



**ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ
РАБОЧЕГО ЦИКЛА ПНЕВМОУДАРНОЙ МАШИНЫ
С ИЗМЕНЯЕМОЙ СТРУКТУРОЙ УДАРНОЙ МОЩНОСТИ**

В. В. Плохих, Б. Б. Данилов, Д. О. Чешчин, А. О. Кордубайло

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: vadim.plohih@yandex.ru, bdanilov@mail.ru, dimixch@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Рассмотрена возможность применения пневматических ударных машин для реализации адаптивных технологических процессов и работы в составе роботизированных комплексов. С учетом анализа существующих пневмоударных машин разработана конструктивная схема пневматического ударного устройства с упругим клапаном и подвижным патрубком. Построена имитационная модель новой пневмоударной системы и проведено исследование рабочего цикла.

Бестраншейные технологии, пневмоударные машины, конструктивная схема, упругий клапан, рабочий цикл, адаптивные технологии, имитационная модель

**JUSTIFICATION OF A PRINCIPAL DIAGRAM AND ANALYSIS OF OPERATING CYCLE
OF PNEUMATIC PERCUSSION MACHINE WITH A VARIABLE IMPACT POWER STRUCTURE**

V. V. Plokhikh, B. B. Danilov, D. O. Cheshchin, and A. O. Kordubailo

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: vadim.plohih@yandex.ru, bdanilov@mail.ru, dimixch@mail.ru,
Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The possibility of using pneumatic percussion machines for the implementation of adaptive technological processes and operation as part of robotic systems is considered. Taking into account the analysis of existing pneumatic percussion machines, a design diagram of pneumatic impact device with an elastic valve and a movable branch pipe is developed. A simulation model of the new pneumatic impact system is constructed and the operating cycle is investigated.

Trenchless technologies, pneumatic percussion machine, design, elastic valve, operating cycle, adaptive technologies, simulation model

Технологические процессы с использованием ударно-импульсного воздействия на обрабатываемую среду широко распространены в горнодобывающей промышленности, строительстве и в других отраслях народного хозяйства. Основой этой технологии являются виброударные машины. Наиболее часто применяются пневматические ударные машины, характеризующиеся конструктивной простотой и надежностью работы в неблагоприятных условиях.

В настоящее время востребованными становятся так называемые “адаптивные технологии”, в которых повышение эффективности достигается за счет оптимизации параметров энергетического воздействия на обрабатываемую среду. Это влечет за собой необходимость создания ударных машин, соответствующих таким требованиям. Кроме того, развитие горнодобывающей отрасли сопровождается вовлечением в производственную сферу месторождений с крайне неблагоприятными условиями ведения горных работ. Эффективным способом обеспечения безопасности персонала в этих условиях может быть внедрение дистанционных “безлюдных” технологий, применение роботизированных буровых комплексов, способных функ-

ционировать в автоматическом режиме [1–3]. Ударные машины для работы в составе комплексов должны обладать возможностью адаптации режима импульсного силового воздействия к свойствам обрабатываемого породного массива.

Анализ наиболее удачных из известных конструктивных схем пневмоударных машин показывает, что наилучшие перспективы для решения обозначенной проблемы имеют машины с клапанной системой воздухораспределения, в которых для герметизации рабочих камер и распределения потока энергоносителя используется кольцевой упругий клапан [4]. Упругий клапан в виде колец круглого и прямоугольного сечения из эластомера, как элемент системы воздухораспределения для погружных пневмоударников, впервые предложено использовать в работах [5, 6]. В дальнейшем это решение позволило существенно улучшить удельные показатели рабочего цикла пневмомолотов нового поколения “Тайфун” [7, 8].

Конструктивные достоинства упругого клапана — простота и компактность. При малых перемещениях клапан способен “управлять” большим проходным сечением. Очевидно, что наиболее предпочтительна установка упругого клапана на неподвижных деталях устройства. Это дает возможность уменьшить его износ и увеличить ресурс машины в целом. Кроме того, упрощается решение задачи по изменению структуры ударной мощности (соотношение энергии и частоты ударов). Эти аргументы являются отправной точкой в разработке конструктивной схемы машины.

С учетом приведенных результатов анализа в ИГД СО РАН разработана новая конструктивная схема пневмоударного устройства, способная изменять структуру ударной мощности непосредственно в процессе работы без остановки машины. Управление динамическими параметрами рабочего цикла (величина хода ударника, скорость и энергия удара) реализуется за счет изменения положения воздухоподводящего патрубка. Схема представлена на рис. 1.

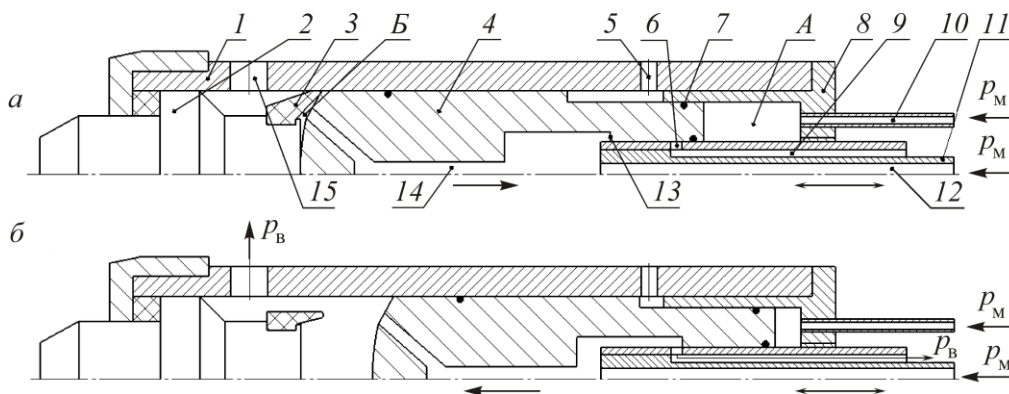


Рис. 1. Конструктивная схема пневмоударного устройства: 1 — корпус; 2 — наковальня; 3 — упругий клапан; 4 — ударник; 5 — отверстие в корпусе; 6 — выхлопное отверстие в патрубке; 7 — резиновое уплотнение; 8 — задняя гайка; 9 — выхлопной канал в патрубке; 10 — впускной патрубок; 11 — подвижный патрубок; 12 — канал подвода энергоносителя в камеру холостого хода; 13 — проточка в ударнике; 14 — осевой канал в ударнике; 15 — выхлопное отверстие в корпусе; А — камера рабочего хода; В — камера холостого хода; p_M — магистральное давление; p_B — давление выхлопа

Пневмоударное устройство состоит из корпуса 1, наковальни 2, ударника 4, подвижного патрубка 11, упругого клапана 3, установленного на неподвижной наковальне и задней гайки 8. Подвод сжатого воздуха осуществляется через патрубки 10 и 11 непосредственно в рабочие камеры ударника. Устройство работает следующим образом. Ударник 4, который находится в положении удара (рис. 1а) механически деформирует упругий клапан 3, закрывая кольцевой зазор между клапаном и внутренней цилиндрической поверхностью корпуса 1. Сжатый воздух поступает одновременно по патрубку 10 в камеру рабочего хода А и через центральный канал 12 в патрубке 11 и осевой канал 14 в камеру холостого хода В. Поскольку площадь со стороны камеры холостого хода больше, чем со стороны камеры рабочего хода ударник движется в

заднее положение (вправо). Упругий клапан в течение холостого хода ударника находится в упруго-деформированном (растянутом) состоянии и удерживается в этом состоянии давлением энергоносителя в камере холостого хода. Одновременно происходит сжатие энергоносителя в камере рабочего хода.

В конце холостого хода (рис. 1б), когда проточка в ударнике 13 пересекает выхлопное отверстие б, камеры холостого хода *Б* соединяются с атмосферой через выхлопной канал 9. Давление в камере холостого хода начинает падать. Данное обстоятельство приводит к уменьшению деформирующего усилия и переходу клапана в свободное (открытое) состояние. Открывается кольцевой зазор над клапаном 3 и возникает выхлоп энергоносителя в атмосферу из камеры холостого хода *Б* через отверстие в корпусе 15. Ударник движется в переднее положение (влево). В конце рабочего хода ударник бьет по наковальне 2 и одновременно осуществляет механическое закрытие упругого клапана. Далее цикл повторяется. Отверстие в корпусе 5 обеспечивает связь с атмосферой полости между ударником и внутренней поверхностью корпуса от возможного скопления энергоносителя через уплотнения 7 в процессе работы машины. Продольное перемещение патрубка 11 относительно задней гайки 8 позволяет изменять координаты положения ударника, при котором наблюдается падение давления в камере холостого хода *Б*, тем самым изменяя его рабочий ход и структуру ударной мощности непосредственно в процессе работы устройства.

Для исследования рабочего цикла предлагаемой машины принято решение представить ее в виде схемы с постоянными и переменными объемами, которые связаны между собой дросселями; пневмоцилиндром, моделирующим рабочие камеры устройства; подвижной массой, моделирующей ударник. Схема пневмоударного устройства с обозначениями объемов рабочих камер *V* и сечениями дросселей *S* показана на рис. 2а. Соответствующая конструктивной схеме имитационная модель, созданная в программном комплексе SimulationX [9], приведена на рис. 2б.

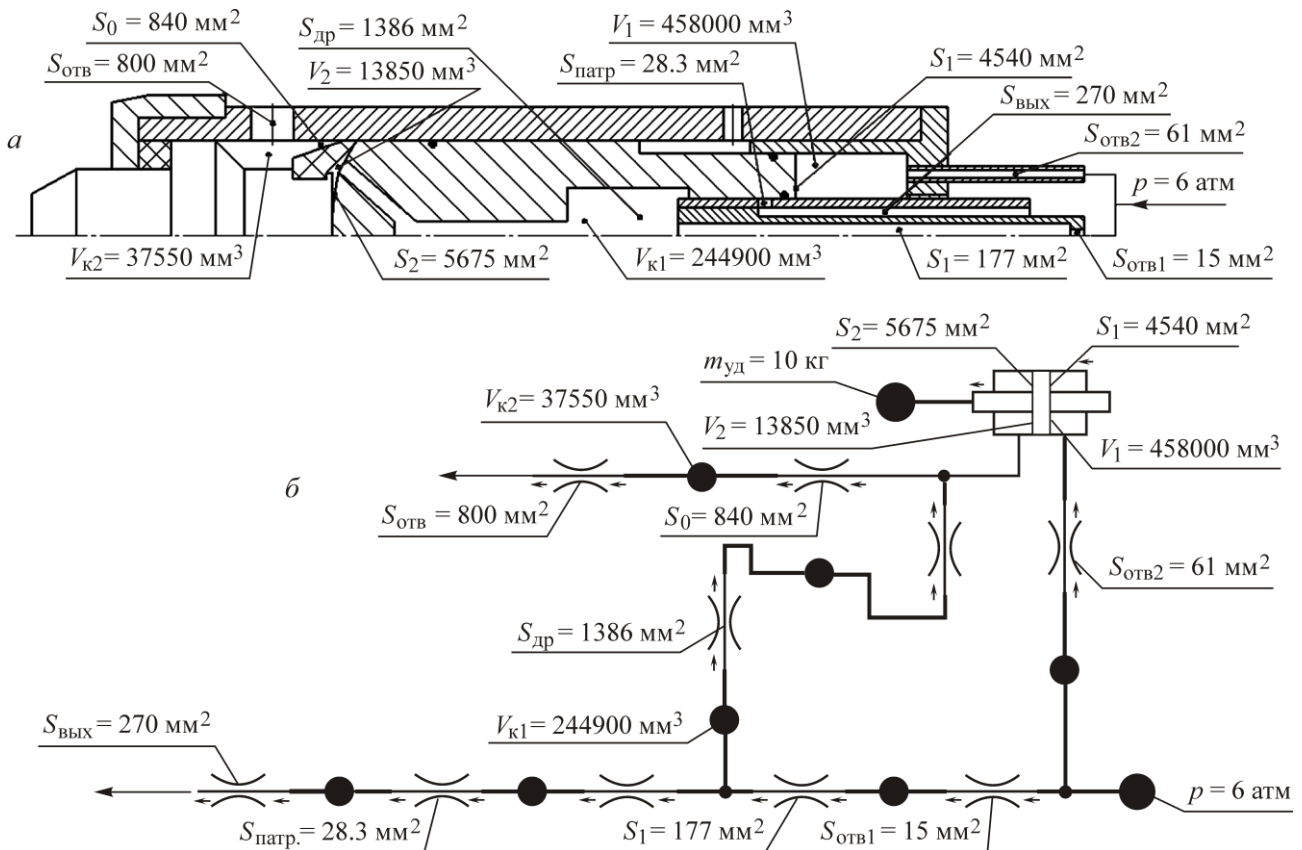


Рис. 2. Схема пневмоударного устройства с обозначением рабочих камер и сечений каналов (а) и имитационная модель пневмоударного устройства в программе SimulationX (б)

Исследования проводились при следующих заданных параметрах: номинальное давление компрессора $p = 6$ атм, площадь камеры рабочего хода $S_1 = 4540$ мм², холостого — $S_2 = 5675$ мм², габаритный ход ударника $X = 130$ мм, масса ударника $m_{уд} = 10$ кг. Давление открытия упругого клапана предварительно было установлено около 4.3 атм. Изменение давления в камере холостого $P_{х.х.}$ и рабочего $P_{р.х.}$ хода ударника в течение рабочего цикла представлено на рис. 3. Начало координат показывает положение ударника в момент удара о наковальню.

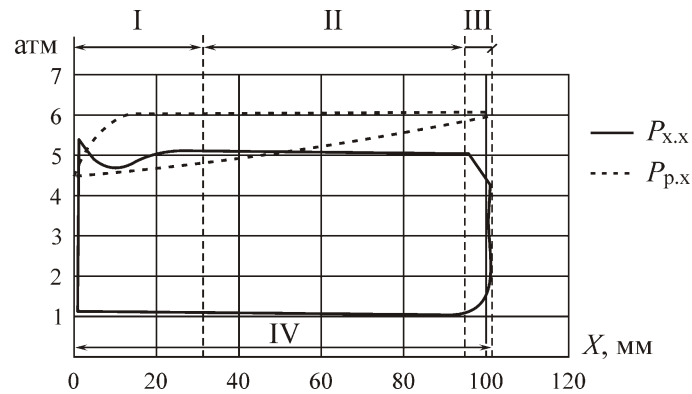


Рис. 3. Изменение давления в камере рабочего и холостого хода

Результаты. Рассмотрим работу устройства в пределах одного цикла. Отталкиваясь от диаграммы давлений в камере холостого хода можно выделить четыре этапа.

I этап. Клапан механически прижат ударником к внутренней цилиндрической поверхности корпуса. Воздух поступает в камеру холостого хода и в ней происходит быстрый рост давления до максимального значения 5.2 атм. Под действием давления ударник начинает холостой ход. Последующее небольшое падение давления объясняется быстрым увеличением объема камеры обратного хода. Повышение давления в камере рабочего хода с 4.5 до 6 атм. появляется в результате уменьшения ее объема.

II этап. Ударник продолжает холостой ход при постоянных значениях давления в рабочих камерах ударного устройства.

III этап. В начале этапа края проточки внутри ударника пересекаются с выхлопным отверстием в патрубке. Давление в камере холостого хода снижается до значения 4.3 атм, при котором открывается эластичный клапан, происходит выхлоп энергоносителя из камеры холостого хода и резкое падение давления до атмосферного.

IV этап. Рабочий ход ударника. В течение всего рабочего хода камера холостого хода сообщена с атмосферой. Увеличение объема камеры рабочего хода приводит к падению давления с магистрального до значения 4.5 атм. В конце этапа наблюдается механическое прижатие клапана ударником к внутренней части корпуса и цикл повторяется.

При рабочем ходе ударника $X = 101$ мм скорость соударения составила $v_c = 6$ м/с, энергия удара $E = 180$ Дж, частота ударов $f = 5.2$ Гц.

Изменения динамических параметров в зависимости от величины рабочего хода, задаваемого изменением положения патрубка, показаны на рис. 4. Видно, что изменение величины рабочего хода в диапазоне 35–101 мм приводит к повышению энергии удара в 2.5 раза, которое сопровождается снижением частоты ударов примерно в 2 раза. Параметры энергоносителя при этом изменять не требуется.

Полученные данные имитационного моделирования позволяют приступить к созданию макетного образца пневмоударной машины с варьируемой в достаточно широких пределах величиной и структурой ударной мощности при неизменных параметрах энергоносителя.

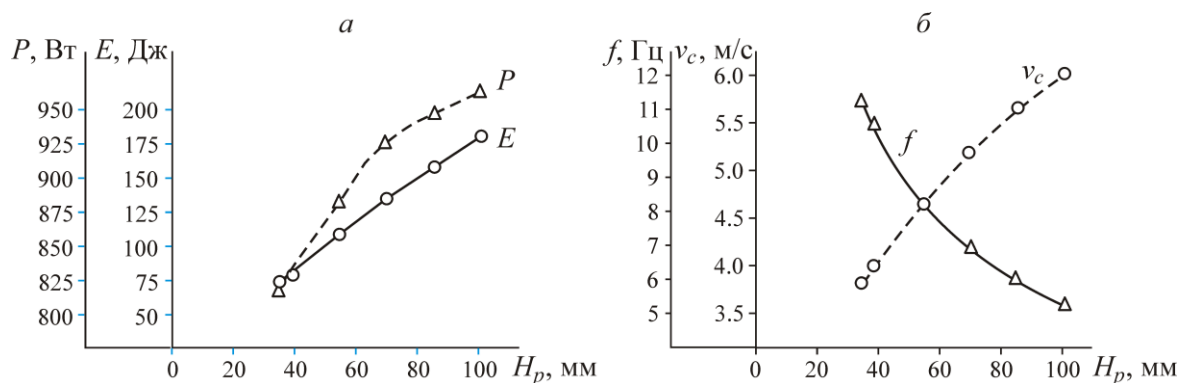


Рис. 4. Изменения мощности и энергии удара (а), частоты и скорости удара (б) в зависимости от величины рабочего хода пневмоударного механизма

ВЫВОДЫ

Новая конструктивная схема пневмоударного механизма с упругим клапаном, установленным на наковальне, может стать основой создания пневмоударной машины с изменяемой структурой ударной мощности для реализации адаптивных буровых технологических процессов и работы в составе роботизированных буровых комплексов и иных автоматизированных систем. Необходимым компонентом в таких комплексах будет блок управления машиной, который задает режим ее работы в соответствии со свойствами обрабатываемой среды и другими параметрами технологического процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Danilov B. B.** Theory and practice of creating equipment for drilling horizontal wells in the ground with pneumatic transport of destroyed material through a rotating pipeline, Thesis of Doct. Tech. Sci., Novosibirsk, 2009, 258 pp. [Данилов Б. Б. Теория и практика создания оборудования для бурения в грунте горизонтальных скважин с пневмотранспортом разрушенного материала по вращающемуся трубопроводу: дис. докт. техн. наук. — Новосибирск, 2009. — 258 с.]
2. **Plokhikh V. V., Danilov B. B., and Cheschin D. O.** Justification of principal diagram and study of the operating cycle of volumetric hydropercussive mechanism, Interexpo GEO-Siberia, XVI Intern. scientific. Congr., Sat. materials, vol. 2, Novosibirsk, SGUGiT, 2020, pp. 153–161. [Плохих В. В., Данилов Б. Б., Чещин Д. О. Обоснование принципиальной схемы и исследование рабочего цикла гидроударного механизма объемного типа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. научн. конгр.: сб. материалов. Т. 2. — Новосибирск: СГУГиТ, 2020. — С. 153–161.]
3. **Plokhikh V. V. and Cheshchin D. O.** Imitation research of the working cycle of a volume type hydraulic shock system, Fundamental and Applied Mining Science: a collection of materials of the V International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists, Omsk, Siberian State Automobile and Highway University, 2021, pp. 27–31. [Плохих В. В., Чещин Д. О. Имитационное исследование рабочего цикла гидравлической ударной системы объемного типа // Фундаментальные и прикладные исследования: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. — Омск: СибАДИ, 2021. — С. 27–31.]
4. **Sudnishnikov B. V., Esin N. N., and Tupitsyn K. K.** Research and design of pneumatic impact machines, Novosibirsk, Nauka, 1985, 135 pp. [Суднишников Б. В., Есин Н. Н., Тупицын К. К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. — Новосибирск: Наука, 1985. — 135 с.]
5. **A. s. 998740.** Pneumatic impact mechanism, V. A. Gaun, Vyull. Izobret., 1983, no. 7. [А. с. 998740. Пневматический ударный механизм / В. А. Гаун // Оpubл. в БИ. — 1983. — № 7.]

6. **Gaun V. A.** Development and research of downhole pneumatic hammers with increased impact energy, Increasing the efficiency of pneumatic percussion drilling machines, Novosibirsk, Institute of Mining, Siberian Branch, Academy of Sciences USSR, 1987, 133 pp. [**Гаун В. А.** Разработка и исследование погружных пневмоударников с повышенной энергией удара // Повышение эффективности пневмоударных буровых машин. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1987. — 133 с.]
7. **Chervov V. V.** Theory and practice of creating pneumatic hammers with a variable power structure for the implementation of trenchless technologies for laying communications, Thesis of Doct. Tech. Sci., Novosibirsk, 2009, 289 pp. [**Червов В. В.** Теория и практика создания пневматических молотов с переменной структурой мощности для реализации бестраншейных технологий прокладки коммуникаций: дис. ... докт. техн. наук. — Новосибирск, 2009. — 289 с.]
8. **Smolyanitskiy B. N. and Chervov V. V.** Increasing the efficiency of energy carrier use in pneumatic hammers for underground construction, Journal of Mining Science, 2014, no. 5, pp. 143–156. [**Смолянцкий Б. Н., Червов В. В.** Повышение эффективности использования энергоносителя в пневмомолотах для подземного строительства // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 143–156.]
9. **SimulationX** [Internet resource]. Official website of the ESI Group company. URL: <https://www.esi-group.com/products/system-simulation> (accessed: 15.06.2021). [**SimulationX** [Электронный ресурс]. Официальный сайт компании ESI Group. URL: <https://www.esi-group.com/products/system-simulation> (дата обращения: 15.06.2021).]