



**МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ
ПРИ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Л. В. Городилов, 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 пр. 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Представлена методика исследования движения корпуса ударного устройства под действием ударной нагрузки, при отработке которой производили регистрацию его смещения параллельно акселерометром и датчиком перемещения. Приведены результаты двойного интегрирования ускорения и их сравнение с перемещением, регистрируемым датчиком перемещения. Отмечена некорректность получаемых при двойном интегрировании осциллограмм ускорения графиков перемещений макета корпуса по амплитуде и направлению. С помощью смещения по оси ординат регистрируемой при ударе первой полуволны осциллограммы ускорений удается существенно улучшить результат интегрирования. Величина смещения подбирается таким образом, чтобы перемещение корпуса после окончания ударного воздействия на него бойка оставалось неизменным.

Ударное устройство, корпус, боек, ускорение, перемещение, сдвиг нуля при ударном взаимодействии

**TECHNIQUE FOR PROCESSING ACCELEROMETER SIGNALS
IN THE IMPACT INTERACTION OF SOLID BODIES**

L. V. Gorodilov, 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 technique for studying the movement of the body of a percussion device under the action of a shock load is presented, during which its displacement was recorded simultaneously with an accelerometer and a displacement sensor. The results of double integration of acceleration and their comparison with the displacement recorded by the displacement sensor are presented. The incorrectness of the acceleration graphs of the body displacements in amplitude and direction obtained with double integration of oscillograms is noted. When displacing along the ordinate axis of the first half-wave of the acceleration oscillogram recorded upon impact, it is possible to significantly improve the integration result. The value of displacement is selected in such a way that displacement of the body after the end of striker impact remains unchanged.

Percussion device, body, striker, acceleration, displacement, zero shift during impact interaction

Движение твердых тел под действием ударной нагрузки и силы трения возможно при преодолении заклинивания устройств в скважинах [1–4], ударных устройств при проходке выработок в грунте [5, 6] и при ударном погружении стержневых элементов в грунт [7, 8]. Для определения эффективности этого процесса необходимы сведения о его динамике в фазе ударного взаимодействия. В работе [9] делается попытка решения этой задачи с использованием высокочастотных датчиков-акселерометров, которая показала некоторые сложности при интегрировании полу-

чаемых сигналов. Возможно, это связано с эффектом смещения или “сдвига” нуля [10] при ударе. В данной работе приводятся результаты отработки методики интегрирования сигналов, регистрируемых акселерометрами при единичном ударном воздействии на макет корпуса ударного устройства, и сравнение их с перемещением, регистрируемым датчиком перемещения.

Экспериментальная установка и методика исследований. Подробно стенд для моделирования движения корпуса ударного устройства в скважине описан в [9]. Он представляет собой закрепленные на общем основании прижимное устройство, макет корпуса с наковальней и маятниковый копер. На рис. 1 показана фотография бойка и прижимного устройства с макетом корпуса.

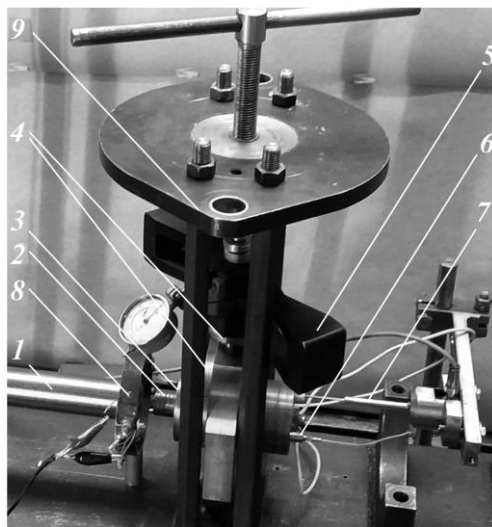


Рис. 1. Фотография прижимного устройства с макетом корпуса и бойком: 1 — боек; 2 — наковальня; 3 — макет корпуса; 4 — кольцо с пуансоном, разрезными кольцами и вкладышами; 5 — динамометр ДОСМ-3-5; 6 — акселерометр Kistler Type 8042; 7 — датчик перемещения ИПИЭ-50; 8 — оптический датчик измерения пред- и послееударной скорости бойка (две пары “лазер–фотодиод”); 9 — рама зажимного устройства с винтом

Ударная масса (бойк) 1 приводилась в движение и разгонялась до требуемой скорости при помощи маятникового копра (на фотографии не указан). Прижимное устройство состояло из рамы 9 (соединенных между собой четырьмя шестигранниками металлических плит), кольца с пуансоном, обоймами-сегментами и вкладышами 4. Макет корпуса ударного устройства 3 с наковальней 2 зажимался между вкладышами. В верхнюю плиту рамы был вмонтирован винт, с помощью которого через измерительный динамометр 5 нагружали собранную конструкцию, состоящую из кольца, сегментов с вкладышами и макета корпуса ударного устройства.

Схема эксперимента изображена на рис. 2. В опытах боек 1 со скоростью v ударял по наковальне 2, закрепленной в макете корпуса 3. Корпус удерживался во вкладышах обоймы 4 силой трения, создаваемой силой F , действующей на пуансон.

Для регистрации ускорений использовали акселерометр 6 (Kistler Type 8042), который крепили на торце макета корпуса, для определения предударной скорости бойка — оптический датчик 8, представлявший собой установленные перед наковальней две пары элементов “лазер–фотодиод” [9]. Перемещения макета корпуса 3 регистрировали с помощью датчика линейных перемещений ИПИЭ-50 ООО “Сенсорика-М”. Сигналы от датчиков через согласующее устройство 9 (от акселерометров через усилители заряда Kistler Amplifier Type 5001 10) поступали на аналого-цифровой преобразователь 11 (L-Card E-440) и передавались на персональный компьютер 12 с установленной программой обработки экспериментальных данных PowerGraph 3.3. В опытах использовали боек массой 5.4 кг и длиной 520 мм, масса макета корпуса с наковальней составляла 4.4 кг, длина — ~ 0.15 м.

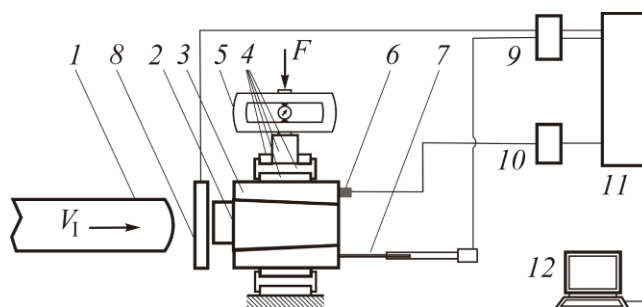


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — боек; 2 — наковальня; 3 — макет корпуса; 4 — кольцо с пьезоэлементами, разрезными кольцами и вкладышами; 5 — динамометр ДОСМ-3-5; 6 — акселерометр Kistler Type 8042; 7 — датчик перемещения ИПИЭ-50; 8 — оптический датчик измерения пред- и послударной скорости бойка (две пары “лазер–фотодиод”); 9 — согласующее устройство; 10 — усилитель заряда Kistler Type 5011; 11 — аналого-цифровой преобразователь L-Card E-440; 12 — персональный компьютер

Результаты экспериментов, их обсуждение. При отработке методики проведено несколько серий экспериментов, в которых изменяли начальное отклонение бойка и усилие со стороны прижимного устройства на макет корпуса. На рис. 3 показан скриншот экрана компьютера с осциллограммами, получаемыми в результате эксперимента в программе PowerGraph 3.3. После регистрации сигналы подвергались предварительной обработке в PowerGraph 3.3: очистке от цифрового шума (функция Filter→NoiseFilter) и смещению (выставление в нуль) сигналов ускорений (функция Data→OffSet).

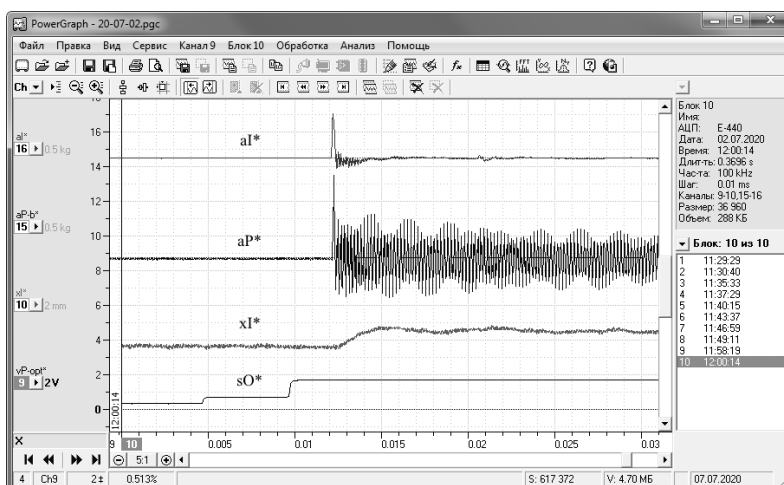


Рис. 3. Осциллограммы регистрируемых в программе PowerGraph 3.3 сигналов: aI^* и aP^* — соответственно ускорения корпуса и бойка, регистрируемые датчиками Kistler Type 8042; xI^* — перемещение корпуса, получаемое прямым измерением датчиком перемещения ИПИЭ-50; sO^* — сигнал с оптического датчика

При двойном интегрировании сигналов ускорений в программе PowerGraph 3.3, как правило, не удавалось достичь удовлетворительного соответствия получаемых перемещений макета корпуса с перемещениями, измеренными прямым датчиком перемещения ИПИЭ-50. Для иллюстрации этого на рис. 4 представлены характерные осциллограммы от установленных на корпусе датчиков ускорений, а также результаты их интегрирования — графики скоростей и перемещений (изображены синими линиями) и полученные с помощью датчика ИПИЭ-50 перемещения корпуса (изображены красными линиями). Видно, что сигнал, регистрируемый датчиком перемещения “отстает” от графика перемещений, полученного двойным интегрированием сигнала от акселерометра на время ~ 0.6 мс, что связано с недостаточными частотными характеристиками датчика ИПИЭ-50. На осциллограмме сигнала, регистрируемого датчиком перемещения,

после достижения максимального значения наблюдаются небольшие колебания с размахом 0.1–0.15 мм, а максимальное значение отличается от аналогичного, полученного интегрированием сигнала датчика ускорения, менее чем на 0.3 мм. Однако затем проинтегрированный график смещается от горизонтальной оси, почти всегда это смещение носит линейный характер. Полученные интегрированием графики перемещений на рис. 4а, б после достижения максимального значения приобретают соответственно отрицательный и положительный наклоны. На рис. 4в наклон сначала положительный, но по истечении ~30 мс после вторичного импульсного возмущения становится отрицательным.

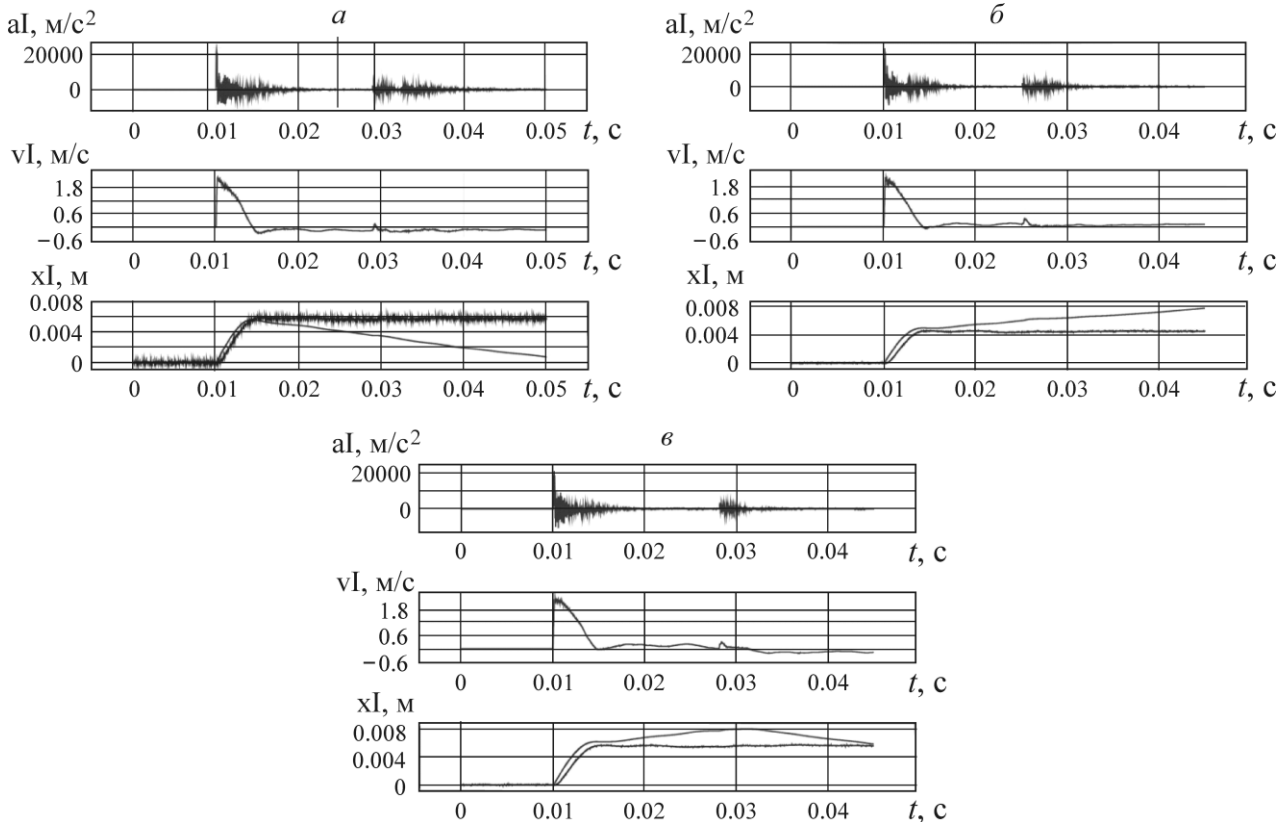


Рис. 4. Осциллограммы ускорения корпуса aI и полученные интегрированием графики их скоростей vI и перемещений xI (синяя линия — получена интегрирование, красная — сигнал от датчика ИПИЭ-50): a — постоянная времени $TC = \text{Medium}$ (10 мс); $б$ — $TC = \text{Long}$; $в$ — $TC = \text{Medium}$ (10 мс). Предударная скорость бойка 2.2 м/с, боковая сила поджатия $F = 3.4$ кН

Очевидно, что такое поведение графиков перемещений вызвано “всплесками” в определенные моменты регистрируемых акселерометром ускорений, что приводит в свою очередь к появлению постоянной составляющей в полученных интегрированием графиках скоростей и линейному изменению (после достижения максимума) полученных двойным интегрированием графиков перемещений. Это может быть следствием известного эффекта “смещения нуля” (сдвига нуля [10]) в ударных импульсах при регистрации сигналов пьезоэлектрическими датчиками, а также с возможными колебаниями корпуса в поперечном направлении (сдвиговыми нагрузками). По каким-то причинам чувствительный элемент датчика в момент ударного воздействия генерирует дополнительный заряд, вызывающий появление постоянной составляющей на графике скорости и затем линейный рост или снижение на графике перемещения.

“Улучшить” результат по интегрированию можно исходя из предположения, что смещение сигнала происходит непосредственно в фазе удара. Тогда это смещение можно скорректировать (сместить сигнал в этой фазе на определенную величину по оси ординат) таким образом, чтобы непосредственно после окончания ударного взаимодействия скорость становилась равной

нулю, а перемещение оставалось постоянным. Осциллограмма начального участка сигнала ускорения до (штриховая линия) и после (сплошная линия) смещения в фазе удара (до первого пересечения оси времени t) показана на рис. 5. Период положительной фазы, которую считали основной фазой удара и в которой производили смещение на ΔaI , составлял 18–20 мкс.

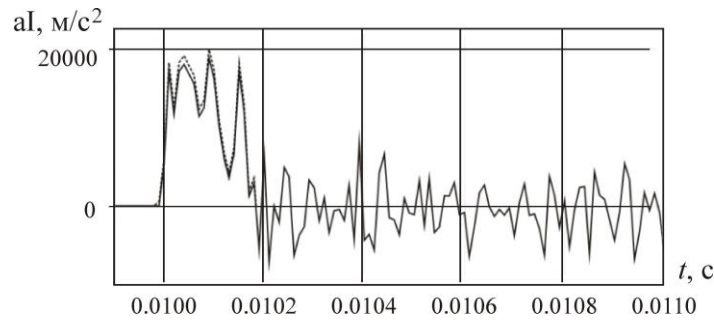


Рис. 5. Осциллограмма ускорения до (штриховая линия) и после (сплошная линия) смещения первой (положительной) фазы сигнала ускорения aI на величину $\Delta aI = 600 \text{ м/с}^2$, соответствующая рис. 4а

На рис. 6 представлены осциллограммы ускорений и графики скоростей и перемещений, соответствующие приведенным на рис. 4 с учетом введенных смещений сигналов в фазе удара ΔaI , которые составляли до 3–4% от максимальной величины aI . Видно, что они позволяют скорректировать графики перемещения и привести по конечному результату (перемещению) к величине, практически совпадающей с перемещением, зарегистрированным датчиком ИПИЭ-50. Однако на рис. 6в можно наблюдать картину, где после повторного возмущения ускорения на участке 25–30 мс, снова происходит смещение исходного сигнала и появление отрицательного наклона графика перемещения.

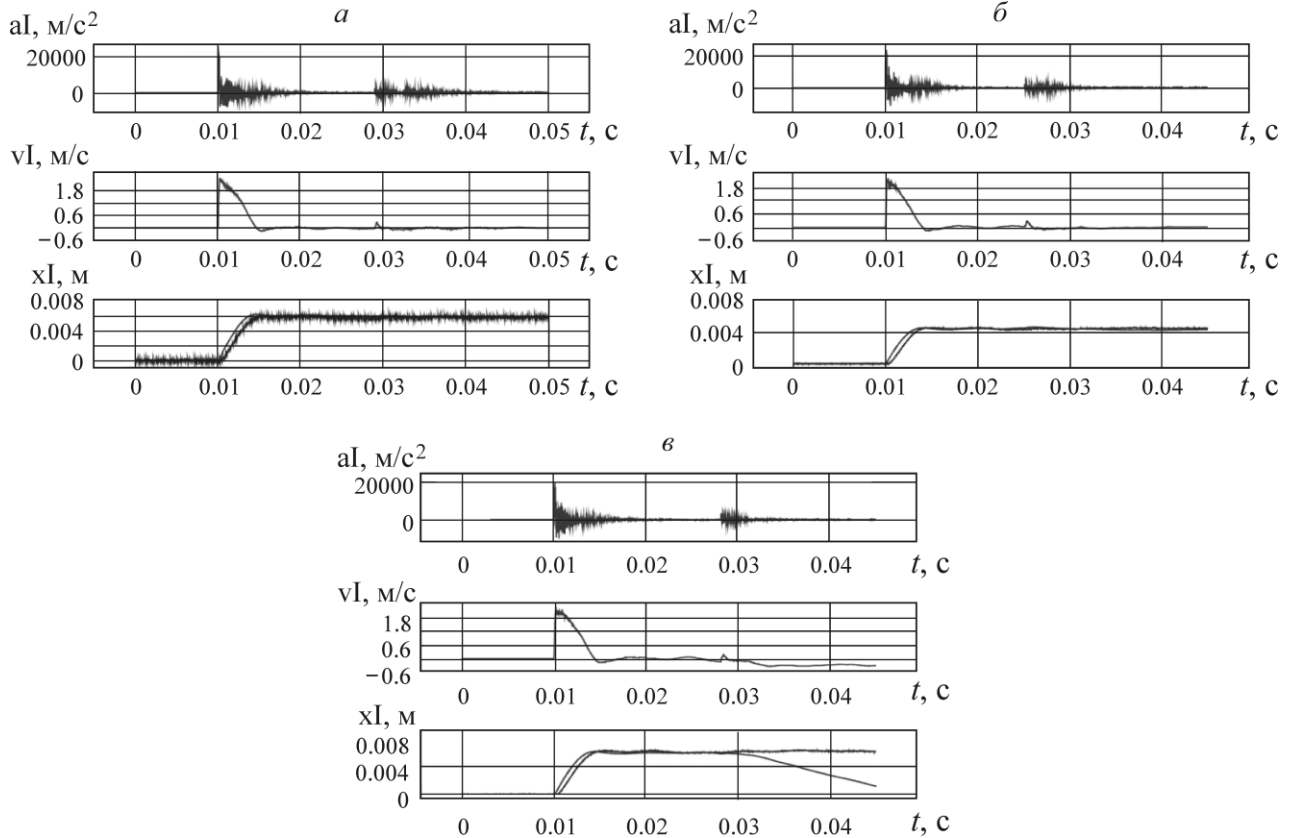


Рис. 6. Осциллограммы ускорения корпуса и полученные интегрированием графики их скоростей и перемещений после смещения сигнала ускорения в фазе удара: *a* — смещение $\Delta aI = 600 \text{ м/с}^2$; *b* — $\Delta aI = -450 \text{ м/с}^2$, *в* — $\Delta aI = -650 \text{ м/с}^2$

Основная часть ударного взаимодействия бойка и корпуса ударной системы, как следует из приведенных графиков, в нашем случае лежит в интервале времени, не превышающем 10–15 мс. Она позволяет детально рассмотреть динамику корпуса под воздействием ударной нагрузки, особенности его продвижения в зависимости от внешних условий. Поэтому введения поправки в исходный сигнал при одном ударном воздействии достаточно для выполнения исследований и получения необходимых закономерностей движения ударного устройства в условиях проводимых экспериментов.

ВЫВОДЫ

Разработана методика, позволяющая проводить исследование динамики корпуса ударного устройства при ударном нагружении с применением акселерометров в условиях, моделирующих его движение в скважине при заклинивании. С применением процедуры двойного интегрирования сигналов ускорения удалось получить графики перемещений, удовлетворительно коррелирующие с осциллограммами перемещений, регистрируемых прямым способом (с датчика перемещений). Для этого перед интегрированием исходного сигнала ускорения осуществлялась его корректировка, выражающаяся в смещении в фазе удара на величину, подбираемую таким образом, чтобы после двойного интегрирования график перемещения после основной фазы движения не имел наклона к горизонтальной оси.

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, vol. 50, no. 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, Ulyanovsk State Technical University, 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.** 2480589 RF. Coal seam degassing method. Y. M. Lekontsev and P. V. Sazhin, *Byull. Izobret.*, 2013, no. 12. [**Пат.** 2480589 РФ. Способ дегазации угольного пласта / Ю. М. Леконцев, П. В. Сажин // Оpubл. в БИ. — 2013. — № 12.]
4. **Pat.** 2703029 RF. Device for point-to-point hydraulic fracturing of solid rocks. L. V. Gorodilov and P. V. Sazhin, *Byull. 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.]
5. **Gurkov K. S. and Klimashko V. V.** *Pnevmoпробойники*. Novosibirsk, Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 1990, 217 pp. (in Russian) [**Гурков К. С., Клиماشко В. В.** Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990. — 217 с.]
6. **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.]
7. **Smolyanitsky B. N., Tishchenko I. V., Chervov V. V., Gileta V. P., and Vanag Yu. V.** Sources for productivity gain in vibro-impact driving of steel elements in soil in special construction technologies, *Journal of Mining Science*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 490–496. [**Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В.,**

- Червов В. В., Гилета В. П., Ваняг Ю. В.** Резервы повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных элементов в технологиях специальных строительных работ // ФТПРПИ. — 2008. — № 5. — С. 72–80.]
- 8. Smolyanitsky V. N., Siryamin Yu. N., Voronstov D. S., and Siryamin P. Yu.** Improving the efficiency of the pneumatic impact machine for immersion of core technological elements into the ground, Mechanization of construction. 2016, vol. 77, no. 2, pp. 47–51. [**Смоляницкий В. Н., Сырямин Ю. Н. Воронцов Д. С., Сырямин П. Ю.** Повышение эффективности работы пневмоударной машины для погружения в грунт стержневых технологических элементов // Механизация строительства. — 2016. — Т. 77. — № 2. — С. 47–51.]
- 9. Gorodilov L. V., Efimov V. P., Sazhin P. V., Kudryavtsev V. G., and Pershin A. I.** Method of studying the movement of the impact device case in the well taking into account the reaction of the rock massif, Fundamental and Applied Mining Science. 2020, vol. 7, no. 1, pp. 272–277. [**Городилов Л. В., Ефимов В. П., Сажин П. В., Кудрявцев В. Г., Першин А. И.** Методика исследования движения корпуса ударного устройства в скважине с учетом реакции породного массива // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 272–277.]
- 10. Ударные акселерометры** [Electronic resource]. URL: <https://osa.llc/udarnyie-akselerometryi>.