

Создание и исследование имитационной модели пневматической ударной машины с изменяемой структурой ударной мощности

В. В. Плохих^{1}, Б. Б. Данилов¹, Д. О. Чещин¹*

¹ Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

Аннотация. В статье предложена новая принципиальная схема пневматического устройства ударного действия, в котором можно изменять параметры импульсного силового воздействия непосредственно в процессе его работы. Это необходимо для реализации адаптивных технологических процессов, создания роботизированных буровых комплексов, внедрения «безлюдных технологий». Приведены результаты исследования динамики рабочего цикла новой конструктивной схемы, полученные с использованием имитационной модели в программе ITISimX.

Ключевые слова: адаптивные технологии, роботизированные буровые комплексы, пневмоударная машина, упругий клапан, конструктивная схема, имитационная модель

Simulation modeling and analysis of air-percussion machine with adjustable impact capacity

V. V. Plokhikh^{1}, B. B. Danilov¹, D. O. Cheshchin¹*

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

Abstract. The paper proposes a new layout of an air-percussion tool with the possibility to change parameters of the impulsive force impact directly during its operation. It is necessary for realization of adaptable technologies, creation of robotic drilling equipment sets and implementation of the unmanned technologies. The results of the research of the operating cycle dynamics of the new layout obtained using the simulation model in the ITISimX program are presented.

Keywords: adaptable technologies, robotic drilling equipment sets, air-percussion machine, elastic valve, structural layout, simulation model

Введение

Современная горнодобывающая промышленность сталкивается с усложнением проблем горного производства – увеличение глубины рудников и шахт. В связи с этим усложняется проблема обеспечения безопасности персонала при ведении горных работ. Последние годы в мировой промышленности расширяется использование автономного технического оборудования, которое позволяет повысить безопасность труда, и сократить при этом себестоимость добычи полезных ископаемых. Так, начиная с 2016 года, увеличивается применение роботизированных систем, регулирование работы которых возможно на дистанционном управлении [1-3].

Многие технологические процессы, такие, как сооружения скважин, забивка шпунтов, стержней и другие основаны на применении виброударных ма-

шин. Широкое применение для таких технологий получили пневматические ударные машины, обладающие такими неоспоримыми достоинствами, как конструктивная простота, низкая стоимость, безопасность и надежность работы в неблагоприятных условиях [4-6].

Актуальной задачей в контексте развития роботизированных технологий и реализации адаптивных процессов воздействия на породный массив может являться создание пневматических ударных машин, конструкции которых позволят изменять не только величину, но и структуру импульсного силового воздействия на рабочий инструмент в зависимости от свойств разрабатываемого породного массива. Для оценки такой возможности необходимо разработать принципиальную конструктивную схему пневмоударного устройства и провести исследование динамики рабочего цикла посредством имитационного моделирования.

Методы и материалы

В современных конструкциях пневмоударных машин применяются следующие типы воздухораспределений [7,8]:

1. Золотниковое
2. Дроссельное
3. Комбинированное (клапанно-беззолотниковое)
4. Беззолотниковое (бесклапанное)
5. Клапанное

Первые три типа не получили широкого распространения из-за сложности конструктивного исполнения, повышенного удельного расхода энергоносителя и недостаточной надежности работы.

Беззолотниковый тип воздухораспределения получил широкое применение. Такого рода рабочий цикл был реализован в ИГД СО АН СССР при создании конструкций пневмопробойников ИП4603, СО134, СО144 и других, получивших известность, как в нашей стране, так и за рубежом. Пневмопробойники используются для крепления бортов карьеров, для строительства дренажных систем, для сооружения скважин и забивки в грунт металлических труб-кожухов при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций [9-13].

Не меньшей известностью во всем мире пользуются значительно более крупные пневмоударные машины - пневмомолоты. Первое поколение пневмомолотов представлено машинами СО166, М200, М400, которые были с таким же бесклапанным типом воздухораспределения. Однако расширение диапазона технических возможностей посредством увеличения ударной мощности, было ограничено производительностью передвижных компрессоров. Поэтому задача дальнейшего повышения мощности пневмомолотов решалась за счет улучшения удельных показателей рабочего цикла. В конце прошлого века в ИГД СО РАН были разработаны пневмомолоты следующего поколения «Тайфун» с упругим клапаном, установленным на ударнике. Такое решение позволило в 1,5-2 раза уменьшить удельный расход энергоносителя. Пневмомолоты «Тайфун» сегодня успешно применяются в строительстве, как в России, так и за ее пределами [14].

Общим недостатком пневмоударных машин является ограниченная возможность регулирования величины и структуры ударной мощности. Обычно существует возможность уменьшения энергии ударных импульсов за счет уменьшения сечения питающей магистрали устройства или понижения давления воздуха. Частота ударов при этом тоже уменьшается. Если бы частота не снижалась, а оставалась неизменной, или даже увеличивалась, то технологические возможности такой машины были бы шире.

Анализ возможных вариантов конструкций пневмоударных механизмов показывает, что наилучшим решением поставленной задачи является установка эластичного клапана на неподвижных деталях устройства. В этом случае можно уменьшить износ клапана и увеличить ресурс работы устройства в целом, особенно в условиях запыленности. Кроме того, решается проблема эффективного режима регулирования параметров непосредственно в процессе работы. Это расширяет возможности реализации адаптивных технологических процессов и позволит использовать такие машины в составе роботизированных буровых комплексов [8, 15, 16].

С учетом изложенных факторов в ИГД СО РАН разработана и запатентована вариант принципиальная конструктивная схема пневматического устройства ударного действия с упругим клапаном [17]. Схема устройства представлена на рис. 1.

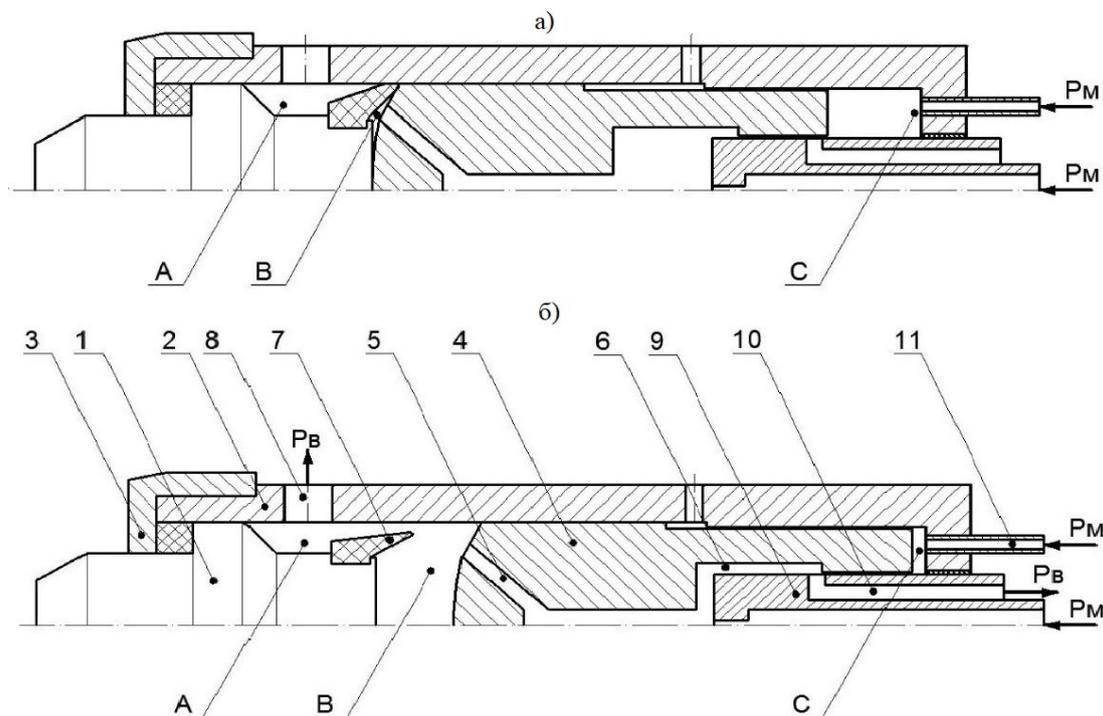


Рис. 1. Конструктивная схема пневмоударного устройства

1 – наковальня; 2 – корпус; 3 – передняя гайка; 4 – ударник; 5 – канал; 6 – проточка в ударнике; 7 – клапан; 8 – выхлопное отверстие; 9 – центральный патрубок; 10 – выхлопные каналы в патрубке; 11 – впускной патрубок; А – камера выхлопа; В – камера обратного хода; С – камера прямого хода; P_m – магистральное давление; P_v – атмосферное давление

Устройство содержит наковальню 1, соединенную с корпусом 2, посредством гайки 3, установленный в корпусе 2 с возможностью перемещения ударник 4, продольный канал 5 и проточку 6 выполненные в ударнике 4, камеру А выхлопа, камеру В обратного хода и камеру С прямого хода, запорный клапан 7, установленный на наковальне 1 с возможностью перекрытия камеры В от камеры А, выхлопные отверстия 8 в корпусе 2, в задней части корпуса 2 установлен центральный патрубок 9 с возможностью продольного перемещения, выхлопные каналы 10 выполненные в центральном патрубке 9, впускной патрубком 11.

Принцип действия устройства следующий. В камеру С (рис. 1б) подается давление P_m через впускной патрубком 11, тем самым создается усилие на ударник 4 для осуществления прямого хода. При этом запорный клапан 7 находится в свободном (открытом) состоянии, сообщая камеру В с атмосферой P_v через камеру А и выхлопные отверстия 8. Ударник 4 начинает прямой ход (на рис. 1б влево).

В предударный момент (рис. 1а) передний торец ударника 4 прижимает запорный клапан 7 ко внутренней поверхности корпуса 2, отсекая камеру В от атмосферы P_v . Одновременно давление по продольному каналу 5 поддерживает запорный клапан 7 в закрытом состоянии и воздействует на передний торец ударника 4. За счет разницы площадей переднего и заднего торцов ударника 4, последний совершает обратный ход.

По окончании обратного хода камера В через продольный канал 5 в ударнике 4, проточку 6 в ударнике 4 и выхлопные каналы 10 в центральном патрубке 9 сообщается с атмосферой P_v . В камере В происходит первоначальное падение давления и запорный клапан 7 под действием собственной силы упругости принимает своё исходное положение, сообщая камеру В через камеру А и выхлопные отверстия 8 в корпусе 2 с атмосферой P_v . Ударник 4 начинает прямой ход и цикл повторяется.

Продольное перемещение центрального патрубка 9 относительно корпуса 2, позволяет изменить момент соединения камеры В через продольный канал 5 и проточку 6 в ударнике 4, выхлопные каналы 10 с атмосферой P_v . При движении центрального патрубка 9 в сторону наковальни 1 величина хода ударника 4 и, соответственно, энергия удара уменьшаются, а частота ударов повышается. При отдалении центрального патрубка 9 от наковальни 1 величина хода ударника 4 и, соответственно, энергия удара увеличиваются, а частота ударов уменьшается. Таким образом, появляется возможность регулировать величину хода ударника 4 и соответственно энергетические параметры устройства, то есть энергию и частоту ударов.

Для исследования динамики рабочего цикла предлагаемого устройства целесообразно на первоначальном этапе представить его в виде обобщенной расчетной схемы с обозначениями объемов рабочих камер V и сечениями каналов S (рис. 2а). На втором этапе необходимо преобразовать обобщенную схему в пневматическую, в которой переменные объемы были представлены в виде цилиндров, сечения каналов в виде дросселей с заданным сечением, а компрессор КМ заменен на источник постоянного давления M (рис. 2б). Такую пневматическую

схему можно считать уточненной после первоначального имитационного моделирования, результаты которого приведены в [8, 18], и последующей проведенной валидации имитационной модели путем проведения экспериментов на физической модели. Результаты экспериментов на физической модели приведены в [19].

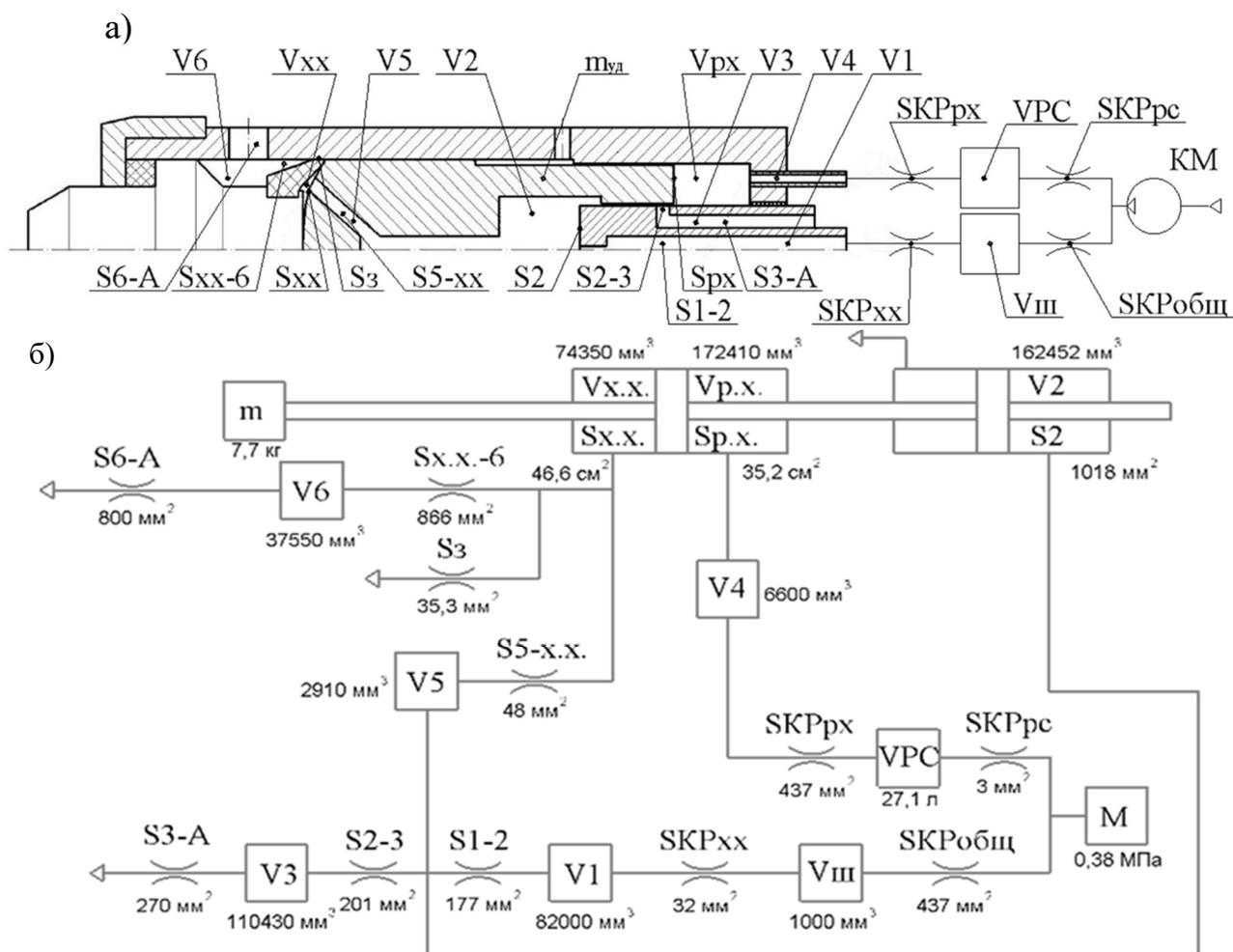


Рис. 2. Обобщенная расчетная схема пневмоударного устройства (а) и пневматическая схема устройства с заданными параметрами (б)

SKPобщ, SKPpc, SKPpx, SKPxx, S1-2, S2, S2-3, S3-A, Sxx, Spx, S3, S5-xx, S6-A, Sxx-6 – площади проходных сечений; VPC, Vш, V1, V2, V3, V4, V5, V6, Vxx, Vpx – объемы камер; m_{уд} – масса ударника; KM – компрессор; M – источник постоянного давления

Для исследования динамики рабочего цикла пневмоударных систем в ИГД СО РАН широко применяется программный комплекс SimulationX (ITISimX) для моделирования физико-технических объектов и систем [20].

С учетом пневматической схемы в программе ITISimX была построена расчетная схема пневмоударной системы. Расчетная схема, составленная в программе, приведена на рис. 3.

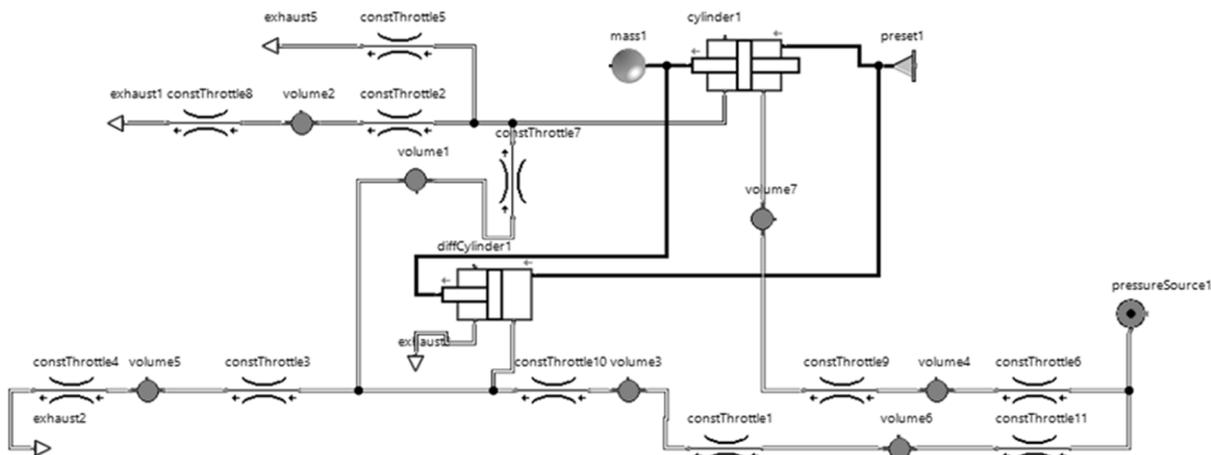


Рис. 3. Расчетная схема пневмоударной системы в программе ITISimX

Имитационное исследование проводилось при параметрах, представленных на рис. 2б. Величина перемещения центрального патрубка изменялась в диапазоне от 40 до 94 мм.

Результаты

По результатам имитационного моделирования пневмоударной системы построены графики изменения энергетических и динамических параметров от величины рабочего хода ударника, приведенные на рис. 4.

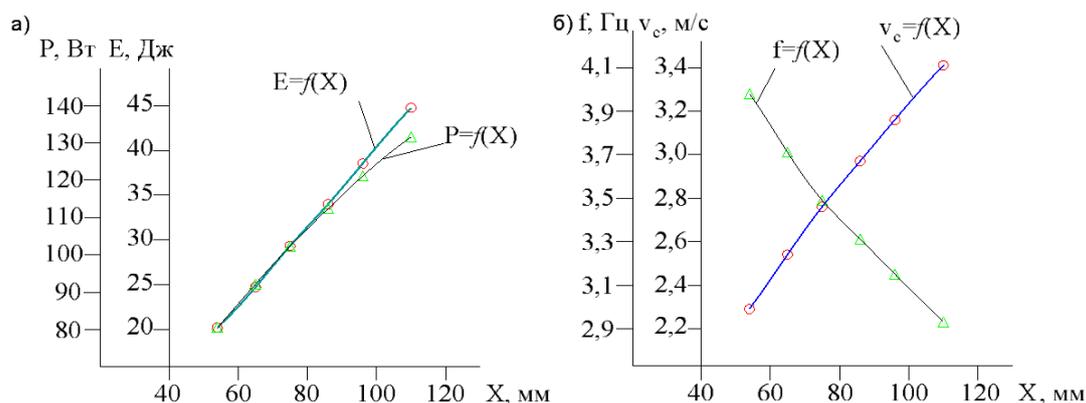


Рис. 4. Графики изменения мощности P и энергии удара E (а), частоты f и скорости удара v_c (б) от величины рабочего хода X

На рис. 5 приведены результаты имитационного исследования энергетических и динамических параметров от величины рабочего хода ударника с переменной величиной рабочего хода. Это достигалось перемещением центрального патрубка в диапазоне от 40 до 180 мм.

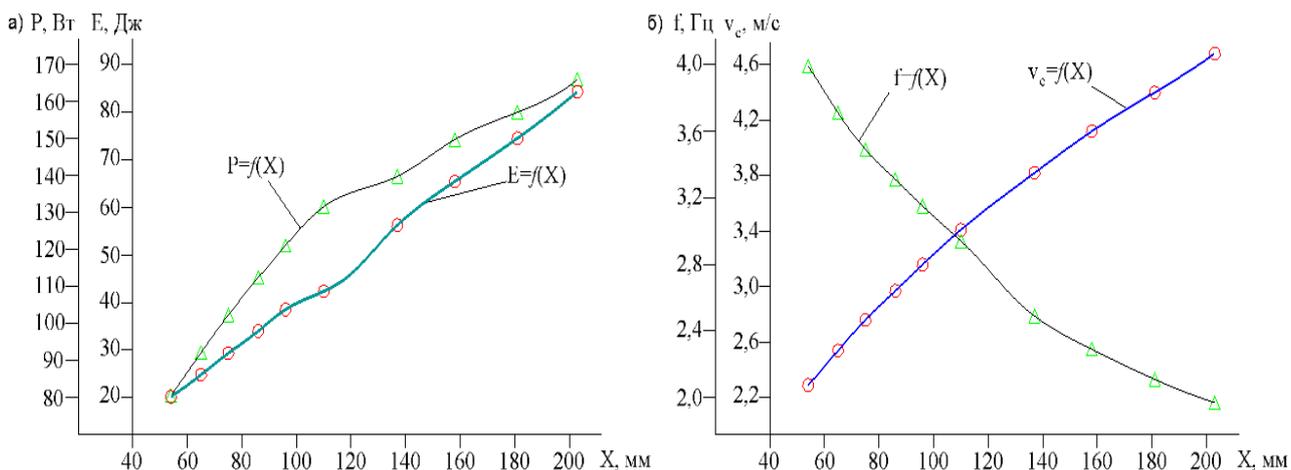


Рис. 5. Изменение мощности P и энергии удара E (а), частоты f и скорости удара v_c (б) от величины рабочего хода X

Обсуждение

Графики, приведенные на рис. 4а, показывают, что перемещение центрального патрубка в конструктивно достижимом диапазоне от 40 до 94 мм приводит к повышению энергии удара примерно в 2 раза. Частота ударов при этом закономерно уменьшается (рис. 4б). В итоге ударная мощность увеличивается примерно в 1,5 раза.

На следующем этапе вычислительных опытов был увеличен диапазон перемещения центрального патрубка. Из графиков на рис. 5а видно, что перемещение патрубка в диапазоне от 40 до 180 мм приводит к повышению энергии удара примерно в 4,2 раза, а мощности примерно в 2 раза. Графики на рис. 5б отражают снижение частоты ударов примерно в 2 раза и повышение скорости соударения в 2 раза в том же диапазоне перемещения патрубка.

Результаты проведенного исследования показывает, что предложенная конструктивная схема позволяет изменять структуру ударной мощности, не прибегая к изменению параметров подаваемого в машину энергоносителя. Уменьшение энергии ударных импульсов сопровождается увеличением их частоты, и наоборот. Это и требуется для реализации адаптивных технологий.

Регулирование параметров рабочего цикла может производиться непосредственно в процессе работы машины. Выбор рационального диапазона перемещения воздухораспределительного патрубка позволяет предусмотреть возможность кратковременного включения форсированного режима работы с увеличенной энергией, если это необходимо для устранения нештатной технологической проблемы.

Заключение

Проведенный анализ типов воздухораспределений и существующих конструкций пневмоударных машин позволил синтезировать новую принципиальную конструктивную схему пневматического устройства ударного действия, позволяющего в процессе работы изменять величину и структуру ударной мощ-

ности. Проведенное имитационное моделирование динамики рабочего цикла пневмоударного устройства подтверждает возможность изменения параметров в процессе работы. Результаты моделирования позволяют создать опытный образец пневмоударного устройства для реализации адаптивных буровых технологических процессов и для работы в составе роботизированных комплексов с использованием автоматизированных систем управления. Применение таких систем позволит обеспечить выполнение буровых работ без непосредственного участия оператора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых / Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 4-15.
2. Dadhich S., Bodin U., Andersson U., 2016, Key challenges in automation of earth-moving machines, *Automation in Construction*. 68, 212-222.
3. Marshall J.A., Bonchis A., Nebot E., Sheding S. Robotics in mining // Springer handbook of robotics. Springer, Cham, 2016; 1549-1576.
4. Rakhmangulov, A, Sustainable pen pit mining and technical systems: concept, principles, and indicators / A. Rakhmangulov, K. Burmostrov, N. Osintsev // Sustainability. – 2021. № 13 (3). – Pp. 1101.
5. Марданов В.А., Ткаченко Д.Г. Об использовании робототехники при ведении горнопроходческих работ // В сборнике: Проблемы горного дела. Сборник научных трудов II Международного Форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященного 100-летию ДонНТУ. Донецкий национальный технический университет; Институт горного дела и геологии. г. Донецк, 2021. С. 89-93.
6. Кауркин И.А., Зиновьев В.В. Роботизация в горнодобывающей промышленности // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «РОССИЯ МОЛОДАЯ». – 2017. – С. 35006.
7. Суднишников Б. В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. – Новосибирск: «Наука», 1985. – 135 с.
8. Плохих В.В., Чещин Д.О. Обоснование принципиальной схемы и исследование динамических параметров пневмоударной машины с изменяемой структурой ударной мощности // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 25-28 октября 2021 г. – М: ИПКОН РАН, 2021. – С. 173 – 177.
9. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Пневмопробойники. - Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1990. – 217 с.
10. Гурков К.С., Муталов Ф.М., Смоляницкий Б.Н. Дальнейшее развитие применения пневмопробойников в строительстве // Механизация строительства. – 1993. – № 1. – С. 9-10.
11. Быков В.И., Потемкин В.П. Оборудование для пробивки скважин в грунте // Механизация строительства. – 1990. – № 2. – С. 9-11.
12. Григоращенко В.А. Прокладка металлических труб пневмопробойниками. – Новосибирск: Изд. ИГД СО АН СССР. Препринт №38, 1990. – 32 с.
13. Климашко В.В., Гилета В.П., Смоляницкий Б.Н. Пути повышения энергии удара машин для забивания труб при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций // Механика горных пород. Горное и строительное машиноведение. Технология горных работ: сб. науч. Тр. / ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1993.
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., Чецин Д.О. Исследование динамических параметров и рабочего цикла виброударных систем, участвующих в реализации адаптивных технологических процессов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Международный научный конгресс, Новосибирск: Международная научная конференция «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов в 8 т. Т. 2 № 4. – Новосибирск: СГУГиТ, 2021. – С. 67 – 77.
16. Петреев А.М. Кольцевой упругий клапан в пневмоударных машинах [Текст] / А.М. Петреев, А.Ю. Примычкин, Д.С. Воронцов // ФТПРПИ. – 2010 – № 4. – С. 56-65.
17. Патент ПМ РФ №208325 Устройство ударного действия / Данилов Б.Б., Плохих В.В., Речкин А.А., Чецин Д.О. / Б.35 от 14.12.2021.
18. Плохих В.В., Данилов Б.Б., Чецин 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.
19. Плохих В.В., Чецин Д.О. Исследование рабочего цикла физической модели пневмоударной машины с изменяемой структурой ударной мощности // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Омск, СибАДИ, 2022. – С. 24 – 29.
20. Официальный сайт компании ESI Group [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esi-group.com/products/system-simulation>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения (29.03.2022)).

© В. В. Плохих, Б. Б. Данилов, Д. О. Чецин, 2022