (без удара) действием давления p_2 в т. 3. Наблюдаемое изменение p_2 не обеспечивало надежную работу упругого клапана в режиме начала выхлопа воздуха из камеры обратного хода, которая достигается гарантированным превышением упругих сил, возникающих при растяжении клапана, над растягивающими силами, резко уменьшающимися после падения давления p_2 в первой фазе выхлопа.

Прерванный выхлоп происходил вследствие недостаточной для стабильной работы пневмомолота скорости движения ударника назад из-за малого сечения дроссельного канала, который препятствовал более интенсивному наполнению камеры обратного хода сжатым воздухом и достижению требуемой скорости его перемещения в первой фазе выхлопа. В т. 3 прекращался рост давления p_2 из-за остановки ударника и выравнивания p_2 и p_1 в камерах обратного и рабочего хода, которые сообщаются по дроссельному каналу в ударнике. После этого ударник вновь начинал двигаться в обратном направлении, но уже с повышенной скоростью под действием возросшего давления до своего крайнего заднего положения.

Скорость обратного хода ударника становилась достаточной для полного заброса ударника назад и обеспечения необходимого открытия выхлопных каналов и успешного завершения первой фазы выхлопа. Благодаря достаточному открытию выхлопных каналов, в т. 4 начиналась вторая фаза — сжатие упругого клапана и полный выхлоп воздуха из камеры обратного хода, которая успешно заканчивалась за счет правильной работы упругого клапана. Если прерывания выхлопа не происходило, то с наименьшим жиклером диаметром 10 мм продолжительность полного цикла работы уменьшалась, а частота ударов увеличивалась и становилась равной 1/5 Гц. Таким образом, рассмотренный режим настройки пневмомолота “Тайфун 300” не стабилен и нерационален.

На рис. 3б показана индикаторная диаграмма при диаметре жиклера 0.013 м. В этом случае работа пневмомолота “Тайфун-300” стабильна, частота ударов $f = 2.2$ Гц. На рис. 3в представлена индикаторная диаграмма при наибольшем диаметре жиклера, равном 0.015 м, и частоте ударов пневмомолота $f = 2.4$ Гц.

Сравнение этих результатов показывает, что увеличение площади сечения жиклера на 33% дало рост частоты ударов всего на 18%: с 2.2 до 2.6 Гц. При этом расход воздуха увеличился на 28%. При наибольшем диаметре жиклера в камере обратного хода наблюдалось возрастание остаточного давления, свидетельствующее о неполном ее опорожнении при выхлопе. Это снижало скорость движения ударника перед ударом и увеличивало потери энергии удара. Повышать частоту ударов дальнейшим увеличением сечения жиклера становилось нерациональным. Подобная картина влияния сечения дроссельного канала на рабочий цикл наблюдалась и у других исследованных пневмомолотов.

Для оценки влияния длины хода ударника до выхлопа на изменение частоты ударов введен коэффициент хода ударника $K_x = x/d_1$ — отношение длины рабочего хода x ударника к диаметру камеры его рабочего хода d_1 . Он дает возможность условно подразделять все пневмомолоты на две группы [7]: короткоходовые высокочастотные ($K_x \leq 1$) и длинноходовые низкочастотные ($K_x > 1$). Внешне при одинаковом диаметре корпуса они отличаются длиной, которая

у короткоходового пневмомолота заметно меньше по сравнению с длинноходовым. Влияние коэффициента K_x на частоту ударов пневмомолота при изменении сечения дроссельного канала также оценена экспериментально по индикаторным диаграммам.

На рис.4 приведены зависимости частоты ударов пневмомолотов с различной массой ударной части и одинаковом диаметре корпуса от сечения дроссельного канала. Установлено, что в исследованном диапазоне изменения сечения канала для всех пневмомолотов наблюдается устойчивый рост частоты ударов, причем наибольшее значение $f = 2.9 - 1.8$ Гц получено в пневмомолоте с наименьшей длиной рабочего хода $x = 0.15$ и ударником массой 300 кг. В диапазоне $150 - 200$ мм² изменения сечения дроссельного канала отмечена тенденция стабилизации частоты ударов. Интенсивность снижения частоты ударов выше у пневмомолотов с более высоким ходом ударника до выхлопа.

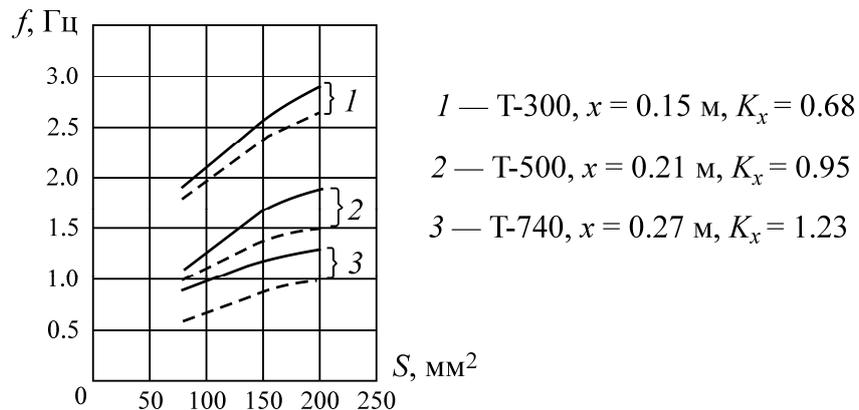


Рис. 4. Зависимость частоты ударов пневмомолотов от сечения дроссельного канала: сплошная линия — горизонтальное расположение пневмомолота; штриховая — вертикальное

Помимо частоты ударов и энергии большое значение для эффективной эксплуатации пневмомолотов имеет расход воздуха Q . Он так же, как и частота ударов, был измерен у пневмомолотов с массой ударника 300, 500 и 740 кг при их горизонтальном и вертикальном расположении.

Для определения расхода воздуха использовался расходомер производства компании CS Instruments (Германия), способный определять массовый или объемный расход сжатого воздуха и относящийся к классу термических (термоанемометрических) измерительных приборов данного типа. Принцип его действия базируется на изменении температуры подогреваемого тела, помещенного в вентиляционную струю газовой среды и заключается в измерении скорости воздушного потока в отдельной точке подводящей магистрали с последующим вычислением расхода путем умножения данной величины на площадь поперечного сечения трубы и поправочный коэффициент, зависящий от характера движения газа [8–10].

При измерении расхода воздушный поток, проходя по измерительному участку трубопровода, вызывал охлаждение термосопротивлений нагревательного элемента датчика. Полученный от датчика аналоговый сигнал поступал в измерительно-регистрирующий модуль для вычисления расходных показателей в стандартных объемных единицах. Операция выполнялась путем перемножения значения массового расхода на коэффициент приведения плотности сжатого газа к нормальным условиям (давление 1000 кПа, температура 200 °С) [8–10].

Согласно зависимостям, приведенным на рис. 5, расход воздуха Q при горизонтальном расположении пневмомолота имеет более высокие значения, чем при вертикальном (рис. 5). Расход имеют пневмомолоты с $K_x < 1$, т. е. высокочастотные короткоходовые.

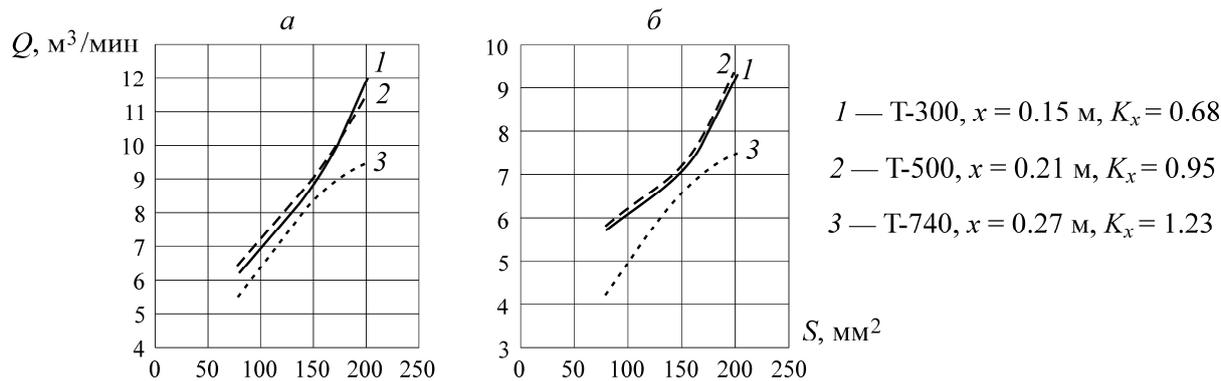


Рис. 5. Зависимость расхода воздуха Q пневмомолотов от сечения дроссельного канала: *а* — горизонтальное расположение пневмомолота; *б* — вертикальное

Более информативным показателем эффективности использования энергоносителя является удельный расход воздуха, отнесенный к энергии удара. Зависимости удельного расхода воздуха q генераторов ударных импульсов от сечения жиклера S представлены на рис. 6. Они свидетельствуют о том, что существуют сечения дроссельного канала, при которых пневмомолоты имеют минимальный или близкий к нему уровень удельного расхода воздуха независимо от массы ударника, расположения пневмомолота (вертикальное или горизонтальное) и коэффициента K_x .

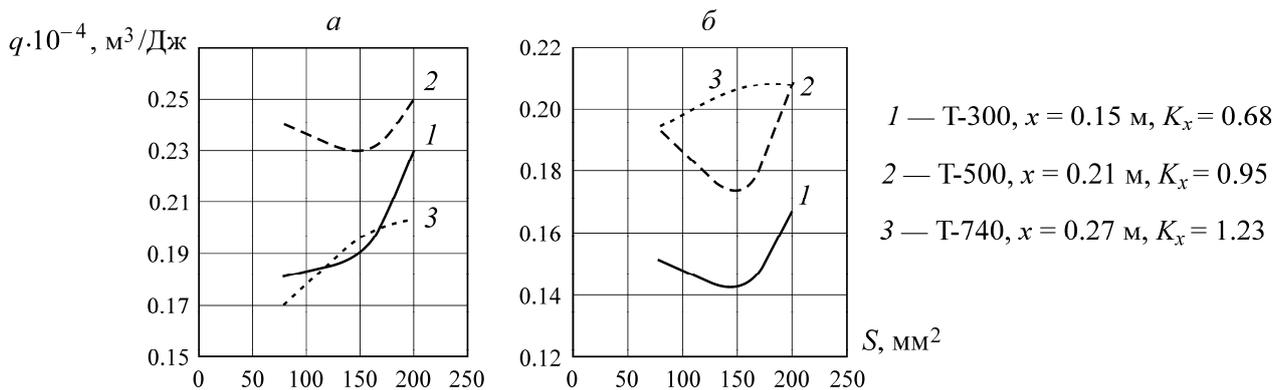


Рис. 6. Зависимость удельного расхода воздуха пневмомолотов от сечения дроссельного канала: *а* — горизонтальное расположение пневмомолота; *б* — вертикальное

Удельный расход воздуха q при горизонтальном расположении пневмомолотов также имеет более высокие значения, чем при вертикальном (рис. 6). При этом в пневмомолотах Т-300 и Т-500 с высокой частотой ударов рациональные значения удельного расхода воздуха находятся в диапазоне изменения сечения дроссельного канала $150\text{--}200 \text{ mm}^2$, т. е. в том диапазоне, в котором частота ударов приближается к своим максимальным значениям. Таким образом, в короткоходовых пневмомолотах можно получить при необходимом для их стабильной работы расходе воздуха более высокие значения ударной мощности.

Несмотря на низкие по сравнению с короткоходовыми пневмомолотами значения расхода воздуха, пневмомолот Т-740 проигрывает им по удельным показателям при вертикальной работе. Это можно объяснить тем, что из-за большого веса ударника Т-740 возрастает давление и время в камере обратного хода, в результате чего существенно снижается частота ударов.

ВЫВОДЫ

На действующих образцах пневмомолотов с различными значениями хода ударника до выхлопа экспериментально получены зависимости частоты ударов, расхода и удельного расхода воздуха от сечения дроссельного канала.

Установлены диапазоны изменения сечения дроссельного канала, обеспечивающие устойчивую работу пневмомолота и минимальный или близкий к нему удельный расход воздуха независимо от массы ударника, расположения пневмомолота (вертикальное или горизонтальное) и отношения длины рабочего хода ударника к диаметру камеры его рабочего хода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смоляницкий Б. Н., Репин А. А., Данилов Б. Б. и др.** Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах / отв. ред. Б. Ф. Симонов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. — 204 с. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 43).
2. **Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В., Червов В. В. и др.** Резервы повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных элементов в технологиях специальных строительных работ // ФТПРПИ. — 2008. — № 5. — 72–80.
3. **Червов В. В., Тищенко И. В., Смоляницкий Б. Н.** Влияние частоты виброударного воздействия и дополнительного статического усилия на скорость погружения стержня в грунт // ФТПРПИ. — 2011. — № 1. — С. 61–70.
4. **Смоляницкий Б. Н., Червов В. В.** Повышение эффективности использования энергоносителя в пневмомолотах для подземного строительства // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 143–157.
5. **Репин А. А., Смоляницкий Б. Н., Алексеев С. Е., Попелюх А. И., Тимонин В. В., Карпов В. Н.** Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 157–167.
6. **Суднишников Б. В., Есин Н. Н., Тупицын К. К.** Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. — Новосибирск: Наука, 1985. — 134 с.
7. **Червов В. В.** Управление подачей воздуха в камеру обратного хода пневмоударного устройства // ФТПРПИ. — 2003. — № 1. — С. 74–82.
8. **Бошняк Л. Л., Бызов Л. Н.** Тахометрические расходомеры. — Л.: Машиностроение, 1968. — 211 с.
9. **Кремлевский П. П.** Расходомеры и счетчики количества веществ. — СПб.: Политехника, 2002. — 409 с.
10. **Червов В. В., Тищенко И. В., Червов А. В.** Влияние элементов системы воздухораспределения пневмомолота с упругим клапаном на потребление энергоносителя // ФТПРПИ. — 2009 — № 1. — С. 41–47.

Поступила в редакцию 11/VII 2016