

УДК 662.233.53

Плохих Вадим Валерьевич

младший научный сотрудник,
отдел горной и строительной геотехники,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
СО РАН,
630091, Новосибирск,
ул. Красный проспект, 54
e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ЗАМЫКАНИЯ УПРУГОГО КЛАПАНА И ПРИМЕНЕНИЕ ЕГО В ПНЕВМОУДАРНОЙ МАШИНЕ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ РАБОЧЕГО ЦИКЛА

Аннотация:

Рассматривается проблема создания новых пневматических ударных машин для повышения эффективности и безопасности горных работ. Решением этой проблемы может быть создание пневмоударных машин, позволяющих реализовать «адаптивные технологии», в которых необходимо изменение энергетических параметров машины в зависимости от свойств обрабатываемой среды, непосредственно в процессе работы. В последующем такие технологии могут быть основой «беспилотных технологических процессов», в которых управление режимами бурения осуществляется дистанционно и автоматически без присутствия оператора в месте проведения работ. Анализ существующих пневмоударных машин показал, что такие устройства не могут быть использованы для реализации упомянутых технологий из-за ограниченной возможности регулирования своих параметров. Варьирование параметров в таких машинах возможно только за счет изменения сечения питающей магистрали или давления энергоносителя. С учетом этого предложена новая принципиальная конструктивная схема пневмоударного устройства с упругим клапаном, в которой возможно регулирование параметров (энергии и частоты ударов). Для определения условий срабатывания упругого клапана в воздухораспределительной системе машины был создан стенд на основе физической модели устройства. На основе результатов экспериментальных исследований работы клапана изготовлена физическая модель пневмоударной машины. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность регулировки динамических и энергетических параметров устройства непосредственно в процессе работы. Проведена валидация имитационной модели. Дополнительные исследования, проведенные на модели, позволили увеличить диапазон изменения энергетических параметров устройства. Полученные результаты могут являться основой для создания опытного образца пневмоударного устройства.

Ключевые слова: адаптивные технологии, беспилотные технологии, пневмоударная машина, упругий клапан, воздухораспределение, условия срабатывания, резина.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.094

Plokhikh Vadim V.

Junior Researcher,
Department of mining and
construction geotechnics,
Institute of Mining n.a. N.A. Chinakal,
Siberian Branch of RAS,
630091 Novosibirsk, 54 Krasny Prospect;
e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

RESULTS OF INVESTIGATION OF MECHANICAL CLOSING PROCESS OF ELASTIC VALVE AND ITS APPLICATION IN PNEUMATIC PERCUSSION MACHINE WITH ADJUSTABLE OPERATING CYCLE PARAMETERS

Abstract:

The paper considers the problem of creating new pneumatic percussion machines to improve the efficiency and safety of mining operations. The solution to this problem can be the creation of pneumatic impact machines that allow the implementation of «adaptive technologies», in which it is necessary to change the energy parameters of the machine, depending on the properties of the medium being processed, directly in the process of operation. In the future, such technologies can be the basis of «unmanned technological processes», in which drilling modes are controlled remotely and automatically without the presence of an operator at the work site. An analysis of existing pneumatic impact machines showed that such devices cannot be used to implement the mentioned technologies due to the limited ability of controlling their parameters. Variation of parameters in such machines is possible only by changing the cross section of the supply line or the pressure of the energy carrier. With this in mind, a new basic design diagram of a pneumatic percussion device with an elastic valve is proposed, in which it is possible to control the parameters (energy and frequency of impacts). To determine the conditions for the operation of a flexible valve in the air distribution system of the machine, a stand was created based on the physical model of the device. Based on the results of experimental studies of the valve operation, a physical model of a pneumatic impact machine was made. The results of experimental studies confirmed the possibility of adjusting the dynamic and energy parameters of the device directly in the process of operation. The simulation model was validated. Additional studies carried out on the model made it possible to increase the range of changes in the energy parameters of the device. The results obtained can be the basis for creating a prototype of a pneumatic percussion device.

Key words: adaptive technologies, unmanned technologies, pneumatic percussion machine, elastic valve, air distribution, triggering conditions, rubber.

Введение

Бурение скважин в породном массиве является важной частью технологических процессов в горном деле, строительстве и других отраслях промышленности. Эффективными способами разрушения горных пород являются способы, основанные на ударном воздействии. Чаще всего в качестве источника удара используются пневматические ударные устройства. Пневмоударные устройства обладают такими достоинствами, как конструктивная простота, невысокая стоимость, надежность и возможность эксплуатации в неблагоприятных условиях. В горном производстве пневмоударные машины нашли широкое применение как в подземных, так и на открытых горных работах при бурении скважин, шпуров и других видах работ [1 – 5].

Одним из решений проблемы повышения эффективности и безопасности горных работ может быть создание пневматических ударных устройств, конструкции которых позволяют реализовать адаптивные технологические процессы. Смысл «адаптивных технологий» заключается в наличии обратной связи, позволяющей изменять динамические и энергетические параметры рабочего инструмента в зависимости от физических свойств обрабатываемого породного массива. Необходимо отметить, что изменение параметров устройства должно производиться непосредственно в процессе бурения. Это не только позволит снизить себестоимость производства горных работ, но и повысит их эффективность. Кроме того, появляется возможность внедрения так называемых «безлюдных технологий», в которых технологические операции бурения осуществляются без присутствия персонала в месте ведения работ [6].

Состояние вопроса

Перспективными базовыми устройствами для решения поставленной задачи могут быть пневматические ударные машины, в системе воздухораспределения которых применяются упругие клапаны [7]. Наибольший вклад в исследование пневмоударных машин с упругими клапанами внесли следующие ученые: Гаун В.А., Червов В.В., Смоляницкий Б.Н., Петреев А.М., Примычкин А.Ю. Учеными были проведены исследования упругих клапанов, имеющих круглое и прямоугольное сечение и применяемых в воздухораспределительных системах различных пневматических ударных машин [8 – 11]. Однако в таких машинах регулирование энергетических и динамических параметров возможно путем изменения сечения питающей магистрали или давления энергоносителя. При этом уменьшение одного из регулируемых параметров, например энергии удара, одновременно приводит к уменьшению и частоты ударов, в результате значительно уменьшается ударная мощность.

Исходя из вышесказанного, в ИГД СО РАН разработана и запатентована новая принципиальная конструктивная схема пневматического устройства ударного действия на основе комбинированного воздухораспределения с упругим клапаном и подвижным патрубком [12]. Перемещение подвижного патрубка приводит к изменению рабочего хода ударника. Такое конструктивное решение позволяет в процессе бурения изменять энергию и частоту ударов разнонаправленно (то есть при уменьшении энергии частота увеличивается, и наоборот), в отличие от существующих пневмоударных машин.

Предварительное имитационное моделирование позволило определить основные конструктивные параметры пневмоударного устройства [6]. Для устойчивой работы машины необходимо исследование динамики работы упругого клапана в системе распределения энергоносителя. В частности, необходимо определить условия срабатывания упругого клапана.

Экспериментальные исследования динамики клапана тарельчатого типа

Для проведения экспериментального исследования был разработан и изготовлен специальный стенд, конструкция которого показана на рис. 1.

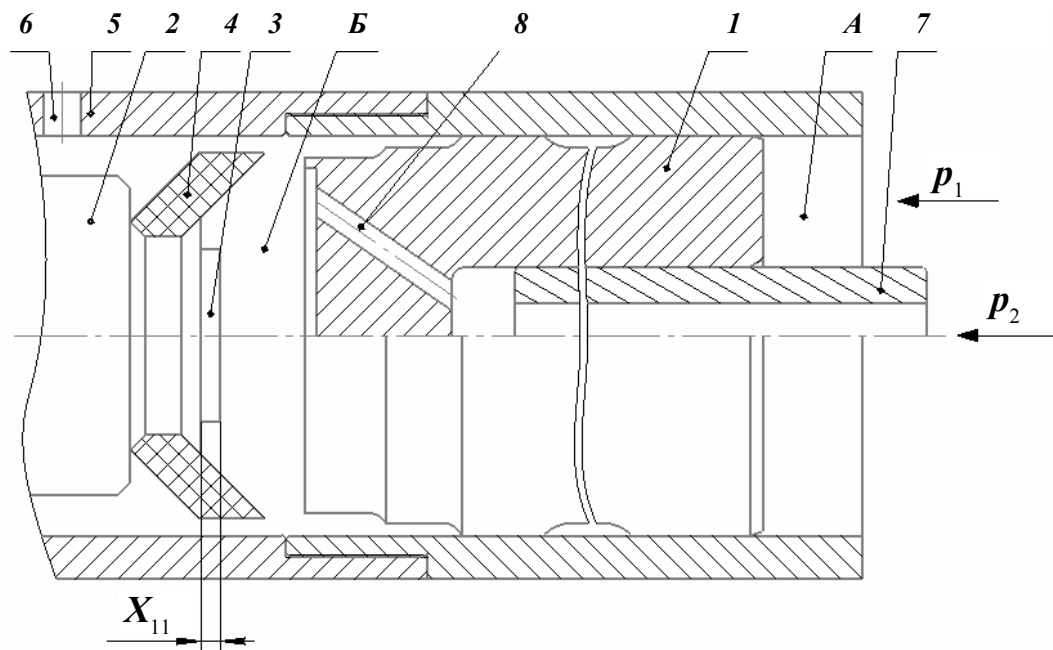


Рис. 1. Конструкция специального стенда:

- 1 – ударник; 2 – наковальня; 3 – подвижная шайба; 4 – упругий клапан; 5 – корпус;
6 – выхлопное отверстие; 7 – трубка; 8 – канал в ударнике;
 X_{11} – величина вылета подвижной шайбы; p – магистральное давление;
A – камера рабочего хода; B – камера холостого хода

Основными элементами стенда являются ударник 1, неподвижная наковальня 2, установленная в корпусе 5, подвижная шайба 3, с помощью которой регулировалась величина вылета X_{11} , и, соответственно, исходная величина прижатия упругого клапана к внутренней поверхности корпуса, упругий клапан 4 и трубка подачи энергоносителя 7 в камеру холостого хода B перед клапаном. Для создания необходимого давления использовался компрессор, подключенный к трубке 7 и к камере рабочего хода A.

Задача заключалась в определении усилия, необходимого для закрытия эластичного клапана. Для этого производилась подача воздуха с давлением p_1 в камеру рабочего хода A. Одновременно в камеру B подавался воздух с меньшим давлением. Пока клапан не закроется, воздух из камеры B будет беспрепятственно выходить в атмосферу по кольцевому зазору между клапаном и корпусом. При достижении определенного давления воздуха p_1 в камере A ударник 1 движется влево, преодолевая сопротивление деформации клапана 4 и происходит механическое закрытие упругого клапана. При этом увеличивается давление воздуха в камере B, что и является сигналом закрытия клапана. Таким образом определялось давление закрытия клапана $P_{\text{закр.}}$.

Далее увеличивали давление воздуха p_2 , подаваемое в камеру B через трубку 7. Так как величина рабочей площади со стороны камеры B больше, чем со стороны камеры A ударника 1, последний под действием результирующей силы от давления энергоносителя движется в заднее положение (на рис. 1 вправо). Клапан 4 под действием давления воздуха находится в растянутом (закрытом) положении. После этого осуществлялось плавное снижение давления воздуха в камере B до открытия клапана и резкого падения давления энергоносителя в этой камере. Так определялось давление открытия упругого клапана $P_{\text{сх.}}$, фиксируемое с помощью манометра. Общий вид стенда с машиной и компрессором представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид стенда для испытания клапанов:
1 – машина; 2 – кран подачи давления в камеру рабочего хода;
3 – кран подачи давления в камеру холостого хода; 4 – компрессор;
5 – манометр; 6 – выхлопное отверстие

В качестве материала для упругих клапанов тарельчатого типа использовалась резина с модулем упругости $E = 5$ МПа, коэффициентом Пуассона $\mu = 0,31$ [13]. Наружный диаметр клапанов – $\varnothing 72$ мм.

Предварительная конструкция клапанов и размеры приняты из работы [14]. Конструктивные формы клапанов, с которыми проводились исследования, представлены на рис. 3а – в.

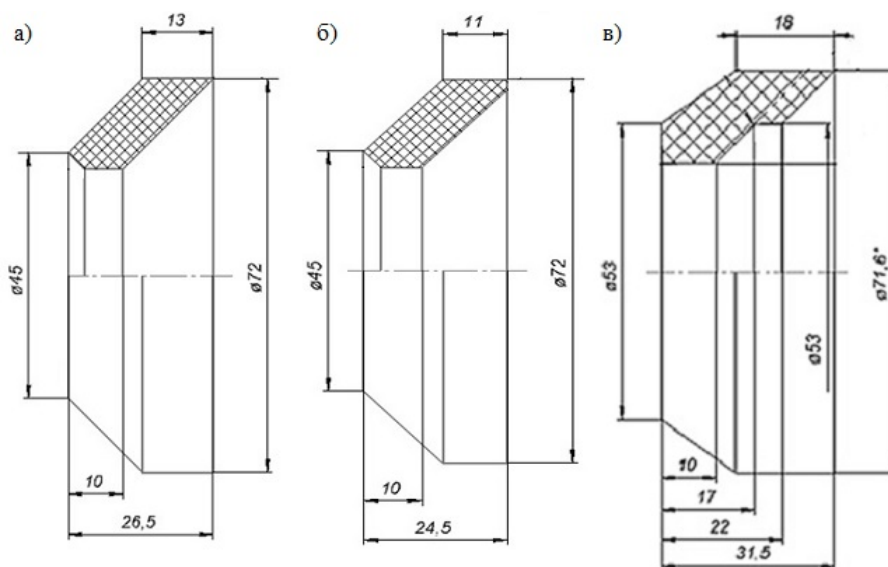


Рис. 3. Конструкции упругих клапанов:
а – тарельчатого типа; б – тарельчатого типа без кромки;
в – тарельчатого типа с увеличенной кромкой

По результатам экспериментов с упругими клапанами тарельчатого типа можно сделать следующие выводы:

1. Закрытие клапана, изображенного на рис. 3а, и герметизация камеры холостого хода *Б* достигнуты при величине вылета шайбы $X_{\text{п}}=7,7$ мм (см. рис.1), после снижения давления воздуха открытие резинового клапана происходит при $P_{\text{сх.}}=0,2$ МПа. Также определено минимально необходимое давление воздуха в камере рабочего хода для закрытия клапана ударником, составившее $P_{\text{закр.}}=0,5$ МПа.

2. Отличием клапана, приведенного на рис. 3б является уменьшение ширины кромки, прилегающей к внутренней части поверхности корпуса, на 2 мм. Без установки подвижной шайбы ($X_{\text{п}}=0$) клапан герметизировал камеру холостого хода. По мере снижения давления воздуха величина открытия резинового клапана составила $P_{\text{сх.}}=0,1$ МПа. Минимальное давление воздуха, необходимое в камере рабочего хода для закрытия клапана ударником, составило $P_{\text{закр.}}=0,115$ МПа.

3. При установке величины вылета подвижной шайбы $X_{\text{п}}=8,4$ мм клапан, показанный на рис. 3в, оказался герметичным. После снижения давления воздуха открытие резинового клапана произошло при $P_{\text{сх.}}=0,09$ МПа. Получено минимальное давление воздуха, необходимое в камере рабочего хода для закрытия клапана, равное $P_{\text{закр.}}=0,45$ МПа.

Таким образом, из результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что наиболее приемлемым для установки в новом пневмоударном устройстве является тарельчатый клапан, изображенный на рис. 3а, с величиной давления открытия, равной $P_{\text{сх.}}=0,2$ МПа. Такая величина давления позволит раньше переводить клапан в открытое состояние, что позволит уменьшить время задержки ударника перед началом рабочего хода и улучшить динамику рабочего цикла ударной машины.

Испытания физической модели пневмоударной машины с клапаном тарельчатого типа

Полученные результаты стендовых испытаний позволили перейти к испытаниям физической модели пневмоударной машины. Стенд с установленной машиной и оборудованием представлен на рис. 4.

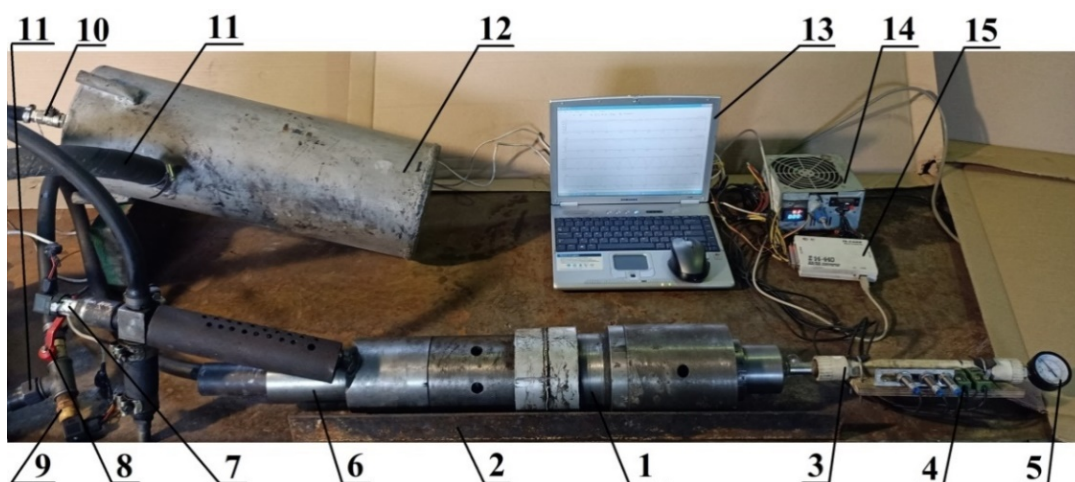


Рис. 4. Общий вид испытательного стенда:

- 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 (АЦП)

Пневмоударная машина 1 была установлена на неподвижном основании 2. В ударник был ввернут стержень с металлическим поршнем на конце, позволяющий отслеживать его положение в корпусе. Поршень был установлен в герметичную пластиковую трубку 3, присоединенную к передней части машины. Вблизи пластиковой трубки были установлены индуктивные датчики 4, отслеживающие положение ударника. Подача энергоносителя в машину осуществлялась от компрессора с номинальным давлением 0,4 МПа. Подача воздуха в камеры машины происходила следующим образом. Сжатый воздух от компрессора через магистральный шланг 11, шаровой кран 8 поступал в камеру холостого хода. Одновременно воздух поступал 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 осуществляется регулировка подачи сжатого воздуха в камеру холостого хода. Для измерения давления в камере холостого хода установлен датчик 9. Калибровка измеряемого давления осуществлялась 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), осуществлялось 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 [15].

Питание индуктивных датчиков 4, датчиков давления 7, 9 и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 15 осуществлялось с помощью источника питания 14. После выхода машины на устойчивый режим работы датчики 4 фиксировали положение ударника, а датчики 7, 9 – изменение давлений в рабочих камерах машины. Далее сигналы с датчиков поступали на АЦП 15. Первоначальная обработка поступающих данных с АЦП производилась с помощью программы LGraph на персональном компьютере 13 [16]. Последующая обработка и представление полученных результатов в графическом виде производилась в программе Microsoft Excel.

Результаты экспериментального исследования отражены в виде графиков изменения энергетических и динамических параметров от величины рабочего хода X пневмоударной машины, приведенных на рис. 5.

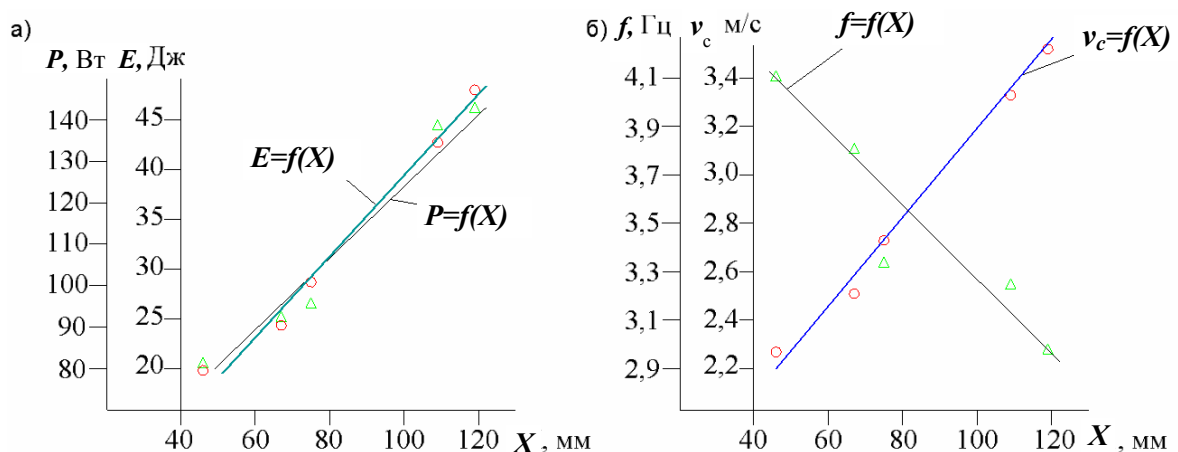


Рис. 5. Изменение ударной мощности P и энергии удара E (а), частоты f и скорости соударения v_c (б) от величины рабочего хода X пневмоударной машины

Графики на рис. 5а показывают, что рост величины перемещения центрального патрубка H_p от 40 до 95 мм приводит к повышению энергии удара примерно в 2,4 раза, а ударной мощности – примерно в 1,7 раз. Графики, представленные на рис. 5б, ото-

бражают снижение частоты ударов примерно в 1,4 раза и повышение скорости соударения – в 1,5 раза. По результатам экспериментальных исследований была проведена валидация имитационной модели.

Решением проблемы увеличения диапазона изменения параметров машины может являться увеличение рабочего хода ударника. В связи с этим было проведено исследование изменения параметров устройства в увеличенном диапазоне перемещения центрального патрубка от 40 до 180 мм на имитационной модели в программе ITISimX [13].

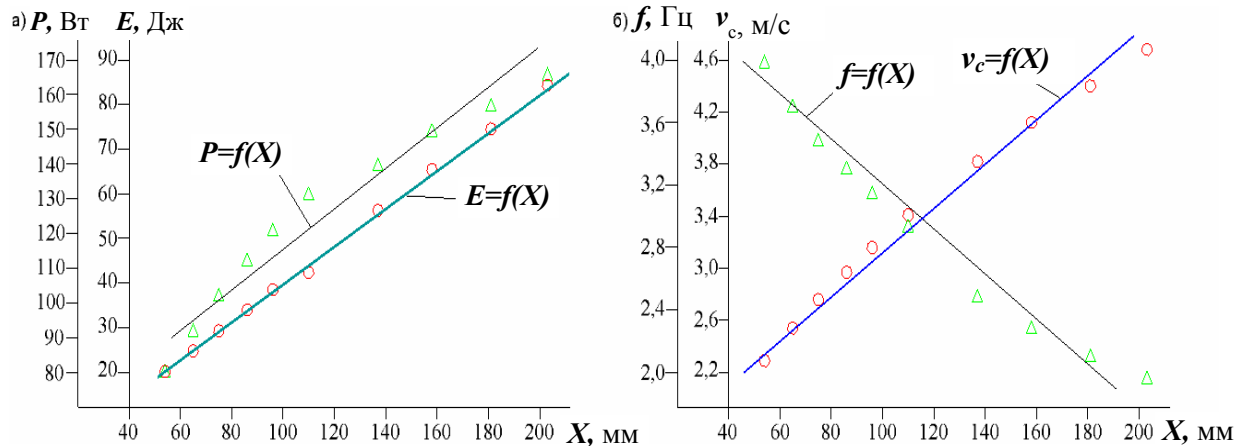


Рис. 6. Изменение мощности P и энергии удара E (а), частоты f и скорости удара v_c (б) от величины рабочего хода X пневмоударной машины при имитационном моделировании

Из графиков на рис. 6а видно, что изменение величины перемещения центрального патрубка в увеличенном диапазоне $H_p=40-180$ мм приводит к повышению энергии удара примерно в 4,2 раза, а ударной мощности – примерно в 2 раза. Графики на рис. 6б отображают снижение частоты ударов в 2 раза и повышение скорости соударения примерно в 2 раза.

На графике ударной мощности (рис. 6а) можно выделить два диапазона. В первом диапазоне $X=54-110$ мм изменение ударной мощности составляет $\delta P=51$ Вт. Во втором диапазоне $X=110-203$ мм – $\delta P=35$ Вт. С большой долей вероятности можно предполагать, что при увеличении диапазона перемещения подвижного патрубка более $H_p=180$ мм изменение ударной мощности будет снижаться и дальнейшая зависимость $P=f(X)$ получит более пологий линейный характер. Это обстоятельство позволит создать конструкцию опытного образца пневмоударной машины, в которой изменение величины энергии будет осуществляться с минимальными потерями ударной мощности.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования условий срабатывания упругих клапанов тарельчатого типа на физической модели пневмоударной машины позволили определить их величину давления открытия и закрытия. Вследствие этого для дальнейшей работы был выбран клапан тарельчатого типа, имеющий наибольшую величину давления открытия.

Экспериментальные исследования физической модели пневмоударной машины позволили получить графики, показывающие, что изменение динамических и энергетических параметров происходит в малом диапазоне. Последующая валидация имитационной модели и проведение дополнительных исследований позволили увеличить диапазон изменения параметров до значений, необходимых для создания опытного образца пневматической ударной машины. Такую пневмоударную машину можно применить для реализации адаптивных технологических процессов, а в перспективе и для ре-

ализации «безлюдных технологий», в которых технологические операции бурения осуществляются автономно, без нахождения персонала в месте ведения горных работ.

Список литературы

1. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К., 1985. *Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия*. Новосибирск: Наука, 135 с.
2. Rakhmangulov A., Burmostrov K., Osintsev N., 2021. Sustainable pen pit mining and technical systems: concept, principles, and indicators. *Sustainability*, vol. 13, no. 3, article 1101. DOI: 10.3390/su13031101.
3. Марданов В.А., Ткаченко Д.Г., 2021. Об использовании робототехники при ведении горнопроходческих работ. *Проблемы горного дела. Сборник научных трудов II Международного Форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященного 100-летию ДонНТУ*. Донецк, С. 89 – 93.
4. Шевченко А.Н., Храмовских В.А., 2019. О перспективах автоматизированных способов добычи полезных ископаемых. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка полезных ископаемых*. Т. 42, № 1. С. 104 – 111. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111.
5. Atkinson R.D., 2019. Robotics and the future of production and work. Information Technology and Innovation Foundation. URL: <https://itif.org/publications/2019/10/15/robotics-and-future-production-and-work/> (дата обращения 20.02.2023)
6. Плохих В.В., Данилов Б.Б., Чежин Д.О., 2022. Создание и исследование имитационной модели пневматической ударной машины с изменяемой структурой ударной мощности. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, Т. 2, № 3, С. 270 – 278. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-270-278
7. Плохих В.В., 2022. Создание пневматической ударной машины для реализации адаптивных технологических процессов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 91 – 103.
8. Гаун В.А., 1978. *Разработка и исследование погружных пневмоударников с комбинированным воздухораспределением*: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.06. Новосибирск, 19 с.
9. Червов В.В., 2009. *Теория и практика создания пневматических молотов с переменной структурой мощности для реализации бестраншейных технологий прокладки коммуникаций*: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.04. Новосибирск, 289 с.
10. Петреев А.М., Смоляницкий Б.Н., 1999. Согласование параметров пневмомолота с производительностью источника питания. *ФТПРПИ*, № 2, С. 86 – 90.
11. Примычкин А.Ю., 2017. *Обоснование параметров кольцевого упругого клапана системы воздухораспределения при создании пневмоударных машин*: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.06. Новосибирск, 22 с.
12. Пат. 208325 РФ, МПК E21B 1/00 (2006.01). *Устройство ударного действия*. Б.Б. Данилов, В.В. Плохих, А.А. Речкин, Д.О. Чежин; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН. № 2021118386; заявл. 24.06.2021, опублик. 14.12.2021, Бюл. № 35 – 7 с.
13. Потураев В.Н., Дырда В.И., 1977. *Резиновые детали машин*. Москва: Машиностроение, 216 с.
14. Данилов Б.Б., Речкин А.А., 2022. Зависимость изменения энергии боя от формы сечения стационарно установленного упругого клапана при их взаимодействии в ударной машине. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 9, № 2, С. 128 – 133. DOI: 10.15372/FPVGN2022090219
15. SimulationX. *Официальный сайт компании ESI Group*. URL: <https://www.esigroup.com/products/system-simulation> (дата обращения: 22.01.2023).
16. АЦП E14-440. *Официальный сайт компании L-CARD*. URL: <http://www.lcard.ru/> (дата обращения 22.01.2023).

References

1. Sudnishnikov B.V., Esin N.N., Tupitsyn K.K., 1985. Issledovanie i konstruirovaniye pnevmaticheskikh mashin udarnogo deistviya [Research and design of pneumatic impact machines]. Novosibirsk: Nauka, 135 p.
2. Rakhmangulov A., Burmostrov K., Osintsev N., 2021. Sustainable pen pit mining and technical systems: concept, principles, and indicators. Sustainability, vol. 13, no. 3, article 1101. DOI: 10.3390/su13031101.
3. Mardanov V.A., Tkachenko D.G., 2021. Ob ispol'zovanii robototekhniki pri vedenii gornoproduktivnykh rabot. Problemy gornogo dela [About the use of robotics in mining operations]. Sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnogo Foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh-gornyakov, po-svyashchennogo 100-letiyu DonNTU. Donetsk, P. 89 - 93.
4. Shevchenko A.N., Khramovskikh V.A., 2019. O perspektivakh avtomatizirovannykh sposobov dobychi poleznykh iskopaemykh [On the prospects of automated methods of mining]. Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka poleznykh iskopaemykh. Vol. 42, № 1. P. 104 - 111. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111.
5. Atkinson R.D., 2019. Robotics and the future of production and work. Information Technology and Innovation Foundation. URL: <https://itif.org/publications/2019/10/15/robotics-and-future-production-and-work/> (дата обращения 20.02.2023)
6. Plokhikh V.V., Danilov B.B., Cheshchin D.O., 2022. Sozdanie i issledovanie imitatsionnoi modeli pnevmaticheskoi udarnoi mashiny s izmenyaemoi strukturoi udarnoi moshchnosti [Creation and research of a simulation model of a pneumatic impact machine with a variable structure of impact power]. Interekspo Geo-Sibir', Vol. 2, № 3, P. 270 – 278. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-270-278
7. Plokhikh V.V., 2022. Sozdanie pnevmaticheskoi udarnoi mashiny dlya realizatsii adaptivnykh tekhnologicheskikh protsessov [Creation of a pneumatic impact machine for the implementation of adaptive technological processes]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 7, P. 91 – 103.
8. Gaun V.A., 1978. Razrabotka i issledovanie pogruzhnykh pnevmoudarnikov s kombinirovannym vozdukhoraspredeleniem [Development and research of submersible pneumatic strikers with combined air distribution]: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.05.06. Novosibirsk, 19 p.
9. Chervov V.V., 2009. Teoriya i praktika sozdaniya pnevmaticheskikh molotov s peremennoi strukturoi moshchnosti dlya realizatsii bestransheinykh tekhnologii prokladki kommunikatsii kommunikatsii [Theory and practice of creating pneumatic hammers with a variable power structure for the implementation of borderless technologies for laying communications]: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.05.04. Novosibirsk, 289 p.
10. Petreev A.M., Smolyanitskii B.N., 1999. Soglasovanie parametrov pnevmomolota s proizvoditel'nost'yu istochnika pitaniya [Matching the parameters of the pneumatic hammer with the performance of the power source]. FTPRPI, № 2, P. 86 – 90.
11. Primychkin A.Yu., 2017. Obosnovanie parametrov kol'tseвого uprugogo klapana sistemy vozdukhoraspredeleniya pri sozdanii pnevmoudarnykh mashin [Substantiation of the parameters for the annular elastic valve of the air distribution system when creating pneumatic impact machines]: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.05.06. Novosibirsk, 22 p.
12. Pat. 208325 RF, MPK E21V 1/00 (2006.01). Ustroistvo udarnogo deistviya [Pat. 208325 RF, IPC E21B 1/00 (2006.01). Shock-action device]. B.B. Danilov, V.V. Plokhikh, A.A. Rechkin, D.O. Cheshchin; zayavitel' i patentoobladatel' IGD SO RAN. № 2021118386; zayavl. 24.06.2021, opubl. 14.12.2021, Byul. № 35 – 7 p.
13. Poturaev V.N., Dyrda V.I., 1977. Rezinovye detali mashin [Rubber machine parts]. Moscow: Mashi-nostroenie, 216 p.

14. Danilov B.B., Rechkin A.A., 2022. Zavisimost' izmeneniya energii boika ot formy secheniya statsionarno ustanovlennogo uprugogo klapana pri ikh vzaimodeistvii v udarnoi mashine [Dependence of the change in the striker energy on the cross-section shape of a stationary elastic valve during their interaction in the shock machine]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol. 9, № 2, P. 128 – 133. DOI: 10.15372/FPVGN 2022090219

15. SimulationX. *Официальный сайт компании ESI Group* [The official website of the ESI Group]. URL: <https://www.esi-group.com/products/system-simulation> (дата обращения: 22.01.2023).

16. ATsP E14-440. *Ofitsial'nyi sait kompanii L-CARD* [The official website of the L-CARD company]. URL: <http://www.lcard.ru/> (data obrashcheniya 22.01.2023).