

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ БОЙКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОЛОТА В СРЕДЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

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

Александр Александрович Шаповалов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, техник отдела горной и строительной геотехники, тел. (923)197-68-99.

Многие нефтяные месторождения России переходят в заключительную стадию разработки. На них внедряются методы увеличения нефтеотдачи пластов (МУН). Перспективный МУН – волновое воздействие на пласт скважинным виброисточником на базе электромагнитного молота. В работе представлены результаты численного исследования динамики движения бойка молота в среде трансформаторного масла. Установлены зависимости скорости удара бойка от вязкости масла, конфигурации и площади перепускного отверстия.

Ключевые слова: скважинный виброисточник, электромагнитный молот, численное моделирование, движение в жидкости, вязкость жидкости, динамика движения бойка, энергия удара.

RESEARCH OF DYNAMICS OF MOVEMENT OF ELECTROMAGNETIC HAMMER BATTLE IN VISCOUS LIQUID

Alexey O. Kordubaylo

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, Department of Mining and Construction Geotechnics, phone: (953)762-70-59, e-mail: Kordubaylo_ao@mail.ru

Boris F. Simonov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Leading Researcher at the Department of Mining and Construction Geotechnics, phone: (913)891-34-00, e-mail: Simonov_BF@mail.ru

Alexander A. Shapovalov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Technician, Department of Mining and Construction Geotechnics, phone: (923)197-68-99

Many Russian oil fields enter the final stage of development. They implement enhanced oil recovery methods (EOR). Promising EOR include wave effect on the formation by a downhole vibration source based on an electromagnetic hammer. The paper presents the results of a numerical

study of the dynamics of striker movement in transformer oil. The dependences of striking speed on oil viscosity, configuration and area of a bypass hole are determined.

Key words: borehole vibration source, electromagnetic hammer, numerical simulation, motion in a fluid, fluid viscosity, dynamic of a striker, impact energy.

Введение

Одной из важнейших проблем современной нефтедобывающей промышленности является переход большинства крупных месторождений в заключительные стадии эксплуатации. Этот процесс сопровождается ростом обводненности добываемой скважинной жидкости, снижением дебита добывающих скважин, ухудшением гидродинамической связи нефтяного пласта со скважиной и т.д. [1-3]. При этом большая часть нефти остается в коллекторах в виде пленок на стенках капилляров и трещин, защемленных в породе скоплениях, а так же в виде насыщенных участков коллектора, обтекаемых со всех сторон вытесняющей водой. Традиционные технологии нефтедобычи, применяемые на месторождениях, не позволяют вовлекать в разработку указанные виды остаточной нефти. В связи с этим все более интенсивное развитие находят наукоемкие методы увеличения нефтеотдачи (МУН). Причем разнообразие физических и химических процессов в нефтяном пласте, уникальные геологические свойства разных месторождений, технические и технологические особенности промыслов обусловили многообразие МУН. Широкое промышленное применение получили следующие способы воздействия на месторождения: 1 – химические (основанные на закачке химических реагентов или поверхностно-активных веществ); 2 – термические (основанные на вытеснении нефти теплоносителями, либо на воздействии на месторождение с помощью внутрипластовых экзотермических окислительных реакций); 3 – физические (включающие гидроразрыв пласта или сейсмическое воздействие на коллектор) [4-8]. Среди перечисленных МУН особое место занимает метод виброволновой обработки нефтяных пластов, т.к. может применяться независимо или совместно с другими МУН, повышая их эффективность [9,10].

Для реализации волнового воздействия на нефтяные пласты в Институте горного дела СО РАН разрабатывается скважинный виброисточник на основе линейного электромагнитного двигателя поступательного действия (электромагнитный молот). Молот включает цилиндрический корпус, в котором размещена направляющая труба меньшего диаметра. На направляющей трубе установлены катушки верхнего и нижнего хода бойка. Боек расположен внутри направляющей трубы с возможностью осевого перемещения в ней под действием электромагнитных сил катушек. Результаты теоретических и экспериментальных исследований опытного образца молота и виброисточника [11,12] подтверждают перспективность разработки. Следует отметить, что при проведении НИОКР движение бойка рассматривалось только в воздушнонаполненной направляющей трубе. Таким образом, разрабатываемый скважинный виброисточник в случае нарушения герметичности уплотнений корпуса потеряет ра-

ботоспособность. Известным и перспективным путем повышения надежности и герметичности глубинной скважинной техники (геофизических приборов, погружных электродвигателей) является предварительное заполнение специальной рабочей жидкостью (например, трансформаторным маслом). Однако заполнение электромагнитного молота жидкостью ведет к повышению сопротивлению поступательного движения бойка и уменьшению скорости удара, т.к. молот является замкнутой динамической системой. В связи с чем, актуальным является исследование динамики движения бойка в среде вязкой жидкости.

Цель работы – установить зависимости скорости бойка от конструктивных параметров системы и вязкости жидкости.

Методы и материалы

Исследование движения бойка под действием электромагнитной силы тяги катушки в среде вязкой жидкости выполнено методом численного моделирования. При этом, т.к. электромагнитный молот является машиной циклического действия, достаточно исследовать динамику одного рабочего хода бойка. Расчетная схема модели представлена на рис. 1.

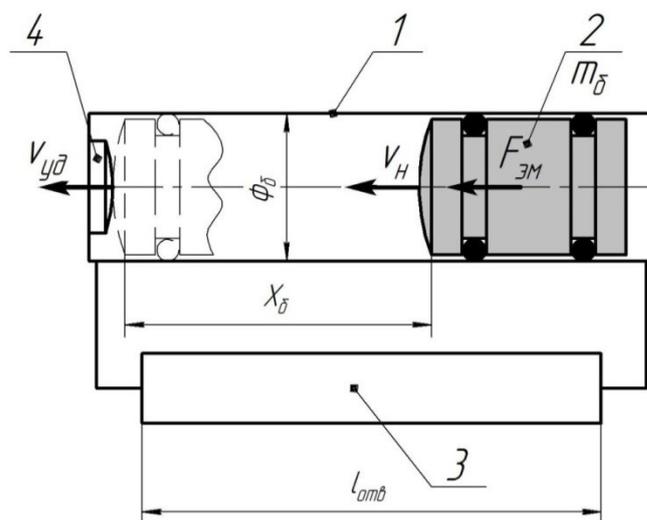


Рис. 1. Модель движения бойка в направляющей:

1 – направляющая труба; 2 – боек; 3 – отверстие; 4 – наковальня

Модель включает направляющую трубу 1, боек 2, установленный в трубе 1 герметично, отверстие 3, соединяющее полости трубы слева и справа от бойка, и наковальню 4. Начальное положение бойка показано основными линиями. При этом к бойку массой $m_{\text{б}}$, равной 14 кг, приложена усредненная сила тяги электромагнита $F_{\text{ЭМ}}$, равная 300 Н, и задана начальная скорость $v_{\text{н}}$ 2 м/с, имитирующая отскок бойка в реальной динамической системе. Под действием электромагнитной силы боек движется влево вытесняя рабочую среду из левой полости в правую через отверстие 3. По окончании хода бойка $X_{\text{б}}$ левый торец

бойка достигает наковальни 4 (положение бойка показано пунктиром), при этом имея скорость удара $v_{уд}$. Установление зависимости $v_{уд}$ от геометрических параметров отверстия 3 является целью настоящей работы.

По результатам опытно-конструкторской проработки электромагнитного молота установлено, что отверстие, соединяющее полости направляющей трубы, может быть выполнено тремя способами, показанными на рис. 2.

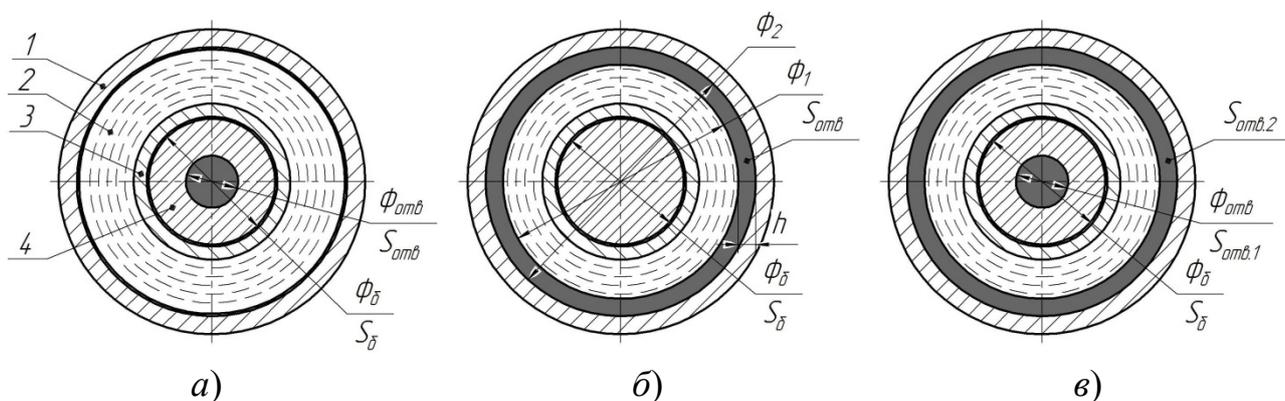


Рис. 2. Поперечное сечение электромагнитного молота:

- а) отверстие в бойке; б) кольцевое отверстие между катушкой и корпусом; в) комбинированное отверстие; 1 – корпус; 2 – обмотка катушки; 3 – направляющая труба; 4 – боек

Форма и размеры отверстий по рис. 2 задавались в расчетную схему рис. 1. При этом для схемы рис. 2, а в ходе исследования изменяли диаметр отверстия $\phi_{отв}$, а для схемы рис. 2, б изменяли наружный диаметр катушки ϕ_1 , тем самым регулируя величину кольцевого зазора h .

В качестве рабочей среды рассмотрено трансформаторное масло в двух состояниях: 1 – с вязкостью $23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (имитация холодного пуска при температуре $t=20 \text{ }^\circ\text{C}$); 2 – с вязкостью $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (имитация номинального режима работы при температуре $t=120 \text{ }^\circ\text{C}$).

Допущением описанной модель является перекачка масла по прямолинейному отверстию постоянного поперечного сечения. При этом не учтены конструктивные элементы молота, создающие местные сопротивления гидравлическому потоку.

Результаты

В ходе выполнения экспериментов с математической моделью получены осциллограммы скорости движения бойка в зависимости от геометрических параметров перепускного отверстия. Наиболее характерные из них приведены на рис. 3.

На рис. 3 осциллограммы с номером 1 соответствуют движению в трансформаторном масле вязкостью $23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, с номером 2 – с вязкостью $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Результаты расчетов приведены в виде графиков на рис. 4.

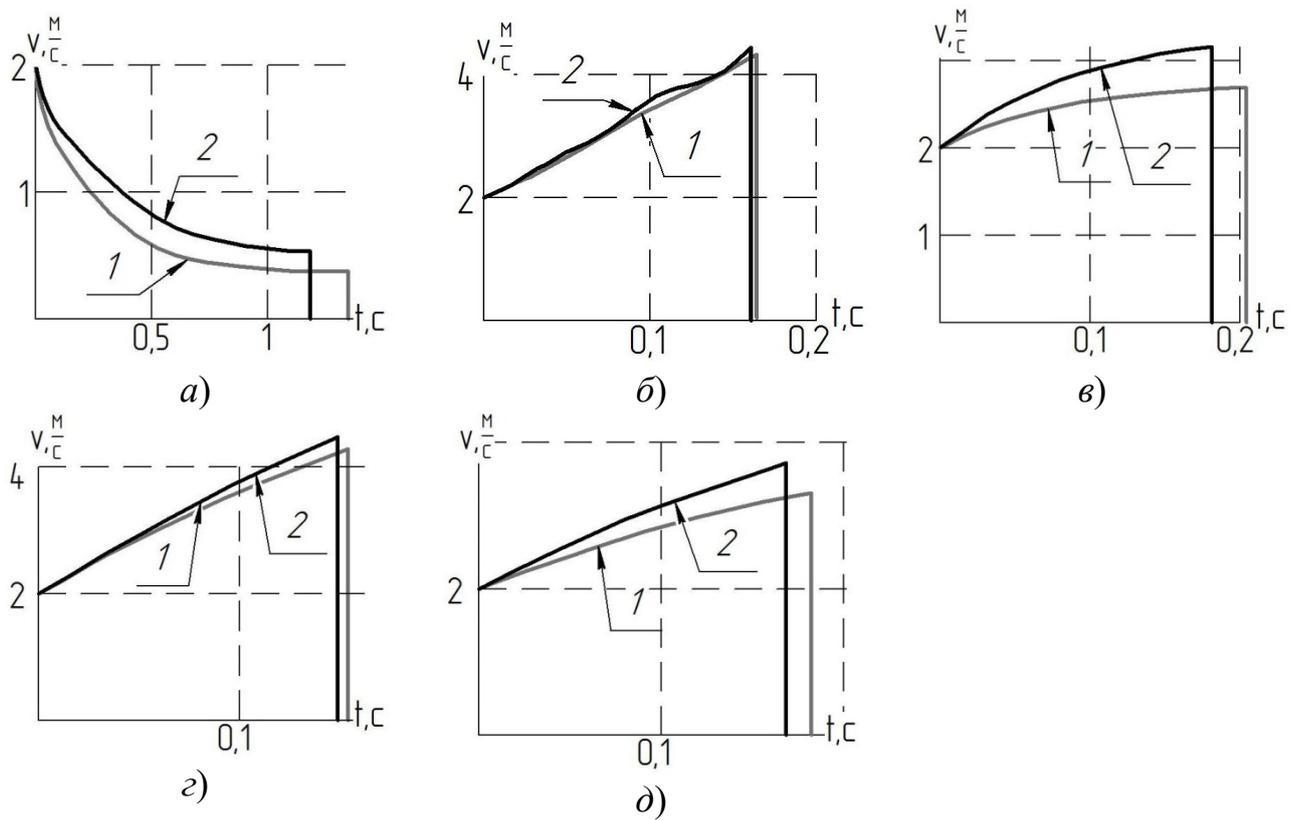


Рис. 3. Осциллограммы скорости бойка:

при цилиндрическом отверстии: а) $\phi_{\text{отв}} = 10$ мм; б) $\phi_{\text{отв}} = 40$ мм; при кольцевом отверстии: в) $h = 6$ мм; г) $h = 10$ мм; д) при комбинированном отверстии, $\phi_{\text{отв}} = 15$ мм; $h = 6$ мм

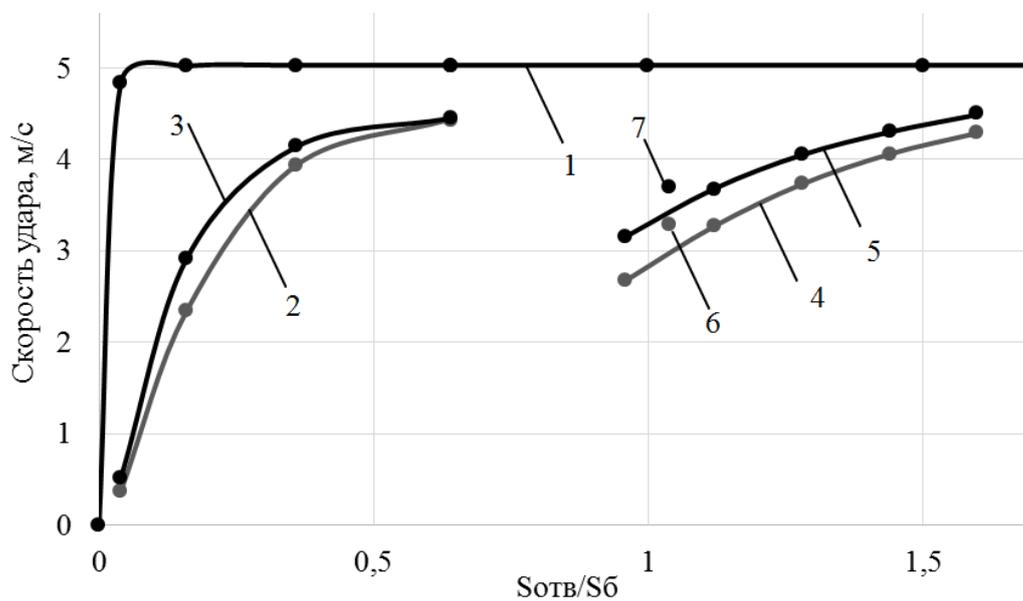


Рис. 4. Зависимость скорости удара бойка от относительной площади отверстия:

1 – движение бойка в воздухе; 2, 3 – движение бойка в масле вязкостью $23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно при цилиндрическом отверстии; 4, 5 – то же при кольцевом отверстии; 6, 7 – то же при комбинированном отверстии

Обсуждение

Из анализа полученных результатов сделаны следующие выводы.

Сопротивление движению бойка при движении в вязкой жидкости больше чем компрессионно-вакуумное сопротивление при движении в воздухе, в следствие чего зависимости 2-7 расположены ниже зависимости 1 на рис. 4. При этом зависимость 1 построена по результатам более ранних исследований [13] и может быть принята за максимальную возможную предупредную скорость бойка $v_{уд\ max}$, которой соответствует максимальная кинетическая энергия удара $E_{уд\ max}$.

При движении бойка в масле для каждой конфигурации перепускного отверстия с увеличением относительной площади отверстия увеличивается значение скорости удара.

При вязкости масла $2 \cdot 10^{-6}$ м²/с величина предупредной скорости на 5-25% выше, чем при вязкости $23 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Причем разность тем больше, чем меньше расстояние между неподвижными стенками перепускного отверстия.

Для цилиндрического отверстия в диапазоне площади $S_{отв}/S_б$ от 0,04 до 0,64 скорость удара увеличивается от 0,08 до 0,88 $v_{уд\ max}$. Т.е. выполнив в бойке отверстие площадью 0,6-0,65 $S_б$ можно обеспечить приемлемую кинематику движения бойка. Однако увеличение диаметра отверстия ведет к уменьшению массы бойка и электромагнитной силы тяги. Вследствие чего существенно ухудшаются динамические характеристики ударной системы (энергия удара $E_{уд}=0,25 \div 0,3 E_{уд\ max}$).

Для кольцевого отверстия в диапазоне площади $S_{отв}/S_б$ от 0,9 до 1,6 скорость удара увеличивается от 0,55 до 0,9 $v_{уд\ max}$. В следствие того, что при наличии кольцевого отверстия между катушкой и корпусом масса бойка не уменьшается, может быть достигнута $E_{уд}=0,81 E_{уд\ max}$. Однако для увеличения $S_{отв}/S_б$ более 1, необходимо либо увеличивать диаметр корпуса молота, либо уменьшать диаметр обмотки катушек.

Комбинированное перепускное отверстие, состоящее из отверстия в бойке диаметром $\phi_{отв}=15$ мм и кольцевого зазора $h=6$ мм, увеличивает предупредную скорость на 8-10% в сравнении с кольцевым отверстием равной площади. Однако при этом на 10% уменьшается масса бойка и на 10-15% уменьшается электромагнитная сила тяги, что не позволит увеличить энергию удара.

Заключение

Перспективным путем повышения герметичности и надежности скважинных электромагнитных ударных систем является их заполнение трансформаторным маслом. При этом необходимо исследовать изменение динамических параметров маслonaполненной ударной системы в сравнении с воздухомонаполненной.

В настоящей работе выполнено математическое моделирование движения бойка в маслonaполненной направляющей с циркулирующей жидкости по пере-

пускному отверстию. Установлены зависимости скорости удара бойка от конфигурации и площади перепускного отверстия. Наиболее рациональным является выполнение в электромагнитном молоте кольцевого отверстия между наружной поверхностью катушек и внутренней поверхностью корпуса. Выполнение такого отверстия площадью $S_{отв} = 1,6S_6$ способствует достижению скорости удара бойка $v_{уд} = 0,9 v_{уд\ max}$ и энергии удара $E_{уд} = 0,81 E_{уд\ max}$ (максимальная скорость и энергия удара достигается при движении бойка в воздухе).

Выполненная работа является первым этапом комплекса НИОКР по исследованию динамики движения бойка электромагнитного молота в среде вязкой жидкости. Дальнейшие работы следует направить на усложнение математической модели, детальное моделирование линейных и местных сопротивлений гидравлическому потоку, разработку и испытание физической модели.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90028.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Ленский В. А., Адиев А. Я., Иркабаев Д. Р., Шарова Т. Н. Сквaziнная сейсморазведка: цели, задачи, геологическая эффективность // Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 2. – С. 117-124.
3. Ошкин А. Н., Ермаков Р. Ю., Рагозин Н. А., Игнатьев В. И. Межскважинное сейсмическое просвечивание – опыт, методология, аппаратура // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2016. – № 3. – С.37-47.
4. 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.
5. Sheng J. J., Leonhardt B., Azri N. Status of polymer-flooding technology. Journal of Canadian Petroleum Technology. 2015. Vol. 54. No 2. pp. 116–126. doi.org/10.2118/174541-PA.
6. Bera A., Babadagli T. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review. Applied Energy. 2015. Vol. 151. pp. 206–226. doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.031.
7. Esmailzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z., Bahramian A., Norouzebeigi R. Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO₂, SiO₂ and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 26. pp. 1294–1305. doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.037
8. Ганиев О. Р., Ганиев Р. Ф., Украинский Л. Е., Устенко И. Г. Основы волноводной механики продуктивных пластов // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 466, № 3. – С. 298–301.
9. Дыбленко В. П., Марчуков Е. Ю., Туфанов И. А. и др. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами. – М.: РАЕН, 2012. – 344 с.
10. Курленя М. В., Пеньковский В. И., Савченко А. В., Евстигнеев Д. С., Корсакова Н. К. Развитие метода повышения притока нефти к скважине в процессе разработки месторождения // ФТПРПИ – 2018. – № 3. – С. 62–71.

11. Simonov B. F., Kordubailo A. O., Neiman V. Y. Polishchuk A. E. Processes in Linear Pulse Electromagnetic Motors of Downhole Vibration Generators // JOURNAL OF MINING SCIENCE. 2018. No 1. pp.61-68.

12. Симонов Б.Ф., Опарин В.Н., Кордубайло А.О., Востриков В.И. Экспериментальные исследования эффективности излучения от скважинного импульсного виброисточника // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8. – С.180-189.

13. Kordubailo, A.O., Primychkin, A.Yu. Compressive vacuum resistance to percussion hammer in downhole vibration source // (2019) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 262(1). – Article № 012034.

© А. О. Кордубайло, Б. Ф. Симонов, А. А. Шаповалов, 2020