

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

Результаты экспериментальных исследований динамики клапана прямоугольного сечения

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

Аннотация. В статье рассматривается проблема применения упругого клапана прямоугольного сечения из резины и полиуретана с фаской и без нее в комбинированной воздухораспределительной системе новой пневматической ударной машины. Использование эластичного клапана позволяет регулировать параметры рабочего цикла непосредственно в процессе работы без остановки технологического процесса. Такая машина позволяет реализовать адаптивные технологические процессы и в перспективе может использоваться в «безлюдных технологиях», направленных на повышение эффективности горных работ и безопасности персонала. Разработан стенд, методика и приведены результаты экспериментальных исследований процесса работы упругих клапанов.

Ключевые слова: пневмоударная машина, упругий клапан, полиуретан, резина, условия срабатывания, воздухораспределение

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

Results of experimental studies of the dynamics of a rectangular valve

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

Abstract. The article deals with the problem of using an elastic rectangular valve made of rubber and polyurethane with and without a chamfer in the combined air distribution system of a new pneumatic impact machine. The use of an elastic valve allows you to adjust the parameters of the working cycle directly during operation without stopping the process. Such a machine makes it possible to implement adaptive technological processes and, in the future, can be used in "unmanned technologies" aimed at improving the efficiency of mining operations and the safety of personnel. A stand, a methodology and the results of experimental studies of the process of operation of elastic valves have been developed.

Keywords: pneumatic percussion machine, elastic valve, polyurethane, rubber, actuation conditions, air distribution

Введение

Бурение протяженных скважин в породном массиве является важной частью технологических процессов в горном деле, строительстве и других отраслях народного хозяйства. Эффективными способами разрушения горных пород являются способы, основанные на виброударном воздействии. Чаще всего в качестве источника удара используются пневматические ударные машины. Пневмоударные машины обладают такими достоинствами, как конструктивная про-

стота, низкая стоимость, надежность работы и возможность эксплуатации в неблагоприятных условиях. В горном производстве пневмоударные машины нашли широкое применение, как в подземных условиях, так и на открытых горных работах при бурении скважин, шпуров и других видах работ [1-5].

Повышение эффективности и безопасности ведения горных работ, особенно на больших глубинах, может быть достигнуто путем создания пневматических ударных машин с переменной амплитудно-частотной характеристикой, реализующих адаптивные технологические процессы. Такие машины должны иметь широкий диапазон регулирования энергии и частоты ударных импульсов, а сам процесс регулирования необходимо производить в процессе работы без остановки машины. Впоследствии такие машины могут использоваться в так называемых «безлюдных технологиях». Суть этих технологий рассмотрена в работах [6, 7].

Перспективными базовыми устройствами для решения поставленной задачи являются пневмоударные машины с клапанной системой воздухораспределения [6]. Весомый 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 условий работы упругих клапанов, имеющих круглое и прямоугольное сечение и применяемых в воздухораспределительных системах погружных пневмоударников, пневмомолотов и кольцевых пневмоударных машин [8-13]. В приведенных технических решениях регулирование энергетических и динамических параметров возможно только 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 чего ударная мощность уменьшается весьма значительно.

Исходя из накопленного опыта, в ИГД СО РАН разработана и запатентована новая принципиальная схема пневмоударного устройства на основе комбинированного воздухораспределения с упругим клапаном и центральным подвижным патрубком [14]. Такое конструктивное решение позволяет изменять рабочий ход ударника. При этом изменяется энергия и частота ударных импульсов непосредственно в процессе работы. Важно, что энергетические показатели изменяются разнонаправленно (уменьшение энергии ударных импульсов сопровождается повышением частоты, и наоборот).

В работе [7] представлены результаты испытаний физической модели пневмоударной машины с центральным патрубком и результаты экспериментальных исследований динамики клапана тарельчатого типа. По результатам испытаний установлено, что устройство входит в устойчивый режим работы при давлении 0,4 МПа. При этом величина давления открытия тарельчатого клапана составляет 0,2 МПа. При обычном рабочем давлении 0,5-0,6 МПа такое давление открытия приводит к преждевременному закрытию клапана и нестабильной работе устройства. Поэтому в настоящей работе поставлена задача определения условий срабатывания упругих клапанов, отличающихся формой и материалом.

Методы и материалы

Для определения условий срабатывания кольцевых клапанов прямоугольного сечения из резины и полиуретана был изготовлен специальный стенд. Конструкция стенда представлена на рис. 1.

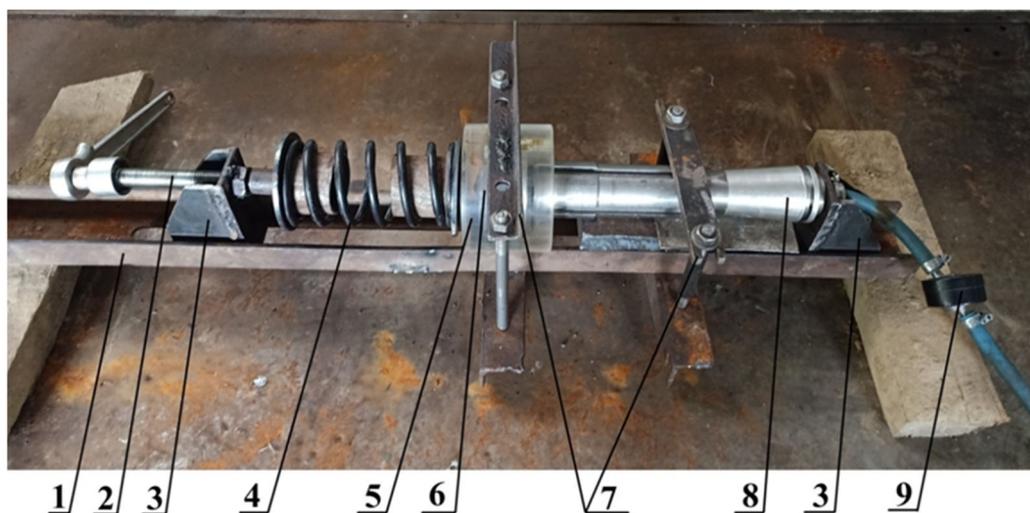


Рис. 1. Исследовательский стенд

1 – швеллер; 2 – винт; 3 – упоры; 4 – пружина; 5 – наковальня; 6 – упругий клапан; 7 – прижимные планки; 8 – ударник; 9 – манометр (1 МПа)

Стенд закреплен на раме в форме швеллера 1. Ударник 8 с осевым каналом внутри для подачи воздуха и наковальня 5, выполненная из органического стекла, и имеющая внутри камеру ступенчатого типа, зажаты между двумя упорами 3 и дополнительно прижаты планками 7 к швеллеру. На левом упоре 3 установлен винт 2, который предназначен для регулируемого перемещения наковальни 5 относительно ударника 8. На ударнике установлен упругий клапан 6, который под действием давления воздуха, поступающего через осевой канал ударника 8, механически деформируется и переходит в закрытое положение, тем самым герметизируя камеру. Для создания необходимого давления в системе использовался компрессор, а для измерения давления – манометр 9, рассчитанный на давление 1 МПа.

Первоначально определялась минимальная величина поджатия клапана Δ от момента касания клапаном торца камеры до механического закрытия клапана и полного прекращения истечения воздуха через кольцевой зазор между клапаном и наковальней (герметизация камеры). Это осуществлялось посредством вкручивания винта 2 и перемещения наковальни 5 в направлении ударника 8. Одновременно по деформации пружины 4 определялось необходимое усилие поджатия клапана $F_{\text{подж.}}$, при которой происходит герметизация камеры. После этого определялось давление закрытия клапана $P_{\text{закр.}}$, которое фиксировалось в момент резкого увеличения давления в камере. Далее происходила проверка сохранения герметичности клапана под действием давления воздуха в рабочем диапазоне пе-

ремещений ударника за счет выкручивания винта 2 и перемещения наковальни 5 от ударника 8. В конце определялось давление открытия упругого клапана $P_{сх.}$, путем плавного снижения давления в камере. По манометру фиксировалось начало резкого падения давления.

Исследования проведены с камерой ступенчатого типа, которая наилучшим образом позволяет механически деформировать клапан и герметизировать камеру. Радиальный зазор между клапаном и внутренней цилиндрической части наковальни изменялся в диапазоне $\theta=2,5-3,5$ мм. В качестве материалов упругих клапанов использовались резина с модулем упругости $E=5$ МПа, коэффициентом Пуассона $\mu=0,31$ и полиуретан с твердостью по Шору 87А [15]. Наружный диаметр клапанов составил $\varnothing 73-75$ мм.

Конструкции упругих клапанов прямоугольного сечения с фаской и без нее из резинового и полиуретанового материалов с наружным диаметром D и шириной h приведены на рис. 2.

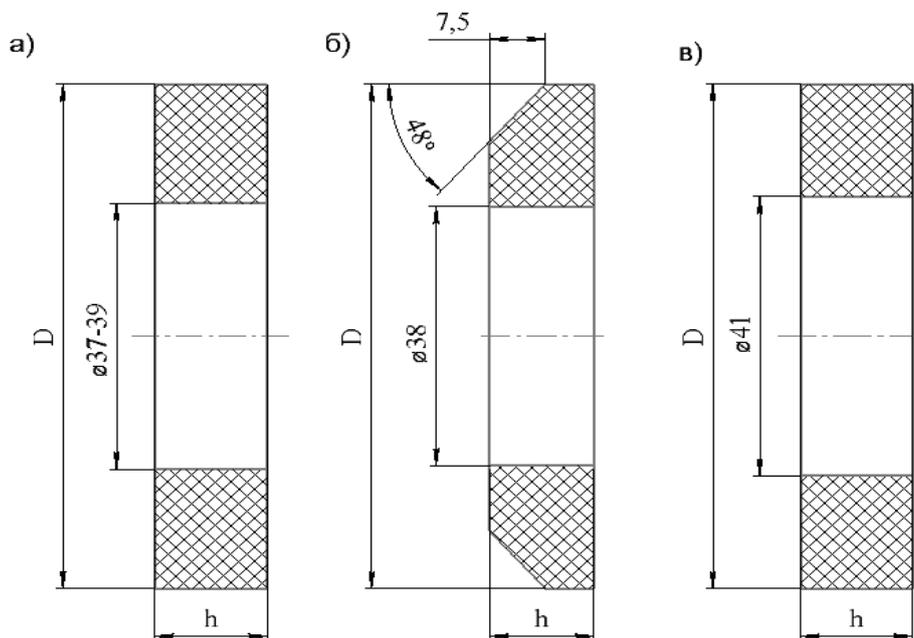


Рис. 2. Конструкции упругих клапанов, применяемые для экспериментальных исследований

- а – упругий клапан прямоугольного сечения;
- б – упругий клапан с фаской;
- в – упругий клапан прямоугольного сечения из полиуретана

Результаты

По результатам исследования построены графики изменения необходимой величины поджатия клапана Δ в зависимости от отношения наружного диаметра клапана к его ширине D/h при радиальном зазоре $\theta=2,5$ и $3,5$ мм между клапаном и наковальней. Графики приведены на рис. 3.

Графики на рис. 3, показывают, что при зазоре $\theta=2,5$ мм для прямоугольного клапана и клапана с фаской из резинового материала необходимая величина поджатия Δ тем больше, чем меньше отношение D/h , Для полиуретанового клапана

величина поджатия не зависит от формы клапана и остается равной 2,3 мм. При уменьшении отношения наружного диаметра клапана к его ширине D/h при зазоре $\theta=3,5$ мм между клапаном и наковальней величина необходимого поджатия Δ для прямоугольного клапана возрастает.

На рис. 4 приведены результаты, отраженные в виде зависимостей изменения величины давления открытия упругого клапана $P_{сх.}$ от отношения диаметра клапана к его ширине D/h при зазорах между клапаном и наковальней $\theta=2,5$ и 3,5 мм.

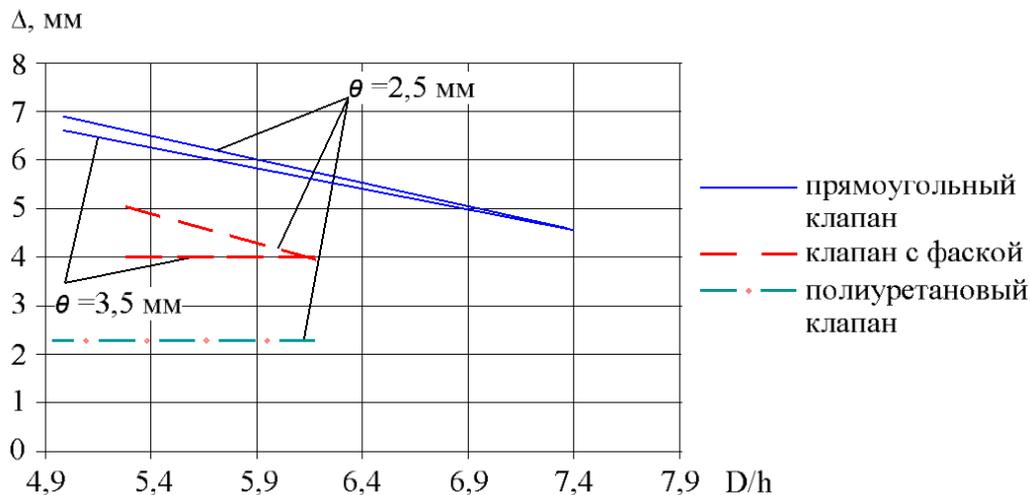


Рис. 3. Изменение величины перемещения упругого клапана Δ от отношения D/h при зазоре $\theta=2,5$ мм и 3,5 мм

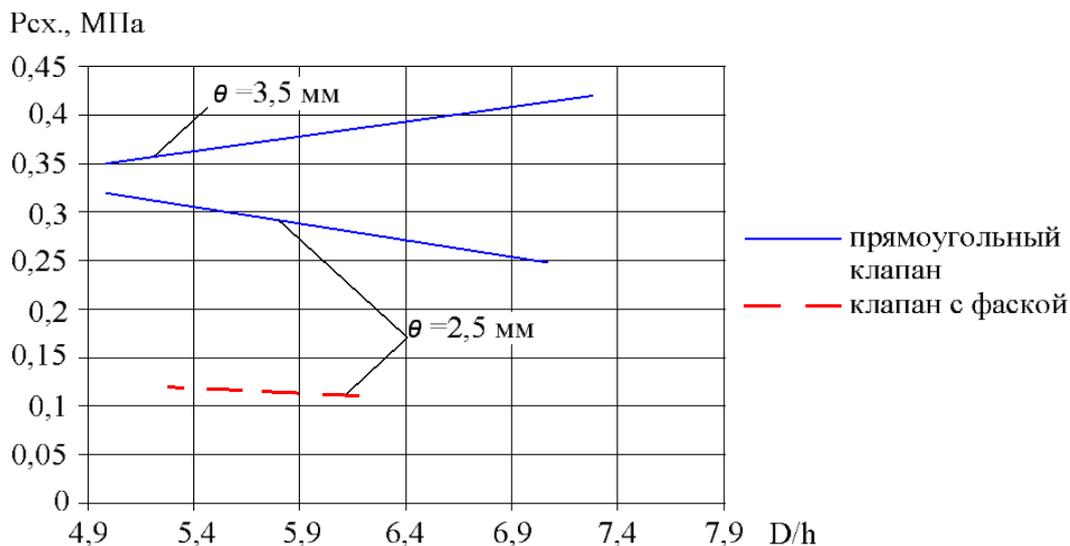


Рис. 4. Изменение величины давления открытия упругого клапана $P_{сх.}$ от D/h при зазоре $\theta=2,5$ мм и 3,5 мм

Из графиков на рис. 4 видно, что при уменьшении соотношения D/h при зазоре $\theta=2,5$ мм величина давления открытия упругого клапана $P_{сх.}$ для клапана с фаской и прямоугольного клапана увеличивается. Увеличение соотношения D/h

при зазоре $\theta=3,5$ мм приводит к повышению давления, при котором клапан прямоугольного сечения переходит в открытое состояние.

На рис. 5 в виде графиков представлены результаты измерения необходимой величины давления закрытия клапана $P_{\text{закр.}}$ в зависимости от отношения наружного диаметра к его ширине D/h для упругих клапанов прямоугольного сечения и с фаской из резинового материала.

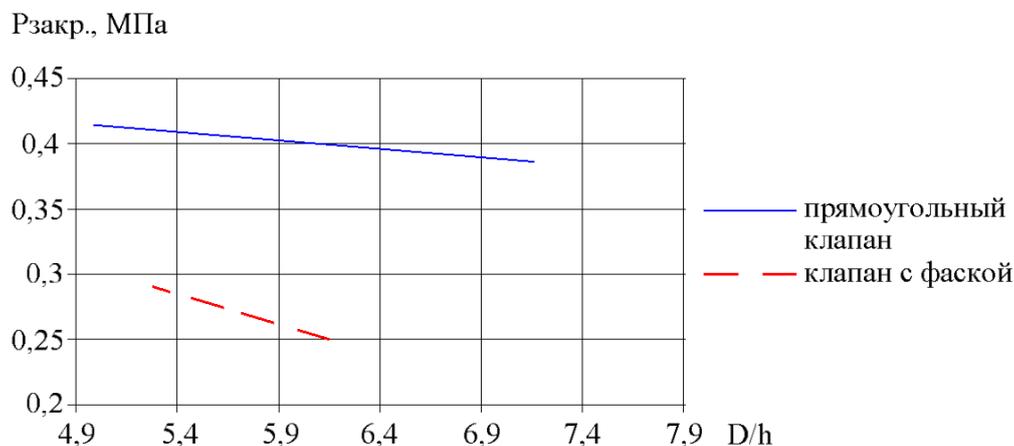


Рис. 5. Изменение необходимой величины давления $P_{\text{закр.}}$ для закрытия упругого клапана от отношения D/h

Графики на рис. 5 демонстрируют, что при уменьшении отношения D/h величина необходимого давления для закрытия клапана $P_{\text{закр.}}$ увеличивается как для клапана прямоугольного сечения, так и для клапана с фаской.

На рис. 6 в виде графиков представлены результаты измерения величины поджатия $F_{\text{подж.}}$ упругого клапана, необходимой для герметизации камеры, в зависимости от изменения отношения D/h . Результаты приведены для клапана прямоугольного сечения, клапана с фаской и полиуретанового клапана прямоугольного сечения.

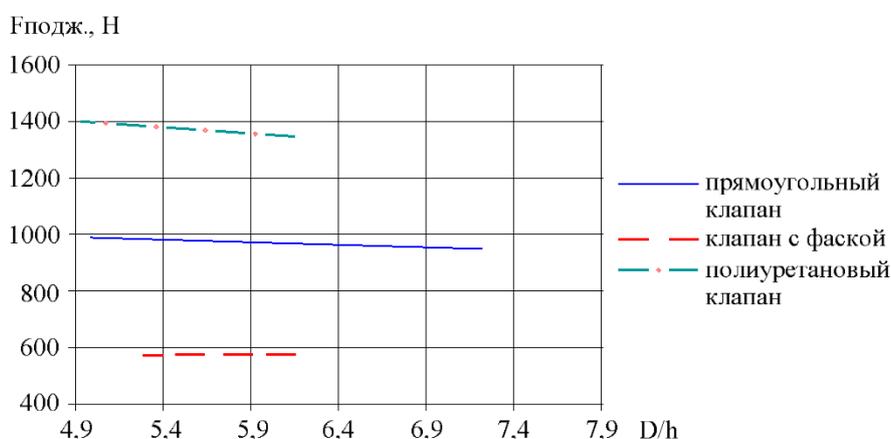


Рис. 6. Изменение усилия поджатия $F_{\text{подж.}}$ необходимого для герметизации камеры обратного хода от отношения D/h

Графики, приведенные на рис. 6, показывают, что при уменьшении отношения D/h усилие поджатия $F_{\text{подж.}}$, необходимое для закрытия клапана и герметизации камеры увеличивается. При этом для полиуретанового клапана величина поджатия лежит в диапазоне $F_{\text{подж.}} = 1340-1400$ Н, а для клапана прямоугольного сечения из резины величина усилия поджатия лежит в диапазоне $F_{\text{подж.}} = 910-980$ Н. У клапана с фаской величина усилия поджатия не меняется и остается равной $F_{\text{подж.}} = 570$ Н.

Обсуждение

При анализе полученных результатов выявлено, что перспективным является применение клапана прямоугольного сечения, поскольку за счет изменения его конструкции можно повысить давление открытия $P_{\text{сх.}}$ до величины 0,25-0,41 МПа (рис. 4). Это позволит раньше переводить клапан в открытое состояние, что в свою очередь уменьшит время задержки ударника в конце холостого хода, и улучшит динамику рабочего цикла машины. Из графиков на рис. 3 видно, что у прямоугольного клапана величина поджатия Δ в зависимости от зазора регулируется в диапазоне от 4,5 до 7 мм. При этом, на зазоре 3,5 мм полиуретановый клапан оказался неработоспособным. Величина изменения давления закрытия $P_{\text{закр.}}$ (рис. 5) для клапана прямоугольного сечения в диапазоне 0,38-0,41 МПа является наиболее оптимальной при работе машины на давлении 0,5-0,6 МПа. Из графика на рис. 6 видно, что необходимое усилие поджатия $F_{\text{подж.}}$ для полиуретанового клапана лежит в интервале 1340-1400 Н. Поэтому применение упругого клапана прямоугольного сечения из резины, имеющего меньшую величину усилия поджатия, позволит уменьшить усилие, создаваемое давлением в камере рабочего хода, необходимое для механической деформации упругого клапана и герметизации камеры холостого хода.

Заключение

Разработаны специальный стенд и методика проведения экспериментов с упругими клапанами. Получены результаты экспериментальных исследований работы упругих клапанов из резинового и полиуретанового материалов. Анализ результатов позволяют говорить о том, что перспективным для использования в новом пневматическом ударном устройстве является клапан прямоугольного сечения из резины.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта НИР FWNZ-2021-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суднишников Б. В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. – Новосибирск: «Наука», 1985. – 135 с.
2. Rakhmangulov A., Burmostrov K., Osintsev N. Sustainable pen pit mining and technical systems: concept, principles, and indicators // Sustainability. 2021, vol. 13, no. 3, article 1101. DOI: 10.3390/su13031101.
3. Марданов В. А., Ткаченко Д. Г. 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 Дон-НТУ. — Донецк, 2021. — С. 89—93.

4. Кауркин И. А., Зиновьев В. В. Роботизация в горнодобывающей промышленности / Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия Молодая». — Кемерово, 2017. — С. 35006.

5. Atkinson R.D. Robotics and the future of production and work. Information Technology and Innovation Foundation (2019).

6. Плохих В. В. Создание пневматической ударной машины для реализации адаптивных технологических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 7. — С. 91–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_91.

7. Плохих В.В. Результаты исследования процесса механического замыкания упругого клапана и применение его в пневмоударной машине с регулируемыми параметрами рабочего цикла // Проблемы недропользования. — 2023. — № 1 (36). — С. 94-103. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.094

8. Гаун, В. А. К вопросу применения воздухораспределительного устройства с эластичным цилиндрическим клапаном в пневмоударниках [Текст] / В. А. Гаун // Исследование пневматических буровых машин ударного действия. — Новосибирск. Изд. ИГД СО АН СССР. 1974. — с. 14 – 15.

9. Гаун, В. А. Разработка и исследование погружных пневмоударников с комбинированным воздухораспределением [Текст]: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.05.06 / Гаун Виктор Александрович. — Новосибирск. 1978. — 19 с.

10. Червов, В. В. Теория и практика создания пневматических молотов с переменной структурой мощности для реализации бестраншейных технологий прокладки коммуникаций [Текст]: дисс. докт. техн. наук: 05.05.04 / Червов Владимир Васильевич. — Новосибирск. 2009. — 289 с.

11. Петреев, А. М. Согласование параметров пневмомолота с производительностью источника питания [Текст] / А. М. Петреев, Б. Н. Смоляницкий // ФТПРПИ. — 1999. — №2. — с. 86 – 90.

12. Петреев, А. М. Кольцевой упругий клапан в пневмоударных машинах [Текст] / А. М. Петреев, Д. С. Воронцов, А. Ю. Примычкин // ФТПРПИ. — 2010. — №4. — с. 56 – 65.

13. Примычкин, А. Ю. Обоснование параметров кольцевого упругого клапана системы воздухораспределения при создании пневмоударных машин: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.05.06 / Примычкин Александр Юрьевич. — Новосибирск, 2017. — 22 с.

14. Пат. 208325 РФ, МПК E21B 1/00 (2006.01). 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, опубли. 14.12.2021, Бюл. № 35 – 7 с.

15. Потураев, В. Н. Резиновые детали машин [Текст] / В. Н. Потураев, В. И. Дырда. — М.: Машиностроение. 1977. — 216 с.

© В. В. Плохих, Б. Б. Данилов, Д. О. Чещин, 2023