

УДК 621.01

https://doi.org/10.33619/2414-2948/126/32

К РАЗРАБОТКЕ ОБОБЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРФОРАТОРА С УДАРНО-ПОВОРОТНЫМ МЕХАНИЗМОМ

©**Абидов А. О.**, ORCID: 0000-0002-7232-8406, SPIN-код: 8627-7349, д-р техн. наук, Ошского технологического университета им. М. М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан, abidov_65@mail.ru

©**Исманов О. М.**, ORCID: 0000-0003-1018-351X, SPIN-код: 7244-9947, канд. техн. наук, Ошского технологического университета им. М. М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан, omurbek22@mail.ru

©**Турдубаева Ж. А.**, ORCID: 0000-0002-2096-876X, SPIN-код: 8938-4165, Ошского технологического университета им. М. М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан, jyldyzt8787@mail.ru

©**Токтобаева Г. Т.**, ORCID: 0009-0005-8511-3198, Ошского технологического университета им. М. М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан, barcyntt@gmail.com

TOWARDS THE DEVELOPMENT OF A GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF AN ELECTROMECHANICAL PERFORATOR WITH AN IMPACT-ROTARY MECHANISM

©**Abidov A.**, ORCID: 0000-0002-7232-8406, SPIN code: 8627-7349, Dr. habil., Osh Technological University named after M. Adyshev, Osh, Kyrgyzstan, abidov_65@mail.ru

©**Ismanov O.**, ORCID: 0000-0003-1018-351X, SPIN-code: 7244-9947, Ph.D., Osh Technological University named after M. Adyshev, Osh, Kyrgyzstan, omurbek22@mail.ru

©**Turdubaeva J.**, ORCID: 0000-0002-2096-876X, SPIN: 8938-4165, Ph.D., Osh Technological University named after M. Adyshev, Osh, Kyrgyzstan, jyldyzt8787@mail.ru

©**Toktobaeva G.**, ORCID: 0009-0005-8511-3198, Osh Technological University named after M. Adyshev, Osh, Kyrgyzstan, barcyntt@gmail.com

Аннотация. Рассматривается разработка обобщённой математической модели электромеханического перфоратора с ударно-поворотным механизмом. Объектом исследования является электромеханический перфоратор ударно-поворотного действия. Цель работы - разработка обобщенной математической модели электромеханического перфоратора ударно-поворотного действия. На основе структурной схемы и математических моделей отдельных элементов и механизмов с использованием методики упрощения расчетной схемы разработана обобщенная математическая модель электромеханического перфоратора ударно-поворотного действия. Также представлена структурная схема перфоратора с ударно-поворотным механизмом состоящего из универсального коллекторного двигателя, редуктора, поворотного механизма, ударного механизма и инструмента. Результаты моделирования могут быть использованы для оптимизации конструкции, прогнозирования поведения системы и разработки систем управления.

Abstract. This paper discusses the development of a generalized mathematical model of an electromechanical perforator with a rotary-impact mechanism. The object of the study is an electromechanical perforator with a rotary-impact action. The purpose of the work is to develop a generalized mathematical model of an electromechanical perforator with a rotary-impact action. Based on the structural diagram and mathematical models of individual elements and mechanisms using the method of simplifying the calculation scheme, a generalized mathematical model of an electromechanical rotary hammer drill has been developed. Also presented is a structural diagram of

a hammer drill with a rotary impact mechanism consisting of a universal collector motor, a gearbox, a rotary mechanism, an impact mechanism and a tool. The results of the modeling can be used to optimize the design, predict the behavior of the system and develop control systems.

Ключевые слова: электромеханический перфоратор, математическая модель, универсальный коллекторный двигатель, ударный механизм, поворотный механизм, редуктор, кривошип, модель, коромысло.

Keywords: electromechanical hammer drill, mathematical model, universal commutator motor, impact mechanism, rotary mechanism, gearbox, crank, model, rocker arm.

Исследования динамики машин, как правило, проводятся на основе математического моделирования и экспериментальных исследований. Задачей исследования динамики машин является оценка динамической нагруженности отдельных элементов (звеньев) и механизмов, входящих в состав машины, что является следствием неравномерности их вращения и наличия крутильных колебаний. Вопросы неравномерности вращения и наличия крутильных колебаний особенно актуальны для ударных машин, где присутствуют кратковременные экстремальные нагрузки, связанные с процессом удара.

Механизмы и звенья рассматриваемого в данной работе перфоратора с ударно-поворотным механизмом также подвержены динамическим нагрузкам, что делает необходимым проведение исследований его динамики. Для осуществления исследования динамики на основе математического моделирования необходима разработка обобщенной математической модели перфоратора с ударно-поворотным механизмом. В процессе работы перфоратора под действием нагрузок возникает упругая деформация основных элементов. При передаче нагрузок валы и опоры элементов электромеханического перфоратора подвергаются деформациям, которые, в свою очередь, приводят к дополнительным перемещениям зацепляющихся колес и других кинематических пар, что влияет на работу этих звеньев. Определение и изучение изменения режима движения этих звеньев важно, так как оно влияет на кинематические параметры элементов, что, в конечном счете, отражается на технических характеристиках перфоратора в целом. Одним из методов оценки влияния нагрузок на кинематические параметры является анализ движения механизмов на основе решения математической модели. Для составления математической модели электромеханического перфоратора с ударно-поворотным механизмом сначала рассмотрим его структурную схему. В конструкции перфоратора для эффективного разрушения обрабатываемой среды и бурения шпура используется ударное воздействие.

На Рисунке 1 представлена структурная схема перфоратора с ударно-поворотным механизмом. Он состоит из универсального коллекторного двигателя (УКД) 1, редуктора 2, предназначенного для передачи движения от вала двигателя к поворотному 3 и ударному 4 механизмам ударно-поворотной системы 5, которая обеспечивает одновременно ударное воздействие на обрабатываемую среду посредством инструмента 6 и поворот его на определенный угол, соответствующий параметрам поворотного механизма, тем самым обеспечивая бурение обрабатываемой среды.

Составление обобщенной математической модели перфоратора с ударно-поворотным механизмом требует разработки математических моделей его составных частей: универсального коллекторного двигателя, ударного и поворотного механизмов. Затем разработанные математические модели составных частей соединяются согласно структурной

схеме перфоратора, упрощаются по известной методике и формируется обобщенная математическая модель перфоратора [6-8].

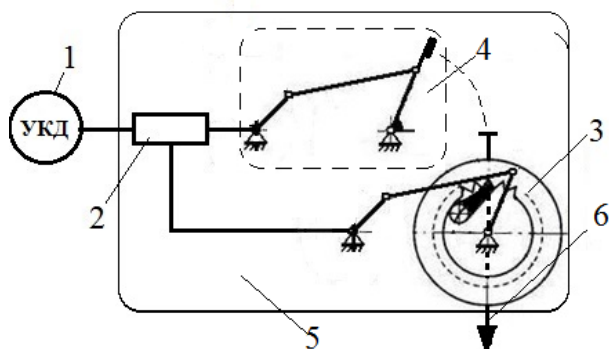


Рисунок 1. Структурная схема перфоратора ударно-поворотного действия: 1 - универсальный коллекторный двигатель; 2 - редуктор; 3 - поворотный механизм; 4 - ударный механизм; 5 - ударно-поворотная система; 6 - инструмент

Однофазные коллекторные электродвигатели, являющиеся приводом рассматриваемого перфоратора, характеризуются высокой удельной мощностью на единицу массы в связи с высокой частотой вращения. Преимуществом этих электродвигателей является возможность выдерживать динамические нагрузки, поэтому на практике их используют в качестве привода в ручных перфораторах ударного действия. На Рисунке 2 представлена модель универсального коллекторного двигателя.

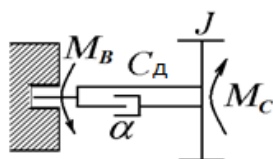


Рисунок 2. Модель универсального коллекторного двигателя: M_B — момент движущих сил; M_C — момент сопротивления механизма; J — момент инерции якоря электродвигателя; C_D — жесткость вала электродвигателя; α — коэффициент демпфирования

Математическая модель универсального коллекторного электродвигателя с последовательным возбуждением с учетом механических, статических и динамических характеристик, электромагнитных процессов, протекающих в машине, первоначально представляется в виде двух уравнений, описывающих движение якоря в зонах насыщенного и ненасыщенного магнитных полей [1, 6, 8]:

$$\left. \begin{aligned} J\ddot{\phi} &= C_m \cdot k \cdot i^2 - M_C \\ U &= C_e \cdot k \cdot i \cdot \dot{\phi} + i \cdot R + L \cdot \left(\frac{di}{dt}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где: $\dot{\phi}, \ddot{\phi}$ — соответственно угловая скорость и ускорение якоря электродвигателя; k — постоянный коэффициент; J — момент инерции якоря электродвигателя; i — ток в цепи якоря; M_C — момент сопротивления механизма; U — напряжение в цепи якоря; R — сопротивления в цепи якоря; L — индуктивность обмотки возбуждения; C_m, C_e — конструктивные коэффициенты электродвигателя.

На основе совместного решения вышеуказанных уравнений составляется математическая модель универсального коллекторного двигателя, которая записывается следующим уравнением [2, 3, 6-8]:

$$J \ddot{\phi} = \left[k_1 \cdot i^{1-a_1} \cdot U \cdot (J\ddot{\phi} + M_C)^{a_1} - k_2 \cdot i^{2-a_1} \cdot \dot{\phi} \cdot (J\ddot{\phi} + M_C)^{a_2} - k_3 \cdot i^{1-a_3} \cdot R \cdot (J\ddot{\phi} + M_C)^{a_3} - \frac{dM_C}{dt} \right], \quad (2)$$

где: $\dot{\phi}$, $\ddot{\phi}$, $\ddot{\phi}$ — соответственно угловая скорость, ускорение и рывок якоря электродвигателя; k_1, k_2, k_3 — постоянные коэффициенты; J — момент инерции якоря электродвигателя; I — ток в цепи якоря; M_C — момент сопротивления механизма; U — напряжение в цепи якоря; R — сопротивления в цепи якоря; a_1, a_2, a_3 — число пар параллельных ветвей. Данная математическая модель УКД была использована при исследовании динамических характеристик электромеханического перфоратора с ударно-вращательным режимом работы и показала результаты, близкие к действительности. В связи с этим в обобщенной математической модели перфоратора с ударно-поворотным механизмом используется представленная модель [1, 6, 7].

Следующей составной частью перфоратора с ударно-поворотным механизмом является ударный механизм переменной структуры. Его математическая модель представляется как приведенный к кривошипу момент сопротивления, создаваемый коромыслом ударного механизма (рисунок 3) [2, 3, 6-8].

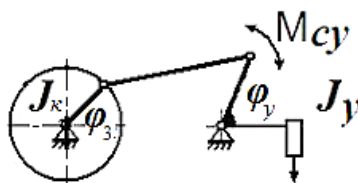


Рисунок 3. Модель ударного механизма: J_k - момент инерции кривошипа ударного механизма; ϕ_3 - угол перемещения кривошипа; M_{cy} - момент сопротивления ударного механизма; ϕ_y - угол перемещения ударного механизма; J_y - момент инерции ударного механизма

Момент, создаваемый коромыслом, рассматривается как [6-8]:

$$M_{cy} = J_y \cdot \ddot{\phi}_y, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (3)$$

где: $J_y, \ddot{\phi}_y$ — соответственно, момент инерции и угловое ускорение коромысла ударного механизма. Угловое ускорение коромысла ударного механизма можно выразить как [2-4]:

$$\ddot{\phi}_y = \ddot{\phi}_3 \cdot u_{43} + \dot{\phi}_3^2 \cdot \dot{u}_{43}, \text{ с}^{-2}, \quad (4)$$

где: $\dot{\phi}_3, \ddot{\phi}_3$ — соответственно, угловая скорость и угловое ускорение кривошипа; u_{43}, \dot{u}_{43} — соответственно аналог угловой скорости и углового ускорения коромысла ударного механизма. Тогда, приведенный к кривошипу момент сопротивления, создаваемый со стороны коромысла ударного механизма равен [2, 3]:

$$M_{cy} = \overleftrightarrow{\overleftrightarrow{J_y \cdot u_{43} (\ddot{\phi}_3 \cdot u_{43} + \dot{\phi}_3^2 \cdot \dot{u}_{43})}}, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (5)$$

Допустим, что кривошип ударного механизма будет вращаться равномерно. При равномерном вращении кривошипа, т.е. при $\ddot{\phi}_3 = 0$ момент сопротивления имеет вид [2, 3, 5-8]:

$$M_{cy} = J_y \cdot u_{43} \cdot \dot{\phi}_3^2 \cdot \dot{u}_{43}, \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (6)$$

Уравнение (6) и есть математическая модель ударного механизма. В данном уравнении момент инерции коромысла ударного механизма — величина постоянная. Если допустить, что угловая скорость кривошипа также является величиной постоянной, тогда момент сопротивления ударного механизма станет функцией, зависящей от u_{43} , \dot{u}_{43} , т.е. $M_c = f(u_{43}, \dot{u}_{43})$ [2-8].

Математическая модель поворотного механизма представляется как приведенный к кривошипу момент сопротивления, создаваемый со стороны коромысла поворотного механизма (Рисунок 4) [2-8].

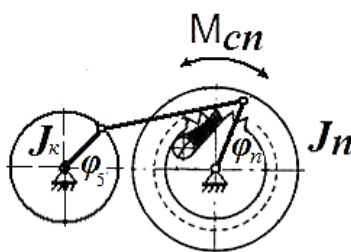


Рисунок 4. Модель поворотного механизма: J_k - момент инерции кривошипа поворотного механизма; ϕ_3 - угол перемещения кривошипа; M_{cp} - момент сопротивления поворотного механизма; ϕ_n - угол перемещения поворотного механизма; J_n - момент инерции поворотного механизма

Момент, создаваемый коромыслом поворотного механизма рассматривается как [6-8]:

$$M_{cp} = \vec{\epsilon} \vec{\epsilon} J_n \cdot \ddot{\phi}_n + \frac{M_{TP}}{u}, \text{ Н}\cdot\text{м,} \quad (7)$$

где: J_n , $\ddot{\phi}_n$ — соответственно, момент инерции и угловое ускорение коромысла поворотного механизма; M_{TP} — момент трения инструмента об обрабатываемую среду; u — передаточное отношение поворотного механизма. Угловое ускорение коромысла поворотного механизма можно выразить как [2-4]:

$$\ddot{\phi}_n = \ddot{\phi}_5 \cdot u_{65} + \dot{\phi}_5^2 \cdot \dot{u}_{65}, \text{ с-2,} \quad (8)$$

где: $\dot{\phi}_5$, $\ddot{\phi}_5$ — соответственно, угловая скорость и угловое ускорение кривошипа; u_{65} , \dot{u}_{65} — соответственно, аналог угловой скорости и углового ускорения коромысла поворотного механизма. Тогда, приведенный к кривошипу момент сопротивления, создаваемый со стороны коромысла поворотного механизма равен:

$$M_{cp} = \vec{\epsilon} \vec{\epsilon} J_n (\ddot{\phi}_5 \cdot u_{65} + \dot{\phi}_5^2 \cdot \dot{u}_{65}) + \frac{M_{TP}}{u}, \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (9)$$

При допущении, что кривошип вращается равномерно, т.е. при $\ddot{\phi}_3 = 0$ момент сопротивления имеет вид:

$$M_{cp} = \vec{\epsilon} \vec{\epsilon} J_n \cdot \dot{\phi}_5^2 \cdot \dot{u}_{65} + \frac{M_{TP}}{u}, \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (10)$$

Полученное уравнение (10) характеризует математическую модель поворотного механизма, где момент инерции коромысла и угловая скорость кривошипа – величины постоянные. Вышеперечисленные элементы и механизмы соединены между собой передаточными механизмами, массо-инерционные параметры которых также учитываются в обобщенной математической модели электромеханического перфоратора. Учет всех промежуточных элементов в обобщенной модели делает создаваемую модель громоздкой, что затрудняет вычисление.

В связи с этим, используя методику парциальных систем, упрощаем расчетную схему и получаем окончательную обобщенную математическую модель электромеханического перфоратора с ударно-поворотным механизмом [7, 8].

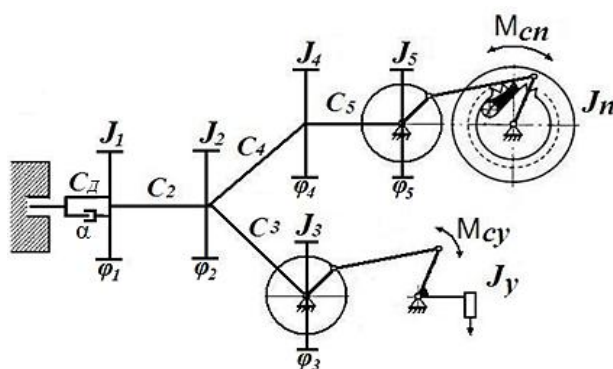


Рисунок 5. Обобщенная модель электромеханического перфоратора с ударно-поворотным механизмом

$J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_y, J_n$ — моменты инерций, соответственно, вала якоря двигателя, вал-шестерни, кривошипа ударного механизма, зубчатого колеса, кривошипа поворотного механизма, ударного механизма и поворотного механизма; M_{cy}, M_{cp} — моменты сопротивления, соответственно, ударного и поворотного механизмов; $C_д, C_3, C_5$ — жесткости, соответственно, вала двигателя, зубчатых зацеплений и шлицевого соединения колеса с промежуточным валом; C_2, C_4 — суммарные жесткость, соответственно, зубчатых зацеплений и шлицевого соединения колеса с промежуточным валом, зубчатых зацеплений; α — коэффициент демпфирования. Считая характерными элементами вал двигателя, элементы редуктора и инструмент, приходим к модели перфоратора в виде пятимассовой системы с эквивалентными упругими связями между массами. Уравнения движения элементов перфоратора по данной расчетной схеме (Рисунок 5) записываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\phi}_1 = k_1 \cdot U \cdot (J_1 \cdot \dot{\phi}_1 + M_C)^{\alpha_1} - k_2 \cdot \dot{\phi}_1 \cdot (J_1 \cdot \dot{\phi}_1 + M_C)^{\alpha_2} - k_3 \cdot R \cdot (J_1 \cdot \dot{\phi}_1 + M_C)^{\alpha_3} - M_C; \\ J_2 \ddot{\phi}_2 = C_2(\phi_1 - \phi_2) - C_3(\phi_2 - \phi_3) - C_4(\phi_2 - \phi_4); \\ J_3 \ddot{\phi}_3 = C_3(\phi_2 - \phi_3) - M_{cy}; \\ J_4 \ddot{\phi}_4 = C_4(\phi_2 - \phi_4) - C_5(\phi_4 - \phi_5); \\ J_5 \ddot{\phi}_5 = C_5(\phi_4 - \phi_5) - M_{cp}, \end{cases} \quad (11)$$

где $\phi_1 - \phi_5$ — угловое перемещение элементов перфоратора; $\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_5$ — угловая скорость элементов перфоратора; $\ddot{\phi}_1 - \ddot{\phi}_5$ — угловое ускорение отдельных масс перфоратора; M_{cy} — момент сопротивления, действующий со стороны ударного механизма; M_{cp} — момент сопротивления, действующий со стороны поворотного механизма. Данная система

дифференциальных уравнений решается численным методом Рунге-Кутты с использованием прикладной программы.

Заключение

Отмечены актуальность и цели исследования динамики электромеханического перфоратора с ударно-поворотным механизмом. Для разработки обобщенной математической модели перфоратора использованы модели его элементов и исполнительных механизмов. Работа ударных и поворотных механизмов учтена через моменты сопротивления, создаваемые данными узлами. Расчетная схема электромеханического перфоратора упрощена с использованием метода парциальных систем; составлена окончательная обобщенная математическая модель перфоратора с ударно-поворотным механизмом, которая решается численным методом Рунге-Кутты.

Список литературы:

1. Абдраимов С., Абидов А. О., Фокин Ю. А., Кукчаев М. М. Математическая модель универсального коллекторного двигателя // Вестник Иссык-Кульского университета. 2000. №4. С. 79-82.
2. Абидов А. О., Исманов О. М. Математическая модель электромеханического перфоратора с ударно-поворотным механизмом // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №5. С. 233-240. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/42/31>
3. Абидов А. О., Исманов О. М. Разработка электромеханического перфоратора с ударно-поворотным механизмом на основе анализа существующих конструкций // Приволжский научный вестник. 2016. №3(55). С. 27-31.
4. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1988. 396 с.
5. Абидов А. О., Исманов О. М. Электромеханический перфоратор с ударно-поворотным механизмом // Технические науки – от теории к практике. 2016. №5-1 (53). С. 128-134.
6. Кукчаев М. М. Динамика электромеханического перфоратора с механизмом переменной структуры: дис. ... канд. техн. наук. Бишкек, 2000. 118 с.
7. Манжосов В. К., Абдраимов С., Невенчанная Т. О. Крутильные колебания в трансмиссиях буровых машин. Фрунзе: Илим, 1982. 166 с.
8. Ismanov O., Turdubaeva Z., Abidov A., Bolushev E., Azimova A. Development of a mathematical model and analysis of the dynamics of an electromechanical perforator with an impact-rotary mechanism // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2024. V. 525. P. 06012.

References:

1. Abdraimov, S., Abidov, A. O., Fokin, Yu. A., & Kukchaev, M. M. (2000). Matematicheskaya model' universal'nogo kollektornogo dvigatelya. *Vestnik Issyk-Kul'skogo universiteta*, (4), 79-82. (in Russian).
2. Abidov, A., & Ismanov, O. (2019). Mathematical Model of Electromechanical Punch With Shock-Turning Mechanism. *Bulletin of Science and Practice*, 5(5), 233-240. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/42/31>
3. Abidov, A. O., & Ismanov, O. M. (2016). Razrabotka elektromekhanicheskogo perforatora s udarno-povorotnym mekhanizmom na osnove analiza sushchestvuyushchikh konstruksij. *Privolzhskij nauchnyj vestnik*, (3 (55)), 27-31. (in Russian).
4. Artobolevskij, I. I. (1988). Teoriya mekhanizmov i mashin. (in Russian).
5. Abidov, A. O., & Ismanov, O. M. (2016). Elektromekhanicheskij perforator s udarno-povorotnym mekhanizmom. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*, (5-1 (53)), 128-134. (in Russian).

6. Kukchaev, M. M. (2000). *Dinamika elektromekhanicheskogo perforatora s mekhanizmom peremennoj struktury: dis. ... kand. tekhn. nauk.* Bishkek.

7. Manzhosov V. K., Abdraimov S., Nevenchannaya T. O. (1982). *Krutil'nye kolebaniya v transmissiyakh burovykh mashin.* Frunze. (in Russian).

8. Ismanov, O., Turdubaeva, Z., Abidov, A., Bolushev, E., & Azimova, A. (2024). Development of a mathematical model and analysis of the dynamics of an electromechanical perforator with an impact-rotary mechanism. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 525, p. 06012). EDP Sciences.

Поступила в редакцию
17.03.2026 г.

Принята к публикации
24.03.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Абидов А. О., Исманов О. М., Турдубаева Ж. А., Токтобаева Г. Т. К разработке обобщенной математической модели электромеханического перфоратора с ударно-поворотным механизмом // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №5. С. 269-276. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/126/32>

Cite as (APA):

Abidov, A., Ismanov, O., Turdubaeva, J., & Toktobaeva, G. (2026). Towards the Development of a Generalized Mathematical Model of an Electromechanical Perforator with an Impact-Rotary Mechanism. *Bulletin of Science and Practice*, 12(5), 269-276. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/126/32>