

УДК 622.23.05

**ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ
РЕГУЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ПНЕВМОУДАРНОЙ МАШИНЫ**

В. В. Плохих, Б. Б. Данилов, Д. О. Чешин

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

E-mail: vadim.plohih@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Проведен анализ конструктивных схем пневматических ударных машин и обосновано применение пневмоударной машины, созданной на основе комбинированного воздушораспределения с использованием упругого клапана, для реализации адаптивных технологических процессов. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований динамики рабочего цикла пневмоударного устройства с возможностью регулировки его энергетических параметров в процессе работы.

Адаптивные технологии, пневмоударная машина, конструктивная схема, имитационная модель, упругий клапан, рабочий цикл

DOI: 10.15372/FTPRPI20230210

Прокладка подземных каналов — важная часть технологических процессов горнодобывающей промышленности и подземного строительства. Наиболее действенными являются способы, базирующиеся на ударных методах разрушения горных пород. Этим объясняется широкое разнообразие ударных машин и механизмов, выпускаемых для горнодобывающей промышленности и других отраслей народного хозяйства.

В качестве источника импульсных ударных воздействий широкое распространение получили машины и механизмы с пневматическим приводом. Это связано с технологической простотой их изготовления, невысокой стоимостью и приемлемой надежностью. Такие машины применяются при проходке скважин различного назначения, бурении шпуров, креплении анкерных тяг в горных выработках и других видах строительных и горных работ [1 – 3].

В настоящее время в сферу горного производства все больше вовлекаются месторождения, имеющие участки с вредными и опасными условиями труда в зоне проведения горных работ. Для обеспечения безопасности персонала в таких условиях создаются пневматические ударные машины, реализующие адаптивные технологии, которые автоматически выбирают параметры энергетического воздействия на обрабатываемую среду в зависимости от свойств этой среды. В перспективе это позволит перейти к безлюдным технологическим процессам. Кроме того, адаптивные технологии смогут повысить эффективность горных работ и снизить себестоимость добычи полезных ископаемых [4 – 7]. Для их реализации требуется создание нового поколения пневмоударных машин, конструкция которых позволяет варьировать энергетические параметры устройства непосредственно в процессе работы без остановки ударного механизма.

АНАЛИЗ СИСТЕМ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ И КОНСТРУКЦИЙ ПНЕВМОУДАРНЫХ УСТРОЙСТВ

Пневмопробойники используются для сооружения скважин и для забивания в грунт металлических труб при креплении бортов карьеров посредством забивки стержневых элементов, для строительства дренажных систем и сооружения буронабивных свай. В современных конструкциях пневмоударных машин применяются несколько типов воздухораспределительных систем: золотниковое, дроссельное, клапанное, беззолотниковое (бесклапанное), комбинированное (клапанно-беззолотниковое) [8].

Достоинство пневмоударных машин с золотниковой системой распределения — высокие энергетические характеристики рабочего цикла. Это достигается за счет продолжительности сообщения рабочих камер с магистралью или с атмосферой. Однако такие механизмы характеризуются повышенной конструктивной сложностью и золотник, как правило является слабым местом, снижающим надежность их работы [9].

Пневматические ударные машины, имеющие дроссельное воздухораспределение, отличаются простотой конструкции. Недостаток таких машин — увеличение габаритов из-за наличия в корпусе дополнительных каналов и повышенный расход воздуха [10].

Широкое распространение получила беззолотниковая (бесклапанная) система воздухораспределения, где камера рабочего хода постоянно сообщена с компрессором. Камера холостого хода периодически сообщается с компрессором для возврата ударника в заднее положение. Такая схема воздухораспределения реализована в ИГД СО АН СССР при создании пневмопробойников. Принципиальная конструктивная схема пневмопробойника приведена на рис. 1. Она включает в себя корпус 1, внутри которого установлены подвижный боек 3, осуществляющий удары по наковальне 2, и хвостовик 6. Конструкция хвостовика представлена амортизатором 5, втулкой 7, внутри которой находится патрубок 4, перемещение которого позволяет переключать режим работы устройства с прямого хода на реверс, и наоборот. Амортизатор 5 имеет выхлопные каналы 8, а на втулке 7 размещен клапан 9, предназначенный для предотвращения попадания пыли во внутреннюю часть устройства. Подвод энергоносителя от компрессора в камеры устройства осуществляется через шланг 10. Для сообщения камер А и Б в ударнике имеются радиальные отверстия 11 [11].

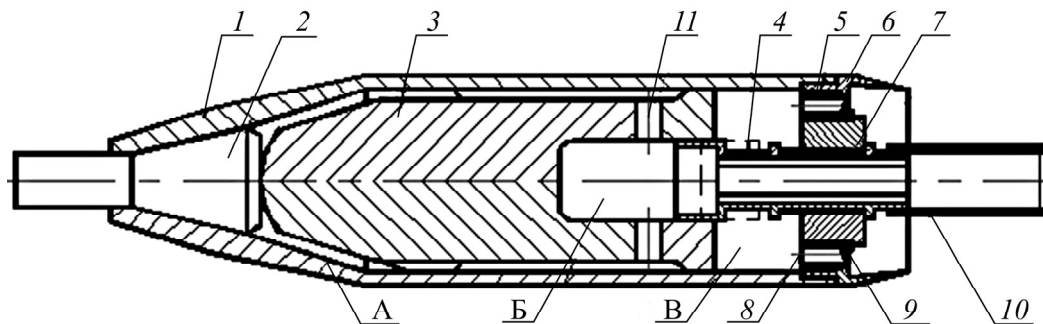


Рис. 1. Принципиальная конструктивная схема пневмопробойника: 1 — корпус; 2 — наковальня; 3 — боек; 4 — патрубок; 5 — амортизатор; 6 — хвостовик; 7 — втулка; 8 — выхлопные каналы; 9 — клапаны на втулке; 10 — шланг; 11 — отверстия для сообщения камер А и Б; А — камера холостого хода; Б — камера рабочего хода; В — выхлопная камера

За рубежом на основе бесклапанной системы воздухораспределения разработаны пневмопробойники “Грундомат” фирмы “Тракто-техник”, “Крет”, “Терра” и др. [11]. Эта же конструктивная схема с беззолотниковым воздухораспределением использовалась при создании первого поколения пневмомолотов, представленных отечественными машинами СО166, М200, М400.

В 80-х годах прошлого века впервые предложена новая воздухораспределительная система, включающая в себя упругие клапаны (разработана сотрудником ИГД СО РАН В. А. Гауном). Наибольшее применение в конструкциях пневмоударных машин получили упругие клапаны, имеющие форму в виде кольца круглого или прямоугольного сечения. Материалом для таких клапанов чаще всего служит полиуретан, резина, каучук и др. В результате их применения удалось увеличить как энергию удара, так и ударную мощность, не изменяя габаритов машины и расхода сжатого воздуха. Примерами пневмоударных машин, в системе воздухораспределения которых установлены упругие клапаны, являются погружные пневмоударники П155 и П105-2К [12, 13].

Развитие бестраншейной технологии потребовало дальнейшего увеличения как длины, так и диаметра прокладываемых трубчатых кожухов. Однако производительность существующих в то время передвижных компрессоров ощутимо ограничивала такие возможности. Увеличение ударной мощности пневмомолотов за счет улучшения удельных показателей их рабочего цикла удалось осуществить при разработке пневмомолотов следующего поколения “Тайфун” (рис. 2.)

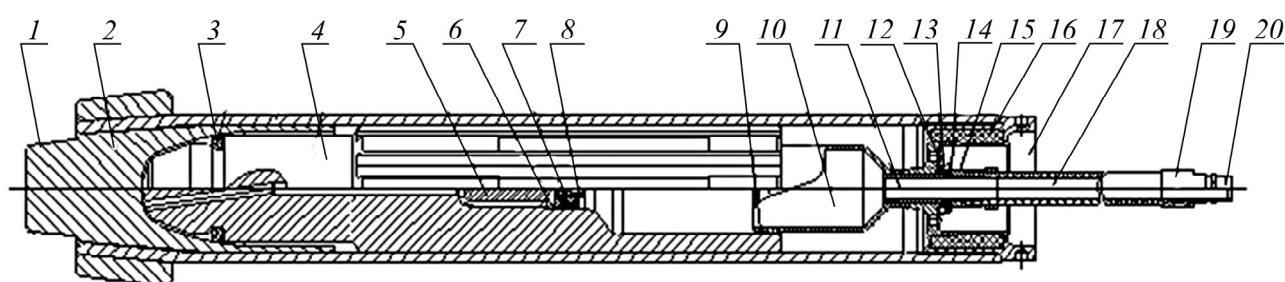


Рис. 2. Конструкция пневмомолота “Тайфун”: 1 — корпус; 2 — наковальня; 3 — резиновое кольцо; 4 — ударник; 5 — инерционный клапан; 6 — упорное кольцо; 7 — резиновое седло; 8 — жиклер; 9 — полиэтиленовое кольцо; 10 — патрубок; 11 — стемель; 12 — ступица; 13 — клапан; 14 — стальное кольцо; 15 — гайка; 16 — демпфер; 17 — хвостовик; 18 — рукав; 19 — гайка; 20 — штуцер

Пневмомолоты “Тайфун” имеют камеру холостого хода, которая не создает противодействия ударнику при его рабочем ходе. Это связано с тем, что на протяжении всего рабочего хода камера холостого хода связана с атмосферой, а расход энергоносителя снижается благодаря уменьшению “мертвого объема” камеры обратного хода. Последнее достигается за счет использования кольцевого эластичного клапана в системе воздухораспределения. В таблице приведены технические характеристики пневмомолотов первого поколения и пневмомолотов “Тайфун”.

Технические характеристики пневмоударных машин

Параметры	СО166	М200	М400	“Тайфун-100”	“Тайфун-190”	“Тайфун-500”
	Воздухораспределение					
	беззолотниковое			клапанное		
Энергия удара, Дж	1000	2000	4000	1000	2000	4000
Частота ударов, Гц	3.30	2.70	2.60	2.0–4.0	2.0–3.2	1.0–1.7
Рабочее давление, МПа	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Удельный расход воздуха, $\text{м}^3 \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{кВт}^{-1}$	2.13	1.56	1.72	1.50	1.25	1.50
Масса машины, кг	370	710	1560	230	370	1350
Масса ударника, кг	185	270	570	100	190	500
Габаритные размеры, мм						
длина	1720	2260	2590	1100	1700	2000
диаметр	240	270	400	240	240	400
Наибольший диаметр забиваемых труб, мм	530	820	1020	325	530	820

Пневмоударные машины с эластичным клапаном в системе распределения энергоносителя обладают примерно в 1.2–1.5 раза меньшим удельным расходом сжатого воздуха при той же энергии удара. Кроме того, такие пневмомолоты имеют меньшие габариты [14]. Конструктивная простота исполнения и компактность — главные преимущества эластичного клапана. Малые радиальные перемещения клапана позволяют управлять большим проходным сечением. Лучшим решением является установка клапана на неподвижных деталях машины, что позволит не только уменьшить износ клапана, но и увеличить ресурс работы машины в целом, особенно в условиях высокого пылеобразования [15].

Характерный недостаток рассмотренных конструкций пневматических ударных машин — ограниченная возможность изменения своих динамических и энергетических параметров. В таких машинах уменьшение энергии ударных импульсов возможно только за счет понижения давления энергоносителя или уменьшения сечения питающей магистрали. Очевидно, что при этом снижаются частота и энергия удара. С точки зрения эффективности бурения логичнее создать машину, в которой при уменьшении энергии ударных импульсов увеличивается их частота, и наоборот. Таким образом, для адаптации режима импульсного силового воздействия к технологическим условиям бурения и свойствам разрушаемого породного массива необходимо создание нового поколения пневмоударных машин.

Исходя из поставленной задачи, разработана и запатентована новая принципиальная конструктивная схема пневматического устройства ударного действия, основанная на комбинированной системе воздухораспределения с использованием упругого запорного клапана [16]. Управление параметрами рабочего цикла (энергией и частотой ударных импульсов) осуществляется изменением положения центрального патрубка непосредственно в процессе работы без остановки машины. Схема представлена на рис. 3. Пневмоударное устройство состоит из корпуса 2, в котором установлена неподвижная наковальня 3 посредством передней гайки 1, ударника 5, запорного клапана 4, установленного на наковальне, задней гайки 7 и центрального патрубка 10 с возможностью продольного перемещения относительно корпуса 2 устройства. Подача энергоносителя осуществляется одновременно в камеры устройства через патрубки 9 и 10.

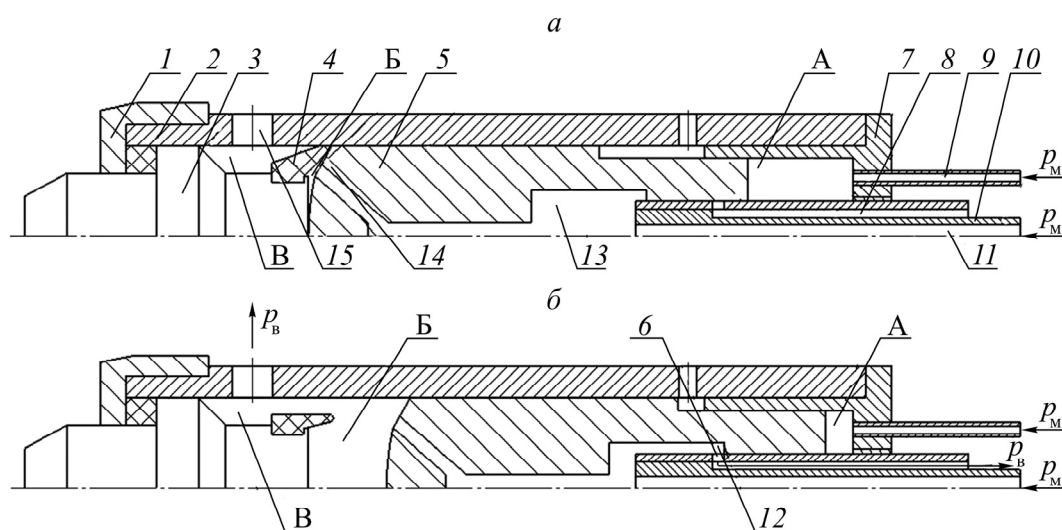


Рис. 3. Конструктивная схема пневматического ударного устройства: а — ударник в положении удара; б — ударник в начале рабочего хода

Устройство работает следующим образом. В камеру рабочего хода А через впускной патрубок 9 подается сжатый воздух под давлением p_m (рис. 3а). Происходит механическое прижатие ударником 5 упругого клапана 4 к внутренней поверхности корпуса 2. Это приводит к перекрытию кольцевого зазора между корпусом 2 и клапаном 4 и к разобщению камеры холостого хода Б с камерой выхлопа В. Камера В связана с атмосферой через отверстие 15 в корпусе. Одновременно осуществляется подача энергоносителя p_m в камеру холостого хода Б через канал 11 в центральном патрубке 10, проточку 13 и канал 14 в ударнике 5. Это позволяет удерживать упругий клапан 4 в герметично закрытом состоянии. Ввиду того, что рабочая площадь переднего торца ударника 5, расположенная со стороны камеры холостого хода Б, имеет большее значение, чем рабочая площадь заднего торца со стороны камеры рабочего хода А ударника, последний под действием результирующей силы, возникающей от давления воздуха, начинает холостой ход (на рис. 3а вправо). Запорный клапан 4 под действием давления энергоносителя в камере Б находится в растянутом (закрытом) положении в период холостого хода ударника.

В конце холостого хода (рис. 3б) происходит сообщение камеры холостого хода Б через канал 14, проточки 13, 12 в ударнике 5, отверстие 6 и выхлопной канал 8 в подвижном патрубке 10 с атмосферой p_v . Отмечается начальное падение давления в камере холостого хода Б. Под действием собственных сил упругости запорный клапан 4 переходит в свое начальное (открытое) состояние, тем самым соединяя камеру холостого хода Б через кольцевой зазор над клапаном 4 и корпусом 2 с камерой выхлопа В и отверстие 15 в корпусе 2 с атмосферой p_v . Фиксируется последующее падение давления в камере холостого хода Б, а ударник 5 под действием давления воздуха в камере А начинает рабочий ход, на протяжении которого осуществляется выход воздуха из камеры Б через камеру В в атмосферу p_v . В конце рабочего хода (рис. 3а) ударник 5 наносит удар по наковальне 3 и одновременно производит механическое прижатие упругого клапана 4, и цикл повторяется.

Достоинством представленной схемы является простота конструкции, а установка запорного клапана 4 на неподвижной наковальне 3 позволяет уменьшить его изнашивание при взаимодействии с ударником 5 и корпусом 2. Кроме того, наличие подвижного центрального патрубка 10, установленного в задней части устройства через гайку 7, и его продольное перемещение относительно корпуса 2 позволяет изменять момент времени первоначального сброса давления из камеры холостого хода Б. За счет этого регулируется рабочий ход ударника 5 и, следовательно, динамические параметры пневмоударного устройства (энергия и частота ударов) непосредственно в процессе работы. Перемещение центрального патрубка 10 в направлении наковальни 3 уменьшает рабочий ход ударника 5. Это приводит к снижению энергии ударов, но их частота при этом увеличивается и ударная мощность снижается незначительно. Выдвижение центрального патрубка 10 от наковальни 3 увеличивает рабочий ход 5, энергию удара и ударную мощность, при этом частота ударов уменьшается.

Такое регулирование динамических параметров позволяет расширить возможность адаптации режима импульсного воздействия к условиям технологического процесса и свойствам обрабатываемого породного массива.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА УДАРНОГО УСТРОЙСТВА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование динамики рабочего цикла нового устройства проведено с помощью имитационного моделирования. Для этого ударный механизм представлен в виде обобщенной расчетной схемы, имеющей постоянные и переменные объемы, связанные между собой дросселя-

ми, имитирующими сечения каналов; пневмоцилиндрами, имитирующими рабочие камеры устройства; подвижной массы, имитирующей ударник и связанной с пневмоцилиндрами. Обобщенная расчетная схема пневмоударного устройства с обозначениями объемов рабочих камер V , сечениями проходных каналов S , ударника $m_{уд}$ и компрессора КМ приведена на рис. 4.

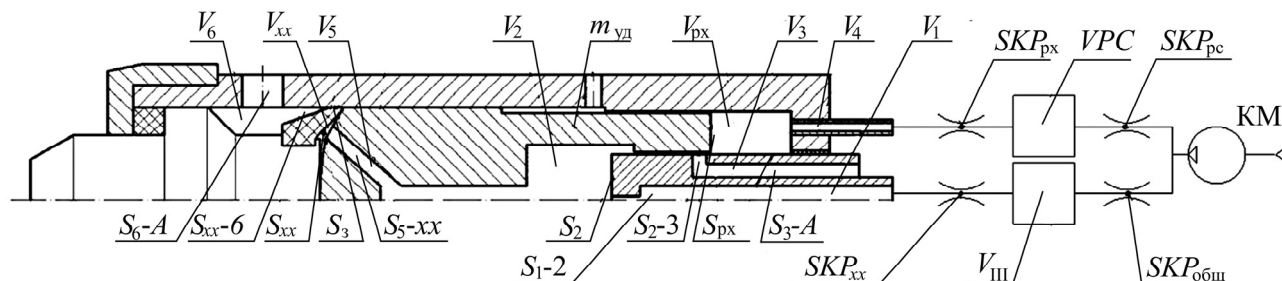


Рис. 4. Принципиальная схема устройства: S — площади проходных сечений; V — объемы камер; $m_{уд}$ — масса ударника; КМ — компрессор; SKP — площади проходных сечений кранов

Построенная пневматическая схема для последующего имитационного моделирования была перенесена в среду программы ITISimX. Расчетная схема в этой программе представлена на рис. 5 [17]. Исследования динамики рабочего цикла проводились при постоянных значениях массы ударника $m_{уд} = 7.7$ кг, площадей камер рабочего $S_{px} = 35.2$ см² и холостого хода $S_{xx} = 46.6$ см², номинального давления воздуха $p = 0.38$ МПа. Перемещение центрального патрубка H_p изменялось в диапазоне 40–95 мм.

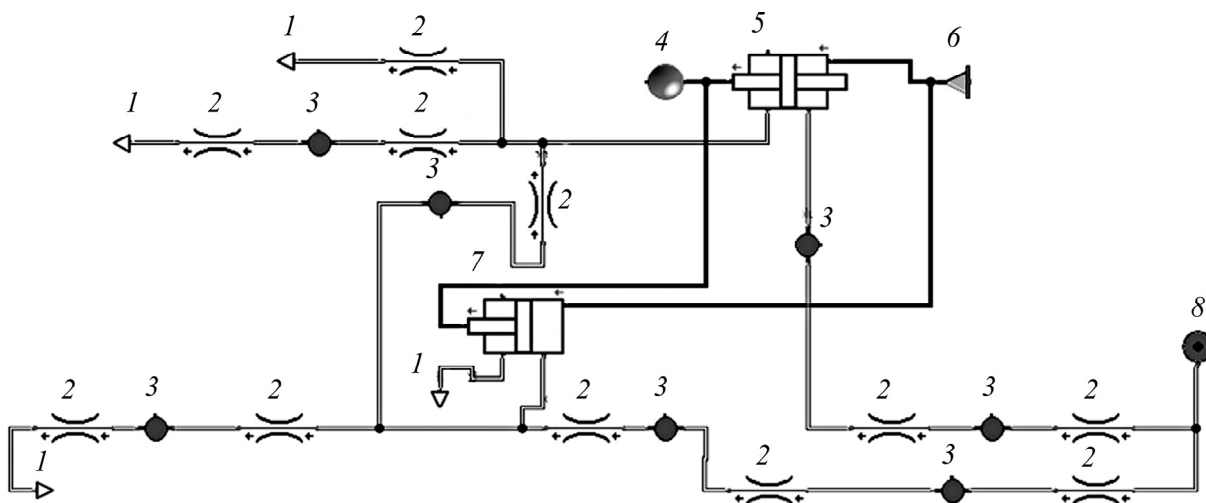


Рис. 5. Расчетная схема пневмоударного устройства в среде программы ITISimX: 1 — выхлопное средство; 2 — постоянное значение дросселя; 3 — объем; 4 — масса; 5 — цилиндр; 6 — фиксатор; 7 — дифференциальный цилиндр; 8 — источник давления

Имитационное моделирование позволило получить результаты, которые отражены в виде зависимостей изменения энергетических и динамических параметров от величины рабочего хода X . Полученные зависимости представлены на рис. 6. Перемещение центрального патрубка в пределах конструктивно достижимого диапазона $H_p = 40–95$ мм приводит к изменению рабочего хода ударника X от 54 до 110 мм. При этом энергия удара изменяется более чем в 2 раза, а ударная мощность — в ~ 1.5 раза (рис. 6а). Скорость соударения повышается в 1.5 раза, частота ударов снижается примерно в 1.3 раза (рис. 6б).

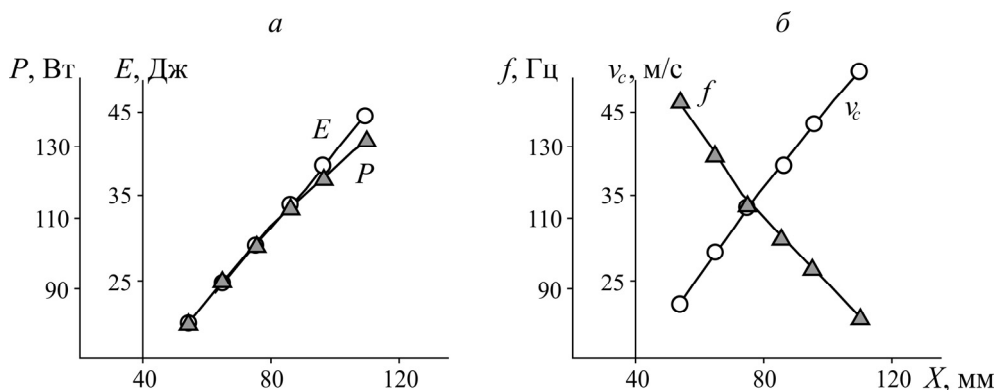


Рис. 6. Изменение ударной мощности P и энергии удара E (а), частоты f и скорости соударения v_c (б) от величины рабочего хода X модели пневмоударной машины

Таким образом, новая конструктивная схема пневмоударного устройства позволяет изменять энергетические параметры в достаточно широком диапазоне. Важно, что энергия ударных импульсов и их частота меняются разнонаправленно. Уменьшение энергии сопровождается увеличением частоты, и наоборот. Следовательно, колебание ударной мощности в процессе регулировки будет существенно меньше по сравнению с другими способами регулирования энергетических параметров.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДАРНОГО УСТРОЙСТВА, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе имитационного моделирования получены результаты, позволившие определить основные конструктивные параметры пневмоударного устройства, необходимые для создания ее физической модели. Испытательный стенд с установленной машиной и оборудованием для измерения ее характеристик приведен на рис. 7 [18].

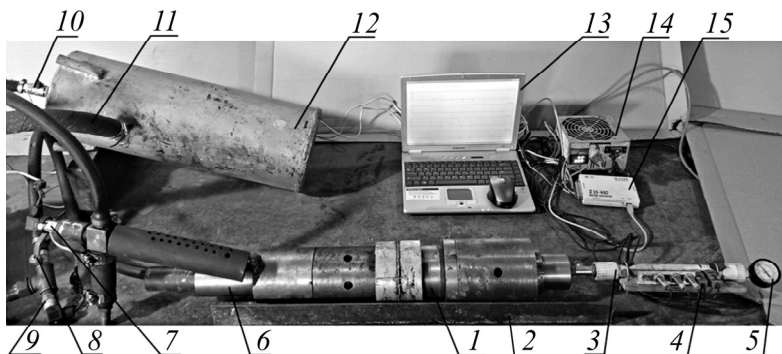


Рис. 7. Общий вид испытательного стенда: 1 — машина; 2 — основание; 3 — трубка; 4 — датчики перемещения; 5 — манометр; 6 — резьбовая втулка; 7 — датчик измерения давления в камере рабочего хода; 8 — кран подачи давления в камеру холостого хода; 9 — датчик измерения давления в камере холостого хода; 10 — кран подачи давления в камеру рабочего хода; 11 — магистральный шланг; 12 — ресивер; 13 — персональный компьютер; 14 — источник питания; 15 — аналого-цифровой преобразователь

Пневмоударная машина 1 закреплена на неподвижном основании 2. В ударник ввернут стержень с металлическим поршнем на конце, позволяющий отслеживать его положение в корпусе. Поршень установлен в герметичную пластиковую трубку 3, присоединенную к передней части машины. Вблизи пластиковой трубки размещены индуктивные датчики 4, отсле-

живающие положение поршня и, соответственно, ударника. Подача энергоносителя в машину осуществляется от компрессора с номинальным давлением 0.4 МПа. Подача воздуха в камеры машины происходит следующим образом. Сжатый воздух от компрессора через магистральный шланг 11, шаровой кран 8 поступает в камеру холостого хода. Одновременно воздух поступает через шланг 11, ресивер 12, шаровой кран 10 и далее через датчик измерения давления 7 в камеру рабочего хода машины. Ресивер 12 необходим для восполнения утечек воздуха в камере рабочего хода. Наличие крана 10 позволяет регулировать подачу энергоносителя из ресивера 12 в камеру рабочего хода. С помощью крана 8 регулируется подача сжатого воздуха в камеру холостого хода. Для измерения давления в камере холостого хода установлен датчик 9. Калибровка измеряемого давления выполняется с помощью манометра 5, установленного на пластиковой трубке 3. Перемещение центрального патрубка относительно корпуса машины, регулирование рабочего хода ударника, а также динамических параметров пневмоударной машины (энергии и частоты ударов) осуществляется за счет вращения резьбовой втулки 6. Площади проходных сечений всех указанных кранов взяты из предварительного расчета, проведенного с помощью имитационного моделирования в программном комплексе ITISimX [17].

Питание индуктивных датчиков 4, датчиков давления 7, 9 и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 15 происходит с помощью источника питания 14. После выхода машины на устойчивый режим работы датчики 4 фиксируют положение ударника, датчики 7, 9 — изменение давлений в рабочих камерах машины. Далее сигналы с датчиков поступают на АЦП 15. Первоначальная обработка поступающих данных с АЦП производилась по программе LGraph на персональном компьютере 13 [19].

На начальном этапе для упрощения экспериментальных работ использовалась механическая система регулирования рабочего хода ударника за счет вращения резьбовой втулки 6. Результаты экспериментального исследования отражены в виде изменения энергетических и динамических параметров от величины рабочего хода X пневмоударной машины (рис. 8).

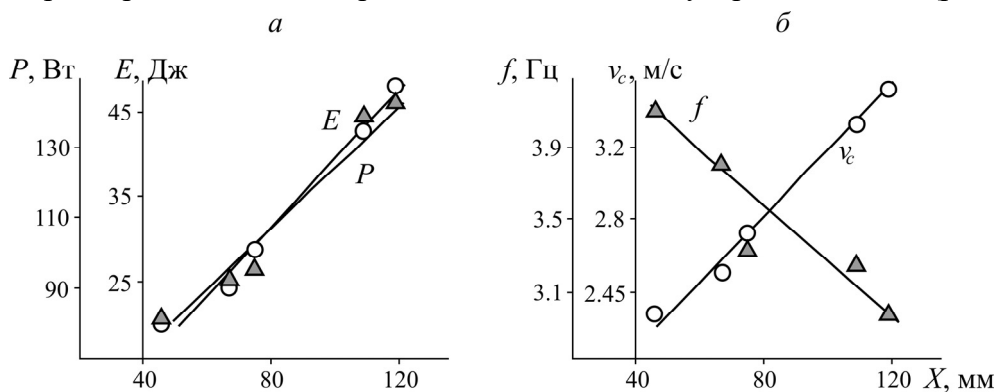


Рис. 8. Изменение ударной мощности P и энергии удара E (а), частоты f и скорости соударения v_c (б) от величины рабочего хода X пневмоударной машины

Как следует из рис. 8а, изменение величины хода X пневмоударной машины от 40 до 120 мм приводит к повышению энергии удара примерно в 2.4 раза, а ударной мощности примерно в 1.7 раз. На рис. 8б показано снижение частоты ударов примерно в 1.4 раза и повышение скорости соударения в 1.5 раза. По результатам экспериментальных исследований проведена валидация имитационной модели.

На рис. 9 приведено сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований. Наибольшее их расхождение для скорости соударения составляет 10 % (рис. 9а), для частоты ударов — 8 % (рис. 9б).

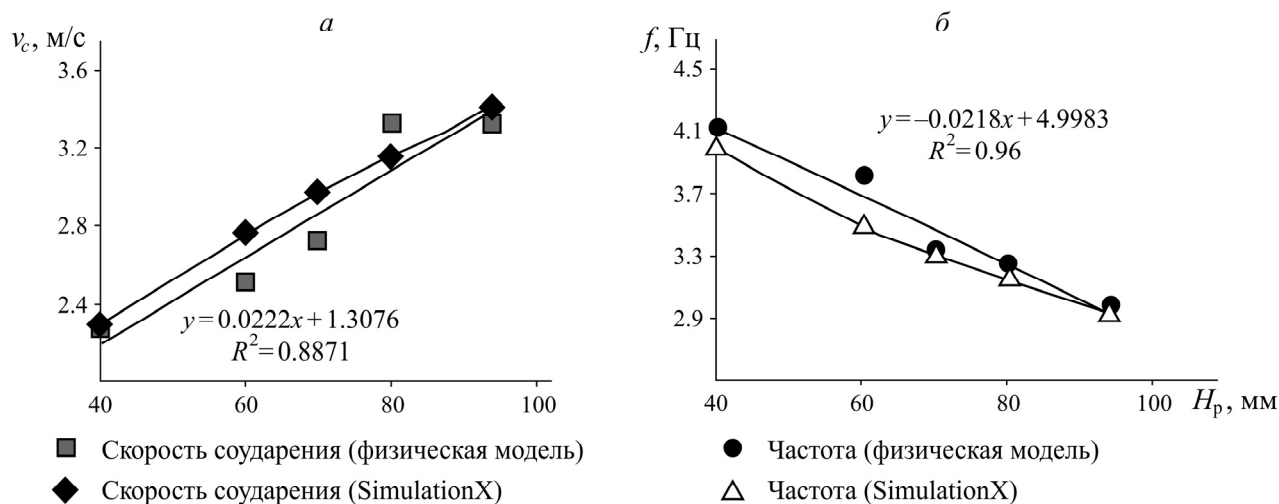


Рис. 9. Изменение максимальных значений скорости удара v_c (а) и частоты f (б) от перемещения центрального патрубка H_p

Расхождение полученных значений находится в пределах допустимой погрешности. Следовательно, имитационная модель, созданная в программном комплексе ITISimX, соответствует физической модели машины и может быть использована для дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

Разработана новая конструктивная схема пневмоударного устройства, позволяющая изменять энергию и частоту ударных импульсов. Схему можно применять для реализации адаптивных технологических процессов, в которых необходимо оперативно изменять параметры импульсного воздействия на горную породу в зависимости от ее свойств. Результаты проведенных исследований могут служить основой для создания опытного образца пневматической ударной машины с регулируемой энергией и частотой ударов непосредственно в процессе работы без остановки ударного механизма.

Рассмотрением динамики рабочего цикла установлена работоспособность предложенной конструкции пневмоударной машины и определен диапазон регулирования энергии и частоты ударных импульсов. В процессе регулирования рабочего хода ударника энергия и частота ударных импульсов меняются разнонаправленно, что позволяет избежать существенных потерь ударной мощности по сравнению со способами регулирования за счет изменения параметров энергоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rakhmangulov A., Burmostrov K., and Osintsev N. Sustainable pen pit mining and technical systems: concept, principles, and indicators, Sustainability, 2021, No. 13 (3). — P. 1101.
2. Марданов В. А., Ткаченко Д. Г. Об использовании робототехники при ведении горнопроходческих работ // Проблемы горного дела: сб. науч. тр. II Междунар. форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященного 100-летию ДонНТУ. — Донецк, 2021. — С. 89–93.
3. Кауркин И. А., Зиновьев В. В. Роботизация в горнодобывающей промышленности // Сб. материалов IX Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых с международным участием “Россия молодая”. — Кемерово, 2017. — 35006.

4. **Хазин М. Л.** Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. — 2020. — Т. 18. — № 1. — С. 4–15.
5. **Atkinson R. D.** Robotics and the future of production and work, Inf. Technol. and Innovation Foundation, 2019.
6. **Dadhich S., Bodin U., and Andersson U.** Key challenges in automation of earth-moving machines, Automation in Construction, 2016, No. 68. — P. 212–222.
7. **Marshall J. A., Bonchis A., Nebot E., and Sheding S.** Robotics in mining, Springer handbook of robotics. Springer, Cham, 2016. — P. 1549–1576.
8. **Суднишников Б. В., Есин Н. Н., Тупицын К. К.** Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. — Новосибирск: Наука, 1985. — 135 с.
9. **Назаров Н. Г.** Повышение ударной мощности пневмопробойников // Горные машины: сб. науч. тр. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1980. — С. 14–20.
10. **Сулакшин С. С.** Бурение геологоразведочных скважин. — М.: Недра, 1991. — 334 с.
11. **Гурков К. С., Климашко В. В., Костылев А. Д. и др.** Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990. — 217 с.
12. **Смоляницкий Б. Н., Червов В. В.** Повышение эффективности использования энергоносителя в пневмомолотах для подземного строительства // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 143–156.
13. **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.
14. **Петреев А. М., Смоляницкий Б. Н.** Согласование параметров пневмомолота с производительностью источника питания // ФТПРПИ. — 1999. — № 2. — С. 86–90.
15. **Плохих В. В., Данилов Б. Б., Чещин Д. О., Кордубайло А. О.** Обоснование принципиальной схемы и исследование рабочего цикла пневматической ударной машины с изменяемой структурой ударной мощности // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2021. — Т. 8. — № 1. — С. 315–320.
16. **Пат. 208325 РФ, МПК E21B 1/00.** Устройство ударного действия / Б. Б. Данилов, В. В. Плохих, А. А. Речкин, Д. О. Чещин; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН. — № 2021118386; заявл. 24.06.2021 // Оpubл. в БИ. — 2021. — № 35 — 7 с.
17. **SimulationX [электронный ресурс].** Сайт компании ESI Group. URL: <https://www.esi-group.com/products/system-simulation> (дата обращения: 08.11.2022).
18. **Плохих В. В.** Создание пневматической ударной машины для реализации адаптивных технологических процессов // ГИАБ. — 2022. — № 7. — С. 91–103.
19. **АЦП E14-440 [электронный ресурс].** Сайт компании L-CARD. URL: <http://www.lcard.ru> (дата обращения 08.11.2022).

Поступила в редакцию 08/XI 2022

После доработки 20/II 2023

Принята к публикации 16/III 2023