

УДК 621.23.05

**ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТОЙ УДАРОВ ПНЕВМОМОЛОТА
С МЕХАНИЧЕСКИМ ЗАМЫКАНИЕМ УПРУГОГО КЛАПАНА**

И. В. Тищенко, В. В. Червов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: ighor.tishchienko.70@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Обоснована актуальность дистанционного управления рабочим циклом пневмоударного механизма через внешние распределительные элементы, задающие частоту ударов. Разработана принципиальная схема пневматического импульсного механизма с плавным изменением частоты ударов при постоянном значении энергии для динамического погружения в грунт конструктивных строительных элементов. Создан и исследован экспериментальный образец такого механизма. На основе анализа импульсных индикаторных диаграмм его рабочего цикла построены зависимости частоты ударов от сечения дроссельного канала ударника для трех вариантов расположения блока управления. Установлены пределы регулирования частотной компоненты ударной мощности.

Грунтовой массив, пневмомолот, ударный модуль, упругий клапан, структура мощности, частота ударов, энергия ударного импульса, плавная регулировка, блок управления

DOI: 10.15372/FTPRPI20230110

Грунты служат основаниями фундаментов зданий и сооружений, а также являются материалами для строительства автомобильных и железнодорожных магистралей, насыпей и выемок, дамб, плотин и других гражданских, промышленных и транспортно-логистических объектов. В них непосредственно осуществляется прокладка подземных коммуникаций различного назначения, проходка тоннелей, размещение подземных хранилищ энергетического, водного и материально-технического обеспечения [1 – 3].

Среди многообразия приемов механического воздействия на грунтовой массив значительное распространение получили методы, в основе которых лежит динамический характер нагружения обрабатываемой среды рабочим инструментом [4] (рис. 1). Они объединяют взрывные технологии [5], ударные [6 – 8] и вибрационные [9 – 11] методы на основе применения широкой гаммы гидравлических и пневматических молотов, а также вибропогружателей. Выбор того или иного способа и исполнительного механизма зависит от типа земляного сооружения и его размеров, вида грунта, гидрологических и климатических условий, рельефа местности осваиваемой территории.



Рис. 1. Способы и средства механической разработки грунта

Одно из направлений, где успешно применяются ударные методы, — погружение в грунтовую среду широкой номенклатуры металлических профилей, включая трубы, двутавры, шпунты Ларсена и др. [12–17]. Они являются технологическим инструментом, непосредственно взаимодействующим с грунтом и передающим на него периодическую импульсную нагрузку со стороны ударного устройства. Эффективность действия таких систем обусловлена тем, что в грунтовой среде создаются значительные усилия, приводящие к разрушению ее внутренних связей и разупрочнению в зоне контакта. При этом основную роль играет уровень контактных напряжений, а не время их действия. Это достигается тем, что ударные машины способны преобразовывать постоянный поток подводимой энергии в дискретную последовательность силовых импульсов продолжительностью $10^{-3} - 10^{-4}$ с. Такая система (рис. 2а) представляет собой генератор 1 с подвижным бойком 2, питающийся от энергоустановки 3 и возбуждающий в стержне-волноводе 4 периодические продольные вынужденные колебания, воздействующие на грунтовый массив 5 в зоне контакта. В качестве примера на рис. 2б приведена картина силового импульса, сформированного на погружаемой трубе диаметром 75 мм пневматическим механизмом с массой ударника $m_y = 4$ кг [18].

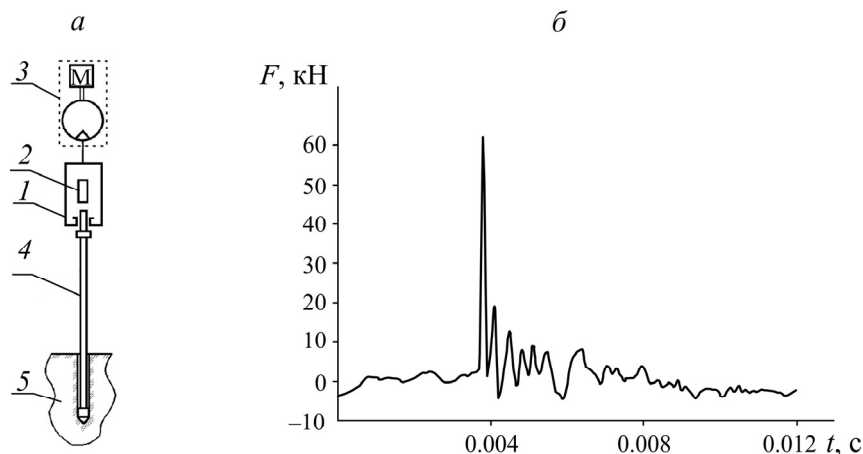


Рис. 2. Структура силовой импульсной системы (а) и формируемый ударный импульс (б): 1 — генератор; 2 — подвижный боек; 3 — энергоустановка; 4 — стержень-волновод; 5 — грунтовый массив

При испытании натурального образца высокочастотной машины с массой ударника 150 кг (“Тайфун-150”) ранее был выявлен и зафиксирован на видеокамеру эффект непропорционального увеличения скорости внедрения двутавровых балок № 50 (высота профиля 500 мм) длиной 5 м в вертикальном грунтовом канале [19]. Так, при частоте $f = 7$ Гц интенсивность их погружения составляла $V = 19.7$ м/ч, а со ступенчатым переходом на $f = 9$ Гц (рост в 1.3 раза) ско-

ростной показатель возрастал в 2.3 раза до уровня $V=45.6$ м/ч. Очевидно, что данная тенденция связана с дополнительным приращением перемещения за один удар с 0.8 мм/удар ($f=7$ Гц) до 1.4 мм/удар ($f=9$ Гц) за счет уменьшения сопротивления грунтового массива.

Для более детального изучения эффекта снижения сопротивления грунтового массива под действием ударной нагрузки в лабораторных условиях запланирован цикл экспериментальных исследований. Цель первого его этапа — создание физической модели пневмоударного механизма с плавной регулировкой частоты ударов в диапазоне, включающем интервал значений $f=7-9$ Гц, и осуществляемый без остановки процесс внедрения.

Сравнительный анализ структур машин с различными системами воздухораспределения и учет опыта их эксплуатации [20–23] дает основание при создании перспективного пневмоударного модуля взять за основу устройство с дифференциальным поршнем-ударником и кольцевым упругим клапаном в камере обратного хода. Данный вариант обладает неоспоримыми преимуществами, заключающимися в минимизации влияния воздушной подушки перед ударником при его движении вперед, в отсутствии расширения сжатого воздуха в камере обратного хода и, как следствие, в исключении обмерзания машины во время ее работы, в ступенчатой настройке частоты ударов для согласования расхода сжатого воздуха с параметрами компрессорной установки, а также в простом решении уплотнения зазоров в подвижных сопряжениях. Принцип работы пневмомолота основан на разности площадей рабочих камер прямого 1 и обратного 2 хода ударника 3 и давлений в них (рис. 3).

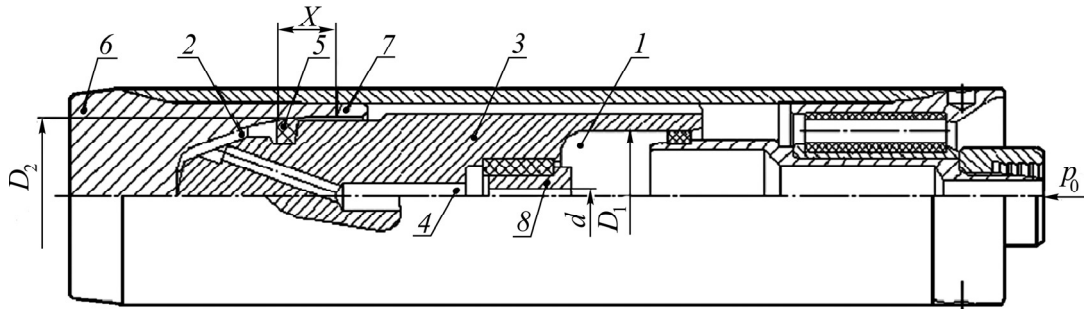


Рис. 3. Функциональная схема пневмомолота: 1 — камера прямого хода; 2 — камера обратного хода; 3 — ударник; 4 — дроссельный канал; 5 — упругий клапан; 6 — наковальня; 7 — выхлопной паз; 8 — жиклер

Связь полостей между собой осуществляется через дроссельный канал 4. Движение ударной массы назад обеспечивается примыканием контактной части кольцевого упругого клапана 5 к внутренней диаметральной поверхности наковальни 6. При этом во временно замкнутой камере 2 наблюдается рост давления до необходимого уровня и за счет того, что $D_2 > D_1$, ударник движется в крайнее заднее положение на величину рабочего хода X до момента, когда запирающий элемент входит в соприкосновение с выхлопными пазами 7. Происходит соединение полости с атмосферой и ее опорожнение. Ударник начинает движение вперед вплоть до нанесения удара по наковальне. Изменение интенсивности наполнения камеры обратного хода сжатым воздухом возможно за счет установки одного из сменных жиклеров 8 с заданным пропускным диаметром d . Это позволяет изменять время рабочего цикла машины, а следовательно, управлять частотой ударов.

Составляющие компоненты ударной мощности такого устройства определяются по зависимостям [24, 25]:

$$E = \left(p_0 - \frac{\Delta p_1}{2} \right) A_1 X, \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{X} \left(\frac{2}{V} + \frac{A_2}{vS} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где E — энергия удара; f — частота ударов; p_0 — магистральное давление на входе в распределительный тракт; Δp_1 — максимальное падение давления в камере прямого хода; A_1, A_2 — площади камер прямого и обратного хода; X — ход ударника до начала выхлопа; V — предупдарная скорость; v — скорость воздушного потока через дроссельный канал; S — сечение отверстия жиклера.

В качестве прототипа физической масштабной модели генератора с плавной регулировкой частоты ударов взят пневмомолот “Тайфун-4” [26]. Ниже приведены его основные параметры:

Масса ударника m , кг	4
Длина рабочего хода X_0 , мм:	
расчетная	25
фактическая	28
Среднее давление в камере прямого хода $(p_0 - \Delta p_1 / 2)$, МПа	0.56
Энергия удара E , Дж	35
Предударная скорость V , м/с	4.2
Частота ударов f , Гц при диаметре d , мм и соответствующем сечении S , мм ² отверстия жиклера:	
$d = 3.0$ $S = 7.1$	9.2
3.6 10.2	12.6
5.0 19.6	18.4
6.0 28.2	21.3

Экспериментальный образец выполнен в тех же габаритах, что и базовый вариант (рис. 4). Основным конструктивным отличием является вынос блока установки сменных жиклеров, располагаемого ранее на ударнике 1 с упругим клапаном 2, за пределы корпуса машины 3. Такое решение позволяет запитывать рабочие камеры A_1 и A_2 двумя независимыми параллельными потоками энергоносителя. Данная особенность обеспечивается оригинальной конструкцией патрубка 4 с гибким внутренним воздуховодом 5 и наличием распределительной коробки 6, подключаемой через пусковой кран 7 к источнику сжатого воздуха 8. Последующая замена блока жиклеров на дистанционный дроссельный регулятор 9, устанавливаемый на линии питания камеры обратного хода, позволяет перейти от дискретного на плавный режим регулирования времени ее наполнения через центральный канал 10. Таким образом осуществляется изменение периода рабочего цикла и частоты ударного воздействия непосредственно в ходе эксплуатации оборудования.

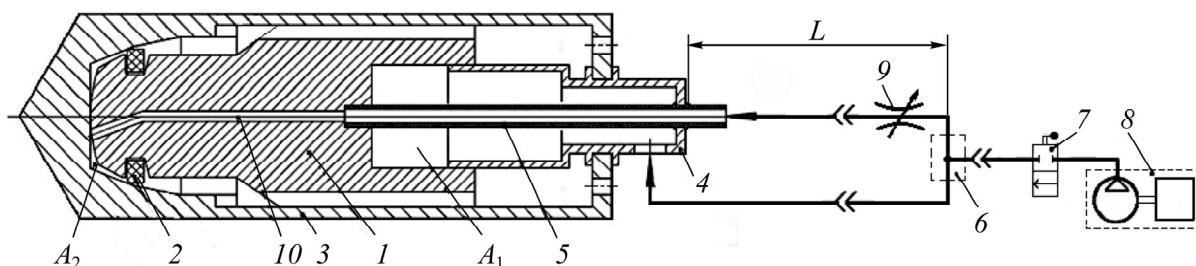


Рис. 4. Схема экспериментального образца машины: 1 — ударник; 2 — кольцевой клапан; 3 — корпус; 4 — патрубок; 5 — гибкий воздуховод; 6 — распределительная коробка; 7 — пусковой кран; 8 — источник сжатого воздуха; 9 — дроссельный регулятор; 10 — центральный канал

Для оценки влияния длины L управляющего канала (рис. 4) записаны импульсные индикаторные диаграммы. Запись диаграмм выполнялась на стенде с использованием датчиков давления D_1 и D_2 и штатной аппаратуры фиксации и обработки параметров (рис. 5). Модель 1 размещалась на неподвижной станине, а внешний блок управления, состоящий из распределительной коробки 2 и дроссельного регулятора 3, располагался за ее пределами на различном расстоянии. Для подвода сжатого воздуха использовались рукава 4 и 5 с внутренним диаметром 25 и 8 мм соответственно. При этом моделировались следующие ситуации:

- распределительная коробка монтировалась непосредственно на внешней части патрубка (рис. 5а), когда $L = 0$;
- блок управления отодвигался на расстояние $L = 5$ м от машины;
- длина внешних гибких рукавов питания рабочих камер доводилась до максимального значения $L = 20$ м (рис. 5б).

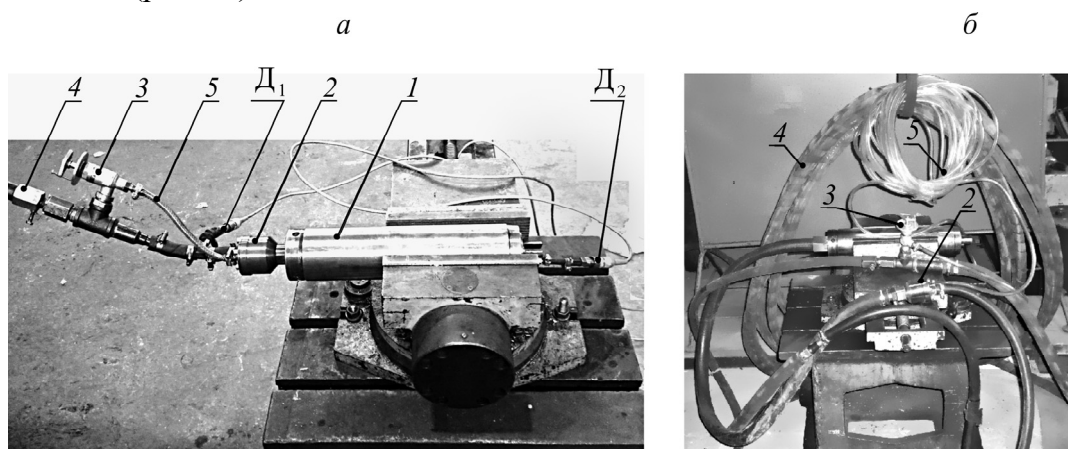


Рис. 5. Модель пневмомолота с выносом блока управления на внешнюю часть патрубка (а) и на расстояние 20 м от машины (б): D_1 , D_2 — датчики давления; 1 — генератор; 2 — распределительная коробка; 3 — дроссельный регулятор; 4 — основная магистраль; 5 — линия питания камеры обратного хода

Эксперименты подтвердили потенциальные возможности схемы с упругим клапаном в камере обратного хода ударника (рис. 3), связанные с дистанционным управлением структурой ударной мощности рассматриваемого механизма. Результаты, полученные на макетном прототипе с $m_y = 4$ кг (рис. 4) при записи импульсных индикаторных диаграмм, доказали его работоспособность и функциональность при всех рассматриваемых вариантах настройки внешней системы подачи энергоносителя. Кривые изменения давления в камерах (рис. 6) носят типичный характер, свойственный всей линейке пневмомолотов с кольцевым упругим клапаном в выхлопном тракте [23]. Их главная отличительная особенность — плавное изменение периода рабочего цикла $T = 0.17 - 0.06$ с при установке распределительной коробки непосредственно на патрубке (рис. 6а, б) и $T = 0.40 - 0.14$ с при ее отдалении на расстояние 20 м от машины. В указанных диапазонах наблюдался четкий отклик автоколебательной системы на подаваемые команды посредством поворота золотника дроссельного распределителя и изменения его проходного сечения. Выход за минимальную границу $S < 1.8 \text{ мм}^2$ приводил к сбоям в рабочем цикле с последующей остановкой машины, а превышение максимального значения $S > 28.3 \text{ мм}^2$ не вызывало дальнейшего существенного изменения периода рабочего цикла. Наступал режим насыщения, когда увеличение подачи сжатого воздуха не сопровождается ростом скорости

движения ударника в крайнее заднее положение. При этом во всем исследуемом диапазоне энергия единичного удара, определяемая по (1), оставалась практически на одном и том же уровне $E = 34 - 37$ Дж.

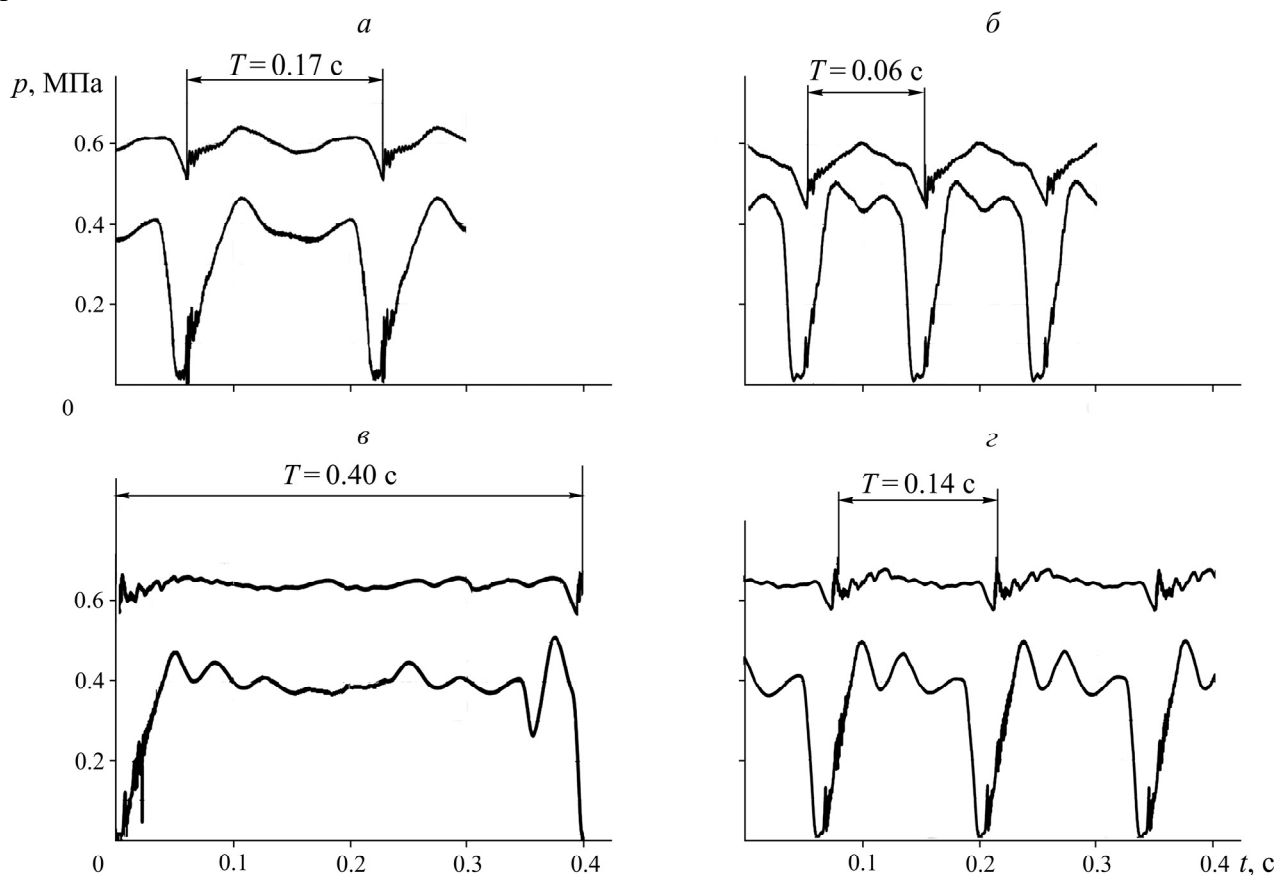


Рис. 6. Индикаторные диаграммы рабочего цикла при установке распределительной коробки на патрубке (а, б) и отдалении ее на 20 м от машины (в, г)

Обработка импульсных индикаторных диаграмм позволила построить графики изменения частоты ударов, значения которой обратно пропорциональны периоду полного рабочего цикла модели:

$$f = T^{-1} = \frac{1}{T_1 + T_2}, \quad (3)$$

где T_1, T_2 — время прямого и обратного хода ударника.

Полученные таким образом графические зависимости приведены на рис. 7. С целью сравнительного анализа на кривой 1 с учетом приведенных ранее табличных данных показан диапазон изменения частоты в случае классической компоновки пневмомолота “Тайфун-4” с кольцевым упругим клапаном в выхлопном тракте (рис. 3). При этом установка сменных жиклеров непосредственно в дроссельном канале ударника сопровождается последовательным приращением частотной компоненты от минимально возможного значения $f_1 = 9.2$ Гц ($S = 7.1$ мм²) до максимального $f_2 = 21.3$ Гц ($S = 28.2$ мм²). Таким образом, без потери энергетической составляющей ударной мощности степень регулирования частоты ударов в указанном диапазоне составляет $\lambda = f_2 / f_1 = 21.3 / 9.2 = 2.3$.

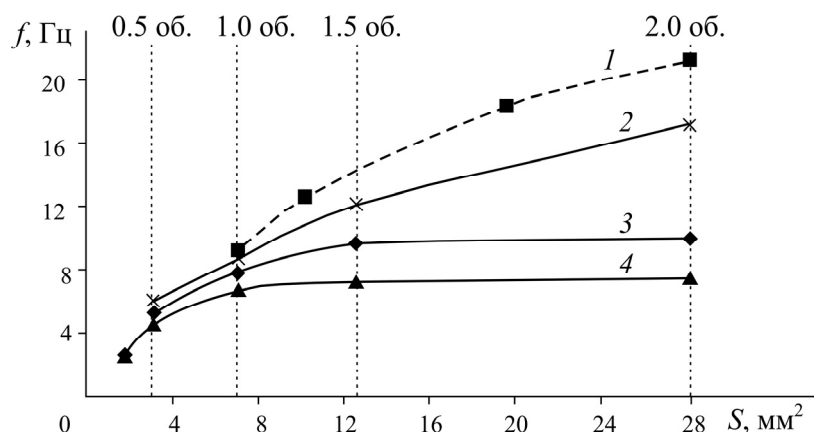


Рис. 7. Частотная характеристика экспериментальной модели: 1 — без дополнительной линии питания; 2 — длина линии питания $L=0$ м; 3 — $L=5$ м; 4 — $L=20$ м

Установка распределительной коробки (рис. 4) непосредственно на внешней части патрубка ударного устройства ($L=0$) дает возможность реализовать рабочий цикл с $f_1=6$ Гц (кривая 2). При выносе блока управления на расстояние $L=5$ и $L=20$ м этот показатель смещается к своему нижнему пределу до $f_1=5.3$ (кривая 3) и $f_1=2.5$ Гц (кривая 4) соответственно.

В целом качественная картина изменения частотных кривых у экспериментального образца идентична аналогичной характеристике классического варианта исполнения системы воздухо-распределения. Наиболее важным аспектом является падение максимально возможных значений частот с $f_2=17.2$ Гц у варианта с жестким соединением органа управления с патрубком ($L=0$) до $f_2=10$ и $f_2=7.4$ Гц при наличии дополнительных гибких рукавов длиной $L=5$ м и $L=20$ м соответственно. В последнем варианте исполнения наблюдается смещение нижней границы частотного диапазона до $f_1=2.5$ Гц. Для первого образца экспериментальной модели ($L=0$) степень плавного регулирования частотной компоненты составляет $\lambda=f_2/f_1=17.2/6=2.9$; для второго ($L=5$ м) $\lambda=f_2/f_1=10/5.3=1.9$; для третьего ($L=20$ м) $\lambda=f_2/f_1=7.4/2.5=2.9$.

ВЫВОДЫ

Одно из направлений дальнейшего развития силовых импульсных машин, работающих на энергии сжатого воздуха, — обеспечение переменной структуры ударной мощности для оперативной адаптации к непостоянным свойствам грунта. Такая возможность может быть реализована за счет плавного дистанционного регулирования частотной компоненты, что может обеспечить оптимальный с точки зрения скорости процесса режим работы автоколебательной системы “пневмомолот — погружаемый элемент — грунтовый массив”.

На основе известной схемы ударной машины с упругим кольцевым элементом в выхлопном тракте разработан и испытан на стенде экспериментальный образец генератора импульсной нагрузки, позволяющий осуществлять плавную регулировку частоты ударов с помощью внешнего выносного блока управления. Установлены границы эффективного изменения проходного сечения дроссельного поворотного регулятора, в пределах которых фиксировался четкий устойчивый режим работы устройства: $S=3.1-28.3$ мм² при изменении длины дополнительной линии питания $L=0-5$ м и $S=1.8-12.6$ мм² при $L=20$ м. Включение в схему базового варианта исполнения машины с исходным частотным интервалом $f=9.2-21.3$ Гц внешнего командоаппарата с дополнительной линией питания длиной $L=5$ и $L=20$ м сопровождается смещением его значений в пределах $f=5.3-10$ и $f=2.5-7.4$ Гц соответственно. При этом степень регулирования $\lambda=f_2/f_1$ составляет 1.9 раза в первом случае и 2.9 — во втором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кюн Г., Шойбле Л., Шлик Х. Закрытая прокладка непроходных трубопроводов. — М.: Стройиздат, 1993. — 168 с.
2. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика). — М.: ПрессБюро — № 1. — 2005. — 304 с.
3. Справочник по общестроительным работам. Основания и фундаменты / под ред. М. И. Смородинова. — М.: Стройиздат, 1974. — 372 с.
4. Абраменков Э. А., Грузин В. В. Средства механизации для подготовки оснований и устройства фундаментов. — Новосибирск: НГАСУ, 1999. — 215 с.
5. Покровский Г. И., Федоров И. С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. — М.: Стройиздат, 1967. — 325 с.
6. Кершенбаум Н. Я., Минаев В. И. Прокладка горизонтальных и вертикальных скважин ударным способом. — М.: Недра, 1984. — 245 с.
7. Пневмопробойники в строительном производстве / А. Д. Костылев, В. А. Григоращенко, В. А. Козлов и др. — Новосибирск: Наука, 1987. — 142 с.
8. Рацкевич Г. И., Козлов В. А., Костылев А. Д. Применение пневмомашин ударного действия для устройства подземных сооружений // Механизация строительства. — 1978. — № 5. — С. 8–10.
9. Бауман В. А., Быховский И. И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. — М.: Высш. шк., 1977. — 255 с.
10. Савинов О. А., Лускин А. Я. Вибрационный метод погружения свай и его применение в строительстве. — Л.: Госстройиздат, 1960. — 153 с.
11. Баркан Д. Д. Виброметод в строительстве. — М.: Госстройиздат, 1959. — 315 с.
12. Алимов О. Д., Манжосов В. К., Еремьянц В. Э. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. — М.: Наука, 1985. — 358 с.
13. Теплякова А. В., Азимов А. М., Алиева Л., Жуков И. А. Обзор и анализ технических решений для повышения долговечности и улучшения технологичности элементов ударных узлов бурильных машин // ГИАБ. — 2022. — № 9. — С. 120–132.
14. Теплякова А. В., Жуков И. А., Матюшев Н. В. Применение бурильных машин с ударным кулачковым механизмом в различных горно-геологических условиях // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3 (53). — С. 501–515.
15. Тимофеев Е. Г., Теплякова А. В., Жуков И. А., Голиков Н. С. Автоматизированный метод проектирования бойков ударных машин по физико-механическим свойствам разрушаемых объектов // ГИАБ. — 2022. — № 12-2. — С. 257–269.
16. Юнгмайстер Д. А., Гасымов Э. Э., Исаев А. И. Обоснование конструкции и параметров устройства для регулирования потока воздуха в погружных пневмоударниках станков шарошечного бурения // ГИАБ. — 2022. — № 6-2. — С. 251–267.
17. Bolobov V., I., Chupin S. A., and Le-Thanh B. Modeling impact fracture of rock by hydraulic hammer pick with regard to its bluntness, Eurasian Min., 2022, Vol. 37(1). — P. 72–75.
18. Тищенко И. В., Червов В. В., Горелов А. И. Влияние дополнительного вибровозбудителя и комбинации виброударных устройств на скорость внедрения трубы в грунт при прокалывании // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 107–118.
19. Тищенко И. В. Пневмомолот с повышенной частотой ударного воздействия // Вестн. КузГТУ. — 2014. — № 3. — С. 12–16.
20. Пневмопробойники / К. С. Гурков, В. В. Климашко, А. Д. Костылев и др. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1990. — 217 с.

- 21. Физико-математические модели** и расчет пневматических механизмов машин ударного действия / Д. Э. Абраменков, Э. А. Абраменков, В. В. Аньшин и др. — Новосибирск: НГАСУ, 2002. — 285 с.
- 22. Абраменков Э. А., Абраменков Д. Э.** Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные: срав. пособие. — Новосибирск: НГАСУ, 1993. — 429 с.
- 23. Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Трубицын В. В. и др.** Новые пневмоударные машины для специальных строительных работ // Механизация строительства. — 1997. — № 7. — С. 12–17.
- 24. Червов В. В.** Энергия удара пневмомолота с упругим клапаном в камере обратного хода // ФТПРПИ. — 2004. — № 1. — С. 80–89.
- 25. Червов В. В., Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В.** Определение диапазона изменения частоты ударов пневмомолота с кольцевым упругим клапаном в выхлопном тракте камеры обратного хода // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 75–79.
- 26. Тищенко И. В.** Модели импульсных генераторов с переменной структурой ударной мощности // Строительство. — 2014. — № 3. — С. 79–87.

Поступила в редакцию 15/IX 2022

После доработки 16/I 2023

Принята к публикации 19/I 2023