

УДК 536.242

**Леуткин Александр Аркадьевич**  
инженер,  
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала  
Сибирского отделения РАН,  
630091, г. Новосибирск,  
ул. Красный проспект, 54  
e-mail: [leutkin-alexandr@rambler.ru](mailto:leutkin-alexandr@rambler.ru)

**Кордубайло Алексей Олегович**  
кандидат технических наук,  
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала  
Сибирского отделения РАН  
e-mail: [kordubaylo\\_ao@mail.ru](mailto:kordubaylo_ao@mail.ru)

### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОЛОТА

*Аннотация:*

*В статье представлен анализ эффективности систем охлаждения катушек электромагнитного молота, имеющего металлический корпус. Исследованы различные варианты заполнения свободного пространства между поверхностью катушек и корпусом: воздух, трансформаторное масло, компаунд «Силагерм-2113» и активное охлаждение катушек трансформаторным маслом по замкнутому контуру. Моделирование тепловых процессов выполнено в программе конечноэлементного анализа FEMM 4.2. Установлено, что наибольшей эффективностью обладает активное масляное охлаждение. При невозможности организации такового наиболее эффективным вариантом является размещение слоя компаунда «Силагерм-2113» между поверхностью катушек и корпусом молота. При этом другие полости конструкции должны быть заполнены трансформаторным маслом.*

*Ключевые слова:* электромагнитный молот, силовая катушка, тепловые процессы, моделирование, эквивалентный ток, имитационная модель, тепловыделение, тепловой поток, конечноэлементный анализ.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.147

**Leutkin Alexander A.**  
Institute of Mining n.a. Chinakal,  
Siberian Branch of RAS,  
54 Krasny Prospekt,  
630091 Novosibirsk  
e-mail: [leutkin-alexandr@rambler.ru](mailto:leutkin-alexandr@rambler.ru)

**Kordubailo Alexey O.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Institute of Mining n.a. Chinakal,  
Siberian Branch of RAS  
e-mail: [kordubaylo\\_ao@mail.ru](mailto:kordubaylo_ao@mail.ru)

### EFFICIENCY ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC HAMMER COOLING SYSTEMS

*Abstract:*

*The article presents an analysis of the efficiency of cooling systems for coils of an electromagnetic hammer having a metal body. The paper deals with various options for filling the free space between the surface of the coils and the housing: air, transformer oil, Silagerm-2113 compound and active cooling of coils with transformer oil in a closed circuit. Modeling of thermal processes was performed in the FEMM 4.2 finite element analysis program. It was found that active oil cooling has the highest efficiency. If it is impossible to organize one, the most effective option is to place a layer of Silagerm-2113 compound between the surface of the coils and the hammer body. At the same time, other parts of the structure have to be filled with transformer oil.*

*Key words:* electromagnetic hammer, power coil, thermal processes, modeling, equivalent current, simulation model, heat dissipation, heat flow, finite element analysis.

### Введение

Электромагнитные молоты достаточно широко используются в промышленности. На их основе созданы виброисточники [1 – 6] для повышения нефтеотдачи пластов и дебита нефтяных скважин, установки для разрушения негабаритов в карьерах [7], проводятся исследования по созданию адаптивных копровых установок [8]. Преимуществами этого устройства являются экологичность и относительная простота изготовления [9]. Типовая конструкция такого молота имеет боек,двигающийся внутри трубчатой диамагнитной направляющей, на которой установлены две силовые катушки индуктивности, питаемые импульсами постоянного тока. Возвратно-поступательное движение бойка обеспечивается своевременным переключением питания катушек. При работе электромагнитных молотов за счет протекания токов по обмоткам электромагнитов происходит выделение большого количества тепловой энергии [10]. Во избежание перегрева обмоток этот тепловой поток должен максимально эффективно отводиться от поверхности обмотки в окружающую среду. Исследованию процессов теплообмена

и тепловой защиты молотов посвящена работа [11], из которой следует, что уравнение теплового баланса – многопараметрическая функция. На процесс теплопередачи влияют размеры катушек и корпусов, физические свойства материалов, их тепловые сопротивления и коэффициенты теплопроводности, режимы работы молота, продолжительность включения, действующие токи и другие параметры. Для каждой конструкции и геометрии электромагнитных молотов задача тепловой защиты должна решаться индивидуально. В настоящей работе проведен анализ систем охлаждения электромагнитного молота скважинного виброисточника [12], работающего в нагнетательной скважине, используемой для сброса воды в пласт. В нем катушки установлены в герметичном стальном корпусе, обеспечивающем его защиту от неблагоприятных внешних условий: высокого давления и агрессивных сред.

Такая конструкция имеет существенный недостаток – затрудненное охлаждение внешней поверхности катушек молота, так как отсутствует доступ внешней среды внутрь корпуса. Плотность тока в катушках составляет  $3 - 5 \text{ А/мм}^2$ , активное сопротивление –  $1-1,5 \text{ Ом}$ , что обеспечивает выделение до  $1,5 \text{ кВт}$  тепловой мощности. При таких условиях невозможна длительная работа молота без охлаждения.

#### Постановка задачи

Проблема работы заключается в обеспечении максимально эффективного отвода тепла от катушки в окружающую среду.

В конструкции молота между обмотками катушек и корпусом присутствует конструктивный зазор, необходимый для прокладки коммуникаций вдоль катушек молота (рис. 1). Этот зазор можно использовать в целях охлаждения катушек. Кроме этого, в конструкции имеются свободные полости выше и ниже катушки. Рассмотрены несколько вариантов наполнителей зазора и свободных полостей: 1 – зазор и полости заполнены воздухом; 2 – зазор и полости заполнены трансформаторным маслом; 3 – зазор заполнен компаундом «Силагерм-2113», а полости – трансформаторным маслом; 4 – производится активное охлаждение катушек трансформаторным маслом с организацией принудительной циркуляции.

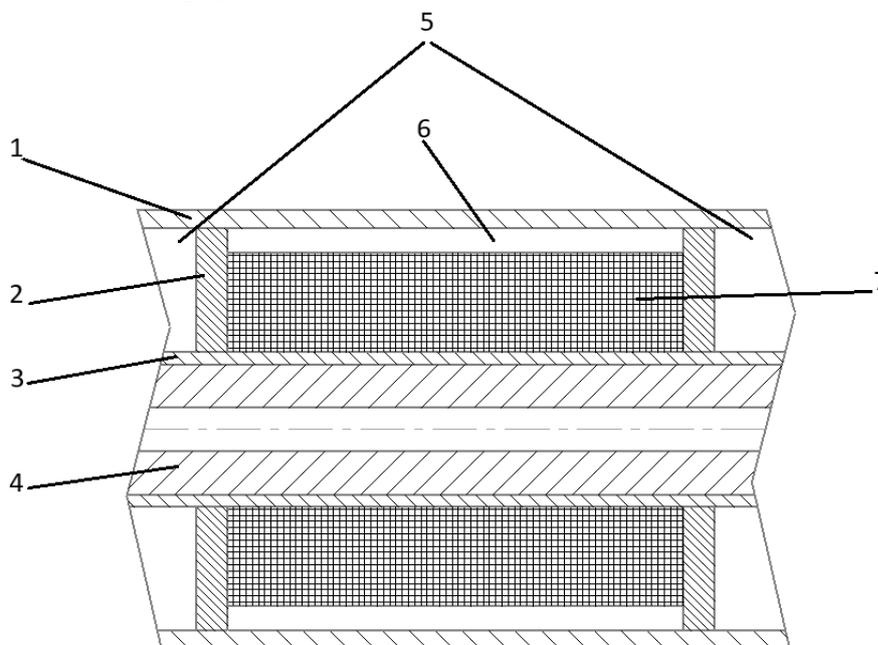


Рис. 1. Продольное сечение катушки молота:  
1 – внешний стальной корпус; 2 – стальной полюс катушки;  
3 – немагнитная направляющая бойка; 4 – стальной боек молота; 5 – полости конструкции;  
6 – зазор между катушкой и корпусом; 7 – силовая катушка

Целью работы является исследование эффективности охлаждения катушек электромагнитного молота в зависимости от материалов заполнения внутренних полостей молота.

Для сравнительного анализа описанных конструкций предлагается ввести безразмерный коэффициент эффективности теплоотвода от катушки:

$$K_1 = \frac{T_A}{T_i}, \quad (1)$$

где  $T_i$  – температура катушек при использовании исследуемого метода охлаждения;  $T_A$  – температура катушек при использовании воздушного охлаждения.

Кроме того, предлагается ввести коэффициент передачи тепла корпусу молота от катушек, характеризующий соответствие температуры корпуса в зоне расположения катушек и фактической температуры катушек:

$$K_2 = \frac{T_i}{T_C}, \quad (2)$$

где  $T_i$  – температура катушек при использовании исследуемого метода охлаждения;  $T_C$  – температура корпуса молота при тех же условиях.

#### Материалы и методы исследования

Исследование выполнено посредством моделирования тепловых потоков от катушек электромагнитного молота в программе FEMM 4.2. Эта программа позволяет создавать имитационные модели реальных объектов с высокой реалистичностью [13]. В имитационной модели учтены тепловые характеристики материалов реального молота. Так как основным тепловыделяющим элементом являются катушки, необходимо рассчитать объемный тепловой поток, создаваемый ими. Тепловой поток определяется рабочими токами, сопротивлением катушек и режимом работы молота; объемом меди в катушке.

Молот работает с перерывами, длительность работы и простоя одинакова и составляет 5 мин. Необходимо рассчитать эквивалентный ток катушек:

$$I_{\text{Э}} = I_K * D * \text{ПВ} = 24 * 0,5 * 0,5 = 6 \text{ А}, \quad (3)$$

где  $I_K$  – амплитуда импульсов тока катушек, А;  $D$  – коэффициент заполнения импульсов тока катушек, равный 0,5; ПВ – коэффициент продолжительности включения, равный 0,5.

Мощность, выделяемая каждой катушкой при протекании эквивалентного тока:

$$P_K = I_{\text{Э}}^2 * R_K = 6^2 * 1,3 = 46,8 \text{ Вт}, \quad (4)$$

где  $I_{\text{Э}}$  – эквивалентный ток катушки, А;  $R_K$  – активное сопротивление катушки, Ом.

Объем меди в теле катушки:

$$\begin{aligned} V_K &= \frac{\pi}{4} * (D_0^2 - D_1^2) * h = \\ &= \frac{3,14}{4} * (0,08^2 - 0,06^2) * 0,615 \approx 1,35 * 10^{-3} \text{ м}^3, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $D_1$  – внутренний диаметр катушки, м;  $D_0$  – внешний диаметр катушки, м;  $h$  – высота катушки, м. Коэффициент заполнения окна катушки обмоточным проводом равен единице.

Расчет объемного теплового потока:

$$q_V = \frac{P_K}{V_K} = \frac{46,8}{1,35 * 10^{-3}} \approx 34 \text{ 667 Вт/м}^3, \quad (6)$$

где  $V_K$  – объем катушки;  $P_K$  – активная мощность, выделяемая катушкой.

Полученная величина объемного теплового потока является исходной для имитационной модели в программе FEMM 4.2. Для модели заданы следующие граничные условия: окружающая среда – вода с температурой 15 °С, что соответствует рабочему режиму скважинного виброисточника в нагнетательной скважине.

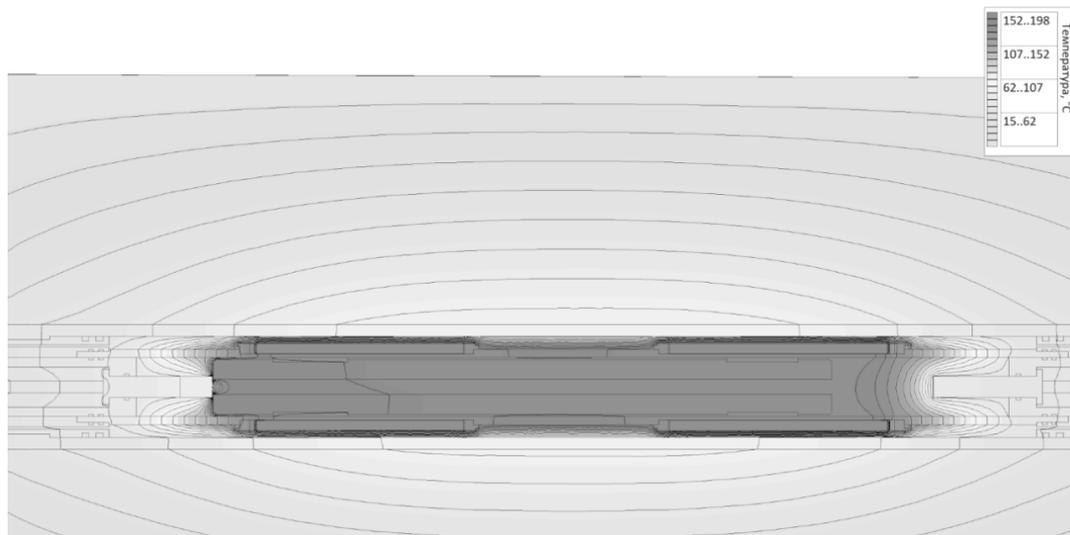


Рис. 2. Температурная карта молота при заполнении полостей воздухом

Температура катушек при воздушном заполнении зазора и полостей составляет 197 °С (рис. 2). Это предельно допустимая температура для обмоточного провода и паяных соединений. Перегрев выше этой температуры может привести к плавлению припоя и разрушению эмалевой изоляции обмоточного провода. Поэтому такое значение температуры будет использоваться как эталонное при расчете коэффициента эффективности охлаждения. Следовательно,  $T_A=197$  °С. Температура корпуса молота в зоне расположения катушек составляет 95 °С. Расчет коэффициента передачи тепла корпусу от катушек:

$$K_2 = \frac{T_i}{T_c} = \frac{197}{95} \approx 2,07. \quad (7)$$

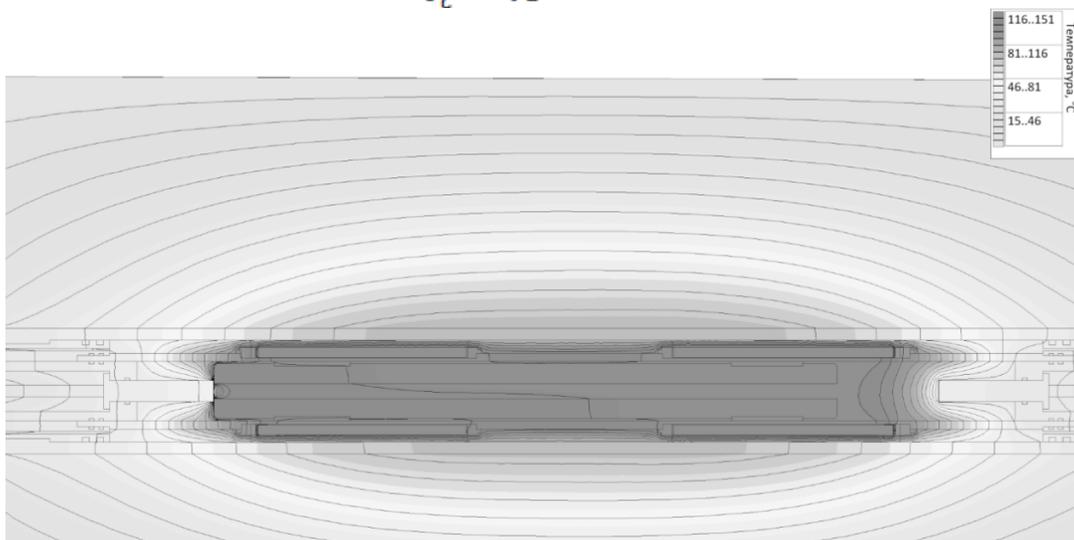


Рис. 3. Температурная карта молота при заполнении трансформаторным маслом

Температура катушек молота при заполнении полостей трансформаторным маслом составляет 150 °С (рис. 3). Расчет коэффициента эффективности охлаждения:

$$K_1 = \frac{T_A}{T_i} = \frac{197}{150} \approx 1,31. \quad (8)$$

Температура корпуса молота в зоне расположения катушек составляет 104 °С. Расчет коэффициента передачи тепла корпусу от катушек:

$$K_2 = \frac{T_i}{T_c} = \frac{150}{104} \approx 1,44. \quad (9)$$

Ввести компаунд «Силагерм-2113» во все полости молота технологически сложно, поэтому применяется комбинированная конструкция: в пространство между катушками и корпусом помещен компаунд, а остальные полости заполнены трансформаторным маслом (рис. 4).

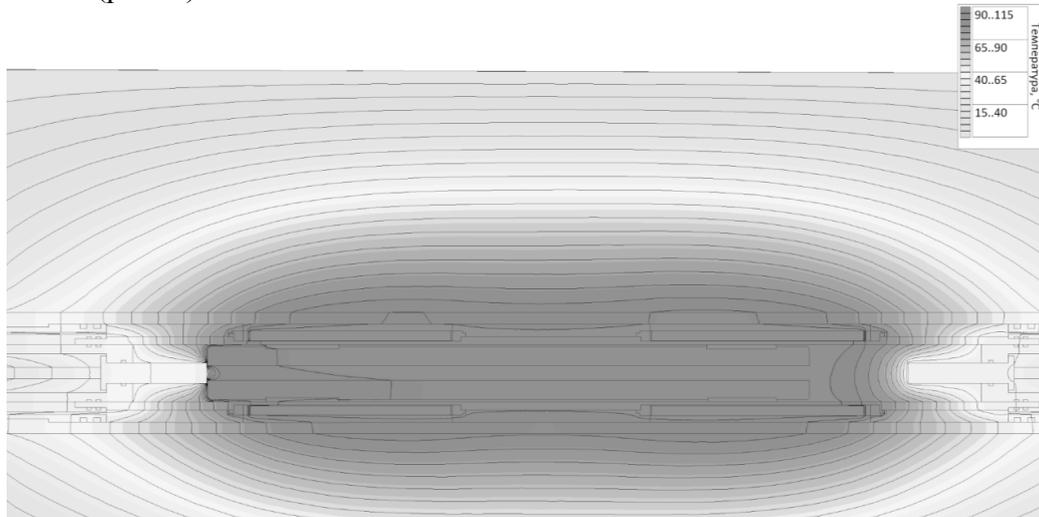


Рис. 4. Температурная карта молота при заполнении пространства между катушками и корпусом компаундом «Силагерм-2113», а остальных полостей – трансформаторным маслом

Температура катушек молота при использовании комбинированной технологии заполнения составляет 115 °С. Расчет коэффициента эффективности охлаждения:

$$K_1 = \frac{T_A}{T_i} = \frac{197}{115} \approx 1,71. \quad (10)$$

Температура корпуса молота в зоне расположения катушек составляет 110 °С. Расчет коэффициента передачи тепла корпусу от катушек:

$$K_2 = \frac{T_i}{T_C} = \frac{115}{110} \approx 1,05. \quad (11)$$

Активное охлаждение катушек реализовано методом создания принудительной циркуляции масла через контур с внешним радиатором (рис. 5).

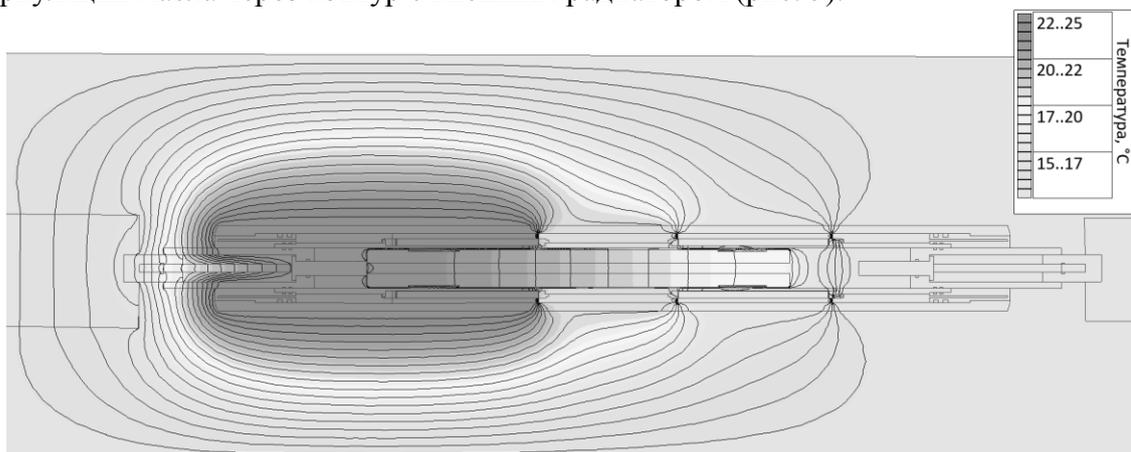


Рис. 5. Температурная карта молота при активном охлаждении катушек

Максимальная температура катушек молота при активном масляном охлаждении составляет 24 °С. Расчет коэффициента эффективности охлаждения:

$$K_1 = \frac{T_A}{T_i} = \frac{197}{24} \approx 8,21. \quad (12)$$

Температура корпуса молота в зоне расположения катушек составляет 23 °С. Расчет коэффициента передачи тепла корпусу от катушек:

$$K_2 = \frac{T_i}{T_c} = \frac{24}{23} \approx 1,04. \quad (13)$$

Результаты моделирования обобщены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнение эффективности систем охлаждения катушек  
электромагнитного молота**

Охлаждающая среда	Температура катушек по результатам моделирования, °С	Коэффициент эффективности охлаждения	Коэффициент передачи тепла корпусу от катушек
Воздух	197	1	2,07
Трансформаторное масло	150	1,31	1,44
Комбинированная, компаунд и трансформаторное масло	115	1,71	1,05
Принудительная циркуляция трансформаторного масла	24	8,21	1,04

#### *Выводы*

Анализ результатов теплового моделирования электромагнитного молота показал высокую эффективность активного масляного охлаждения катушек с принудительной циркуляцией: коэффициент эффективности охлаждения составил 8,21, температура катушек в номинальном режиме работы не превышает 24 °С при температуре корпуса 23 °С. При невозможности организации циркуляции масла наиболее целесообразным вариантом является использование компаунда «Силагерм-2113» с заполнением остальных полостей молота трансформаторным маслом. Такая конструкция обеспечивает температуру катушек не более 115 °С при температуре корпуса 110 °С. Эта особенность позволяет эффективно использовать охлаждающую способность среды, в которую помещен молот.

#### **Список литературы**

1. Газизов А.А., 2002. *Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки*. Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 639 с.
2. Sheng J. J., Leonhardt B. and Azri N., 2015. Status of polymer-flooding technology, *J. Can. Petr. Technol.*, Vol. 54, Issue 2, P. 116 – 126.
3. Bera A. and Babadagli T., 2015. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: *A review, Applied Energy*, Vol. 151, P. 206 – 226.
4. Delamaide E., Bazin B., Rousseau D. and Degre G., 2014. Chemical EOR for heavy oil: The Canadian experience, *SPE EOR Conference at oil and gas West Asia 2014: Driving integrated and innovative EOR*, P. 566 – 596.
5. Esmaeilzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z., Bahramian A. and Norouzbeigi R., 2015. 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. Nat. Gas Sci. Eng.*, Vol. 26, P. 1294 – 1303.

6. Дыбленко В.П., Марчуков Е.Ю., Туфанов И.А. и др., 2012. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами. Москва: РЕАН, 344 с.
7. Li Y., Shan H. and Huang S., 2018. Study on failure evolution process of fractured rock specimen under axial force. *Proceedings - 10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2018*, vol. 2018-January, P. 387–390.
8. Al-Rawashdeh A.Y. and Pavlov V.E., 2024. Study of operating modes of electromagnetic hammer with adjustable impact energy and blow frequency. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Mar., vol. 15, no. 1, p. 64.
9. Wróblewski A., Krot P., Zimroz R., Mayer T. and Peltola J., 2023. Review of linear electric motor hammers—an energy-saving and eco-friendly solution in industry, *Energies*, Jan., vol. 16, no. 2, P. 959.
10. Бессонов Л.А., 2016. *Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров*. 12-е изд., исправ. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 701 с.
11. Karimi G., Bhattacharya S., Gould R., Tremelling D., 2014. Thermomagnetic liquid cooling: A novel electric machine thermal management solution. *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. URL: <https://www.proceedings.com/content/024/024070webtoc.pdf> (дата обращения 2.03.2025)
12. 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.
13. David M., 2015. *Finite Element Method Magnetics: User Manual*, 160 p. URL: <https://pdfslide.us/documents/finite-element-method-magnetics.html> (дата обращения 5.03.2025)

## References

1. Gazizov A.A., 2002. Uvelichenie nefteotdachi neodnorodnykh plastov na pozdnei stadii razrabotki [Increased oil recovery of heterogeneous formations at a late stage of development]. Moscow: ООО "Nedra-Biznestsentr", 639 p.
2. Sheng J. J., Leonhardt B. and Azri N., 2015. Status of polymer-flooding technology, *J. Can. Petr. Technol.*, Vol. 54, Issue 2, P. 116 – 126.
3. Bera A. and Babadagli T., 2015. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: *A review, Applied Energy*, Vol. 151, P. 206 – 226.
4. Delamaide E., Bazin B., Rousseau D. and Degre G., 2014. Chemical EOR for heavy oil: The Canadian experience, *SPE EOR Conference at oil and gas West Asia 2014: Driving integrated and innovative EOR*, P. 566 – 596.
5. Esmailzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z., Bahramian A. and Norouzbeigi R., 2015. 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. Nat. Gas Sci. Eng.*, Vol. 26, P. 1294 – 1303.
6. Dyblenko V.P., Marchukov E.Yu., Tufanov I.A. i dr., 2012. Volnovye tekhnologii i ikh ispol'zovanie pri razrabotke mestorozhdenii nefti s trudnoizvlekaemymi zapasami [Wave technologies and their use in the development of oil fields with hard-to-recover reserves]. Moscow: REAN, 344 p.
7. Li Y., Shan H. and Huang S., 2018. Study on failure evolution process of fractured rock specimen under axial force. *Proceedings - 10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA 2018*, vol. 2018-January, P. 387–390.

8. Al-Rawashdeh A.Y. and Pavlov V.E., 2024. Study of operating modes of electromagnetic hammer with adjustable impact energy and blow frequency. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Mar., vol. 15, no. 1, p. 64.

9. Wróblewski A., Krot P., Zimroz R., Mayer T., and Peltola J., 2023. Review of linear electric motor hammers—an energy-saving and eco-friendly solution in industry, *Energies*, Jan., vol. 16, no. 2, P. 959.

10. Bessonov L.A., 2016. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi: uchebnik dlya bakalavrov [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits: a textbook for bachelors]. 12-e izd., isprav. i dop. Moscow: Izdatel'stvo Yurait, 701 p.

11. Karimi G., Bhattacharya S., Gould R. Tremelling D., 2014. Thermomagnetic liquid cooling: A novel electric machine thermal management solution. *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. URL: <https://www.proceedings.com/content/024/024070webtoc.pdf> (data obrashcheniya 2.03.2025)

12. Pat. 2642199 Rossiiskaya Federatsiya, MPK E21V23/01 (2006.01). Skvazhinnyi seismoistochnik [Borehole seismic source] / B.F. Simonov, Yu.V. Pogarskii, A.O. Kordubailo, Yu.A. Lebedev; zayavitel' i patentoobladatel' PAO "SilenSeismoimpul's"; zayavl. 19.04.2017; opubl. 24.01.2018; Byul. № 3, 11 p.

13. David M., 2015. *Finite Element Method Magnetics: User Manual*, 160 p. URL: <https://pdfslide.us/documents/finite-element-method-magnetics.html> (data obrashcheniya 5.03.2025)