



**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ КОРПУСА УДАРНОГО УСТРОЙСТВА
В СКВАЖИНЕ С УЧЕТОМ РЕАКЦИИ ПОРОДНОГО МАССИВА**

Л. В. Городилов, В. П. Ефимов, П. В. Сажин, В. Г. Кудрявцев, А. И. Першин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: gor@misd.ru, a.ig.pershin@gmail.com,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Разработана методика экспериментального исследования перемещений ударного устройства в скважине, включающая использование “низкочастотных” (токовихревых) датчиков перемещения и “высокочастотных” (акселерометров) датчиков ускорения. Проведена программная обработка получаемых с датчиков сигналов, включающая частотную фильтрацию, двойное интегрирование ускорений и определение точек сопряжения перемещений после интегрирования и прямой регистрации. Приведены осциллограммы измерений при разных величинах реакции со стороны породного массива. Обсуждены количественные аспекты явления, сделана попытка выявить взаимосвязь между количественными показателями ударных импульсов и продвижением корпуса.

Ударное устройство, породный массив, корпус, боек, сила трения, осциллограмма, ускорение

**PROCEDURE OF STUDYING THE MOVEMENT OF IMPACT DEVICE CASE
IN A BOREHOLE TAKING INTO ACCOUNT THE ROCK MASS REACTION**

L. V. Gorodilov, V. P. Efimov, P. V. Sazhin, V. G. Kudryavtsev, and A. I. Pershin

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: gor@misd.ru, a.ig.pershin@gmail.com, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

A procedure of experimental study of the impact device case movement in a borehole has been developed, including the use of “low-frequency” current-vortex displacement sensors and “high-frequency” (accelerometers) acceleration sensors. After registration, software signal processing was performed, including double integration of accelerations and determination of points of interface of displacements obtained after integration and direct registration. Oscillograms of measurements at different values of reaction from the rock mass are given. The quantitative aspects of the phenomenon are discussed, and an attempt is made to identify the relationship between the quantitative indicators of impact pulses and case displacement.

Impact device, rock mass, case, striker, friction force, oscillogram, acceleration

Одной из проблем, возникающих при бурении и использовании в уже пробуренных скважинах специального оборудования, является его заклинивание во время проведения технологических операций [1–3]. Это приводит к потере используемого оборудования и выходу из строя скважины, что существенно увеличивает стоимость работ. Подобные проблемы возникают и при проходке подземных коммуникаций в грунтах при помощи специальных ударных устройств — пневмопробойников [4–7]. Применение для решения этих и других подобных задач ударных устройств, в том числе реверсивных [8], позволяет многократно увеличить прикладываемые к оборудованию для его освобождения силы и эффективно преодолевать заклинивание.

Для правильного понимания процессов, происходящих при продвижении ударного устройства в скважине или грунте, необходимо знать реальную динамику его корпуса под действием ударных нагрузок. Для этого были разработаны стенд и методика исследований динамики корпуса ударного устройства при воздействии на него ударной нагрузки и силы трения.

Стенд и методика экспериментов. Стенд для моделирования движения корпуса ударного устройства в скважине представляет собой собранные на общем основании прижимное устройство с макетом корпуса с наковальней и маятниковый копер (рис. 1). Швеллер-основание 1 фиксируется болтами на металлическом столе, который в свою очередь жестко крепится к массивному бетонному основанию. Маятниковый копер состоит из рамы 2 и ударной массы (бойка) 3, подвешенной к раме на струнах. Прижимное устройство состояло из рамы (соединенных между собой четырьмя шестигранниками металлических плит), также закрепленной на основании 1.

На нижней плите закреплено кольцо с пуансоном 10, в которое вставляли обоймы-сегменты с вкладышами из модельного материала 11. Между вкладышами размещали макет корпуса ударного устройства 4 с наковальней 5. В верхнюю плиту был вмонтирован винт 8, с помощью которого создавали силу, действующую через измерительный динамометр 9, пуансон в кольце и обоймы-сегменты с вкладышами 11 на корпус ударного устройства 4.

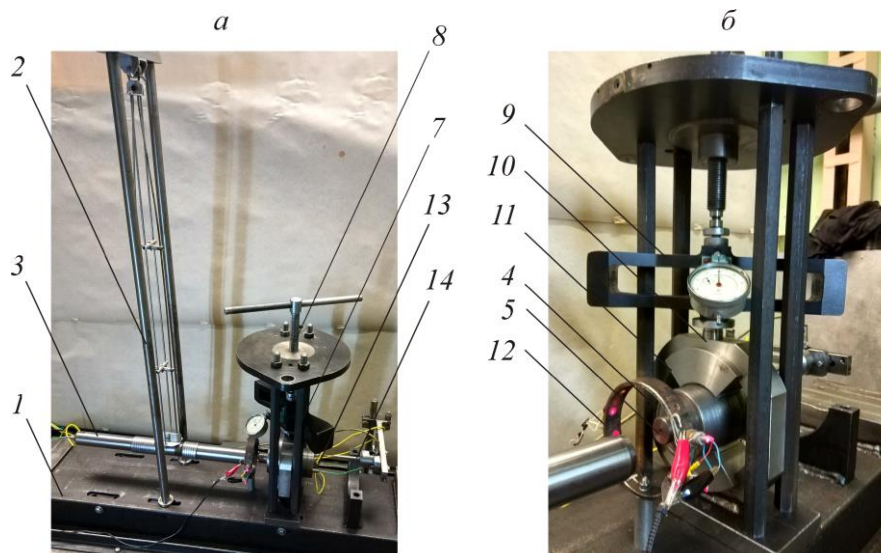


Рис. 1. Фотографии стенда: *а* — общий вид, *б* — прижимное устройство (1 — швеллер-основание; 2 — рама с подвесом; 3 — боек; 4 — наковальня; 5 — макет корпуса; 7 — рама зажимного устройства; 8 — винт; 9 — динамометр ДОСМ-3-5; 10 — кольцо с пуансоном; 11 — обоймы-сегменты с вкладышами; 12 — оптический датчик измерения пред- и послеударной скорости бойка (две пары “лазер–фотодиод”); 13 — акселерометр Kistler Type 8042; 14 — датчик перемещения EDS-100

Схема эксперимента представлена на рис. 2. В опытах боек 3 поднимали на фиксированную высоту. После отпускания он разогнался и ударял по наковальне 5, закрепленной в макете корпуса 4. Специальное соединение подвеса с бойком позволяло разъединять их в момент удара. Корпус удерживался во вкладышах обоймы силой трения. Для регистрации ускорений в бойке и макете корпуса использовали акселерометры Kistler Type 8042 13, которые крепили на противоположных торцах этих элементов резьбовыми соединениями. Для определения пред- и послеударной скоростей бойка взяли оптический датчик 12, представляющий собой установленные перед наковальней две пары “лазер–фотодиод” [9]. Для регистрации перемещения макета корпуса 4 применяли датчик линейных перемещений ИПИЭ-50. Сигналы от датчиков через согласующее устройство 16 (от акселерометров через усилители заряда Kistler Amplifier Type 5001) по-

ступали на аналого-цифровой преобразователь L-Card E-440 17 и передавались на персональный компьютер 18 с установленной программой обработки экспериментальных данных PowerGraph 3.3. В опытах использовали цилиндрический боек массой 5.4 кг и длиной 520 мм, масса макета корпуса с наковальней составляла 4.4 кг, длина — 0.15 м.

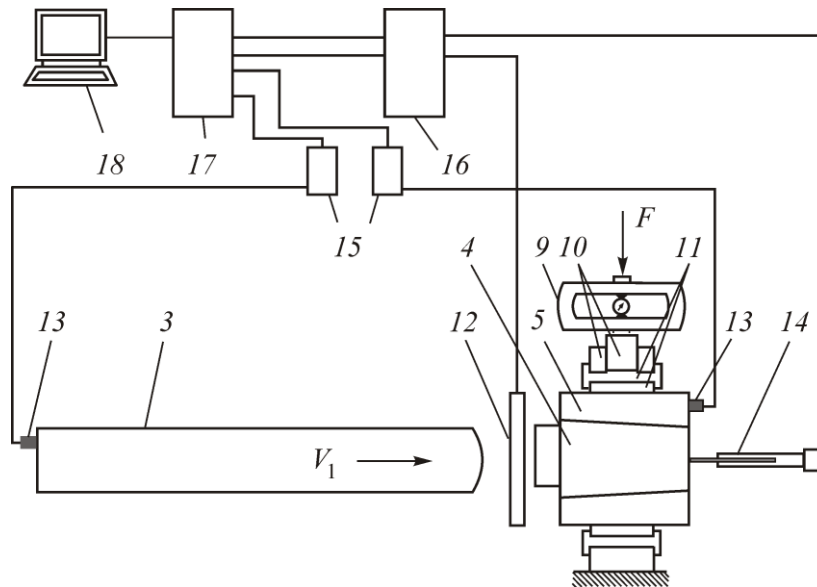


Рис. 2. Схема эксперимента: 3 — боек; 4 — наковальня; 5 — корпус; 9 — динамометр ДОСМ-3-5; 10 — кольцо с пуансоном; 11 — обойма-сегмент с вкладышами; 12 — оптический датчик измерения пред- и послеударной скорости бойка (две пары “лазер–фотодиод”); 13 — акселерометр Kistler Type 8042; 14 — датчик перемещения ИПИЭ-50; 15 — усилитель заряда Kistler Amplifier Type 5011; 16 — согласующее устройство; 17 — аналого-цифровой преобразователь L-Card E-440; 18 — персональный компьютер

Результаты экспериментов. При тестировании методики проведены эксперименты с изменением силы прижима F вкладышей обойм-сегментов 11 к корпусу 4 и силы трения, действующей на корпус устройства. В опытах использовали алюминиевые вкладыши. На рис. 3 представлен пример осциллограмм, получаемых в программе PowerGraph 3.3 в результате эксперимента. После регистрации сигналы подвергались предварительной обработке в PowerGraph 3.3: очистке от цифрового шума (функция Filter→NoiseFilter) и смещению (выставление вступления сигналов в нуль) сигналов ускорений (функция Data→Offset).

При двойном интегрировании сигналов ускорений в программе PowerGraph 3.3 не удалось добиться удовлетворительного соответствия перемещений макета корпуса с перемещениями, получаемыми прямым измерением датчиком перемещения ИПИЭ-50. По нашему мнению, это связано с известным эффектом смещения нуля в ударных импульсах при измерении сигналов пьезоэлектрическими датчиками. Поэтому была разработана программа на языке C#, ввод и вывод данных в которой осуществлен из текстовых файлов программы PowerGraph 3.3. Программа позволяла производить смещение исходных и полученных в результате обработки данных с определенной точки во времени, их интегрирование и вывод графиков ускорений, скоростей и перемещений. Интегрирование в программе выполнялось методом трапеций.

Так как боек перед ударом имел некоторую постоянную (предударную) скорость $vP+$, которую измеряли с помощью оптических датчиков, то значение его скорости после интегрирования, смещали на величину, равную $vP+$. Полученное после интегрирования скорости перемещение бойка $xP+$ смещали таким образом, чтобы его координата в момент соударения с наковальней оказывалась нулевой.

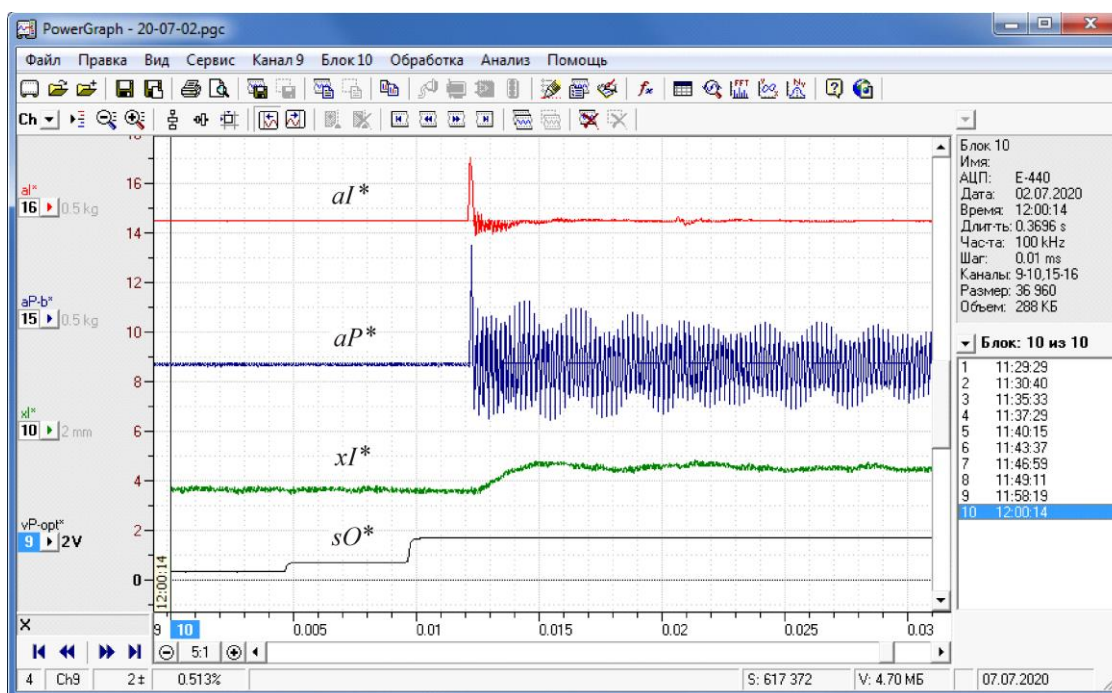


Рис. 3. Осциллограммы регистрируемых в программе PowerGraph 3.3 сигналов: aI^* , aP^* — соответственно ускорения корпуса и бойка; xI^* — перемещение корпуса; sO^* — сигнал с оптического датчика

На рис. 4 приведены осциллограммы от датчиков ускорений, установленных на бойке и корпусе, и результаты их обработки с помощью описанной процедуры интегрирования — графики их скоростей и перемещений (сплошные линии), а также полученные с помощью датчика ИПИЭ-50 перемещения корпуса (штриховые линии). Для большей наглядности сигналы от датчиков ускорений и графиков скоростей и перемещений смещены влево по оси t таким образом, чтобы моменты вступления их ударных импульсов совпадали. Величины смещения сигналов ускорения подбирались таким образом, чтобы перемещение макета корпуса, полученное после интегрирования, и в результате непосредственного измерения примерно совпадали между собой, а скорости бойка до и после удара совпадали с показаниями оптического датчика. Значение смещений ускорения для корпуса составляло 0.02 – 0.07 % от максимальной величины, для бойка — 0.03 – 0.76 %.

В представленных опытах предупредная скорость бойка $vP+$ составляла величину 1.97 (рис. 4а), 1.90 (рис. 4б), 1.97 (рис. 4в) м/с, сила прижима вкладышей к корпусу F — 3.4 (рис. 4а), 6.8 (рис. 4б), 10.3 кН (рис. 4в). Из графиков перемещений корпуса xI можно наблюдать, что перемещение, измеренное датчиком ИПИЭ-50 достаточно хорошо коррелирует с перемещением, полученным двойным интегрированием ускорения с датчика, установленного на корпусе. Расхождение результатов в показанном диапазоне не превышает 10 %. “Заваливание” фронта сигнала с датчика перемещения по сравнению с аналогичным с датчика ускорения свидетельствует о его неудовлетворительных частотных характеристиках (его частотный диапазон 0 – 600 Гц [10]). Для сравнения собственная частота акселерометров Kistler Type 8042 составляет 100 кГц.

Следует отметить также значительное уменьшение длительности положительной фазы сигнала скорости макета корпуса при увеличении силы прижима вкладышей к корпусу F от 3.4 (рис. 4а) до 10.3 кН (рис. 4в) – с ~ 3 до ~ 1.5 мс при почти одинаковой максимальной составляющей сигнала, равной ~ 2 м/с. Это свидетельствует об увеличении жесткости системы при росте силы F , что в данном случае влияет на длительность генерируемого после удара импульса.

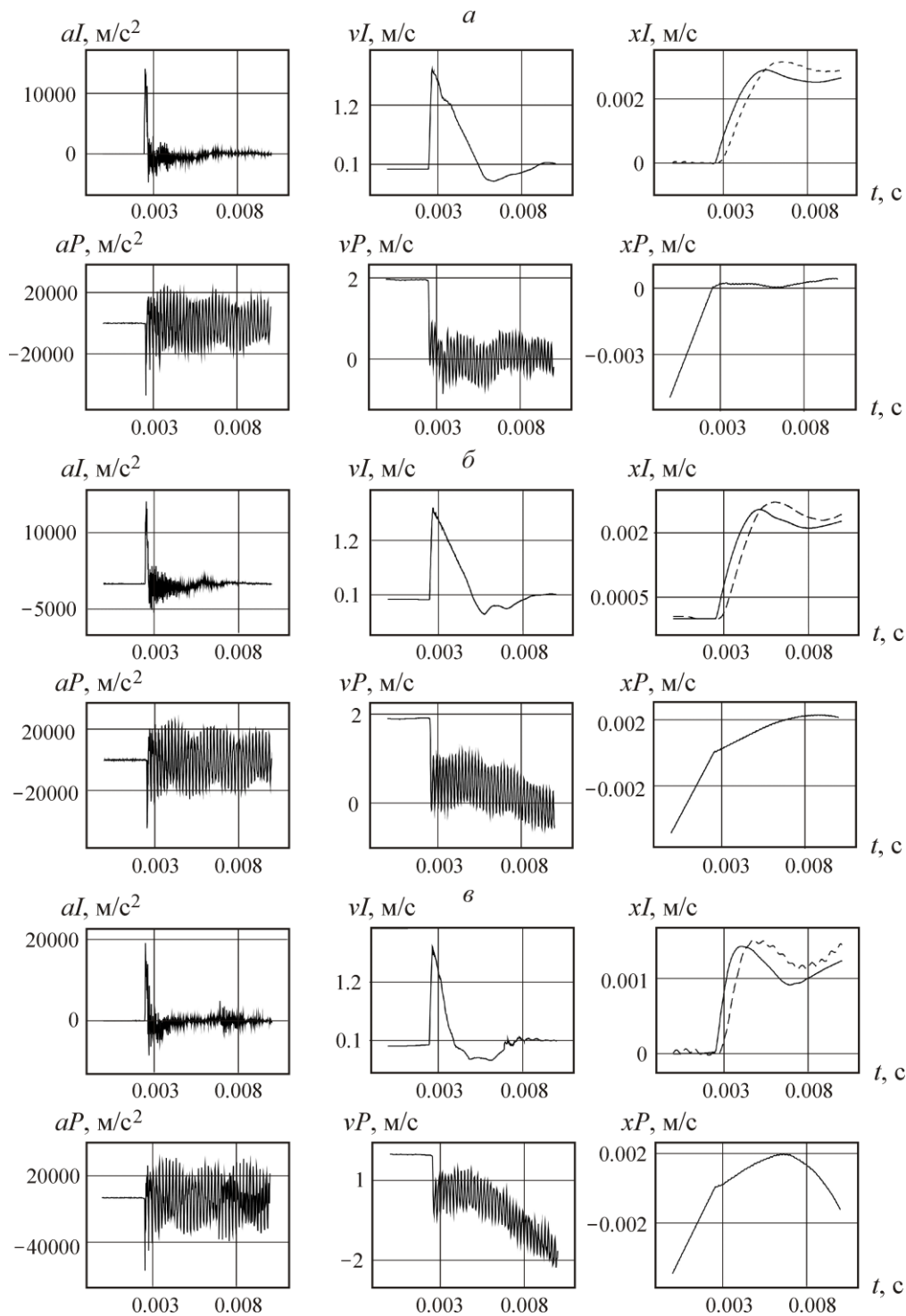


Рис. 4. Осциллограммы динамических характеристик в серии опытов с изменяющейся силой F (рис. 2), действующей на макет корпуса: t — время; aI, aP, vI, vP — соответственно ускорения и скорости корпуса и бойка; xI — перемещение корпуса, полученное интегрированием (—), и измеренное датчиком (-----); xP — перемещение бойка

ВЫВОДЫ

В работе представлен стенд и методика экспериментальных исследований с применением акселерометров перемещения корпуса ударного устройства в условиях, моделирующих движение в скважине при заклинивании. Используя процедуры двойного интегрирования сигналов ускорения, удалось получить графики перемещений, которые удовлетворительно коррелируют с осциллограммами перемещений, полученными прямым способом (с датчика перемещений).

При интегрировании исходного сигнала ускорения приходилось производить его смещение по оси ординат, что связано с известным эффектом “смещения нуля” при ударе на подобного типа датчиках. Цель дальнейшего совершенствования методики — отыскание точных параметров этого смещения. Одним из способов преодоления затруднений в определении перемещения с помощью датчиков ускорений может быть применение датчиков, изготовленных по технологии MEMS, которые позиционируются как акселерометры “без эффекта смещения нуля”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Lekontsev Y. M. and Sazhin P. V.** Directional hydraulic fracturing in difficult caving roof control and coal degassing, *Journal of Mining Science*, 2014, 50 (5), pp. 914–917. [**Леконцев Ю. М., Сажин П. В.** Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 137–142.]
2. **Manzhosov V. K. and Novikov D. A.** Simulation of transients and limit cycles of motion of vibro-impact systems with discontinuous characteristics, Ulyanovsk, UISTU, 2015, 236 pp. (in Russian) [**Манжосов В. К., Новиков Д. А.** Моделирование переходных процессов и предельных циклов движения виброударных систем с разрывными характеристиками. — Ульяновск: УЛГТУ, 2015. — 236 с.]
3. **Pat. 2703029 RF.** Device for point-to-point hydraulic fracturing of solid rocks. L. V. Gorodilov and P. V. Sazhin, *Vyull. Izobret.*, 2019. no. 29. [**Пат. 2703029 РФ.** Устройство для поинтервального гидроразрыва прочных горных пород / Л. В. Городилов, П. В. Сажин // Оpubл. в БИ. — 2019. — № 29.]
4. **Gurkov K. S. and Klimashko V. V.** Pneumatic punches, Novosibirsk, Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 1990, 217 pp. (in Russian) [**Гурков К. С., Климашко В. В.** Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990. — 217 с.]
5. **Smolyanitsky B. N. and Timofeev E. D.** Controllable pnevmohammer drill, *Interexpo Geo-Siberia*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 236–240. (in Russian) [**Смоляницкий Б. Н., Тимофеев Е. Д.** Управляемый пневмопробойник // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2015. — Т. 2. — № 3. — С. 236–240.]
6. **Danilov B. B. and Cheshchin D. O.** Pneumatic punch for laying curved wells. *Transport systems*, 2015, pp. 724–729. (in Russian) [**Данилов Б. Б., Чещин Д. О.** Пневмопробойник для прокладки криволинейных скважин // Политранспортные системы. — 2015. — С. 724–729.]
7. **Danilov B. B., Cheshchin D. O., and Vorotnikov D. A.** Results of controllable pneumatic punch field testing. *Interexpo Geo-Siberia*, 2018, vol. 5, pp. 26–31. (in Russian) [**Данилов Б. Б., Чещин Д. О., Воротников Д. А.** Результаты полевых испытаний управляемого пневмопробойника // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2018. — Т. 5. — С. 26–31.]
8. **Gorodilov L. V.** Analysis of self-oscillating single-acting hydro-impact system operational modes with two limiters of striker movement, *International Journal of Fluid Power*, 2019, no. 20 (2). pp. 209–224.
9. **Gorodilov L. V., Efimov V. P., Kudryavtsev V. G.** Modeling the striking head-impact tool-rock mass interaction, *Journal of Mining Science*, 2013, vol. 49, no. 4, pp. 618–624. [**Городилов Л. В., Ефимов В. П., Кудрявцев В. Г.** Моделирование процесса взаимодействия системы “боек–инструмент” с горным массивом на стенде // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 116–124.]
10. **Datchik** polozheniya induktivno-potentsiometricheskij s integrirovannym elektronnyim modulem ИПИА-50-S. *Instruktsiya po ekspluatatsii.* Samara, Sensorika-M. (in Russian) [**Датчик** положения индуктивно-потенциметрический с интегрированным электронным модулем ИПИА-50-С. Инструкция по эксплуатации. — Самара: ООО “Сенсорика-М”.]
11. **Ударные акселерометры.** URL: <https://osa.llc/udarnye-akselerometry/> (last visited 08.07.2020) [Electronic resource]