

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И РАБОЧЕГО ЦИКЛА ВИБРОУДАРНЫХ СИСТЕМ, УЧАСТВУЮЩИХ В РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Вадим Валерьевич Плохих

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (913)389-01-74, e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

Борис Борисович Данилов

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, главный научный сотрудник, и.о. зав.отделом горной и строительной геотехники, тел. (383)205-30-30, доб. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Дмитрий Олегович Чецин

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (923)198-81-81, e-mail: dimixch@mail.ru

В статье рассматривается возможность применения гидравлических и пневматических ударных машин для работы в составе роботизированных буровых комплексов. Анализ специфики этой задачи позволил создать новые принципиальные схемы ударных машин, позволяющие изменять их динамические показатели в зависимости от свойств обрабатываемой среды, реализовать адаптивные технологические процессы. Исследование динамики рабочего цикла на имитационных моделях, построенных в междисциплинарном программном комплексе ITI SimulationX, позволило определить динамические параметры виброударных систем. Результаты исследования подтверждают возможность создания таких типов машин.

Ключевые слова: проходка скважин, породный массив, гидроударник, пневмоударник, упругий клапан, рабочий цикл, адаптивные технологии

DYNAMICS AND OPERATING CYCLES OF VIBRATORY-PERCUSSIVE SYSTEMS INVOLVED IN IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE TECHNOLOGIES

Vadim V. Plokhikh

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Research at the Mining and Construction Equipment Department, +7 913 389 0174, e-mail: vadim.plohih@yandex.ru

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Principal Researcher, Acting Head of the Mining and Construction Equipment Department, office: +7 (383) 205 30 30, ext. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Dmitry O. Cheshchin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Researcher at the Mining and Construction Equipment Department, +7 923 198 8181, e-mail: dimixch@mail.ru

The study discusses serviceability of pneumatic and hydraulic percussion machines within robotic drilling systems. The newly designed action charts of percussion machines allow varying flow data of the machines versus properties of the medium being treated, which enables technological adaptability of the machines. Simulation modeling of the operating cycle dynamics in ITI SimulationX made it possible to determine dynamic parameters of vibratory–percussive systems. The research findings prove designability of such machines.

Keywords: drilling, rock mass, hydraulic hammer, air drill hammer, elastic valve, operating cycle, adaptive technologies

Введение

Бестраншейные технологии прокладки коммуникаций играют важную роль в горно-добывающей промышленности, строительстве инфраструктуры предприятий, городов и в других отраслях народного хозяйства. Для реализации таких технологий широко применяются виброударные машины (пневматические и гидравлические). Наиболее распространены пневматические ударные машины. Эти машины обладают конструктивной простотой, надежностью работы в неблагоприятных условиях. Однако существенным недостатком этих машин является низкий коэффициент полезного действия (КПД). В мировой практике все шире применяются гидравлические ударные машины. Такие машины, по сравнению с пневматическими, более сложны в технологическом отношении и требуют более высокой точности изготовления их деталей и узлов. Однако преимущества гидропривода по сравнению с пневмоприводом значительны. К наиболее важным можно отнести большие резервы повышения ударной мощности и увеличение КПД машины.

Актуальной проблемой, связанной с переходом горных работ на большие глубины является обеспечение безопасности персонала в крайне неблагоприятных условиях. Кардинальным решением этой проблемы может быть внедрение систем дистанционного управления, использование «безлюдных» технологических процессов с посредством создания роботизированных буровых комплексов. Для этого необходимы ударные машины, обладающие возможностью адаптации режима импульсного силового воздействия к условиям технологического процесса и свойствам обрабатываемой среды [1-5]. Для оценки этих возможностей необходимо разработать принципиальные схемы ударных машин и провести исследование динамики рабочего цикла с использованием имитационных моделей.

Методы и материалы

Наиболее перспективными техническими решениями в контексте упомянутых требований являются ударные механизмы, в которых для герметизации рабочих камер и переключения потока энергоносителя используется кольцевой эластичный клапан. Пневмомолоты «Тайфун», давно и успешно применяющиеся в строительстве, являются примером выполненных по такой схеме пневмоударных механизмов [6-16].

Анализ известных конструктивных решений показывает, что предпочтительным является расположение клапана на неподвижных деталях механизма.

В этом случае удастся уменьшить износ клапана и увеличить ресурс работы механизма в целом, особенно в условиях запыленности. Кроме того, упрощается задача реализации адаптивных технологических процессов посредством изменения структуры ударной мощности (соотношение энергии и частоты ударов).

С учетом изложенных факторов в ИГД СО РАН разработан вариант принципиальной конструктивной схемы пневматического ударного устройства с упругим клапаном, установленным на наковальне. Схема представлена на рис. 1.

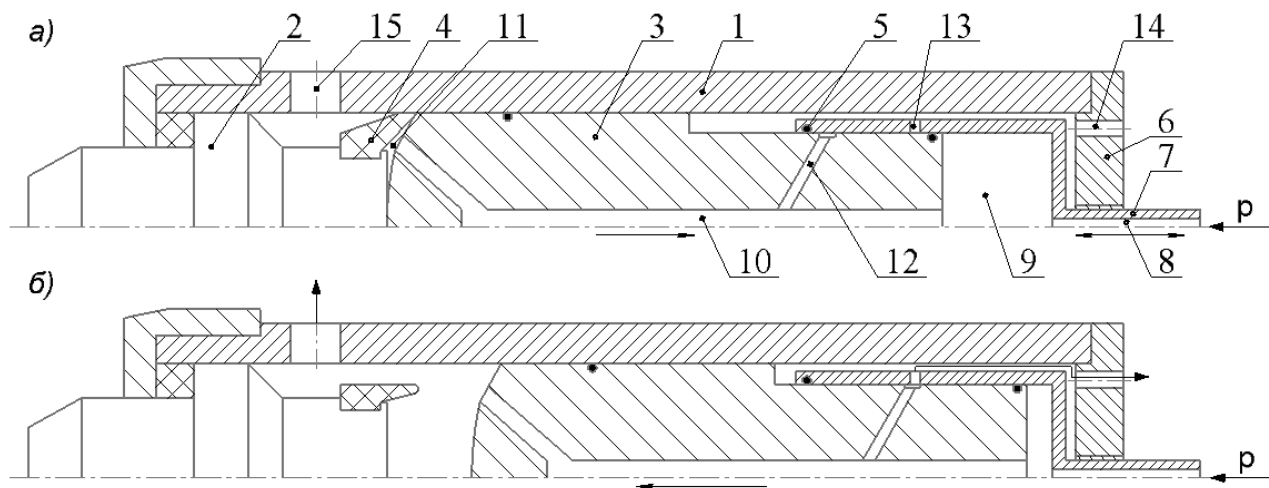


Рис. 1. Конструктивная схема пневмоударного механизма

1 – корпус; 2 – наковальня; 3 – ударник; 4 – упругий клапан; 5 – резиновое уплотнение; 6 – задняя гайка; 7 – подвижная втулка; 8 – канал подвода сжатого воздуха; 9 – камера рабочего хода; 10 – осевой канал; 11 – камера холостого хода; 12 – выхлопной канал; 13 – выхлопное отверстие во втулке; 14 – выхлопное отверстие в задней гайке; 15 – выхлопное отверстие в корпусе; p – магистральное давление

Пневмоударный механизм состоит из корпуса 1, наковальни 2, ударника 3 подвижной втулки 7 и упругого клапана 4. Подвод сжатого воздуха осуществляется через канал 8 непосредственно в камеру рабочего хода 9.

Устройство работает следующим образом. Ударник 3, находясь в положении удара (рис. 1а), механически деформирует упругий клапан 4, тем самым закрывая кольцевой зазор между клапаном и внутренней цилиндрической поверхностью корпуса 1. Энергоноситель поступает через канал 8 подвижной втулки 7 в камеру рабочего хода 9. Далее через канал 10 в ударнике сжатый воздух поступает в камеру холостого хода 11. Так как площадь со стороны камеры холостого хода больше, чем со стороны камеры рабочего хода ударник движется в заднее положение. Клапан при этом находится в упруго-деформированном (растянутом) состоянии и удерживается в этом состоянии давлением воздуха в камере холостого хода.

В конце холостого хода (рис. 1б) происходит соединение камеры 11 с атмосферой через каналы в ударнике 10 и 12 и через выхлопные отверстия 13 и 14. Происходит падение давления в камере холостого хода, что приводит к умень-

шению деформирующего усилия и переходу клапана в свободное (открытое) состояние. Открывается кольцевой зазор над клапаном и происходит выхлоп энергоносителя из камеры холостого хода через выхлопное отверстие в корпусе 15 в атмосферу. В конце рабочего хода ударник бьет по наковальне 2. При этом осуществляется механическое закрытие упругого клапана. Далее цикл повторяется. Перемещение подвижной втулки 7 позволяет изменять величину рабочего хода ударника, тем самым изменяя структуру ударной мощности непосредственно в процессе работы машины.

Для исследования динамики рабочего процесса виброударных систем в ИГД СО РАН широко применяется программный комплекс SimulationX (ITISimX) для моделирования физико-технических объектов и систем [17].

В программе ITISimX была построена имитационная модель разработанной пневмоударной системы, в которую заложены основные параметры к объектам модели из конструктивной схемы. Расчетная схема, составленная в программе, представлена на рис. 2.

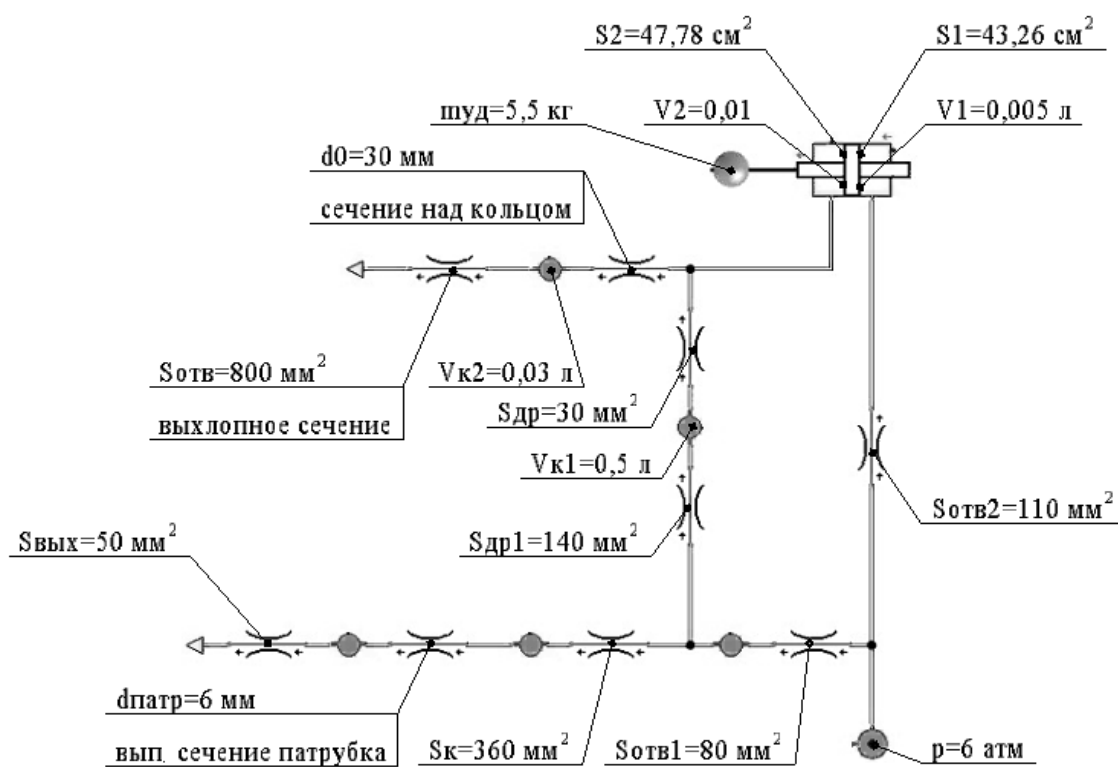


Рис. 2. Расчетная схема пневмоударной системы с упругим клапаном в программе ITI SimulationX

Стоит отметить, что существенным и практически неустранимым недостатком пневмоударных машин является низкий КПД. Кардинально увеличить этот показатель можно посредством применения гидроударных машин [18].

Актуальной проблемой при создании таких машин является совершенствование системы циркулирования рабочей жидкости, позволяющей обеспечить

беспрепятственный слив энергоносителя из камеры холостого хода при высокой предупредной скорости ударника в конце рабочего хода. Данное обстоятельство имеет большое значение, поскольку рабочая жидкость несжимаема, и недостаточная площадь сливной магистрали приводит к торможению ударника, что приводит к ухудшению динамики рабочего цикла [19-21]. Разработанная схема пневмоударной машины может являться основой и при создании гидравлического ударного механизма для реализации адаптивных технологических процессов в зависимости от свойств породного массива. Введение дополнительной камеры в конструктивную схему ударного механизма позволит снизить давление в камере холостого хода в конце рабочего цикла.

Исходя из этого, разработана принципиальная конструктивная схема гидроударного механизма, с изменяемой структурой ударной мощности и отдельным распределительным механизмом. Данная схема приведена на рис. 3.

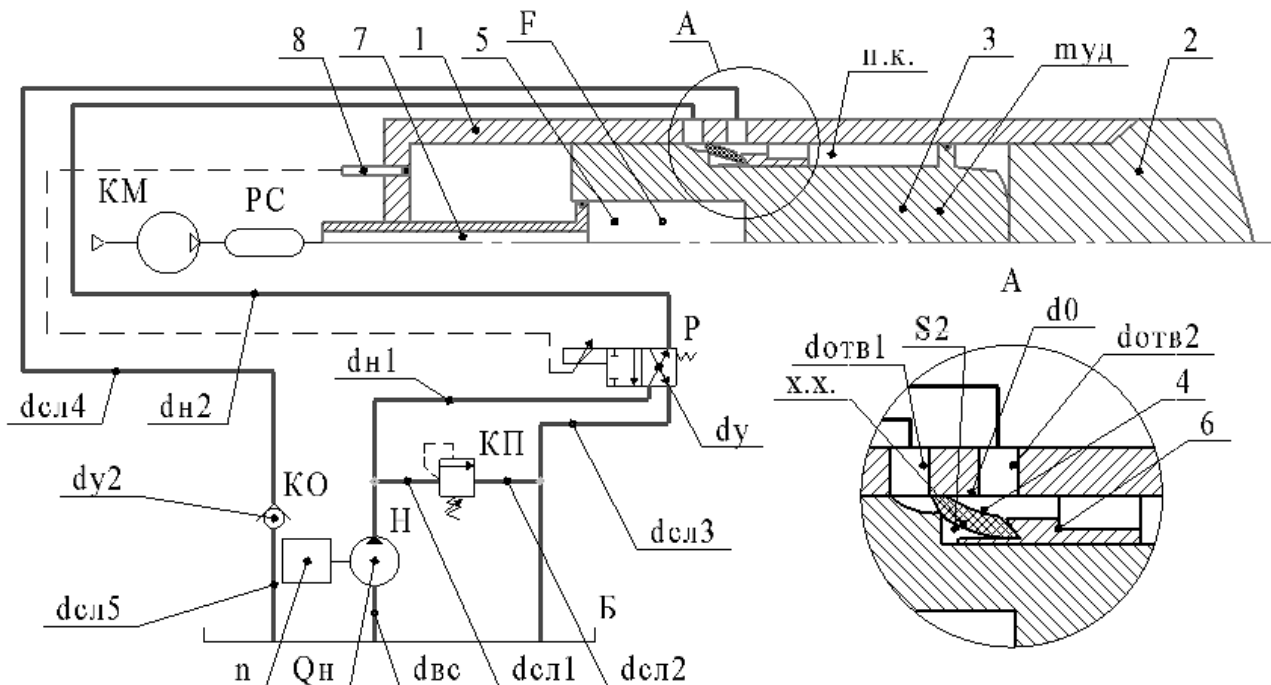


Рис. 3. Конструктивная схема гидроударного механизма с промежуточной камерой и упругим клапаном

1 – корпус; 2 – наковальня; 3 – ударник; 4 – упругий клапан; 5 – камера рабочего хода ударника; 6 – шлицевая гильза; 7 – канал подвода сжатого воздуха; 8 – датчик; х.х. – камера холостого хода ударника; п.к. – промежуточная камера ударника; n – частота вращения вала двигателя; Q_H – производительность насоса; $d_{вс}$ – диаметр всасывающей линии; $d_{сл1}$, $d_{сл2}$, $d_{сл3}$, $d_{сл4}$, $d_{сл5}$ – диаметры сливных линий; $d_{н1}$, $d_{н2}$ – диаметры напорных линий; d_y – диаметр условного прохода распределителя; d_{y2} – диаметр условного прохода обратного клапана; d_0 – диаметр проходного сечения над упругим клапаном; $d_{отв1}$, $d_{отв2}$ – диаметры отверстий в корпусе; S_2 – рабочая площадь камеры обратного хода; $m_{уд}$ – масса ударника

Гидроударный механизм состоит из корпуса 1, наковальни 2, ударника 3 и неподвижной шлицевой гильзой 6 на которой установлен упругий клапан 4. Подвод сжатого воздуха в камеру рабочего хода 5 осуществляется через канал 7 от ресивера РС и компрессора КМ. Ударник показан в положении удара. Подача энергоносителя в камеру холостого хода производится гидрораспределителем Р. Сигнал на переключение золотника распределителя осуществляется системой управления (на схеме не показана) и датчиком 8.

Принцип работы устройства заключается в следующем. Компрессор КМ производит заполнение ресивера РС необходимым давлением и отключается. В дальнейшем компрессор используется для компенсации давления вследствие неизбежных утечек. Ударник 3, находясь в положении удара механически деформирует упругий клапан 4, тем самым закрывая кольцевой зазор d_0 . Происходит разобщение промежуточной и холостой камеры ударника. Энергоноситель через распределитель Р поступает в камеру холостого хода. Ударник 3 движется в заднее положение, сжимая некое рабочее тело в виде пневматической пружины. Клапан при этом находится в упруго-деформированном (растянутом) состоянии. В конце холостого хода сигнал от датчика 8 поступает на соленоид распределителя, тем самым подключая камеру холостого хода на слив. Падение давления в камере холостого хода приводит к уменьшению деформирующего усилия и клапан переходит в свободное (открытое) состояние. Это приводит к открытию кольцевого зазора d_0 , по которому при движении ударника в направлении удара происходит перепуск энергоносителя (рабочей жидкости) из камеры холостого хода в промежуточную камеру. При этом объемы камер изменяются синхронно, в противофазе, создавая благоприятные условия для перепуска рабочей жидкости. В следующем цикле при взводе ударника происходит слив ранее перепущенной жидкости из промежуточной камеры через обратный клапан КО в бак Б. Обратный клапан установлен в системе для предотвращения возможного всасывания рабочей жидкости из бака Б в промежуточную камеру при рабочем ходе ударника. Подача сигнала на золотник распределителя от датчика 8 осуществляется с заданной задержкой времени, тем самым изменяя величину рабочего хода ударника.

Использование отдельного распределительного устройства имеет ряд положительных следствий. Наиболее важное из них – это возможность использования полимерных уплотнительных элементов в подвижном сопряжении ударника и цилиндра. Следовательно, снижаются требования к точности размеров этих деталей, упрощается конструкция, повышается надежность работы машины. Вдобавок расширяется возможность регулирования режима работы, изменения структуры ударной мощности (энергии и частоты ударов), позволяющая оперативно приводить параметры энергетического воздействия в соответствие со свойствами обрабатываемого породного массива [22-25].

Для исследования динамики рабочего цикла гидроударной системы с промежуточной камерой построена имитационная модель в программе ITISimX. Расчетная схема модели представлена на рис. 4. Все объекты, введенные в расчетную схему, соответствуют конструктивным элементам реальной машины.

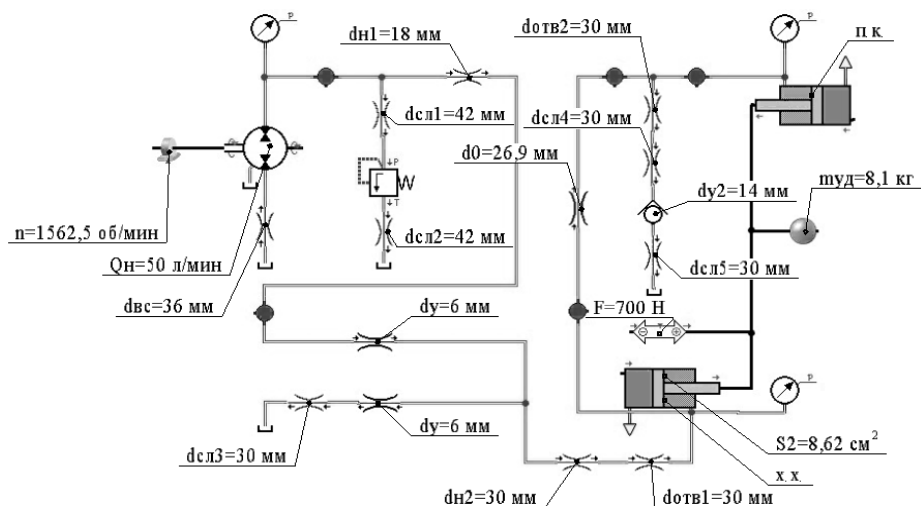


Рис. 4. Расчетная схема гидроударной системы в программе ITISimX

Имитационное исследование модели проводилось при следующих параметрах: производительности насоса $Q_n = 50$ л/мин; давлении в напорной магистрали $p_n = 12$ МПа; силы, приложенной со стороны камеры прямого хода $F = 700$ Н; рабочей площади камеры обратного хода $S_2 = 8,62$ см²; габаритного хода ударника $X_x = 200$ мм; массе ударника $m_{уд} = 8,1$ кг.

Результаты

По результатам моделирования работы пневмоударной системы построены графики изменения удельного расхода воздуха при изменении координаты перемещения втулки для различных соотношений площадей камер рабочего и холостого хода ударника. Графики приведены на рис. 5.

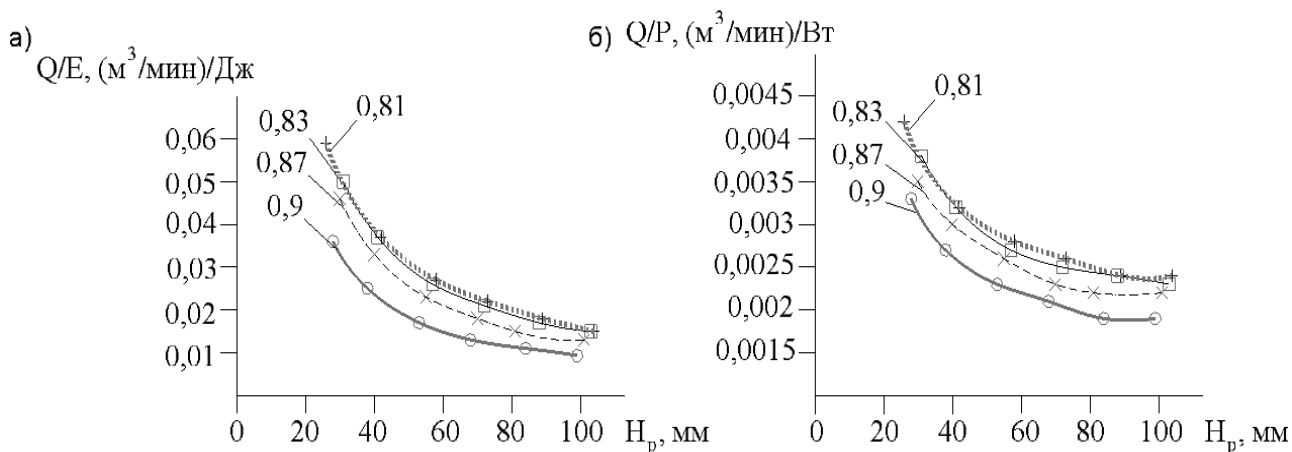


Рис. 5. Графики изменения удельного расхода воздуха при изменении координаты перемещения втулки для $S_{р.х.}/S_{х.х}$

На рис. 6 приведены графики изменения динамических параметров в зависимости от перемещения втулки при соотношении площадей 0,9.

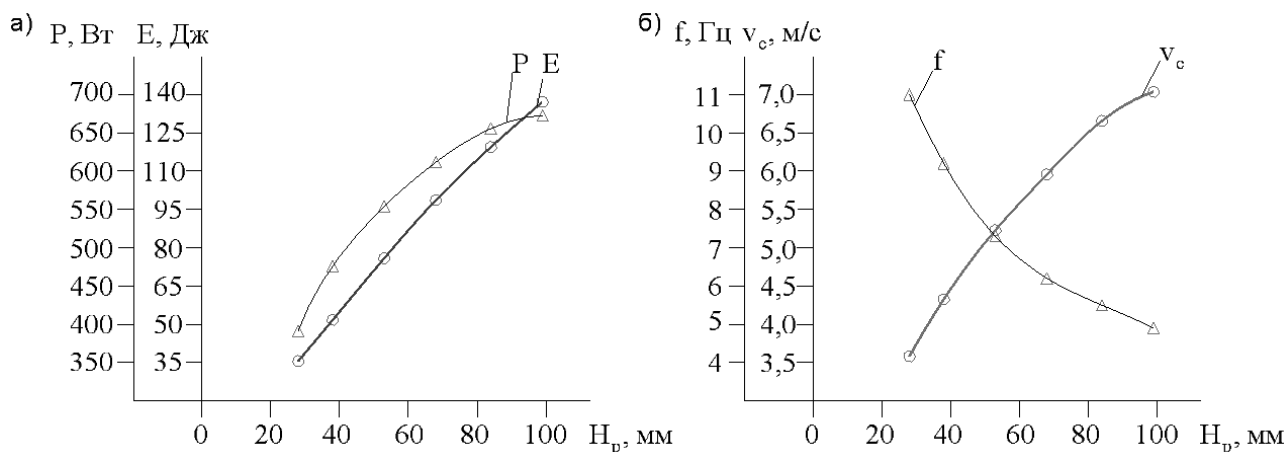


Рис. 6. Графики изменения динамических параметров в зависимости от перемещения втулки при $S_{p.x.}/S_{x.x.}=0,9$

По результатам моделирования гидроударной системы построены графики изменения давления в камере холостого хода в течение рабочего цикла $P_{xx} = f(X)$ (рис. 7а) и изменения скорости ударника (рис. 7б). Начало координат соответствует положению ударника в момент удара об наковальню.

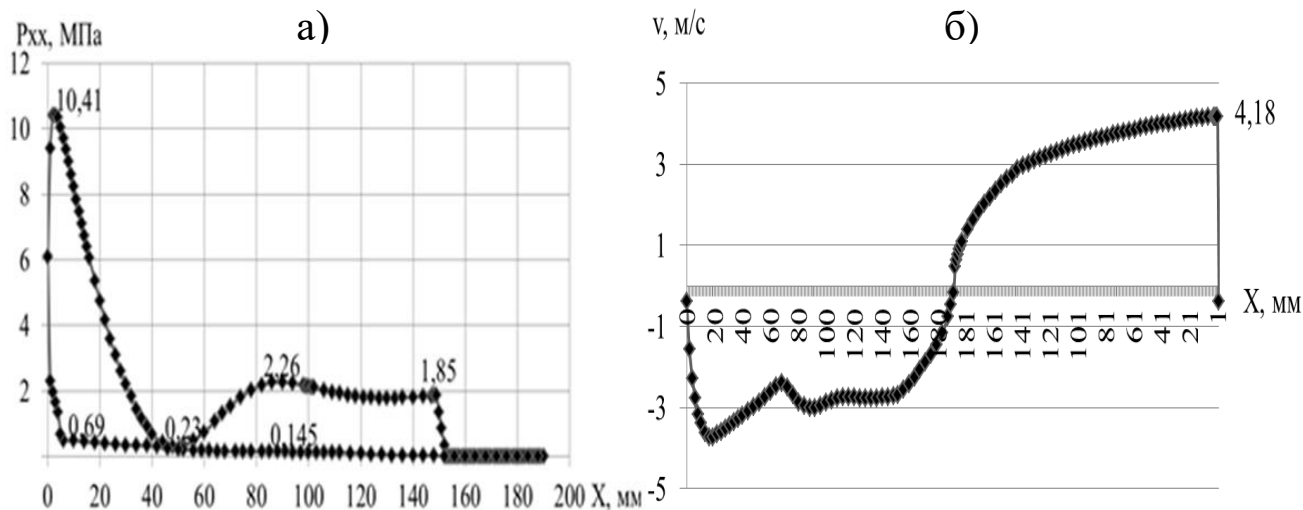


Рис. 7. Графики результатов моделирования гидроударного механизма

Обсуждение

Из графиков приведенных на рис. 5 видно, что при увеличении соотношения площадей камеры рабочего хода $S_{p.x.}$ к камере холостого хода $S_{x.x.}$ происходит снижение удельного расхода воздуха по отношению к энергии удара (рис. 5а) и

мощности (рис. 5б). Это свидетельствует о предпочтительности предложенной конструктивной схемы пневмоударного механизма перед схемой серийных пневмопробойников, где большие значения этого соотношения недостижимы.

Графики, представленные на рис. 6, показывают, что изменение величины рабочего хода ударника в конструктивно достижимом диапазоне приводит к четырехкратному изменению энергии (рис. 6а) и двукратному изменению частоты ударов (рис. 6б).

График, изображенный на рис. 7а, показывает, что в конце рабочего цикла происходит незначительный рост давления до величины 0,69 МПа, при максимальной скорости соударения 4,18 м/с (рис. 7б). Данное обстоятельство позволяет предполагать, что схема гидроударного механизма, представленная на рис. 3, позволяет решить проблему беспрепятственного слива энергоносителя из камеры холостого хода при высокой предупредительной скорости ударной части в конце рабочего хода.

Данные результаты имитационного исследования могут служить основой для проектирования виброударных машин как пневматических, так и гидравлических, предназначенных для работы в составе роботизированных комплексов.

Заключение

Проведенное имитационное моделирование виброударных систем подтверждает возможность создания машин, позволяющих реализовать адаптивные технологические процессы, где требуется изменять параметры импульсного силового воздействия в зависимости от свойств разрабатываемого породного массива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилов Б.Б. Теория и практика создания оборудования для бурения в грунте горизонтальных скважин с пневмотранспортом разрушенного материала по вращающемуся трубопроводу: Дис. докт. техн. наук (05.05.04). – Новосибирск, 2009. – 258 с.
2. Архипенко, А. П., Федулов А.И. Гидравлические ударные машины. – Новосибирск: Ин-т горного дела СО АН СССР, 1991. – 106 с.
3. Галдин Н. С., Бедрина Е. А. Ковши активного действия на основе гидроударников для экскаваторов: Учеб. пособие / М-во образования Рос. Федерации. Сиб. гос. автомоб.- дорож. акад. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003.
4. Galdin N. S. Regression equations for basis parameters of hydraulic impact pulse systems, *Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny*. – 2002. – № 3.– С. 15–17.
5. Галдин Н. С. Многоцелевые гидроударные рабочие органы дорожно-строительных машин. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2005. – 223 с.
6. Lazutkin S. L., Lazutkina N. A. (2015) Perspective construction of hydraulic impact device // *Procedia Engineering*. – Vol. 129. – 2015. – С. 403–407.
7. Kiyama A., Tagawa Y., Ando K. and Kameda M. Effects of water hammer and cavitation on jet formation in a test tube, *Journal of Fluid Mechanics* 787. – 2016. – С. 224–236.
8. D Pepa, C Ursoniu, G R Gillich and C V Campian. Water hammer effect in the spiral case and penstock of Francis turbines, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 163 (2017) 012010 doi:10.1088/1757-899X/163/1/012010.
9. Kamil Urbanowicz. Modern modeling of water hammer, *Polish Maritime Research* 3 (95). – Vol. 24. – 2017. – С. 68–77.

10. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Пневмопробойники. - Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990.
11. Гурков К.С., Муталов Ф.М., Смоляницкий Б.Н. Дальнейшее развитие применения пневмопробойников в строительстве // Механизация строительства. – 1993. – № 1
12. Быков В.И., Потемкин В.П. Оборудование для пробивки скважин в грунте // Механизация строительства. – 1990. – № 2
13. Григоращенко В.А. Прокладка металлических труб пневмопробойниками. – Новосибирск: Изд. ИГД СО АН СССР. Препринт №38, 1990.
14. 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.
15. Vorontsov, D.S., Petreev, A.M. Improvement of Air-Distributing System of the Pneumatic Impact Machines for Trenchless Technologies. Journal of Mining Science **38**, 481–487 (2002).
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. Официальный сайт SimulationX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simulationx.com/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 18.03.2021).
18. Данилов Б.Б., Смоляницкий Б.Н., Плохих В.В. Обоснование применения кольцевого упругого клапана с кинематическим замыканием в гидроударных механизмах объемного типа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2018 XIV Междунар. научн. конгр., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 6 т. Т. 6. – Новосибирск: СГУГ и Т, 2018. – С. 21–28.
19. Плохих В. В., Данилов Б. Б., Чешин Д. О. Обоснование принципиальной схемы и исследование рабочего цикла гидроударного механизма объемного типа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020. XVI Междунар. научн. конгр., Национальная науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: сб. материалов. — Новосибирск: СГУГиТ, 2020. — Т. 2. — С. 153 – 161.
20. Плохих В. В., Чешин Д. О. Обоснование принципиальной схемы и определение конструктивных и энергетических параметров гидроударной машины // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. — Омск: СибАДИ, 2020. — С. 15 – 19.
21. Плохих В.В. Результаты экспериментального исследования процесса механического замыкания упругого клапана в гидроударной машине // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: сборник материалов III Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Омск, СибАДИ, 2019. – С. 27–31.
22. Плохих В.В., Чешин Д.О. Результаты физического моделирования рабочего процесса кольцевого упругого клапана в реверсивном гидроприводе // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М: ИПКОН РАН, 2019. – С. 184–187.
23. Плохих В.В., Чешин Д.О. Обоснование схемы ударного механизма с гидравлическим взводом // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 14 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М: ИПКОН РАН, 2019. – С. 177 – 180.
24. Плохих В.В., Данилов Б.Б., Чешин Д.О. Обоснование принципиальной схемы и анализ динамики рабочего цикла гидравлического ударного механизма объемного типа // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2020. – Т. 7. – № 2. – С. 157 – 162.

25. Данилов Б.Б., Чецин Д.О. Плохих В.В. Экспериментальное исследование процесса работы гидравлической ударной машины объемного типа // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2020. – Т. 7. – № 1. – С. 293 – 297.

© В. В. Плохих, Б. Б. Данилов, Д. О. Чецин, 2021