

*А. О. Кордубайло<sup>1</sup>, К. В. Федин<sup>2</sup>, О. К. Марилов<sup>2</sup>, А. А. Леуткин<sup>1</sup>*

## **К вопросу сохранения целостности цементной крепи нефтяных скважин при работе импульсного скважинного виброисточника**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

**Аннотация.** Важной проблемой нефтедобывающей промышленности является низкий коэффициент извлечения нефти. Для его увеличения может быть использовано виброволновое воздействие на нефтяные пласты, осуществляемое скважинными сейсмическими источниками. При создании виброисточников актуальны вопросы защиты эксплуатационной колонны скважины от разрушения. В работе предложен способ увеличения длительности ударного импульса и снижения добротности сигнала за счёт упруго-пластической прокладки. Представлены результаты экспериментальных исследований динамики колебаний виброисточника и обсадной колонны скважины. Проведён анализ влияния толщины прокладок на длительность ударного импульса, добротность сигнала и величину передаваемой энергии. Обоснован выбор толщины упруго-пластических элементов, и даны рекомендации к внедрению прокладок в конструкцию скважинного электромагнитного импульсного виброисточника.

**Ключевые слова:** волновой метод увеличения нефтеотдачи, скважинный виброисточник, цементный камень, обсадная колонна, упруго-пластический элемент, прокладка, колебания, длительность импульса, добротность сигнала, энергия колебаний

*А. О. Kordubailo, К. V. Fedin, О. К. Marilov, А. А. Leutkin*

## **On the issue of maintaining the integrity of the cement lining of oil boreholes during the operation of a pulsed borehole vibration source**

<sup>1</sup>Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Petroleum Geology and Geophysics. A. A. Trofimuk SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation

**Abstract.** An important problem of the oil industry is the low oil recovery factor. To increase it, vibrowave impact on oil reservoirs, carried out by borehole seismic sources, can be used. When creating vibration sources, the issues of protecting the production string from destruction are relevant. The paper proposes a method for increasing the duration of the shock pulse and reducing the quality factor of the signal due to the elastic-plastic gasket. The results of experimental studies of the dynamics of oscillations of the vibration source and the well casing are presented. An analysis was made of the effect of the thickness of the spacers on the duration of the shock pulse, the quality factor of the signal, and the magnitude of the transmitted energy. The choice of the thickness of elastic-plastic elements is justified, and recommendations are given for the introduction of gaskets into the design of a borehole electromagnetic pulsed vibration source.

**Keywords:** wave method of enhanced oil recovery, borehole vibration source, cement stone, casing string, elastic-plastic element, gasket, vibrations, pulse duration, signal quality factor, vibration energy

## *Введение*

Одной из важных и актуальных проблем современной нефтегазовой промышленности в России и за рубежом является низкий коэффициент извлечения нефти из месторождений. Традиционные способы разработки позволяют извлечь из недр лишь 25-40 % сырья. При этом большая часть углеводородов остаётся в пласте в виде замкнутых скоплений в коллекторах с малой проницаемостью, в тупиковых зонах контуров нефтеносности, а также в виде плёнки на стенках трещин породы [1-2]. Для вовлечения этой части нефти в разработку на промыслах внедряются различные методы увеличения нефтеотдачи [3-7]. Одним из перспективных МУН является технология виброволнового воздействия на продуктивные пласты скважинными источниками упругих колебаний. В сравнении с другими МУН виброволновые технологии требуют сравнительно малых финансовых затрат на реализацию и могут комбинироваться с другими МУН, повышая их эффективность [8-10].

В Институте горного дела им. Н.А. Чинакала разработан скважинный электромагнитный импульсный виброисточник (далее СВИ), в котором генератором осевых ударных импульсов служит электромагнитный линейный двигатель. Тяжные соленоиды двигателя перемещают ударник, который оказывает импульсное воздействие на гидромеханические силовые элементы. Силовые элементы снабжены эластичной камерой, которая при заполнении рабочей жидкостью под давлением расширяется и раздвигает пуансоны до упора в обсадную колонну скважины. Под действием ударов в рабочей жидкости возникают импульсы давления, которые так же через пуансоны передаются на стенки скважины [11-13].

В процессе работы СВИ на обсадную колонну оказываются осевые и радиальные ударные импульсы с энергией удара 150-200 Дж и частотой 7-8 Гц. При этом крайне актуальным является вопрос сохранения функциональных свойств эксплуатационной колонны, в частности, цементной крепи скважины. Проведённые ранее лабораторные исследования влияния режимов и длительности работы СВИ на герметичность цементного камня, окружающего стальную обсадную трубу, показало локальное увеличение проницаемости камня в зоне механического контакта с пуансонами. При этом участки камня выше и ниже указанной зоны сохранили герметичность [14]. Однако при проведении эксперимента в лабораторных условиях невозможно воссоздать протяжённый участок обсаженной скважины с имитацией горного давления, длительности эксплуатации скважины и других важных факторов. Наиболее объективные сведения о безопасности разработанного устройства для эксплуатационной колонны могут быть получены только в условиях работы в нефтяной скважине.

Сотрудники ИГД СО РАН совместно с АО «Сейстех» провели промысловые испытания скважинного СВИ на месторождениях республики Татарстан. Перед спуском виброисточника в скважину проведена оценка качества цементирования скважины аппаратурой акустического контроля (далее – АКЦ) с использованием зонда МАК-2. Результаты АКЦ приведены на рис. 1а. Из результатов следует,

что в силу длительной эксплуатации скважины в ней имеются зоны частичного нарушения контакта обсадной трубы с цементным камнем. Эти зоны показаны зелёной заливкой на столбце «контакт с колонной». Установлено, что интервал скважины с 608 м по 650 м имеет устойчивый контакт колонны с камнем. В связи с этим для проведения испытаний СВИ выбрана глубина 630м. После спуска устройства и его силового замыкания в обсадной колонне на этой глубине проведено внутрискважинное импульсное воздействие в течение 24 часов. После демонтажа оборудования проведён повторный АКЦ скважины и получена диаграмма состояния контакта обсадной трубы с цементным камнем рис. 1б.

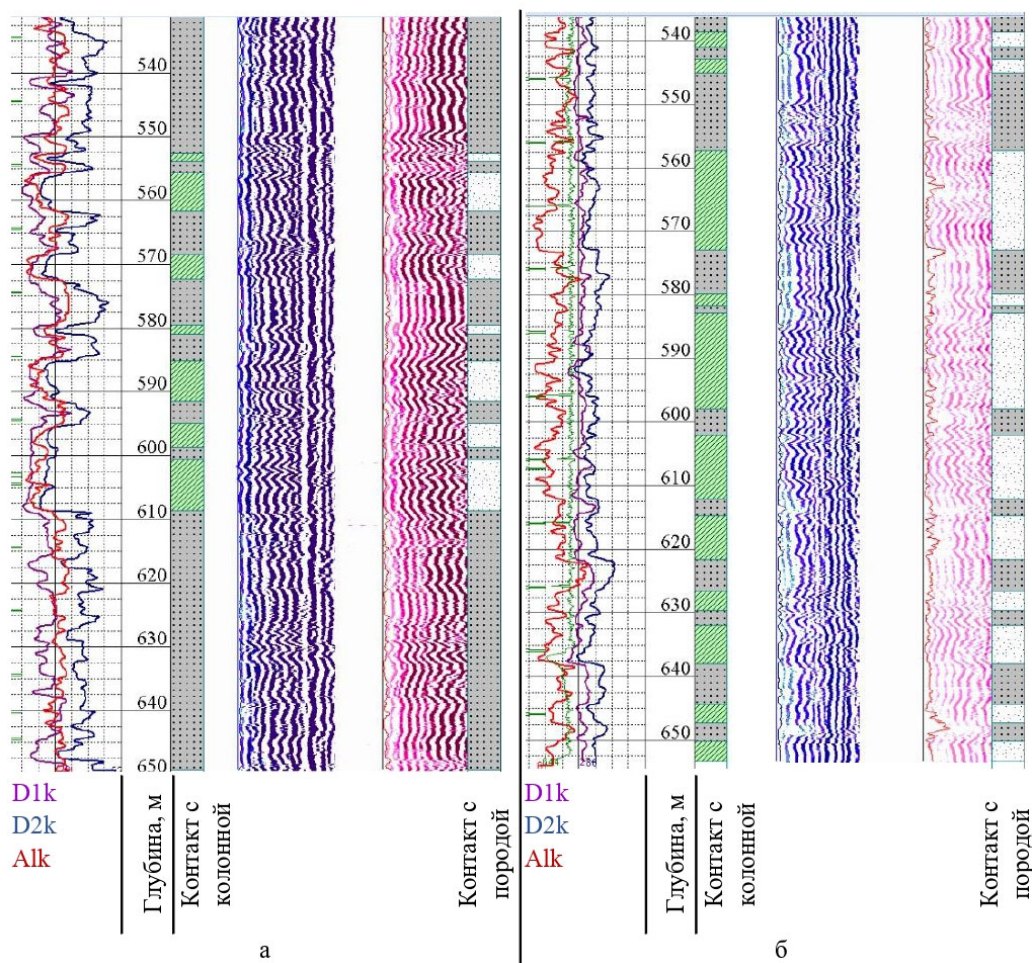


Рис. 1 – Результаты АКЦ скважины до (а) и после (б) вибровоздействия

При сравнении результатов АКЦ видно, что ранее повреждённые участки скважины в интервале глубин 555-608 м после вибровоздействия увеличились в 1,5-2 раза, а в интервалах глубин 530-555 м и 608-650 м образовались новые локальные участки с частичным повреждением контакта трубы с цементом.

Факт частичного нарушения целостности цементного в процессе вибровоздействия обуславливает актуальность работ, направленных на снижение негативного влияния СВИ на скважину. Одним из наиболее распространённых способов защиты объектов ударного воздействия от разрушения является введение

упруго-пластических конструктивных элементов между генератором и объектом ударного импульса. Такие элементы применяются для виброзащиты оборудования, защиты оголовков железобетонных свай и в других импульсных и вибрационных установках. Упруго-пластические элементы способствуют увеличению длительности ударного импульса, более равномерному распределению контактных напряжений, что существенно повышает ресурс свай, бетонных оснований и других элементов конструкций [15,16]. Применительно к СВИ подобные защитные элементы могут быть выполнены в виде листовых резиновых прокладок между пуансонами силового элемента СВИ и обсадной трубой скважины.

Целью работы является выявление влияния наличия и толщины резиновой прокладки между пуансонами силового элемента и обсадной трубой на длительность ударного импульса и энергию удара, передаваемую от виброисточника на скважину.

### *Методы и материалы*

Наиболее достоверная оценка влияния указанных резиновых прокладок на динамические характеристики сложной многомассовой системы может быть получена экспериментальным методом. Для этого опытный образец СВИ установлен на специальной жёсткой раме, включающей фрагменты обсадной трубы скважины. Механическая связь виброисточника с рамой осуществляется аналогично работе в скважине, то есть силовые элементы распираются в обсадных трубах и виброисточник удерживается за счёт силы трения. Для отдельного измерения скорости при колебательных движениях СВИ и обсадной трубы на них установлены два велосиметра Байкал-8 (рис. 2).

Базовая конструкция СВИ подразумевает распор стальных пуансонов силового элемента в стальную обсадную трубу без прокладок. При проведении настоящего исследования такой режим принят за базовый для дальнейшего сравнения с ним конструкций с прокладками.

Методика проведения эксперимента:

- стенд жёстко закрепляется на бетонном основании;
- на стенд монтируется СВИ так, чтобы распорные силовые элементы находились в фрагментах обсадной трубы;
- в силовые элементы нагнетается рабочая жидкость под давлением 10 МПа, силовые элементы распираются в обсадных трубах, фиксируя СВИ;
- на фрагменте обсадной трубы и на корпусе СВИ крепятся датчики виброскорости (рис. 2) и подключаются к регистрирующей аппаратуре;
- запускается ударный узел и в течение 60 с ведётся запись осциллограмм скоростей перемещения СВИ и стенда (рис. 3);
- СВИ вынимается из стенда, на пуансоны силовых элементов устанавливаются прокладки из листовой резины толщиной 1,5 мм, после чего виброисточник устанавливается обратно и эксперимент повторяется;
- эксперимент повторяется с прокладками толщиной 3 мм и с армированной резиной толщиной 5 мм.



а



б

Рис. 2 – Установка велосиметров на фрагменте обсадной трубы (а) и на корпусе виброисточника (б)

Полученные осциллограммы обрабатывались методом выделения стоячих волн из микросейсмического шума в программе Spectrum, разработанной в ГС РАН. Энергия импульса определялась по спектральной плотности. Добротность сигнала, характеризующая отношение амплитуды колебаний тела при резонансе к амплитуде вынужденных колебаний, определялась как отношение величины выходного напряжения на резонансном контуре к величине напряжения, поданного на него [17-20].

### *Результаты*

Пример экспериментально записанных осциллограмм виброскорости СВИ и станда по трём координатам показан на рис. 3.

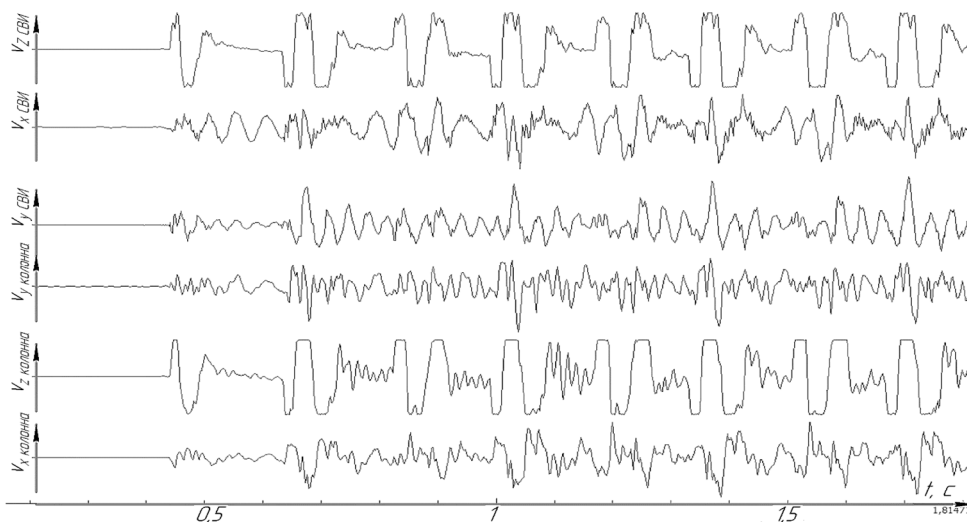


Рис. 3 – Осциллограммы виброскорости колебаний СВИ и колонны

В результате обработки осциллограмм для каждой конструкции соединения СВИ с обсадной колонной получены длительности импульсов (рис. 4), распределение добротности (рис. 5а) и энергии передаваемого сигнала (рис. 5б). При анализе результатов перечисленные параметры импульсов для конструкций СВИ с резиновыми прокладками сравнивались с базовой конструкцией без прокладок.

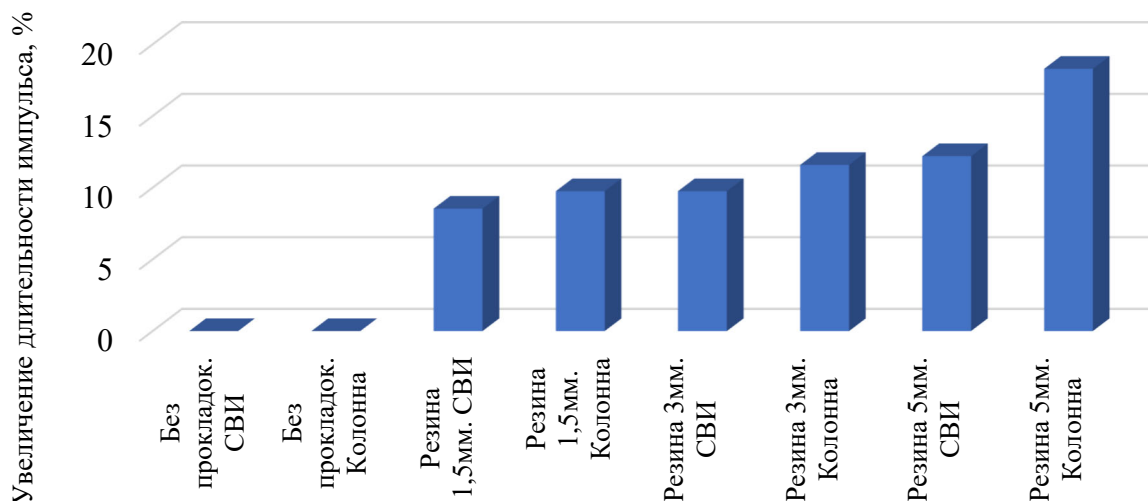


Рис. 4 – Влияние толщины упругой прокладки на длительность импульса

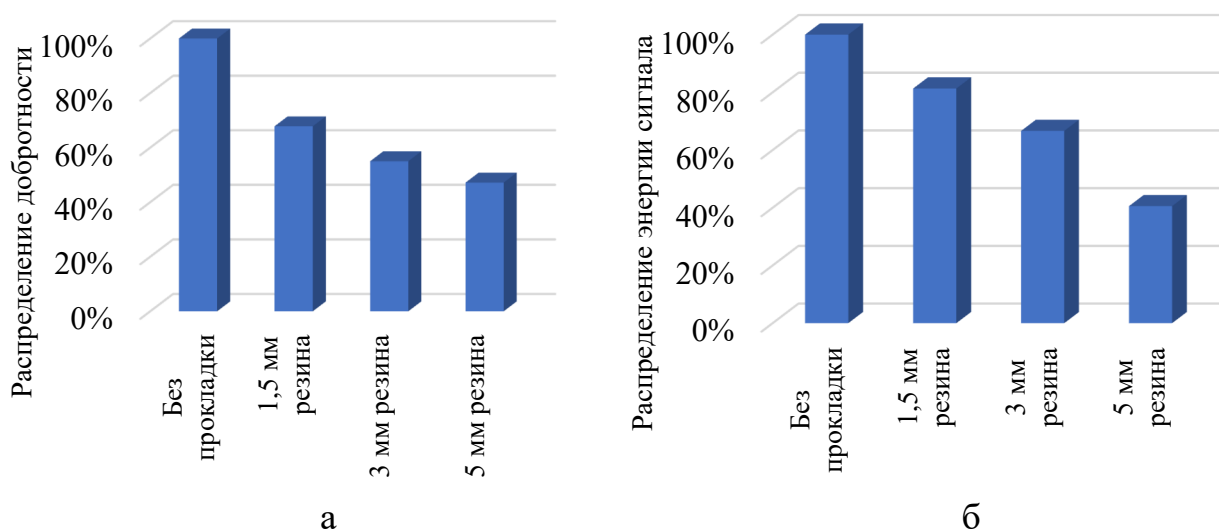


Рис. 5 – Распределение добротности (а) и энергии (б) передаваемого сигнала в зависимости от толщины прокладок

### Обсуждение

Из рис. 4 и рис. 5 видно, что введение в конструкцию СВИ прокладок между пуансонами и последующее увеличение их толщины ведёт к увеличению длительности импульса на 7-17 % по сравнению импульсом, передаваемым от СВИ на колонну без прокладок, и уменьшению добротности сейсмического сигнала на 32-53 %. Эти результаты обуславливают снижение динамической нагрузки на

обсадную колонну скважины и риск разрушения колонны от резонансных явлений при приближении частоты генерирования ударных импульсов к частоте собственных колебаний колонны.

Однако введение в конструкцию упруго-пластической прокладки влечёт уменьшение энергии, передаваемой от СВИ на обсадную колонну на 19-60 %. Причём уменьшение энергии прямо пропорционально толщине используемой прокладки, а добротность сигнала обратно пропорциональна толщине прокладки и снижается с затухающей интенсивностью. Это значит, что для снижения негативного воздействия на обсадную колонну при передаче большей части сейсмической энергии целесообразно вводить в конструкцию прокладки малой толщины от 1 до 1,5 мм.

### *Заключение*

Снижение негативного динамического воздействия на обсадную колонну скважины является важной задачей при разработке скважинных сейсмических источников. Одним из решений может быть введение в конструкцию устройства упруго-пластических прокладок, закреплённых механически на наружной поверхности пуансонов силового элемента, вступающих в силовое замыкание с обсадной колонной.

Экспериментальные стендовые исследования динамики колебаний виброисточника и обсадной трубы показали, что целесообразно использовать тонкие резиновые прокладки толщиной около 1,5 мм. При этом длительность ударного импульса увеличивается на 7-9 %, добротность сигнала снижается на 32 %, а потери энергии должны составлять не более 20 %.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Апасов Т. К., Апасов Р. Т., Апасов Г. Т. Методы интенсификации добычи нефти и повышения нефтеотдачи для месторождений Западной Сибири: Учебное пособие. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. – 187 с.
2. Алтунина Л. К., Кувшинов А. А., Кувшинов И. В. и др. Физико-химические и комплексные технологии увеличения нефтеотдачи Пермо-Карбоновой залежи высоковязкой нефти Усинского месторождения // Нефтяное хозяйство. – 2017. – №7. – С.26-29.
3. Bera A., Babadagli T. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects // A review. Applied Energy. – 2015. – Vol. 151. — P. 206–226. doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.031.
4. Esmaeilzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z. and other. Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery // J. Natural Gas Sci. and Eng. – 2015. – Vol. 26. — P. 1294–1305. doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.037.
5. Sheng J. J., Leonhardt B., 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.
6. 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.
7. G.Yu, Y. Z. Chen, X. M. Wang and other. 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.

8. 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. — 344с.
9. Ганиев О. Р., Ганиев Р. Ф., Украинский Л. Е. Основы волноводной механики продуктивных пластов // Доклады Академии наук. — 2016. — Т. 466, №3. — С. 298–301.
10. Курленя М. В., Пеньковский В. И., Савченко А. В. и др. Развитие метода повышения притока нефти к скважине в процессе разработки месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 3. — С. 62–71.
11. 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.
12. Кордубайло А.О., Симонов Б. Ф. Исследование конструкций скважинного электромагнитного импульсного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — №5 — С.146-153.
13. Simonov B. F., Kordubailo A. O., Neiman V. Y. and other. Simulation Modeling of Operation of Downhole Vibration Exciter EM Drive // Journal of Mining Science. — 2020. — Т.56. — № 3. — С. 435-444.
14. Кордубайло А. О., Симонов Б. Ф., Нечаев Н. С. О влиянии внутрискважинного вибровоздействия на герметичность цементного камня // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т.6. — №2. — С.151-156.
15. Бекбасаров И. И., Исаков Г. И. Конструктивные особенности нового свайного наголовника, обеспечивающего сохранность железобетонных свай при забивке // Механика и технологии. — 2013. — №1. — С.36–41.
16. Рындин В. П. К вопросу совершенствования ударного бурения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — №8. — С.146–150.
17. Harlow, James H. Electric power transformer engineering. CRC Press. Archived from the original on 2016-12-02. pp. 2–216
18. Dennis Bohn. "Bandwidth in Octaves Versus Q in Bandpass Filters". Retrieved 2019-11-20.
19. Konev V. V. Vektornaya algebra [Vector algebra]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2008, 31 p. (In Russian).
20. Demin S. E., Demina E. L. Analiticheskaya geometriya [Analytical geometry]. Nizhny Tagil, Ural Federal University, 2016, 272 p. (In Russian).

© А. О. Кордубайло, К. В. Федин, О. К. Марилов, А. А. Леуткин, 2023