

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.22 + 622.2

АНАЛИЗ СПОСОБОВ И СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГИДРОУДАРНЫХ МАШИН ОБЪЕМНОГО ТИПА

Л. В. Городилов, В. Г. Кудрявцев

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

E-mail: gor@misd.ru, vit22@ngs.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Представлен анализ разработанных и опробованных в последнее время новых схем управления рабочими циклами гидроударных машин, позволяющих отдельно регулировать их характеристики: с помощью только обратных связей между давлением в гидросистеме и распределителем, микропроцессорный способ и комбинированные с включением дополнительного управления по давлению. Приводятся примеры адаптивных ударных машин, схемы управления которыми позволяют изменять энергию и частоту ударов в зависимости от свойств разрушаемой среды. Указывается, что для расширения области применения гидроударной техники существует потребность в разработке высокочастотных ударных устройств с высокой ударной мощностью, что возможно достигнуть за счет совершенствования распределителей и перехода на повышенное давление рабочей жидкости.

Гидроударная система, рабочий цикл, распределительное устройство, частота и энергия ударов, адаптивная машина

DOI: 10.15372/FTPRPI20220107

Гидроударная техника в настоящее время находит широкое применение в горном деле, строительстве, в других отраслях промышленности. Начальный этап ее разработки и использования относится к 50–60-м годам прошлого века и главным образом связан с работами по бурению скважин при добыче на нефтегазовых месторождениях. Он отражен в ряде монографий [1–4], где представлены конструкции и классификации данного типа машин, опыт их практического применения. В гидроударных машинах этого этапа для передачи энергии от жидкости к бойку использовался гидравлический удар, генерируемый в системе при периодических прерываниях потока жидкости, поступающей от насоса по буровому ставу к ударному устройству. С этим связан их основной недостаток — низкий КПД, не превышающий 15–20 %. Однако достоинства (надежность и простота конструкции) оставляют их основным классом устройств, используемых в качестве буровых забойных машин (погружных гидроударников) для бурения скважин глубиной до 500 м и более [5].

Следующий этап развития гидроударной техники распространяется на более широкий класс гидроударных систем и связан не только с проблемой бурения, но и с проблемой разрушения и отбойки твердых материалов в горном деле и строительстве. Он включает так называемые объемные машины, в которых импульс бойку сообщается статическим давлением, действующим на него со сторон рабочих камер. Обязательным элементом гидросистемы в этом случае является аккумулятор энергии, призванный запасать энергию в одних фазах цикла и отдавать ее в других фазах. Результаты этого этапа можно видеть в ряде отечественных монографий [6–8] и в практической реализации гидроударной техники. В настоящее время, охватывая широкий диапазон выходных характеристик, выпускаются десятки моделей гидроударных устройств зарубежных [9–11] и отечественных [12] производителей.

В последнее время интерес к гидроударной технике возобновился. Инициированы исследования по нескольким направлениям, включая разработку новых схем распределения жидкости, создание устройств с регулируемой энергией и частотой ударов, с гидравлическим и микропроцессорным управлением, адаптивных устройств [13–22]. Необходимы осмысление и систематизация новых исследований, чтобы определить перспективные направления развития данного вида машин. Ударные технологии должны занять более значительное место в современной добыче полезных ископаемых, что связано с требованиями практики и с качественными изменениями в развитии современной техники, новыми материалами и компьютерными технологиями. Настоящая статья посвящена анализу и обобщению новых результатов исследований, связанных со способами и схемами управления характеристиками гидроударных устройств, их систематизации и возможности более эффективного применения в современных машинах, предназначенных для разработки твердых полезных ископаемых.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОУДАРНЫХ СИСТЕМ ОБЪЕМНОГО ТИПА

Рассмотрим одно из фундаментальных свойств объемных гидроударных систем, определяющее зависимость их характеристик (предударной скорости v_l^* и частоты ударов f^* , надстрочный символ “*” означает, что характеристики относятся к предельному циклу) от поступающего к ним расхода насоса q_0 .

В [23] проведен размерный анализ гидроударной системы двухстороннего действия (рис. 1) и определены основные безразмерные критерии подобия, в пространстве которых исследованы ее свойства.

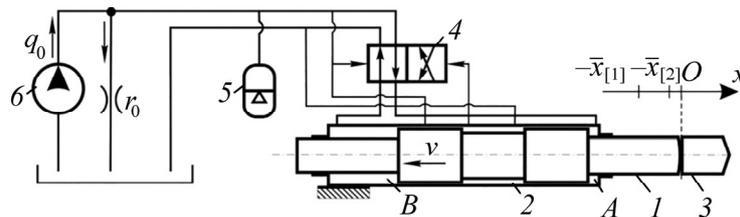


Рис. 1. Принципиальная схема гидроударной системы: 1 — боек; 2 — корпус; 3 — инструмент; 4 — распределитель; 5 — аккумулятор; 6 — насос (источник постоянного расхода); A, B — соответственно камеры обратного и прямого хода; $r_0 = p_n / q_0(1 - \eta_0)$ — гидравлическое сопротивление, определяющее утечки в системе (q_0 , p_n — соответственно идеальный расход и номинальное давление насоса, η_0 — объемный КПД); $\bar{x}_{[1]}$ — длина фазы обратного хода бойка

Установлено, что между размерными предударной скоростью и частотой ударов и их безразмерными аналогами (\bar{v}_l^* и \bar{f}^*) существуют следующие функциональные зависимости:

$$v_i^* \sim q_0 \bar{v}_i^*(\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_{[1]}), \quad f^* \sim q_0 \bar{f}^*(\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_{[1]}), \quad (1)$$

в которых критерии подобия σ_0 и $\bar{x}_{[1]}$ не зависят от расхода q_0 , а критерий σ_1 обратно пропорционален $\sigma_1 \sim 1/q_0^2$.

Используя полученные в [23] зависимости безразмерных характеристик гидроударной системы от критериев подобия (рис. 2, указано сечение пространства критериев подобия $\bar{x}_{[1]} = 1$), можно показать, что, например, при фиксированном значении $\sigma_0 = 0.32$ и изменении лишь σ_1 зависимости (1) представляются в виде

$$v_i^* \sim 7.87q_0^{0.84}, \quad f^* \sim 1.01q_0^{1.15}. \quad (2)$$

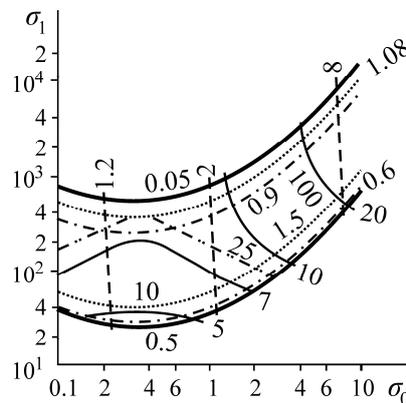


Рис. 2. Изолинии характеристик гидроударной системы в сечении пространства критериев подобия $\sigma_0\sigma_1\bar{x}_{[1]}$ плоскостью $\bar{x}_{[1]} = 1$: — скорость \bar{v}_i^* ; — КПД η^* ; — мощность \bar{N}^* ; — время цикла \bar{T}_c^* ; — размах колебаний \bar{x}_{\max}^* ; — максимальное \bar{p}_{\max}^* и минимальное \bar{p}_{\min}^* давления

Для всего исследовавшегося диапазона безразмерных критериев подобия зависимости предударных скоростей и частот ударов от расхода имеют вид, представленный в (1). Аналогичные результаты могут быть получены и для систем одностороннего действия [22, 23].

Таким образом, в объемных гидроударных машинах при увеличении подаваемого к устройству расхода одновременно повышаются частота и энергия ударов, т. е. в этом случае не удается добиться их глубокой независимой регулировки. Для решения этой проблемы существуют различные способы: от реализации дополнительных связей между ударным узлом и распределителем до микропроцессорного управления моментами перераспределения потоков жидкости, направляемых в гидравлические камеры ударного узла.

ТИПЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ГИДРОУДАРНЫХ СИСТЕМ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Гидроударные машины объемного типа включают в себя следующие устройства: источник расхода (насос), ударный узел (корпус и боек), распределительное устройство и аккумулятор. На рис. 1 представлена схема такой системы с ударным узлом двухстороннего действия с двумя управляемыми камерами A (обратного хода) и B (прямого хода). В большинстве случаев на практике применяется схема с одной управляемой камерой, что упрощает конструкцию ударного устройства с позиционным управлением рабочим циклом по положению бойка (см. рис. 1).

В классификации гидроударных систем [6] одним из признаков, по которым они разделяются, указан принцип построения обратных связей между ударным узлом и распределителем по перемещению, скорости и ускорению бойка. Отмечается, что гидравлические связи, устанавливаемые в гидрообъемных системах, допускают управление ими с помощью различного рода золотников и клапанов. В результате анализа конструкций гидроударных систем различаются гидропневмоударники трех классов: с управлением по положению бойка — с втулкой управления и с трубчатым клапаном и по ускорению бойка — с инерционным золотником [24]. Более полная классификация приведена в [25], где гидрообъемные ударные машины по типу распределительного элемента подразделяются на золотниковые (с вращательным, прерывисто-вращательным и с возвратно-поступательным движением золотника), клапанные (с упруго-эластичным клапаном, с клапаном-захватом и дифференциальным клапаном), бесклапанные и с комбинированным распределительным элементом. Несмотря на разнообразие конструктивных исполнений ударных узлов и распределителей, в большинстве известных конструкций гидроударных машин используются позиционные обратные связи (по перемещению бойка). Наиболее распространенными в современных гидроударных машинах являются конструкции распределительных устройств с возвратно-поступательным движением золотника с гидравлическим приводом. За редким исключением конструктивно ударный узел и распределительное устройство имеют раздельное исполнение.

К примерам первых конструкций гидроударных устройств с регулируемыми характеристиками можно отнести бурильную головку RPH400 фирмы Sekoma [26], в которой изменяется длина фазы обратного хода бойка, и гидромолот Rammer 800 [25], где с помощью дополнительной обратной связи “по давлению” между гидросистемой и ударным узлом происходит задержка движения бойка в начале обратного хода.

НОВЫЕ СХЕМЫ И СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОУДАРНЫХ МАШИН

Рассмотрим ряд оригинальных схем гидроударных устройств, разработанных в последнее десятилетие. В [13] представлено устройство двухстороннего действия с управляемой камерой прямого хода *B* и газовой камерой *C* (рис. 3). Для него разработано распределительное устройство с использованием клапанов ввертного монтажа, работающее следующим образом. В начальный момент канал *K* соединен со сливом, распределитель *4* находится в крайнем левом положении, клапан *5* закрыт, клапан *6* открыт. Боек совершает обратный ход, при соединении *K* с напорной линией распределитель переходит в крайнее правое положение. Клапан *5* открыт, клапан *6* закрыт, боек совершает прямой ход.

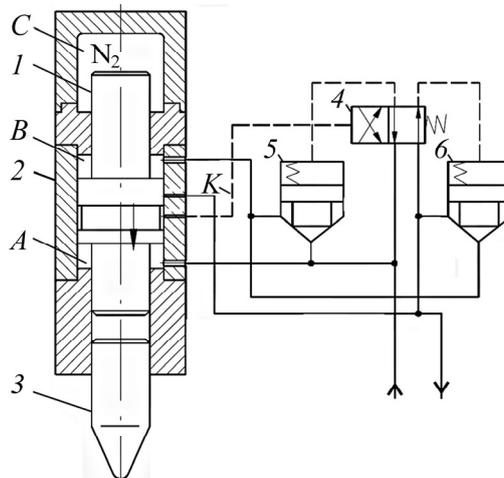


Рис. 3. Принципиальная схема гидроударного устройства: *1* — боек; *2* — корпус; *3* — инструмент; *4* — распределитель; *5* — входной клапан; *6* — выходной клапан; *A*, *B* — камеры обратного и прямого хода соответственно; *C* — газовая камера; *K* — канал управления

По мнению авторов, клапаны должны обеспечивать большую пропускную способность, меньшее время срабатывания и практически нулевую утечку. В среде Matlab/Simulink разработана имитационная модель системы, сравниваются расчетные и экспериментальные результаты по перемещению и скорости бойка, а также давлению в камере обратного хода. Делается вывод — новая система распределения эффективна, ее применение может увеличить частоту и мощность удара. Однако результаты расчетов показывают лишь увеличение частоты ударного устройства с 6.13 до 6.61 Гц при использовании приведенной клапанной системы распределения по сравнению с золотниковой.

В [14, 15, 27–29] представлен ряд принципиальных схем гидроударных машин, управление которых осуществляется микроэлектронной системой. Одна из таких схем, управление работой которой полностью производится с компьютера, показана на рис. 4 [15].

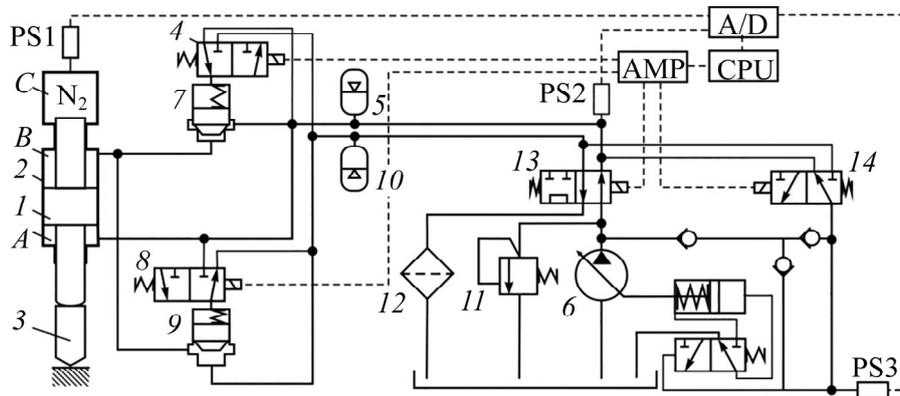


Рис. 4. Принципиальная схема системы управления гидроударником: 1 — боек; 2 — корпус; 3 — инструмент; 4, 8 — направляющие распределители; 5, 10 — аккумуляторы; 6 — насос; 7, 9 — клапаны; 11 — предохранительный клапан; 12 — фильтр; 13, 14 — распределители; A, B — камеры обратного и прямого хода соответственно; C — газовая камера; PS1, PS2, PS3 — датчики давления; A/D — аналого-цифровой преобразователь; CPU — микропроцессор; AMP — усилитель

Ударный узел системы включает две гидравлические камеры (обратного A и прямого B хода) и газовую камеру C, образованную корпусом и задним торцом бойка. Управление рабочим циклом производится по величине давления в камере C, измеряемого датчиком давления PS1. Сигнал от PS1 поступает к аналого-цифровому преобразователю A/D и далее к микропроцессору CPU. Микропроцессор управляет усилителем, который переключает направляющие гидрораспределители 4 и 8. В начальный момент (бойк находится на инструменте, давление в камере C — низкое) распределитель 4 включен, 8 — выключен, соответственно клапан 7 закрыт, 9 — открыт, камера B соединена со сливной линией. Боек 1 совершает обратный ход, давление в камере C повышается. При превышении давлением в камере C установленного значения микропроцессор выключает распределитель 4 и включает распределитель 8, соответственно открывается клапан 7 и закрывается клапан 9. Камера B отсоединяется от сливной линии и соединяется с напорной. Боек 1 совершает торможение и прямой ход до удара об инструмент 3. В конце прямого хода давление в камере C снижается до уровня, при котором микропроцессор включает распределитель 4 и выключает распределитель 8. Цикл повторяется.

В схеме рис. 4 имеются два электромагнитных распределителя, управляемых микропроцессором CPU: распределитель 13 открывает и прекращает подачу масла в гидроударное устройство, распределитель 14 с помощью ШИМ-управления регулирует давление масла по показаниям датчиков давления.

Давление, при котором процессор переключает рабочий цикл устройства с обратного хода на прямой, изменяется в зависимости от коэффициента восстановления скорости бойка R , который определяется по давлению в камере C после удара датчиком PS1. В зависимости от свойств разрушаемого материала устанавливается энергия удара. По показаниям датчика PS2 определяется расход жидкости, поступающей к устройству, и регулируется его частота.

Для управления характеристиками гидроударного устройства применяется нечеткий алгоритм. Проведены эксперименты, в которых при заданных потоке и давлении в системе получено, что при ударах по материалам с различными свойствами (кирпичу, бетонному блоку, камням и железу) энергия и частота ударов изменяется: чем выше твердость материала, тем больше энергия и меньше частота удара и наоборот.

В [14] разработан новый гидроударник DBS500 с аналогичной приведенной на рис. 4 микропроцессорной системой управления рабочим циклом. Различие заключается в том, что в нем камера A управляемая, камера B постоянно соединена со сливной линией. Частота ударов изменяется задержкой момента включения гидрораспределителя, соединяющего камеру A со сливом после окончания обратного хода бойка.

Характеристики устройства адаптируются к свойствам обрабатываемого материала по скорости восстановления бойка R , которая также определяется с помощью датчика давления. Для адаптации характеристик устройства разработан нечеткий контроллер с двумя входами (ошибкой E_v между заданным и измеренным значениями R и изменением ошибки E_{cv} значения R) и одним выходом (изменение давления газа dpN). Нечеткие множества E_v , E_{cv} и dpN разделены на 7 разрядов. В результате обобщения опыта ручного управления в процессе работы системы получены 49 нечетких правил управления следующего вида: если E_v и E_{cv} , то dpN . Нечеткие значения затем преобразовывались в таблицу точных значений и формировалась общая контрольная таблица, которая вводилась в микропроцессор. Результаты экспериментов ударного устройства с такой системой управления показали возможность регулирования энергии удара до 500 Дж и частоты 0–8 Гц. Зафиксировано изменение характеристик устройства от удара к удару при изменении свойств разрушаемого материала.

В [27–29] представлены гидромолоты с аналогичной микроэлектронной системой управления, обратной связью между ударным узлом и распределителем по давлению в газовой камере, нечетким алгоритмом управления характеристиками. Их схемы управления рабочим циклом подобны изображенной на рис. 4. Базой гидроударной системы [28] служил выпускаемый серийно гидроударник TNB-6E. Алгоритм нечеткого управления основан на программном обеспечении SCM.

В [16, 30–32] приведены результаты имитационного моделирования и экспериментальных исследований системы управления гидроударным устройством, в распределителе которой для реализации рабочего цикла используется обратная связь только по давлению в гидравлической системе. В устройстве двухстороннего действия с управляемой камерой обратного хода (рис. 5) камера C служит аккумулятором жидкости [16]. При прямом ходе бойка жидкость частично из камеры A вытесняется в камеру C , при обратном — из камеры C поступает в сливную линию СЛ. В исходном положении камера A через распределитель связана с напорной линией НЛ, боек совершает обратный ход (движется вправо). Золотник 4 имеет одинаковые площади своих камер, но за счет пружины поджат и находится в крайнем левом положении. Когда давление в системе становится выше давления открытия поджатого пружинной пилотного клапана 6, он открывается, жидкость через дроссель 7 по оси золотника поступает на слив, давления в камерах золотника 4 становятся разными, и он перемещается в крайнее правое положение. Камера обратного хода от-

соединяется от напорной линии, соединяется с камерой *C* и со сливной линией. Боек совершает торможение и прямой ход до удара об ограничитель. В конце прямого хода давление в системе падает, пилотный клапан закрывается, давление в камерах распределителя выравнивается, золотник возвращается в исходное положение. Цикл повторяется.

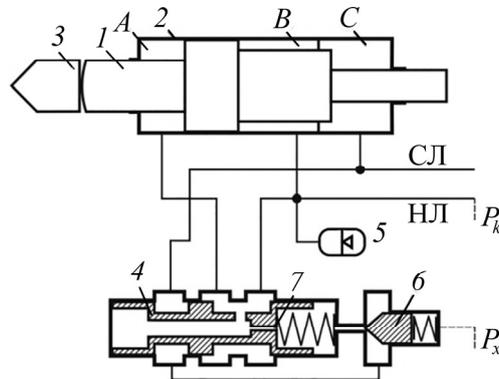


Рис. 5. Схема ударного устройства с управлением рабочим циклом по давлению в гидросистеме: 1 — боек; 2 — корпус; *A*, *B* — соответственно камеры обратного и прямого хода; *C* — вспомогательная гидравлическая камера; 4 — золотник; 5 — аккумулятор; 6 — пилотный клапан; 7 — дроссель

Разработана система управления подачей регулируемого насоса и давлением в гидросистеме с помощью механизма их плавной регулировки. При изменении подачи насоса (управляющим давлением P_k) изменяется частота гидромолота, при изменении управляющего давления P_x изменяется давление в гидросистеме молота и энергия удара. Машинист с помощью механизма управления может выбрать наилучшую комбинацию между энергией удара и частотой гидромолота в соответствии с условиями его работы.

В [30] создана нелинейная математическая и имитационная модели гидромолота. Исследуется влияние регулировки управляющего давления P_x пилотного клапана (8–15 МПа), расхода (10–40 л/мин) и давления зарядки аккумулятора (3.25–7.5 МПа) на энергию удара, длину обратного хода бойка, частоту и КПД устройства. Делается вывод о том, что при давлении открытия пилотного клапана 10–15 МПа, подаче насоса 25 л/мин и давлении зарядки аккумулятора 5.0–6.5 МПа ударная производительность гидромолота наилучшая. В [31] представлен внешний вид гидромолота и результаты экспериментов, которые показали, что его энергия при почти постоянной частоте (5.25–5.3 Гц) может изменяться от 329 до 515 Дж, а частота при почти постоянной предударной скорости (8.013–8.088 м/с) — от 3.8 до 5.2 Гц. В [32] разработана имитационная модель распределителя, проведено исследование его динамических свойств и влияния на них параметров дросселя, массы золотника, сечений гидравлических каналов, жесткости пружины.

В ударном устройстве [17] управление рабочим циклом также проводится по давлению в гидросистеме (рис. 6). Позиционная обратная связь служит для ограничения хода бойка. Устройства двухстороннего действия с управляемой камерой прямого хода *B* и газовой камерой *C* (гидромолот ТВ725Х компании Teledyne).

В исходном состоянии золотник 6 находится в крайнем левом положении, жидкость от насоса поступает в камеру *A* ударного узла, камера *B* соединена со сливом. Боек движется вправо и перекрывает канал, соединяющий камеру управления золотника *D* со сливной линией. В случае повышения давления в системе выше уровня, заданного управляющим давлением P_x , клапан давления 7 открывается и жидкость поступает в левую камеру управления распределителя.

теля. Из-за разницы площадей камер распределителя золотник перемещается в крайнее правое положение. Камера B соединяется с напорной линией, боек совершает торможение и прямой ход. В конце прямого хода камера D соединяется со сливной линией, золотник $б$ возвращается в исходное состояние. Цикл повторяется. В случае если давление в системе не превысит значения, заданного P_x , боек совершает обратный ход до положения, при котором камера A соединится с камерой D управления распределителя.

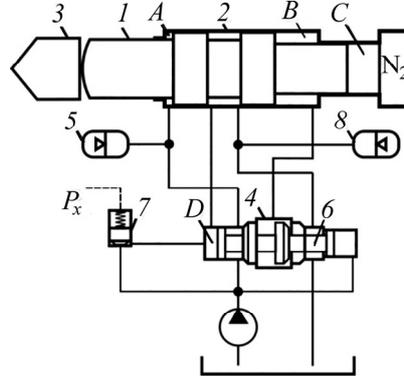


Рис. 6. Принципиальная схема и параметры имитационной модели гидромолота: 1 — боек; 2 — корпус; 3 — инструмент; 4 — распределитель; 5, 8 — аккумуляторы; 6 — золотник; 7 — пилотный клапан; A , B — соответственно камеры обратного и прямого хода; C — газовая камера; D — камера управления золотника

Для представленной схемы разработана математическая модель и выбраны 16 оптимизируемых параметров, включающих рабочие площади поршня бойка и золотника, координаты позиций управляющих каналов, давления зарядки и объема азотной камеры и аккумулятора. В качестве целевой функции оптимизации выбрано КПД устройства, которое определяется как отношение ударной энергии бойка к затрачиваемой энергии гидропривода за один цикл. Проведено имитационное моделирование влияния давления управления P_x , расхода насоса и параметров газовой камеры. Влияние первого параметра заключается в регулировании мощности устройства, второго — частоты, третьего — в возможности глубокой регулировки характеристик устройства.

В [33] описано моделирование в программе AMESim гидроударного механизма анкероустановщика с управлением обратными связями между ударным узлом и золотниковым распределителем. В ударном узле, аналогично [26], предусмотрено несколько положений координаты обратной связи и разработано оригинальное регулировочное устройство для их переключения. Представлены графики движения бойка при разных координатах обратной связи.

Устройства двухстороннего действия с управляемой камерой прямого хода с “задержкой” движения бойка предложены в патентах № 2230189, 2495991 РФ. В них боек в одной из фаз рабочего цикла неподвижен до момента, пока давление p в гидравлической системе не превысит заданного значения p_z , называемого давлением задержки: в первом — перед началом фазы обратного хода, во втором — прямого хода.

В патенте № 2321777 РФ предложены конструкции распределителей для устройств с задержкой (рис. 7), с помощью которых можно реализовать предложенные системы управления рабочим циклом. Распределитель по варианту рис. 7а состоит из золотника 1 и корпуса 2. В начальный момент золотник под действием силы F находится в крайнем левом положении (как показано на рисунке). При подаче жидкости по каналу управления КУ в камеру управления 3 давление p в ней повышается и при превышении им установленного значения p^* золотник 1 сместится вправо по чертежу и откроет доступ жидкости, подаваемой от канала управления КУ,

к камере 5. Одновременно будет перекрыт канал 4, по которому рабочая жидкость от камеры 5 поступала к сливной линии СЛ. Золотник 1 под действием давления жидкости в камерах 3 и 5 сместится вправо и займет крайнее правое по рисунку положение, отсоединит НЛ от камеры В прямого хода ударного узла и соединит с ней сливную линию СЛ. Происходит обратный ход бойка. Возврат золотника в исходное положение произойдет при определенном положении бойка ударного устройства, при котором происходит соединение канала управления со сливной линией под действием силы F . При этом камера В отсоединяется от СЛ и соединяется с НЛ. Происходит прямой ход бойка, в конце которого КУ соединяется с НЛ. Цикл повторяется.

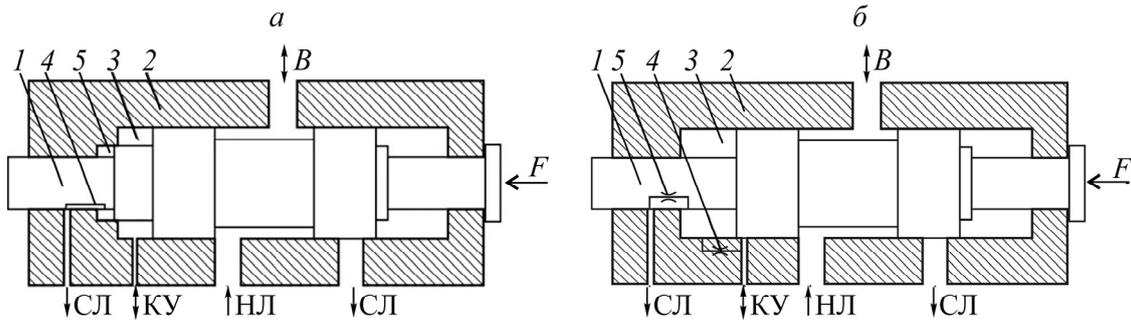


Рис. 7. Схемы золотниковых распределителей для реализации рабочего цикла гидроударной системы с задержкой движения бойка: а — золотник ступенчатой формы; б — бесступенчатый золотник (пояснения в тексте)

В канал управления КУ распределителя по варианту рис. 7б подается рабочая жидкость под давлением p , откуда ограниченное количество рабочей жидкости через дроссель 4 поступает в камеру 3 управления. Давление p_3 в камере 3 управления плавно повышается и имеет значение

$$p_3 = \frac{r_2 p}{r_1 + r_2},$$

где r_1 , r_2 — гидравлические сопротивления соответственно дросселей 4 и 5. При превышении давлением p в канале управления установленного значения p^* золотник 1 сместится вправо по чертежу и при достижении кромкой золотника канала управления откроет прямой доступ потоку рабочей жидкости из этого канала в камеру 3, одновременно будет перекрыт дроссель 5 между камерой 3 и сливной линией. Золотник 1 под действием давления в камере 3 сместится вправо и займет крайнее правое по рисунку положение, отсоединит НЛ от камеры В прямого хода ударного узла и соединит с ней сливную линию СЛ. Возврат в исходное положение золотника произойдет при определенном положении бойка ударного устройства, при котором происходит соединение канала управления со сливной линией под действием силы F . Параметры золотника, дросселей, величина смещения золотника, при которой происходит прямое соединение КУ с камерой 3, подбираются таким образом, чтобы импульс, сообщаемый золотнику 1 в течение возможного гидроудара, был недостаточным для самопроизвольного срабатывания золотника при давлении, меньшем p^* .

Достоинством конструкций представленных распределителей патента № 2321777 РФ является надежная фиксация золотника в крайних положениях и его быстрое переключение после начального смещения и прямого соединения камер 5 (рис. 7а) и 3 (рис. 7б) с каналом управления.

Испытания гидроударного устройства с распределителем по схеме рис. 7б [18] показали возможность эффективного регулирования энергии удара, которая росла почти пропорционально давлению задержки p^* , и частоты устройства при сравнительно небольшом изменении предупредительной скорости с помощью регулирования расхода подаваемой к устройству жидкости.

В [20] описан распределитель адаптивного гидроударного устройства (рис. 8). Влияние свойств разрушаемого массива на работу ударной системы проявляется в коэффициенте восстановления скорости бойка R : при его увеличении давление в системе падает, при снижении — растет [34]. Соответствующим образом изменяется предупредная скорость и энергия удара. Для сохранения энергии удара на заданном уровне предложено электромеханическое управление (рис. 8, элементы 5–7), позволяющее поддерживать среднее давление постоянным, вне зависимости от значения коэффициента R .

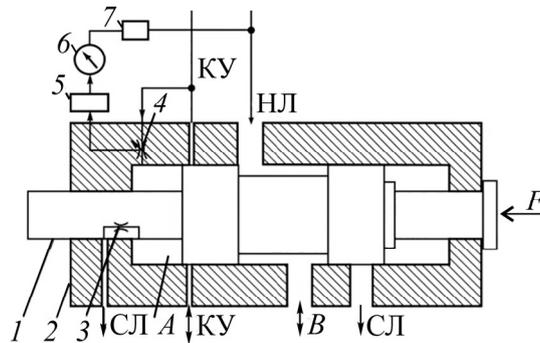


Рис. 8. Схема распределителя адаптивного гидроударного устройства с задержкой движения бойка (пояснения в тексте)

Принцип работы распределителя аналогичен представленному на рис. 7б. Отличие заключается в возможности автоматической регулировки давления в системе, что происходит следующим образом. Рабочая жидкость из напорной линии НЛ через демпфирующее устройство 7, усредняющее ее давление, подается к датчику 6 давления, который регистрирует среднее давление $P_{\text{ср}}$ в НЛ. Когда давление $P_{\text{ср}}$ в НЛ отклоняется от установленного значения $P_{\text{ср-уст}}$, измененное управляющее воздействие от датчика давления 6 подается на электронное устройство 5 с электромеханическим приводом, которое производит регулировку площади проходного сечения дросселя 4. В результате изменяется сопротивление дросселя 4 и, соответственно, начало движения золотника 1 и рабочего цикла ударного устройства. Это приводит к корректировке среднего давления $P_{\text{ср}}$ и возвращению его на установленный уровень $P_{\text{ср-уст}}$.

Предложены схемы адаптивных гидроударных устройств, в которых характеристики (частота ударов [19], частота и энергия ударов [21]) изменяются в зависимости от свойств разрушаемого массива. Так как система управления устройства [19] является частью системы управления [21], то приведем схему и описание работы только второй системы. На рис. 9 представлено устройство двухстороннего действия с управляемой камерой прямого хода с позиционной обратной связью между ударным узлом и распределителем. Управление характеристиками работы основано на согласовании частоты ударов со свойствами разрушаемого массива. Корпус устройства под действием внешней силы F_{out} движется по мере углубления инструмента. Закон его движения после удара и откола части массива определяется силой F_{out} , массой корпуса, динамикой бойка и инструмента. В случае если корпус не успевает в период между двумя ударами поджать инструмент к массиву, происходит прострел, кромка ступени 7 бойка 6 входит в тормозную камеру 9 ударного узла. Тормозная камера связана с регулятором потока 11, который в зависимости от давления в тормозной камере изменяет позицию поршня 19. Его игла управляет подачей жидкости к турбине золотника распределителя 12. Чем выше давление, тем медленнее скорость и ниже частота ударов и наоборот.

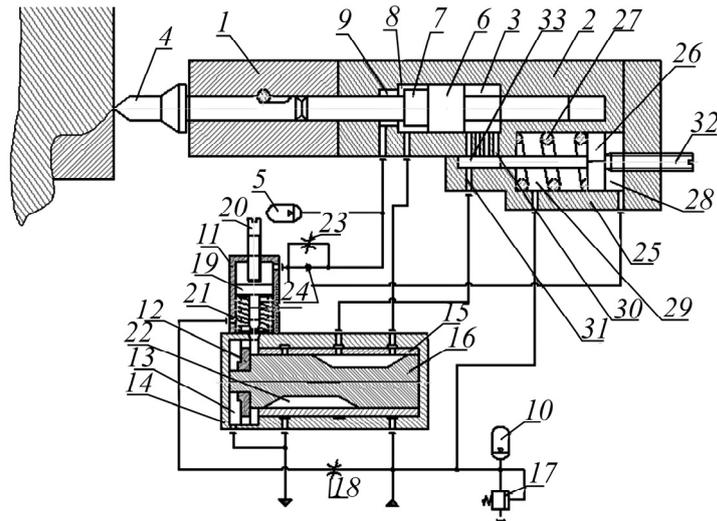


Рис. 9. Схема гидравлического устройства ударного действия с автоматической регулировкой частоты и энергии единичного удара от внешней нагрузки на инструмент: 1, 2 — корпус; 3, 8, 9 — камеры прямого и обратного хода, тормозная; 4 — инструмент; 5, 10 — гидропневмоаккумуляторы; 6 — боек; 7 — тормозная ступень бойка; 11 — регулятор потока; 12 — турбина; 13 — камера распределителя; 14 — распределитель; 15 — неподвижная гильза; 16 — вращающийся золотник; 17 — предохранительный клапан; 18 — регулируемый дроссель; 19 — поршень; 20 — регулировочный винт; 21 — дроссельная полость; 22 — золотниковая полость; 23 — жиклер; 24 — обратный клапан; 25 — корпус; 26 — поршень; 27 — пружина; 28 — камера управления; 29 — поршневая полость; 30, 31 — каналы управления; 32 — регулировочный винт; 33 — камера управления

Регулировка энергии удара осуществляется ступенчатым изменением длины фазы обратного хода бойка, который, как и частота, управляется давлением в тормозной камере ударного устройства. При его увеличении происходит повышение давления в камере 28 управляющего поршня 26, который смещается и перекрывает последовательно отверстия 30 в камере 33, соединяющие камеру прямого хода 3 со сливом. Боек останавливается раньше, чем камера прямого хода отсоединяется от сливной линии и соединяется с напорной линией. Длина его прямого хода оказывается меньше, соответственно, меньше предупредительная скорость и энергия удара.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ И СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГИДРОУДАРНЫХ МАШИН

Предложенный обзор способов и схем управления характеристиками гидроударных машин не является исчерпывающим. Основное внимание в нем уделялось действующим моделям или моделям, для которых проведены расчеты, доказывающие их работоспособность. Ударные узлы устройств в них — почти всегда цилиндры двухстороннего действия с управляемой камерой прямого хода, часто с газовой камерой с торцевой стороны бойка, распределители — золотниковые выносные (отделенные от ударного узла) возвратно-поступательного действия.

Системы управления, представленные в [16, 17, 30–32], в которых положение двухпозиционного золотника распределителя зависит только от давления в гидравлической системе, ранее не применялись. Их использование возможно вследствие реализуемого в практике для автоколебательных гидроударных систем с источником постоянного расхода условия роста давления в течение фазы обратного хода. Системы [16, 30–32] исключают управляющие каналы между ударным узлом и распределителем, что существенно упрощает конструкцию гидроударного устройства, однако, как указывают авторы, требует тщательной настройки параметров распре-

делителя. Развитие получило регулирование характеристик гидромолота (энергии и частоты ударов), которое может осуществляться оператором используемого оборудования в зависимости от условий работы при помощи специальной аппаратуры. Сложность применения указанных систем заключается в необходимости точного согласования параметров источника расхода, ударного узла и распределителя, хотя при развитии современных программ расчета это вполне преодолимо [35].

Новым явлением в развитии гидроударных систем стало применение микроэлектронной техники для управления рабочим циклом и адаптации их параметров к свойствам разрушаемого материала. В [14, 15, 27–29] заявлено о создании интеллектуальных гидравлических ударников, управление которыми осуществляется микроэлектронной системой, образованной цепочкой: датчик давления — аналого-цифровой преобразователь — микропроцессор — усилитель — направляющие электромагнитные распределители — клапаны. Рассматриваются гидромолоты с газовой камерой, образованной корпусом и задним торцом бойка. Микропроцессор анализирует значение давления в газовой камере, определяя положение бойка, и подает в соответствии с этим управляющие сигналы на электромагнитные двухпозиционные распределители, которые, в свою очередь, управляют клапанами, осуществляющими подачу жидкости в управляемую камеру устройства. Обратную связь между газовой камерой ударного узла и распределителем следует отнести к позиционной, так как в этом случае давление в камере является однозначной функцией положения бойка. Однако она, как и в предыдущем случае, исключает управляющие каналы между ударным узлом и распределительным устройством.

Микропроцессорная техника открывает новые возможности управления рабочим циклом гидроударных устройств, позволяет регулировать энергию и частоту ударов без каких-либо дополнительных гидравлических связей. Положение бойка в данном случае определялось по давлению в газовой камере. Еще с большей точностью это можно сделать, например, с помощью датчиков перемещения или другим способом. Показана возможность создания на данной основе программируемого гидроударного устройства, характеристики которого изменяются в зависимости от свойств разрушаемой среды. В приведенных примерах для прогнозирования и установки новых характеристик устройства, применяется алгоритм нечеткой логики, но при наличии микропроцессора есть возможность использовать любой другой алгоритм.

Вместе с тем не ясно быстрое действие применяемой при управлении рабочим циклом устройств цепочки “датчик давления — аналого-цифровой преобразователь — процессор — усилитель — электромагнитные распределители — гидроклапаны”. Это не позволяет судить о возможных частотных характеристиках таких систем. В [14, 15, 27–29] частота ударов не превышала 5–8 Гц, что в ряде практических приложений недостаточно.

Получили дальнейшее развитие гидроударные машины [25], в которых вместе с позиционной обратной связью между ударным узлом и распределителем включается дополнительная обратная связь между гидравлической системой и распределителем — связь по давлению, позволяющая регулировать давление в системе и энергию удара [18, 36]. Новым элементом является применение дросселей, соединяющих камеру управления распределителя с напорной и сливной линиями, что позволяет исключить из него дополнительный клапан и таким образом упростить распределительное устройство. Данная схема управления — это схема с комбинированной обратной связью между гидросистемой, ударным узлом и распределителем.

Появились новые, называемые адаптивными, гидроударные устройства, в которых характеристики изменяются автоматически в зависимости от свойств обрабатываемой среды [14, 19–21]. Системы управления для адаптивных устройств можно строить различными способами: как с использованием микроэлектронных технологий, так и гидравлических обратных

связей. В любом случае они используют изменение характера взаимодействия ударной системы “боек – инструмент” с разрушаемым массивом (коэффициент восстановления скорости бойка). В свою очередь, коэффициент восстановления может быть определен при помощи датчика скорости, по давлению в газовой камере (если таковая имеется) или с использованием зависимости от него давления в гидросистеме [34].

В контексте проводимого анализа следует упомянуть замечания по разработке золотниковых распределителей вращательного действия. В [37] отмечаются их перспективы при частотах ударов выше 25–40 Гц и недостаточное быстродействие для диапазона золотниковых распределителей возвратно-поступательного действия. Конечно, это утверждение может быть опровергнуто тем, что повышение частоты гидроударных устройств зависит главным образом от массы бойка, так как она многократно превышает массу распределителя. При использовании распределителей вращательного действия появляются сложности в синхронизации движений бойка и подвижного элемента распределителя, так как почти все объемные гидроударные управляются за счет обратных связей между ними, здесь они отсутствуют. Тем не менее создание устройств с распределителями вращательного действия привлекательно тем, что они могут снизить потери на их работу и при решении задачи синхронизации обеспечить стабильный рабочий цикл.

Вопрос о повышении частотного диапазона гидроударных машин в связи с расширением области их применения достаточно актуален. Это в том числе связано с необходимостью обеспечения компактных геометрических размеров машин, в которых требуемая ударная мощность не может быть достигнута за счет увеличения массы бойка, что актуально в активных исполнительных органах горных машин, реализующих совмещение процессов разрушения и погрузки породы [38, 39], и в погружных гидроударниках [5, 40]. Работы в этом направлении ведутся. Например, в [40] представлены планы по созданию гидроударников частотой до 100 Гц и выше, что, по мнению авторов, должно увеличить скорость бурения. Существенное повышение частотных характеристик гидроударных устройств может быть достигнуто за счет перехода работы их гидросистемы в диапазон более высоких давлений.

ВЫВОДЫ

Фундаментальное свойство гидроударных систем — зависимость их основных характеристик от расхода поступающей к ним жидкости: при его увеличении происходит одновременный рост энергии и частоты ударов. Изменение связи между этими характеристиками, создание схем управления, позволяющего регулировать их отдельно, является одной из задач дальнейшего повышения эффективности гидроударной техники.

Новое направление в развитии систем управления рабочими циклами гидроударных машин связано с реализацией обратных связей между ударным узлом и распределителем по давлению в гидравлической системе или в пневматической камере ударного узла. Это позволяет упростить конструкцию гидроударной машины за счет изъятия каналов, реализующих позиционные обратные связи. Управление параметрами связи и отдельное регулирование частоты и энергии ударов может быть выполнено гидравлическим или микроэлектронным способами.

Важное направление в развитии гидроударной техники — создание адаптивных машин, позволяющих осуществлять регулирование характеристик в зависимости от свойств разрушаемой среды (по коэффициенту восстановления скорости бойка). Это становится возможным с введением дополнительных обратных связей между гидросистемой и распределительным устройством по давлению или в случае применения микропроцессорного управления при помощи специальных алгоритмов, например алгоритма нечеткой логики.

Существующая потребность в создании гидроударных устройств повышенной мощности с ограничениями по размерам (например, при проходке скважин и в активных исполнительных органах горных машин) вызывает необходимость в разработке высокочастотных ударных устройств. Это может быть реализовано за счет совершенствования схемы распределения и перехода на повышенное давление рабочей жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов О. Д. Конструктивные схемы бурильных машин. — Фрунзе: Илим, 1976. — 92 с.
2. Ашавский А. М. Основы проектирования оптимальных параметров забойных буровых машин. — М.: Недра, 1966. — 218 с.
3. Воскресенский Ф. Ф., Кичигин А. В., Славский В. М., Славский Ю. Н., Тагиев Э. И. Вибрационное и ударно-вращательное бурение. — М.: Гостоптехиздат, 1961. — 243 с.
4. Ясов В. Г. Теория и расчет рабочих процессов гидроударных буровых машин. — М.: Недра, 1977. — 152 с.
5. Киселев А. Т., Меламед Ю. А. Гидроударное бурение — итоги и перспективы // Разведка и охрана недр. — 1996. — № 9. — С. 19–22.
6. Алимов О. Д., Басов С. А. Гидравлические виброударные системы. — М.: Наука, 1990. — 350 с.
7. Горбунов В. Ф., Лазуткин А. Г., Ушаков Л. С. Импульсный гидропривод горных машин. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1986. — 195 с.
8. Ушаков Л. С., Котылев Ю. Е., Кравченко В. А. Гидравлические машины ударного действия. — М.: Машиностроение, 2000. — 416 с.
9. Hammer Hard Rock. Гидромолоты и навесное оборудование [Электронный ресурс]. 2011. URL: <http://промкаталог.рф/PublicDocuments/1105385.pdf>.
10. Krupp Hydraulic Breakers Specifications & Datasheets [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lectura-specs.com/en/specs/construction-machinery/attachments-hydraulic-breakers-krupp>.
11. Гидромолоты PROFBREAKER [Электронный ресурс]. URL: <https://exkavator.ru/attachments/producers/profbreaker>.
12. Impuls. Гидромолоты [Электронный ресурс]. 2020. URL: <https://гидромолот-импульс.su>.
13. Ye X., Miao X., and Cen Y. Modeling and simulation for hydraulic breaker based on screw-in cartridge valves, Appl. Mech. Mater., 2012, Vol. 229–231. — P. 1697–1701.
14. Ding W. S., Wang J. J., and Chen L. N. Electronic control hydraulic impactor based on pressure feedback, Proc. Int. Conf. Mech. Autom. Control Eng. MACE 2010, 2010. — P. 2716–2719.
15. Yang G., Ding C., Liang C., and Wang L. Research on intelligent hydraulic impactor, Proc. 3rd Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom. ICMTMA 2011, 2011, Vol. 3. — P. 3–6.
16. Yang G. and Liang C. Research on the new hydraulic impactor control system, Proc. Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom. ICMTMA 2010, 2010, Vol. 3. — P. 207–210.
17. Zhao H., Liu P., Shu M. F., and Wen G. C. Simulation and optimization of a new hydraulic impactor, Appl. Mech. Mater., 2012, Vol. 120. — P. 3–10.
18. Городилов Л. В., Кудрявцев В. Г. Экспериментальное исследование гидроударной системы с задержкой движения бойка // Машиноведение. — 2016. — № 1. — С. 96–102.
19. Лазуткин С. Л., Лазуткина Н. А. Прогрессивная конструкция гидравлического ударного устройства // Вестн. ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. — 2011. — № 3. — С. 5–11.
20. Пат. 2674289 РФ. Распределитель гидравлического ударного устройства / Л. В. Городилов // Оpubл. в БИ. — 2018. — № 34.
21. Фабричный Д. Ю., Толенгутова М. М., Фабричный Ю. Ф. Системы автоматического регулирования гидравлических ударных устройств по нагрузке на инструмент // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. — 2013. — № 4. — С. 72–77.

22. **Городилов Л. В.** Основные свойства гидроударной системы одностороннего действия с двумя ограничителями движения бойка // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 105–115.
23. **Городилов Л. В.** Анализ динамики и характеристик основных классов автоколебательных гидроударных систем объемного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2018. — № 1. — Р. 22–30.
24. **Сагинов А. С., Кичигин А. Ф., Лазуткин А. Г., Янцен И. А.** Гидропневмоударные системы исполнительных органов горных и строительно-дорожных машин. — М.: Машиностроение, 1980. — 200 с.
25. **Архипенко А. П., Федулов А. И.** Гидравлические ударные машины. — Новосибирск: ИГД СО РАН. — 1991. — 106 с.
26. **Иванов К. И., Ципкис А. М.** Бурение шпуров и скважин самоходными шахтными установками. — М.: Недра, 1983. — 198 с.
27. **Yang G. and Ding C.** Research on intelligent hydraulic impactor system based on fuzzy control, 2nd Int. Conf. Adv. Comput. Control., 2010. — P. 418–422.
28. **Chen J. S.** Mechanical and electrical control of hydraulic impactor, Adv. Mater. Res., 2012, Vol. 507. — P. 167–171.
29. **Yu H. and Tang J.** The application of fuzzy control in intelligent hydraulic impactor, Int. J. Adv. Comp. Tech., 2012, Vol. 22, No. 4. — P. 1–9.
30. **Yang G. P., Gao J. H., and Chen B. J.** Computer simulation of controlled hydraulic impactor system, Adv. Mater. Res., 2011, Vol. 179–180. — P. 122–127.
31. **Yang G. and Chen Y.** The research of new type hydraulic breaker with strike energy and frequency of adjusted, Mech. Eng. Res., 2012, Vol. 2, No. 2. — P. 45–51.
32. **Yang G., Yubao C., and Bo C.** Dynamic performance research on reversing valve of hydraulic breaker, World J. Mech., 2012, Vol. 2. — P. 288–296.
33. **Wang X. Y.** Modeling and simulation of impactor of hydraulic roofbolter based on AMESim, Appl. Mech. Mater., 2014, Vol. 448–453. — P. 3426–3429.
34. **Городилов Л. В.** Исследование динамики гидроударных объемных систем двухстороннего действия. Ч. II. Влияние на характеристики предельных циклов конструктивных особенностей устройств и условий их взаимодействия с горным массивом // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 127–138.
35. **Modeling and Simulation of Technical Systems**|ESI ITI [Электронный ресурс]. URL: <https://www.simulationx.com>.
36. **Городилов Л. В., Кудрявцев В. Г.** Экспериментальное исследование режимов работы гидроударного устройства двухстороннего действия для виброударного воздействия на породный массив // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — № 2. — С. 52–56.
37. **Лазуткин А. Г., Лазуткин С. Л.** Анализ систем управления гидроударников // ГИАБ. — 2009. — № 2. — С. 284–286.
38. **Маттис А. Р., Кузнецов В. И., Васильев Е. И.** Экскаваторы с ковшом активного действия: опыт создания, перспективы применения. — Новосибирск: Наука, 1996. — 174 с.
39. **Маттис А. Р., Ческидов В. И., Яковлев В. Л.** Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых. — Новосибирск: СО РАН, 2007. — 337 с.
40. **Wittig V., Riechers J., Lincke J., Bracke R., and Hyun-Ick Yo.** Hydraulic DTH fluid / mud hammers with recirculation capabilities to improve ROP and hole cleaning for deep, hard rock geothermal drilling, World Geothermal Cong., Melbourne, Australia, 2015. — P. 1–9.

*Поступила в редакцию 01/XI 2021
После доработки 21/XI 2021
Принята к публикации 24/XII 2021*