

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УДАРНОГО УЗЛА СКВАЖИННОГО ВИБРОИСТОЧНИКА

Алексей Олегович Кордубайло

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (953)762-70-59, e-mail:Kordubaylo_ao@mail.ru

Борис Феранонтович Симонов

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (913)891-34-00, e-mail: Simonov_BF@mail.ru

Создание скважинных источников упругих колебаний для реализации методов виброволнового увеличения нефтеотдачи является актуальной задачей горного машиноведения. В работе обоснована целесообразность использования электромагнитного линейного привода скважинного виброисточника для генерирования осевых ударных импульсов. Предложена математическая модель, описывающая динамику движения бойка электромагнитного ударного узла под действием тяговых сил катушек, сил трения и аэродинамического сопротивления с учётом упругих связей в конце нижнего и верхнего рабочего хода бойка. Представлены теоретические зависимости перемещения и скорости бойка от времени, полученные с помощью разработанной модели, и показана их высокая сходимость с экспериментальными данными. Математическая модель электромагнитного ударного узла может быть использована для оптимизации его конструктивных параметров, а также для проектирования новых типоразмеров виброисточников, отвечающих требованиям нефтегазовой промышленности.

Ключевые слова: волновой метод увеличения нефтеотдачи, скважинный виброисточник, электромагнитный ударный узел, математическая модель, динамика бойка, скорость, перемещение, электромагнитная сила тяги

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC IMPACT UNIT OF DOWNHOLE VIBRATION SOURCE

Alexey O. Kordubailo

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Junior Researcher, office: +7 (953)762-70-59, e-mail: Kordubaylo_ao@mail.ru

Boris F. Simonov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, office: +7 (913)891-34-00, e-mail: Simonov_BF@mail.ru

Creation of downhole sources of elastic vibrations for the implementation of vibrowave enhanced oil recovery methods is an urgent task of mining engineering. The paper substantiates the expediency of using an electromagnetic linear drive of a downhole vibration source to generate axial shock pulses. A mathematical model is proposed that describes the dynamics of movement of the

striker of electromagnetic impact unit under the action of traction forces of coils, friction forces and aerodynamic resistance, taking into account the elastic constraints at the end of the lower and upper working strokes of the striker. Theoretical dependences of striker displacement and speed on time, obtained using the developed model, are presented, and their high convergence with the experimental data is shown. The mathematical model of electromagnetic impact unit can be used to optimize its parameters, as well as to design new standard sizes of vibration sources that meet the requirements of the oil and gas industry.

Keywords: wave method for enhancing oil recovery, downhole vibration source, electromagnetic impact unit, mathematical model, striker dynamics, speed, displacement, electromagnetic traction force

Введение

Для многих крупных месторождений нефти и газа России и зарубежья одной из важнейших проблем является низкий коэффициент извлечения нефти из продуктивных пластов. Его значения редко превышают 0,3 – 0,4 [1,2]. Для увеличения степени извлечения углеводородов из недр Земли применяются различные методы увеличения нефтеотдачи (МУН). Наиболее широкое промышленное распространение получили физические, химические, тепловые, гидродинамические и биологические МУН [3-7]. Среди них особенно перспективным является метод виброволнового воздействия на продуктивные залежи, вследствие сравнительно малых экономических затрат на его осуществление и возможности совместного применения с другими МУН [8-10].

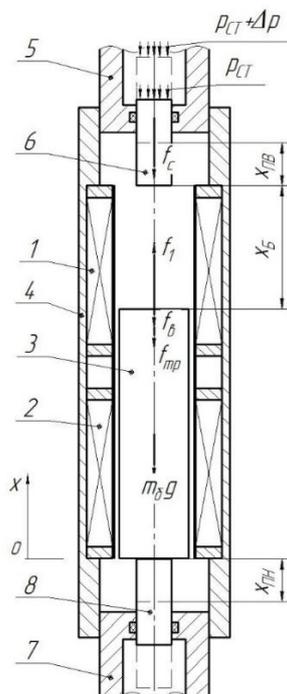
При осуществлении виброволнового МУН целесообразно источник колебаний располагать в скважине. Это позволяет максимально приблизить его к объекту вибровоздействия – нефтяному пласту. В настоящее время известно множество технических решений и конструктивных схем различных устройств, позволяющих производить внутрискважинное волновое воздействие на нефтяные пласты. Их многообразие обусловлено отсутствием достаточно точных и универсальных математических моделей, позволяющих рассчитать и произвести обоснованный выбор рациональных параметров и режимов вибровоздействия из условия обеспечения максимальной нефтеотдачи пластов [11-12]. В связи с этим при создании скважинных вибрационных и импульсных источников необходимо руководствоваться оптимизацией рабочих процессов в самих устройствах, повышением их энергоэффективности и удельных энергетических параметров. При этом, в следствие больших глубин залегания нефтяных пластов (1,5 – 2 км и более), крайне важное значение имеет выбор типа энергоносителя по критерию минимальных потерь энергии при её передаче от генератора на дневной поверхности к виброисточнику в скважине [8, 10]. Среди технически реализуемых способов передачи энергии в скважину: механический, гидравлический, пневматический, электрический – при равных условиях наименьшими линейными потерями обладает электропривод. Это обуславливает целесообразность создания скважинного виброисточника на базе линейного электромагнитного привода ударного действия [13].

В Институте горного дела СО РАН разработан скважинный электромагнитный импульсный виброисточник, который содержит электромагнитный ударный узел для генерирования осевых импульсов и гидромеханические силовые элементы для преобразования и передачи импульсов на обсадную трубу скважины [14]. Экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров на энергетические характеристики виброисточника показали, что целесообразно изготавливать виброисточник по конструктивной схеме, включающей электромагнитный ударный узел, снизу и сверху которого расположены силовые элементы [15]. В таком виброисточнике нижнее и верхнее движение бойка кончается ударом по плунжерам силовых элементов. При этом происходит излучение сейсмического сигнала в горную породу. Для создания скважинных электромагнитных импульсных виброисточников с различными энергетическими характеристиками и геометрическими параметрами необходимо определить влияние всех конструктивных факторов на динамику движения бойка электромагнитного ударного узла.

Цель настоящей работы – разработать адекватную математическую модель движения бойка электромагнитного ударного узла скважинного виброисточника под действием сил тяги катушек и сил сопротивления движению.

Методы и материалы

Для разработки математической модели предложена расчётная схема электромагнитного ударного узла, представленная на рис. 1.



1 – верхняя катушка; 2 – нижняя катушка; 3 – боёк; 4 – корпус; 5,7 – верхний и нижний СЭ; 6,8 – плунжер

Рис. 1. Расчётная схема электромагнитного ударного узла

Схема имеет ряд допущений, а именно:

- верхний и нижний силовые элементы аналогичны по параметрам и конструкции;
- виброисточник расположен в скважине вертикально;
- потери энергии на деформацию обсадной трубы, жидкости и упругой камеры в силовом элементе не учитываются;
- взаимодействие бойка с плунжером абсолютно неупругое.

На рис. 1 боёк ударного узла находится в начальном положении в точке касания с плунжером нижнего силового элемента. После запуска виброисточника боёк осуществляет следующие движения:

- движение вверх под действием электромагнитной силы верхней катушки до контакта с плунжером верхнего силового элемента;
- движение бойка совместно с плунжером вверх на величину $x_{пв}$ и остановка в верхней мёртвой точке;
- движение бойка совместно с плунжером вниз на величину $x_{пв}$;
- движение бойка под действием электромагнитной силы нижней катушки до контакта с плунжером нижнего силового элемента;
- движение бойка совместно с плунжером вниз на величину $x_{пн}$ и остановка в нижней мёртвой точке;
- движение бойка совместно с плунжером вверх на величину $x_{пн}$.

После перечисленных стадий движения бойка рабочий цикл электромагнитного ударного узла повторяется. Каждая стадия движения бойка описывается дифференциальным уравнением (1-6), система которых образует математическую модель ударного узла.

$$\frac{m_{\delta} d^2 x}{dt} = f_1(i_1, x) - m_B g - f_{тр}(k_r, f_1, k_T) - f_B \left(\frac{dx}{dt} \right), \text{ при } 0 < x < x_{\delta}, \quad (1)$$

$$\frac{(m_{\delta} + m_{п}) d^2 x}{dt^2} = -f_p(p, x) - f_c(f_{зат}, k_T), \text{ при } x_{\delta} \leq x \leq x_{\delta} + x_{пв}, \quad (2)$$

$$\frac{(m_{\delta} + m_{п}) d^2 x}{dt^2} = -f_p(p, x) + f_c(f_{зат}, k_T), \text{ при } x_{\delta} + x_{пв} > x \geq x_{\delta}, \quad (3)$$

$$\frac{m_{\delta} d^2 x}{dt} = -f_2(i_2, x) - m_B g + f_{тр}(k_r, f_2, k_T) + f_B \left(\frac{dx}{dt} \right), \text{ при } x_{\delta} > x > 0, \quad (4)$$

$$\frac{(m_{\delta} + m_{п}) d^2 x}{dt^2} = f_p(p, x) + f_c(f_{зат}, k_T), \text{ при } 0 \geq x \geq -x_{пн}, \quad (5)$$

$$\frac{(m_{\delta} + m_{п}) d^2 x}{dt^2} = f_p(p, x) - f_c(f_{зат}, k_T), \text{ при } -x_{пн} < x \leq 0, \quad (6)$$

где x_{δ} - величина хода бойка под действием тяговых сил электромагнитов; $x_{пв}$, $x_{пн}$ - ход плунжеров верхнего и нижнего силовых элементов под действием энергии

удара; m_b , $m_{п}$ – массы бойка и плунжера; $f_1(i_1, x)$, $f_2(i_2, x)$ – тяговые усилия верхней и нижней электромагнитных катушек; i_1 , i_2 – рабочие токи в катушках; g – ускорение свободного падения; $f_{тр}(k_r, f_l, k_T)$ – сопротивление трения бойка в направляющей; k_r – коэффициент радиального прижатия бойка к направляющей; k_T – коэффициент трения в (1), (4) – бойка в направляющей, в (2), (3), (5), (6) – плунжера в уплотнении; $f_b(dx/dt)$ – сила аэродинамического сопротивления перемещения бойка; $f_p(p, x)$ – сила, создаваемая давлением жидкости в силовом элементе на нижний торец плунжера; f_c – сила трения плунжера; $f_{заг}$ – сила поджатия уплотнения плунжера.

Теоретические и экспериментальные результаты исследования тяговых характеристик катушек электромагнитного ударного узла изложены в работе [16]. Из них следует, что величина силы тяги прямо пропорциональна действующему в обмотке току и для электромагнитов с отношением длины катушки к радиусу бойка в пределах 12 – 25 постоянна на большей части рабочего хода бойка. Это позволяет в расчётной модели принять $f_1(i_1, x)$, $f_2(i_2, x)$ постоянными величинами.

При вертикальном положении электромагнитного ударного узла сила трения бойка в направляющей вызвана наличием электромагнитного радиального притяжения бойка к направляющей. Это происходит вследствие неравномерности намотки провода, различной толщиной и дефектами изготовления направляющей и др. факторов. Вопрос радиального притяжения бойка достаточно подробно исследован в работе [17], в которой сказано, что сила радиального притяжения пропорциональна электромагнитной силе тяги. Коэффициент пропорциональности для длинноходовых систем находится в пределах 0,2 – 0,4. Это позволяет определить силу трения бойка при движении в направляющей.

Вопрос аэродинамического сопротивления исследован в работе [18], из результатов которой следует, что выполнение по оси бойка отверстия диаметром, равным 0,27 – 0,31 от наружного диаметра бойка, при скорости движения в пределах 4 – 6 м/с ведёт к образованию установившегося потока воздуха через отверстие. При этом перепад давления между полостями над бойком и под ним составляет не более 0,022 – 0,03 МПа, а сила сопротивления воздуха не превышает 40 – 60 Н.

Решением уравнения (1) определяется скорость бойка в момент контакта с плунжером верхнего силового элемента. Из условия о неупругом соударении бойка с плунжером следует, что начальную скорость совместного движения бойка с плунжером для уравнения (2) можно определить по закону сохранения импульса. Сила сопротивления внедрения плунжера в гидравлическую полость определяется площадью нижнего торца плунжера и гидравлическим давлением. Вопрос определения величины давления в силовом элементе, в зависимости от конструктивных параметров и энергии удара, решён в работе [19]. Это позволяет определить силу, создаваемую давлением в силовом элементе, для решения уравнений (2, 3, 5, 6).

Сила трения в уплотнении плунжера при использовании уплотнительных фторопластовых колец трапецеидального сечения определяется усилием сжатия

уплотнения, углом между наклонными поверхностями и коэффициентом трения фторопласта о плунжер.

Аналогичным способом определяется динамика движения бойка при движении вниз и его взаимодействие с нижним плунжером.

Разработанная математическая модель основана на последовательном решении уравнений (1 – 6) и позволяет установить теоретические зависимости перемещения и скорости движения бойка электромагнитного ударного узла от времени. Из результатов экспериментальных исследований [15] известны значения скоростей ударов бойка по плунжерам силовых элементов. В настоящей работы представлены результаты сравнения теоретических и экспериментальных значений скорости удара.

Результаты

С использованием вышеописанной математической модели рассчитаны зависимости перемещения и скорости бойка от времени. Пример графиков перемещения и скорости при значениях тяговых усилий верхней и нижней катушек соответственно 330 и 40 Н показан на рис. 2.

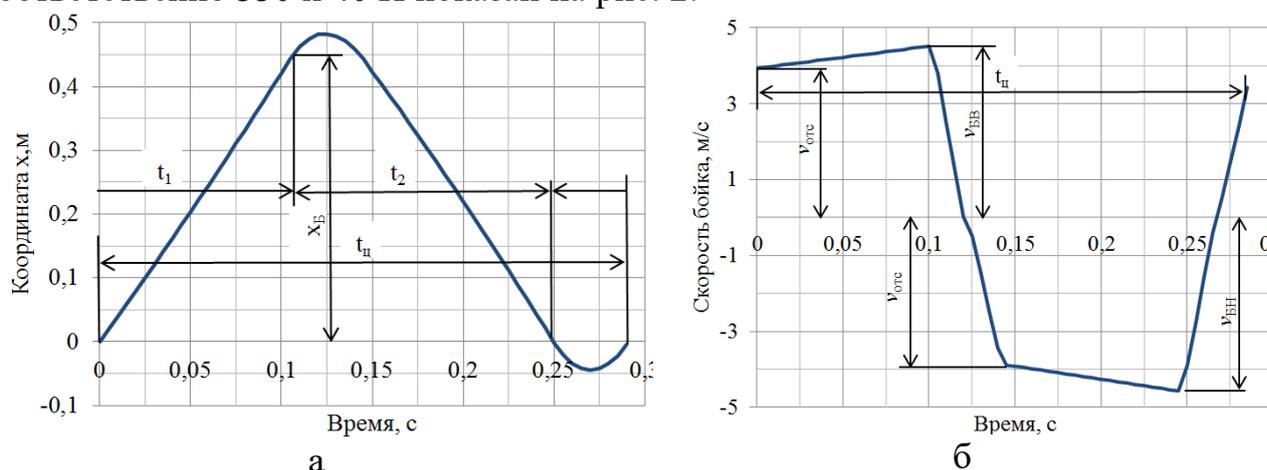


Рис. 2. Теоретические зависимости перемещения (а) и скорости (б) бойка от времени

На графиках введены следующие условные обозначения: t_1 – время включения верхней катушки; t_2 – время включения нижней катушки; $t_{ц}$ – длительность рабочего цикла; $x_б$ – величина хода бойка между точками касания с плунжерами; $v_{отс}$ – скорость бойка после отрыва от плунжера силового элемента; $v_{БВ}$, $v_{БН}$ – скорости движения бойка в моменты касания соответственно верхнего и нижнего плунжеров.

Результаты сравнения расчётных и экспериментальных значений времени работы катушек и времени цикла приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение экспериментального и расчётного времени рабочего цикла

Эксперимент при U=100 В			Расчёт при F ₁ = 300 Н, F ₂ = 10 Н			Абсолютное откло- нение			Относительное от- клонение, %		
t ₁ , мс	t ₂ , мс	t _ц , мс	t ₁ , мс	t ₂ , мс	t _ц , мс	Δt ₁ , мс	Δt ₂ , мс	Δt _ц , мс	ε(t ₁), %	ε(t ₂), %	ε(t _ц), %
161	134	295	147	143	289	-14	9,7	-5,6	9,75	6,09	1,94
Эксперимент при U=120 В			Расчёт при F ₁ = 315 Н, F ₂ = 25 Н			Абсолютное откло- нение			Относительное от- клонение, %		
t ₁ , мс	t ₂ , мс	t _ц , мс	t ₁ , мс	t ₂ , мс	t _ц , мс	Δt ₁ , мс	Δt ₂ , мс	Δt _ц , мс	ε(t ₁), %	ε(t ₂), %	ε(t _ц), %
147	129	276	141	137	278	6	8	2	4,25	5,84	0,72
Эксперимент при U=140 В			Расчёт при F ₁ = 330 Н, F ₂ = 40 Н			Абсолютное откло- нение			Относительное от- клонение, %		
t ₁ , мс	t ₂ , мс	t _ц , мс	t ₁ , мс	t ₂ , мс	t _ц , мс	Δt ₁ , мс	Δt ₂ , мс	Δt _ц , мс	ε(t ₁), %	ε(t ₂), %	ε(t _ц), %
138	122	260	135	132	267	-3,2	10	7	2,37	7,76	2,62

Обсуждение

Для оценки корректности предложенной математической модели произведен сравнительный анализ расчётных и экспериментальных временных характеристик рабочего цикла ударного узла [17]. Из результатов анализа, представленных в табл. 1, следует, что относительное отклонение расчётных значений времени работы катушек и длительности рабочего цикла от экспериментальных значений не более 10 % в диапазоне исследуемых параметров напряжения и тяговых усилий. Это значит, что разработанная математическая модель с совокупностью принятых допущений адекватно описывает динамику движения бойка электромагнитного ударного узла и позволяет определять зависимости скорости и перемещения бойка от времени для различных режимов работы.

С помощью разработанной модели определены такие сочетания тяговых усилий катушек, при которых обеспечивается режим работы ударного узла с равными энергиями нижнего и верхнего удара. Для этого разность между значениями электромагнитной силы верхней и нижней катушки необходимо обеспечивать в интервале от $2,05m_0g$ до $2,15m_0g$, где m_0 – масса бойка, g – ускорение свободного падения. Такое сочетание тяговых усилий позволяет создавать в нефтяном пласте аналогичные сейсмические волны при верхнем и нижнем ударе бойка, что повышает эффективность вибровоздействия.

Разработанная модель позволяет исследовать влияние конструктивных параметров на динамику рабочего цикла ударного узла и может быть использована для оптимизации конструкции длинноходовых электромагнитных ударных узлов с отношением длины намагничивающей катушки к радиусу бойка в диапазоне 12 – 25, применяемых для создания скважинных виброисточников. Также модель может быть использована при проектировании новых типоразмеров

скважинных виброисточников, удовлетворяющих требованиям нефтегазовых промыслов России и мира.

Заключение

Для технической реализации виброволнового метода увеличения нефтеотдачи могут быть использованы скважинные виброисточники на основе линейных электромагнитных двигателей ударного действия, обеспечивающие минимальные потери энергии при её передаче с дневной поверхности к скважинному виброисточнику.

В работе предложена математическая модель электромагнитного ударного узла виброисточника, описывающая динамику движения бойка под действием электромагнитных сил катушек, сил сопротивления движению и реакций со стороны гидромеханических силовых элементов виброисточника. Подтверждена удовлетворительная сходимость результатов расчётов по разработанной модели с экспериментальными данными, что позволяет использовать модель для научно-исследовательских работ и для проектирования типоразмерного ряда виброисточников, востребованных нефтегазовой промышленностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Апасов, Т.К. Методы интенсификации добычи нефти и повышения нефтеотдачи для месторождений Западной Сибири: Учебное пособие / Т.К. Апасов, Р.Т. Апасов, Г.Т. Апасов. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. – 187 с.
2. Ибрагимов, Л.Х. Интенсификация добычи нефти / Л.Х. Ибрагимов, И.Т. Мищенко, Д.К. Челоянц. – М.: Наука, 2000. – 414 с.
3. Алтунина, Л.К. Физико-химические и комплексные технологии увеличения нефтеотдачи Пермо-Карбоновой залежи высоковязкой нефти Усинского месторождения / Л.К. Алтунина, А.А. Кувшинов, И.В. Кувшинов, Л.А. Стасьева, М.В. Чертенков, Л.С. Шкрабюк, Д.В. Андреев // Нефтяное хозяйство. – 2017. – №7. – С.26-29.
4. Bera A. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects / A. Bera, T. Babadagli // A review. Applied Energy. – 2015. – Vol. 151. — P. 206–226. doi.org/10.1016/j.apenergy. 2015.04.031.
5. Esmaeilzadeh P. Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO₂, SiO₂ and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery / P. Esmaeilzadeh, M. T. Sadeghi, Z. Fakhroueian, A. Bahramian and R. Norouzbeigi // J. Natural Gas Sci. and Eng. – 2015. – Vol. 26. — P. 1294–1305. doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.037.
6. Sheng J. J., Leonhardt B., and Azri N. Status of polymer-flooding technology, J. Canadian Petroleum Technology. – 2015. – Vol. 54, No 2. — P. 116–126. doi.org/10.2118/174541-PA.
7. Крянев, Д.Ю. Применение методов увеличения нефтеотдачи пластов в России и за рубежом. Опыт и перспективы / Д.Ю. Крянев, С.А. Жданов // Бурение и нефть. – 2011. – №2. – С. 22-26.
8. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф. и др. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. – Новосибирск: Наука, 2010. – 404 с.
9. G.Yu, Y. Z. Chen, X. M. Wang, O. H. Zhang, Y. P. Li, B. Y. Zhao, J. J. Wu, J. Greer. Walkaway VSP using multimode optical fibers in a hybrid wireline. The Leading Edge. – 2016. – Vol. 35. – No 7. – pp 615-619. doi.org/10.1190/tle35070615.1.

10. Дыбленко, В.П. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами / В.П. Дыбленко, Е.Ю. Марчуков, И.А. Туфанов, Р.Я. Шарифуллин, В.С. Евченко. — М. : РАЕН, 2012. — 344 с.
11. Ганиев О.Р. Основы волноводной механики продуктивных пластов / О.Р. Ганиев, Р.Ф. Ганиев, Л.Е. Украинский, И.Г. Устенко // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 466, №3. — С. 298–301.
12. Курленя, М. В. Развитие метода повышения притока нефти к скважине в процессе разработки месторождения / М.В. Курленя, В.И. Пеньковский, А.В. Савченко, Д.С. Евстигнеев, Н.К. Корсакова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 3. — С. 62–71.
13. Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: монография / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. — Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. — 220 с.
14. Пат. 2642199 Российская Федерация, МПК E21B23/01 (2006.01). Скважинный сейсмоисточник / Б.Ф. Симонов, Ю.В. Погарский, А.О. Кордубайло, Ю.А. Лебедев; заявитель и патентообладатель ПАО «СилэнСейсмоимпульс»; заявл. 19.04.2017; опубл. 24.01.2018; Бюл. № 3. — 11 с.: ил.
15. Кордубайло, А.О. Исследование конструкций скважинного электромагнитного импульсного виброисточника / А.О. Кордубайло, Б.Ф. Симонов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — №5 — С.146-153.
16. Кордубайло, А.О. Исследование тяговых характеристик электромагнитов для скважинного виброисточника / А.О. Кордубайло, Б.Ф. Симонов // Интерэкспо Гео–Сибирь. — 2018. — Т.5. — С. 74–79.
17. Ряшенцев, Н.П. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин / Н.П. Ряшенцев, А.Н. Мирошниченко. — Новосибирск: Наука, 1987. — 160 с.
18. Кордубайло, А.О. Исследование компрессионно-вакуумного сопротивления движению бойка ударного узла скважинного виброисточника / А.О. Кордубайло, А.Ю. Примычкин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — №3. — С.137–142.
19. Кордубайло А.О. Увеличение эффективности волнового воздействия на нефтяной пласт скважинным сейсмоисточником / А.О. Кордубайло // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — №3. — С.137–142.

© А. О. Кордубайло, Б. Ф. Симонов, 2021