

ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ СО СКВОЗНЫМ ОСЕВЫМ КАНАЛОМ

В. Ю. Нейман¹, Л. А. Нейман¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Для расширения функциональных возможностей при проведении работ в горной и строительной отраслях развитие получили электромагнитные машины ударного действия, снабженные сквозными осевыми каналами для забора и транспортировки проб горной породы и строительного материала, а также для погружения в грунт с помощью удара длинных продольно неустойчивых стержней. В работе рассматривается влияние размеров осевого канала на существующий диапазон экстремальных соотношений основных геометрических размеров электромагнитной машины ударного действия, удовлетворяющих критерию минимальной массы объема ее активных материалов. Исследования проведены с использованием численного расчета магнитного поля с применением программного пакета FEMM (Finite Element Method Magnetism) методом конечных элементов. Результаты численного расчета магнитного поля в активном объеме электромагнитной машины представлены в виде графических зависимостей, проведен их анализ и получены рекомендации. Поиск экстремальных значений соотношений основных размеров выполнен методом рационализированного перебора с применением полиномиальной регрессии. На основании анализа, исходя из минимума объема и массы активных материалов, получены области оптимальных соотношений геометрических размеров электромагнитной машины в зависимости от соотношения размеров диаметров сквозного канала и полого бойка. Предложена методика проведения предварительного расчета основных геометрических размеров электромагнитной машины, снабженной по всей длине сквозным осевым каналом, удовлетворяющая критерию минимального объема активных материалов. Рекомендованные соотношения основных геометрических размеров позволяют уменьшить расход активных материалов однокатушечных электромагнитных машин ударного действия, снабженных сквозными каналами, без ущерба для их рабочих характеристик.

Ключевые слова: электромагнитная машина ударного действия, ударный узел, сквозной осевой канал, показатель экономичности, объем активных материалов, полезная работа, оптимальные размеры, численный расчет, магнитное поле.

Для цитирования: Нейман В. Ю., Нейман Л. А. Выбор основных размеров электромагнитной машины ударного действия со сквозным осевым каналом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 38–51. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_38.

Selection of the main dimensions of the electromagnetic impact machine with a through axial channel

V. Yu. Neyman¹, L. A. Neyman¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: Electromagnetic impact machines with through axial channels used for sampling and transporting samples of rock and building materials and providing immersion in the ground of long longitudinally unstable rods expand the possibilities of working in the mining and construction industries. The paper considers the influence of the dimensions of the axial channel of an impact electromagnetic machine on the existing range of extreme ratios of its main geometric dimensions that satisfy the criterion of the minimum mass of the volume of active materials. The studies are carried out using the numerical calculation of the magnetic field by the finite element method using the FEMM (Finite Element Method Magnetics) software package. The results of the numerical calculation of the magnetic field in the active volume of an electromagnetic machine are presented in the form of graphical dependencies. Their analysis makes it possible to obtain the recommendations on the value of the ratios of the main geometric dimensions. The search for the extreme values of the ratios of the main dimensions is carried out by the method of rationalized enumeration using polynomial regression. The ranges of optimal ratios of the geometrical dimensions of an electromagnetic machine depending on the ratio between the through channel and hollow striker diameters are obtained with respect to minimum volume and mass of active materials. The method of preliminary calculation of the main geometrical dimensions of an electromagnetic machine with the through axial channel satisfying the criterion of minimum volume of active materials is proposed. The recommended relations of the main geometrical dimensions give possibility to reduce the consumption of the active materials of single-coil impact electromagnetic machines with the through channels saving their operating characteristics.

Key words: impact electromagnetic machine, impact unit, through axial channel, efficiency indicator, volume of active materials, useful work, optimal dimensions, numerical calculation, magnetic field.

Forcitation: Neyman V. Yu., Neyman L. A. Selection of the main dimensions of the electromagnetic impact machine with a through axial channel. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):38–51. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_38.

1. Введение

Для интенсификации технологических процессов в горнодобывающей и строительной отрасли применяется широкий класс циклических ударных и виброударных устройств [1–3].

Данные устройства генерируют силовые импульсы, которые в виде ударной нагрузки передаются в разрушаемую или деформируемую ими среду с помощью рабочего инструмента [4, 5].

Ударное воздействие является наиболее распространенным безвзрывным способом разрушения горных пород и строительных материалов различной степени крепости [6–8].

Генерация ударных силовых импульсов возникает вследствие возвратно-поступательного движения ударной

массы и ее циклических взаимодействий с рабочим инструментом [9, 10].

В совокупности устройство для возбуждения ударных силовых импульсов и рабочий инструмент, передающий полезную энергию в обрабатываемую среду в процессе выполнения продольного удара, образуют циклическую ударную систему.

Большой объем в горном деле и строительстве занимают работы с энергией удара до 100 Дж, связанные с отборами проб в горных выработках, бурением отверстий и шпуров в скальных породах и в конструкциях из строительных материалов, а также работы, связанные с разрушением гранита, бетона, кирпичной кладки, дорожных покрытий и т.п. [11, 12].

Возвратно-поступательное движение ударной массы и ее взаимодей-

ствии с рабочим инструментом может быть осуществлено с использованием различных энергоносителей [13, 14].

Вне зависимости от энергоносителей движение ударной массы обеспечивается совокупностью различной степени сложности последовательно взаимодействующих между собой механизмов, используемых для преобразования вида движения, а также синхронизации работы ударника и силовой установки [15–17].

Наличие промежуточных механизмов ухудшает весовые характеристики ударных и виброударных устройств, снижает надежность, удорожает стоимость изготовления и увеличивает дополнительные затраты на их обслуживание в процессе эксплуатации.

К наиболее перспективным в сегменте ударных устройств, относящихся к системам непосредственного привода, лишенным всех перечисленных выше недостатков, следует отнести ударные устройства, созданные на основе электромагнитных импульсных систем [18].

Использование в рассматриваемых системах в качестве энергоносителя электрической энергии, а в качестве движущей силы — преобразованной энергии электромагнитного поля, на практике показало высокую эффективность и востребованность применения в электроприводах ударного и ударно-вращательного электроинструмента [19, 20]. Отсутствие промежуточных механизмов для преобразования движения и минимальное количество подвижных элементов обеспечивают высокую надежность [21–23].

Многообразии разновидностей механизмов и устройств, реализованных на основе электромагнитных импульсных систем, определило их дальнейшее развитие как отдельного класса машин,

называемых электромагнитными машинами ударного действия.

Особый интерес представляет класс однокатушечных электромагнитных машин ударного действия с упругим реверсом ударной массы бойка [24, 25].

Конструктивные схемы таких машин позволяют регулировать в широких пределах частоту и энергию удара за счет изменения частоты и длительности следования импульсов питающего напряжения источника, в том числе промышленной частоты 50 Гц. Это значительно повышает возможности регулирования режимов работы электропривода.

Важной особенностью использования подобных конструктивных схем является принципиальная возможность снабжения электромагнитных машин сквозными осевыми каналами для технологического забора и транспортировки подвергнутого импульсному воздействию материала либо для погружения длинных продольно неустойчивых стержней в грунт, что расширяет их функциональные возможности [26, 27].

Сечения отверстий центральных сквозных каналов в конструктивных схемах электромагнитных машин соизмеримы с сечениями полых бойков, находящихся на одной оси с каналами.

В существующих методиках проектирования основным геометрическим размером, с нахождения которого начинается предварительный расчет электромагнитной машины со сквозным каналом, является диаметр бойка. Для его определения П. С. Туровский и А. В. Фролов в своей монографии «Расчет, конструирование и создание электромагнитных генераторов силовых импульсов», изданной в 1984 г., предложили использование обобщенной экспериментальной зависимости, связывающей энергию удара

с внешним диаметром полого бойка. Здесь же авторами приводятся данные по выбору сечения полого бойка, обеспечивающего по интервалам заданное значение энергии удара в соответствии с диапазонами ее изменения.

Однако влияние размеров сквозного канала и связанного с сечением канала диапазона экстремальных значений соотношений геометрических размеров магнитопровода электромагнитной машины в настоящее время до конца не изучено.

Имеющие место в современной литературе рекомендации по предварительному расчету конструкций подобных электроприводов, как правило, ограничены только выбором сечения осевого канала.

Наличие экстремальных значений соотношений геометрических размеров для цилиндрических магнитных систем со сквозным осевым каналом и с образованной в неподвижной части магнитопровода опорной поверхностью впервые рассмотрено в работе [28].

В настоящих исследованиях предлагается методика проведения предварительного расчета основных геометрических размеров однокатушечной электромагнитной машины ударного действия, снабженной сквозным осевым каналом, удовлетворяющая критерию минимального объема активных материалов.

2. Объект и предмет исследований

В качестве объекта исследований рассматривается конструкция ударного узла, выполненная на основе однокатушечной электромагнитной машины по схеме с упругим реверсом бойка и снабженная сквозным осевым каналом (рис. 1) [29].

Возвратно-поступательные движения полого бойка 1 возникают в результате его взаимодействия с пульсирую-

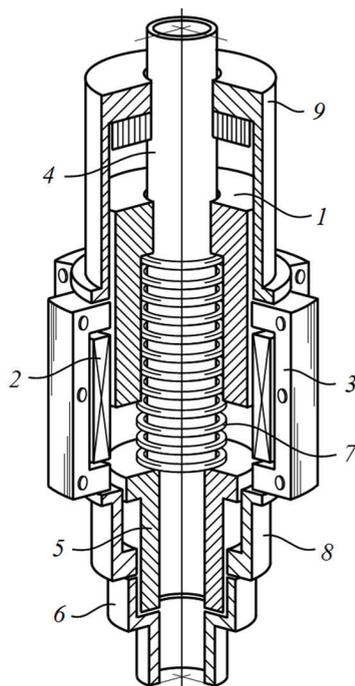


Рис. 1. Ударный узел однокатушечной электромагнитной машины со сквозным осевым каналом: 1 — полый боек; 2 — катушка намагничивания; 3 — неподвижный стальной магнитопровод; 4 — направляющая втулка с образованным по всей длине каналом; 5 — ударник; 6 — соединительная муфта; 7 — возвратная пружина; 8, 9 — элементы корпуса

Fig. 1. Impact unit of a single-coil electromagnetic machine with a through axial channel: 1 — hollow striker; 2 — magnetization coil; 3 — fixed steel magnetic core; 4 — guide sleeve with a channel formed along the entire length; 5 — drummer; 6 — coupling; 7 — return spring; 8, 9 — body elements

щим магнитным полем, созданным током намагничивающей катушки 2, установленной внутри неподвижного стального магнитопровода 3. Боек 1, двигаясь по направляющей втулке 4, через ударник 5, взаимодействует с ударным инструментом, крепление которого осуществляется при помощи соединительной муфты 6. Возврат полого бойка в исходное состояние

выполняется за счет потенциальной энергии упругих сил возвратной пружины 7. Для крепления и защиты ударного узла от внешних воздействий используются элементы корпуса 8 и 9.

Время возврата бойка и длительность времени полного рабочего цикла определяются упругими свойствами пружины. С увеличением жесткости пружины время возврата бойка сокращается, при этом энергия удара заметно снижается.

Неподвижный стальной магнитопровод 3 собран из отдельных пакетов, состоящих из скрепленных между собой П-образных листов электротехнической стали.

Амплитуда, длительность и частота импульсов питающего тока задаются схемой управления, которая получает питание от внешнего источника энергии. Источником энергии может выступать любой автономный источник постоянного или переменного напряжения либо промышленная сеть.

Наиболее простой вариант управления может быть реализован при питании катушки от однофазного промышленного источника напряжения частотой 50 Гц по однополупериодной схеме выпрямления. В таком случае частота ударов бойка не меняется и составляет $n_{уд} = 1500$ уд/мин.

Расчетная схема однокатушечной электромагнитной машины (рис. 1) с обозначениями ее размеров приведена на рис. 2. В расчетной схеме отдельные пакеты магнитопроводов заменены одним эквивалентным по сечению цилиндрическим магнитопроводом с внутренним диаметром d_2 и внешним диаметром d_3 . Длина бойка принимается из расчета $l_6 = l_k + 2h_{п}$.

Предметом проводимых исследований является анализ влияния размеров сечения осевого канала на существующий диапазон экстремальных значе-

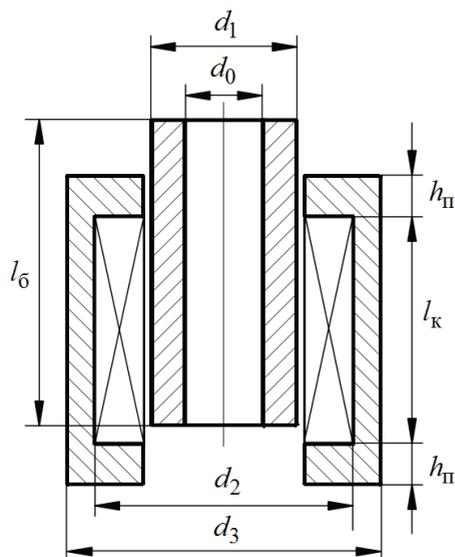


Рис. 2. Расчетная схема однокатушечной электромагнитной машины: d_0 – внутренний диаметр полого бойка; d_1 – внешний диаметр полого бойка; d_2 – внутренний диаметр магнитопровода; d_3 – внешний диаметр магнитопровода; $h_{п}$ – высота полюса; l_k – длина катушки; l_6 – длина бойка

Fig. 2. Calculation scheme of a single-coil electromagnetic machine: d_0 – inner diameter of the hollow striker; d_1 – outer diameter of the hollow striker; d_2 – inner diameter of the magnetic circuit; d_3 – is the outer diameter of the magnetic circuit; h_p – is the height of the pole; l_c – coil length; l_s – the length of the striker

ний соотношений основных размеров однокатушечной электромагнитной машины, удовлетворяющих критерию максимальной полезной работы в занятом активном объеме ударного узла.

Для обозначенной во введении области применения электромагнитной машины ее основные размеры целесообразно выбирать таким образом, чтобы механическая работа в существующем объеме активных материалов была максимальной.

В первом приближении за основу выбора соотношений между основными размерами можно принять показатель экономичности, определяемый в виде отношения суммарной массы объема активных материалов к полезной механической работе за полный цикл работы

$$D(x, y) = \frac{M_{\text{эм}}}{A_{\text{п}}},$$

где $M_{\text{эм}}$ — суммарная масса активного объема, включающая массу стального магнитопровода и меди намагничивающей катушки, кг; $A_{\text{п}}$ — полезная механическая работа на интервале перемещения бойка, Дж.

Масса всего объема активных материалов

$$M_{\text{эм}} = k_3 V_{\text{м}} \gamma_{\text{м}} + V_{\text{ст}} \gamma_{\text{ст}},$$

где $V_{\text{м}}$, $V_{\text{ст}}$ — объем меди намагничивающей катушки и стали магнитопровода, включая объем бойка, м³; $\gamma_{\text{м}}$, $\gamma_{\text{ст}}$ — удельный вес меди и стали кг/м³; k_3 — коэффициент заполнения обмоточного пространства катушки.

Полезная работа $A_{\text{п}}$ определяется как площадь, ограниченная кривой тяговой характеристики и осью абсцисс на интервале перемещения полого бойка.

3. Методика и результаты исследований

Полагаем, что электромагнитная сила, действующая на боек, является функцией безразмерных величин (рис. 2) [28]

$$x = \frac{d_1 - d_0}{d_2 - d_0}, \quad y = \frac{l_{\text{к}}}{d_2 - d_0}.$$

Условимся, что значения x и y , соответствующие наименьшему значению показателя экономичности $D(x, y)$, являются оптимальными.

При проведении численного эксперимента принимаем следующие допущения. Сечение стали вдоль длины магнитопровода считается постоянным. Ток в катушке намагничивания сохраняется неизменным на всем интервале перемещения бойка. Средняя температура перегрева катушки намагничивания не превышает $\tau = 70^\circ\text{C}$. Теплоотвод осуществляется только с наружной и внутренней поверхностей катушки, охлаждением с торцов пренебрегаем. Температуру окружающей среды принимаем равной $t_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$.

Экстремальные значения величин x и y получим методом рационализованного перебора с применением одномерной полиномиальной регрессии для представления результатов численного эксперимента.

Оценка влияния на экономичность $D(x, y)$ размеров сечения осевого канала по отношению к сечению полого бойка с учетом найденных экстремальных значений величин x и y рассматривалось через отношение диаметров в виде $z = d_0/d_1$ (рис. 2).

Оценка влияния размеров сечения осевого канала по отношению к сечению полого бойка с учетом найденных экстремальных значений величин для x и y рассматривалось через отношение диаметров в виде $z = d_0/d_1$ (рис. 2).

Расчет статической тяговой характеристики для фиксированных перемещений бойка выполнялся с помощью моделирования магнитного поля в программе FEMM [30–32].

В качестве примера на рис. 3 приведена геометрическая структура в виде расчетной области модели в программе FEMM и качественная картина распределения линий поля для двух значений величин x при фиксированных значениях y ($y = \text{const}$).

По результатам многочисленных расчетов и их обработки на рис. 4

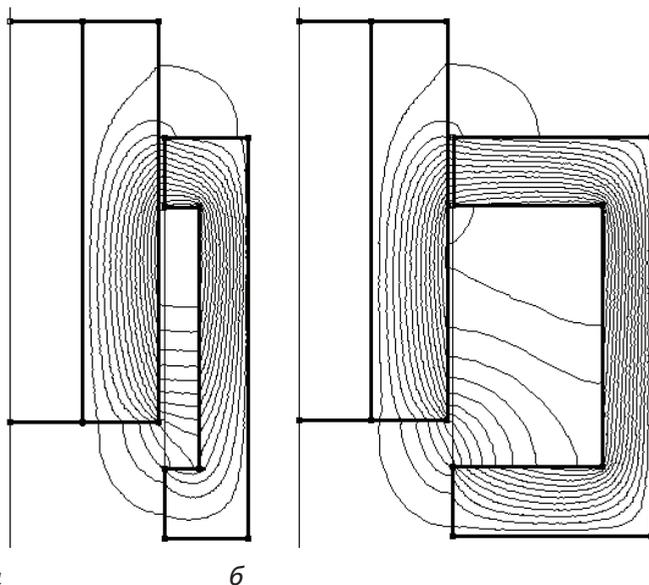


Рис. 3 Расчетная область модели в программе FEMM для $z = 0,5$: а – $x = 0,65$; б – $x = 0,25$
 Fig. 3 Computational area of the model in the FEMM program for $z = 0,5$: а – $x = 0,65$; б – $x = 0,25$

приведены зависимости показателя экономичности для некоторых значений размеров сечений осевого канала по отношению к размеру сечения полого бойка.

Зависимости (рис. 4) указывают на наличие явно выраженного минимума относительно безразмерной величины x . Выраженные минимумы отличаются между собой и зависят от отношения диаметров $z = d_0/d_1$.

Следовательно, в зависимости от того или иного размера сечения осевого канала по отношению к сечению полого бойка следует выбирать соответствующие значения для $x = \frac{d_1 - d_0}{d_2 - d_0}$,

удовлетворяющие минимальному расходу активных материалов.

По результатам численного эксперимента на рис. 5 представлена область рекомендованных оптимальных значений величин x для установленных на этапе предварительного расчета значений отношения диаметров $z = d_0/d_1$.

Так, например, при отношении диаметров $z = 0,4$ минимальный объем активных материалов будет находиться в диапазоне рекомендованных значений величин $x = 0,39...0,45$ (рис. 5).

Явно выраженного минимума добротности $D(x, y)$ в отношении величины y при фиксации величины $x = \text{const}$ в исследованиях не наблюдалось.

Полученные результаты существенно не отличаются от рекомендованных в [28] значений относительных размеров диаметров сквозного канала, рассмотренного для цилиндрических магнитных систем с опорной поверхностью, образованной на неподвижной части магнитопровода. Отличия наблюдаются только в абсолютных расчетных значениях показателя добротности

$$D(x, y).$$

Таким образом, в процессе предварительного расчета, исходя из величины диаметров полого бойка d_1 и диаметра осевого канала d_0 , устанавли-

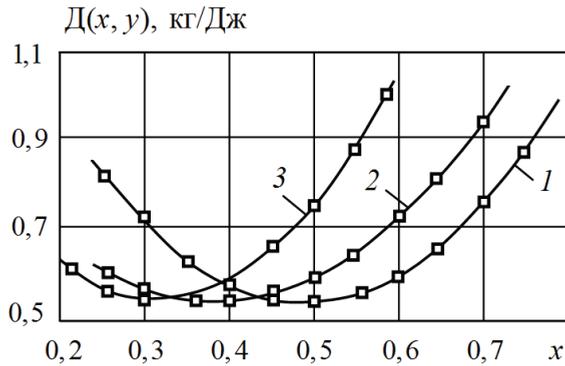


Рис. 4. Зависимости показателя экономичности для различных размеров осевого канала (1 – $z = 0,2$; 2 – $z = 0,5$; 3 – $z = 0,8$)

Fig. 4. Dependences of the economic index for various sizes of the axial channel (1 – $z = 0,2$; 2 – $z = 0,5$; 3 – $z = 0,8$)

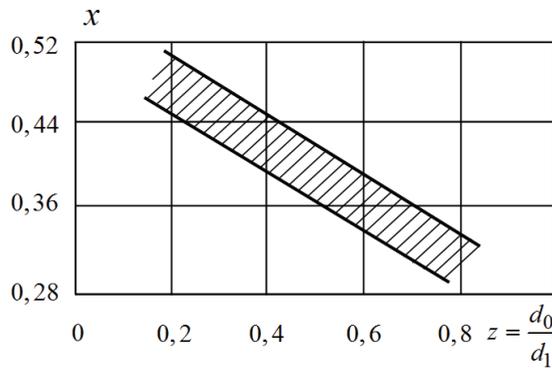


Рис. 5. Область оптимальных значений величин для x

Fig. 5. The area of optimal values for x

ливается отношение их диаметров $z = d_0/d_1$. Затем по зависимости на рис. 5, исходя из области рекомендованных значений, устанавливается величина x и рассчитывается основной размер диаметра d_2 (рис. 3)

$$d_2 = \frac{d_1 - d_0}{x} + d_0.$$

Из требования постоянства площади сечения магнитопровода определяется диаметр d_3 (рис. 3) по следующему соотношению

$$d_3 = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 - d_0^2}.$$

Исходя из равенства сечения стального магнитопровода и полого бойка (рис. 3) рассчитывается высота полюса

$$h_{\text{п}} = \frac{d_1}{4} \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 \right].$$

Переход от цилиндрического магнитопровода к отдельным пакетам из электротехнической стали выполняется, исходя из равенства сечений, с сохранением основного размера диаметра d_2 .

При сохранении высоты полюса $h_{\text{п}}$ через эквивалентные сечения рассчи-

тывается толщина стального пакета и их количество.

Выводы

В сегменте ударных устройств, созданных на основе электромагнитных машин ударного действия, снабженных сквозными осевыми каналами, характерно наличие экстремальных значений соотношений основных геометрических размеров, удовлетворяющих критерию минимального объема активных материалов.

Для указанной области применения однокатушечных электромагнитных ударных машин выбор их основных

размеров целесообразно производить таким образом, чтобы отношение массы активных материалов к совершаемой полезной работе было минимальным.

Полученная область рекомендованных оптимальных значений величин

для $x = \frac{d_1 - d_0}{d_2 - d_0}$ в зависимости от раз-

меров сквозного канала в виде отношения диаметров $z = d_0/d_1$ позволяет снизить расход активных материалов и уменьшить массу электромагнитного ударного узла при сохранении полезной работы и энергии удара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Н. Н., Ределин Р. А., Кравченко В. А., Каманин Ю. Н., Андреев А. В. Оценка взаимосвязи параметров гидравлического ударного устройства и его привода // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2020. — № 2. — С. 211 — 218. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-211-217.
2. Жабин А. Б., Керимов З. Э. Анализ результатов исследований машин ударного действия // Горное оборудование и электромеханика. — 2020. — № 3(149). — С. 49 — 54. DOI 10.26730/1816-4528-2020-3-49-54.
3. Ураимов М. У., Еремьянц В. Э. Гидравлический перфоратор с совмещенным ударным механизмом и механизмом поворота инструмента // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2021. — № 10. — С. 56 — 62. DOI: 10.26160/2658-3305-2021-10-56-62.
4. Ямпольский Д. З. Некоторые особенности ударных импульсов машин ударного действия // Вестник научно-технического развития. — 2020. — № 4 (152). — С. 26 — 42. DOI: 10.18411/vntr2020-152-4.
5. Abramenzov D. E., Popov N. A., Abramenzov E. A. Methodology for evaluating energysaving technical solutions of impact machines and equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference Transport of Siberia. 2020, art. 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012134.
6. Aldannawy H., Rouabhi A., Gerbaud L. Percussive drilling: Experimental and numerical investigations // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2022, vol. 55, no. 3, pp. 1555 — 1570. DOI: 10.1007/s00603-021-02707-5.
7. Жабин А. Б., Лавит И. М., Керимов З. Э. Результаты исследований взаимодействия бойка и инструмента при ударном разрушении горных пород // Горное оборудование и электромеханика. — 2021. — № 3(155). — С. 48 — 53. DOI 10.26730/1816-4528-2021-3-48-53.
8. 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. DOI: 10.33619/2414-2948/42/31.
9. Gumenyuk V., Dobroborsky B., Gumenyuk O., Krupyshev M. Providing high speed drilling of boreholes with portable pneumatic rock drills in emergency situations // IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 666, art. 012094. DOI:10.1088/1757-899X/666/1/012094.

10. Немков С. А., Дроздов А. Н., Степанов В. В. Модель работы компрессионно-вакуумного ударного механизма электрического перфоратора SDSPLUS // Механизация строительства. — 2016. — Т. 77. — № 11. — С. 46–49.

11. Жуков И. А. Новые виды бурового инструмента для разрушения горных пород // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2021. — № 11. — С. 35–39. DOI 10.26160/2658-3305-2021-11-35-39.

12. Ижбулдин Е. А., Абрамов А. Д. Ручной электрический ударный инструмент для реализации виброударных технологий в транспортном машиностроении и строительстве // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2017. — Т. 21. — № 1 (120). — С. 32–39. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-32-41.

13. Galdin N. S., Semenova I. A., Galdin V. N. Analysis of the striker stroke impact on the hydropneumatic impact devices energy performance // Journal of Physics. Conference Series. 2019, vol. 1260, no. 11, article 112010. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/11/112010.

14. Redelin R. A., Kamanin Y. N., Panichkin A. V. Designing hydraulic impact devices for low-temperature operation // Journal of Physics. Conference Series. 2021, vol. 2096, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012005.

15. Rempel D., Antonucci A., Barr A., Cooper M. R., Martin B., Neitzel R. L. Pneumatic rock drill vs. electric rotary hammer drill: Productivity, vibration, dust, and noise when drilling 199 into concrete // Applied ergonomics. 2019, vol. 74, pp. 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.005>.

16. Червов В. В., Тищенко И. В., Червов А. В. Создание физической модели генератора ударных импульсов и высокочастотного пневматического молота // Горный журнал. — 2022. — № 2. — С. 57–62. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.09.

17. Gorodilov L. V., Pershin A. I. Simulation model of a hydro-impact system with two limiters of striker movement // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2022, vol. 991, no. 1, article 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012037.

18. Neiman L. A., Neiman V. Yu., Shabanov A. S. A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive // Russian Electrical Engineering. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 757–760. DOI: 10.3103/S1068371214120104.

19. Едыгенов Е. К., Васин К. А. Результаты испытаний электромагнитного молота для безвзрывного разрушения горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 5. — С. 80–90. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-80-90.

20. Павлов В. Е. Исследование режимов работы длинноходового электромагнитного молота методом компьютерного моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2019. — Т. 23. — № 2 (145). — С. 260–270. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-260-270.

21. Ефимова Ю. Б. Выбор рациональных геометрических параметров линейного электромагнитного пресса с малым ходом плунжера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12–2. — С. 115–128. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_115.

22. Ануфриев А. С., Певчев В. П. Моделирование процесса соударения якоря с индуктором в импульсном электромагнитном сейсмоисточнике // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2018. — № 2 (58). — С. 101–109.

23. Симонов Б. Ф., Нейман В. Ю., Нейман Л. А., Кордубайло А. О. Имитационное моделирование рабочего процесса электромагнитного привода скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 3. — С. 120–130. DOI: 10.15372/FTPPI20200312.

24. Neiman V. Yu. Dynamic energy transformation of linear electromagnetic machines with preliminary magnetic-energy storage // Russian Electrical Engineering. 2003, vol. 74, no. 2, pp. 41–47.

25. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Complex analysis of electromagnetic machines for vibro-impact technologies // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 87, art. 032026. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032026.

26. Усанов К. М., Каргин В. А., Волгин А. В., Моисеев А. П. Оценка режимов работы электромагнитных ударных машин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2020. — № 10(192). — С. 137–142.

27. Каргин В. А., Волгин А. В., Моисеев А. П., Чурляева К. Д., Белов В. В. Использование электромагнитной ударной машины для погружения в грунт металлических стержневых элементов // Известия Международной академии аграрного образования. — 2019. — № 44. — С. 11–17.

28. Нейман В. Ю. К выбору основных геометрических размеров электромагнитного привода со сквозным осевым каналом // Электротехника : науч.-техн. журн. — 2022. — № 5. — С. 8–12. DOI 10.53891/00135860_2022_5_8.

29. Нейман Л. А., Нейман В. Ю. Динамическая модель работы электромагнитного ударного механизма электрического перфоратора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12–2. — С. 190–202. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_190.

30. Nazaruddin N., Siallagan R. Software Engineering Development of Finite Element Method Programming Applications in 2D Frame Structures Using Python Programs // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 2049, art. 012031. DOI:10.1088/1742-6596/2049/1/012031.

31. Крутиков К. К., Рожков В. В. Особенности моделирования электрического и магнитного поверхностного эффекта от переменных электромагнитных полей в FEMM // Электричество. — 2020. — № 8. — С. 51–57. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-51-57. 29.

32. Shevchenko V. P., Babiychuk O. B., Boltentkov V. O. Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex // Applied aspects of information technology. 2019, vol. 2(4), pp. 317–327. **ТАБ**

REFERENCES

1. Volkov N. N., Redelin R. A., Kravchenko V. A., Kamanin Yu. N., Andreev A. V. Evaluation of the relationship between the parameters of the hydraulic percussion device and its drive. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020, no. 2, pp. 211–218. [In Russ]. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-211-217.

2. Zhabin A. B., Kerimov Z. E. Analysis of the research results of impact machines. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2020, no. 3(149), pp. 49–54. [In Russ]. DOI 10.26730/1816-4528-2020-3-49-54.

3. Uraimov M. U., Erem'yanc V. E. Hydraulic hammer drill with combined impact mechanism and tool rotation mechanism. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie:*

nauka i proizvodstvo. 2021, no. 10, pp. 56–62. [In Russ]. DOI: 10.26160/2658-3305-2021-10-56-62.

4. Yampol'skij D. Z. Some features of shock impulses of impact machines. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*. 2020, no. 4 (152), pp. 26–42. [In Russ]. DOI: 10.18411/vntr2020-152-4.

5. Abramenzkov D. E., Popov N. A., Abramenzkov E. A. Methodology for evaluating energy-saving technical solutions of impact machines and equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference Transport of Siberia*. 2020, art. 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012134.

6. Aldannawy H., Rouabhi A., Gerbaud L. Percussive drilling: Experimental and numerical investigations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55, no. 3, pp. 1555–1570. DOI: 10.1007/s00603-021-02707-5.

7. Zhabin A. B., Lavit I. M., Kerimov Z. E. Results of studies of the interaction of the striker and the tool during impact destruction of rocks. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2021, no. 3(155), pp. 48–53. [In Russ]. DOI 10.26730/1816-4528-2021-3-48-53.

8. Abidov A. O., Ismanov O. M. Mathematical model of an electromechanical rotary hammer drill. *Byulleten' nauki i praktiki*. 2019, vol. 5. no. 5, pp. 233–240. [In Russ]. DOI: 10.33619/2414-2948/42/31.

9. Gumenyuk V., Dobroborsky B., Gumenyuk O., Krupyshev M. Providing high speed drilling of boreholes with portable pneumatic rock drills in emergency situations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 666, art. 012094. DOI:10.1088/1757-899X/666/1/012094.

10. Nemkov S. A., Drozdov A. N., Stepanov V. V. Model of the operation of the compression-vacuum percussion mechanism of the SDSPLUS electric rock drill. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2016, vol. 77, no. 11, pp. 46–49. [In Russ].

11. Zhukov I. A. New types of drilling tools for rock destruction. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*. 2021, no. 11, pp. 35–39. [In Russ]. DOI 10.26160/2658-3305-2021-11-35-39.

12. Izhbuldin E. A., Abramov A. D. Hand-held electric percussion tool for the implementation of vibration shock technologies in transport engineering and construction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017, vol. 21, no. 1 (120), pp. 32–39. [In Russ]. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-32-41.

13. Galdin N. S., Semenova I. A., Galdin V. N. Analysis of the striker stroke impact on the hydropneumatic impact devices energy performance. *Journal of Physics. Conference Series*. 2019, vol. 1260, no. 11, article 112010. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/11/112010.

14. Redelin R. A., Kamanin Y. N., Panichkin A. V. Designing hydraulic impact devices for low-temperature operation. *Journal of Physics. Conference Series*. 2021, vol. 2096, no. 1, article 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012005.

15. Rempel D., Antonucci A., Barr A., Cooper M. R., Martin B., Neitzel R. L. Pneumatic rock drill vs. electric rotary hammer drill: Productivity, vibration, dust, and noise when drilling into concrete. *Applied ergonomics*. 2019, vol. 74, pp. 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.005>.

16. Chervov V. V., Tishchenko I. V., Chervov A. V. Creation of a physical model of a shock pulse generator and a high-frequency pneumatic hammer. *Gornyj zhurnal*. 2022, no. 2, pp. 57–62. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.09.

17. Gorodilov L. V., Pershin A. I. Simulation model of a hydro-impact system with two limiters of striker movement. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 991, no. 1, article 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012037.

18. Neiman L. A., Neiman V. Yu., Shabanov A. S. A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive. *Russian Electrical Engineering*. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 757–760. DOI: 10.3103/S1068371214120104.

19. Yedygenov Ye. K., Vasin K. A. Test data of electromagnetic hammer for non-explosive rock fracturing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 5, pp. 80–90. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-80-90.

20. Pavlov V. E. Investigation of the operating modes of a long-stroke electromagnetic hammer by computer simulation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019, vol. 23, no. 2 (145), pp. 260–270. [In Russ]. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-260-270.

21. Efimova Yu. B. Rational geometric parameters selection of a linear electromagnetic press with low plunger stroke. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12–2): 115–128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_115.

22. Anufriev A. S., Pevchev V. P. Modeling the Process of Collision of an Armature with an Inductor in a Pulsed Electromagnetic Seismic Source. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2018. no. 2 (58). pp. 101–109. [In Russ].

23. Simonov B. F., Kordubailo A. O., Neiman V. Y., Neiman L. A. Simulation modeling of operation of downhole vibration exciter em drive. *Journal of Mining Science*. 2020. vol. 56. no. 3. C. 435–444. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20200312.

24. Neiman V. Yu. Dynamic energy transformation of linear electromagnetic machines with preliminary magnetic-energy storage. *Russian Electrical Engineering*, 2003, vol. 74, no. 2, pp. 41–47.

25. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Complex analysis of electromagnetic machines for vibro-impact technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, art. 032026. DOI: 10.1088/1755–1315/87/3/032026.

26. Usanov K. M., Kargin V. A., Volgin A. V., Moiseev A. P. Assessment of operating modes of electromagnetic impact machines. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020, no. 10(192), pp. 137–142. [In Russ].

27. Kargin V. A., Volgin A. V., Moiseev A. P., CHurlyayeva K. D., Belov V. V. The use of an electromagnetic impact machine for immersing metal rod elements into the ground. *Izvestiya Mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2019, no. 44, pp. 11–17. [In Russ].

28. Neyman V. Y. Selection of the Ratios of Basic Dimensions of an Electromagnetic Drive with an Open-Ended Axial Channel. *Russian Electrical Engineering*. 2022, vol. 93, no. 5. pp. 290–293. [In Russ]. DOI 10.3103/S1068371222050108.

29. Neyman L. A., Neyman V. Yu. Dynamic model of the electromagnetic impact mechanism of the electric rock drill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022; (12–2): 190–202. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_190.

30. Nazaruiddin N., Siallagan R. Software Engineering Development of Finite Element Method Programming Applications in 2D Frame Structures Using Python Programs. *Journal of Physics: Conference Series.*, 2021, vol. 2049, art. 012031. DOI:10.1088/1742–6596/2049/1/012031.

31. Krutikov K. K., Rozhkov V. V. Features of modeling the electric and magnetic surface effect from alternating electromagnetic fields in FEMM. *Elektrichestvo*. 2020, no. 8, pp. 51–57. [In Russ]. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-8-51-57.

32. Shevchenko V. P., Babiychuk O. B., Boltenev V. O. Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex. *Applied aspects of information technology*. 2019, vol. 2(4), pp. 317–327.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нейман Владимир Юрьевич — докт. техн. наук, заведующий кафедрой, <http://orcid.org/0000-0002-8433-1610>, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, Россия, e-mail: nv.nstu@ngs.ru.

Нейман Людмила Андреевна — докт. техн. наук, профессор, <http://orcid.org/0000-0002-3442-6531>, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, Россия, e-mail: neyman31@gmail.com.

Для контактов: *Нейман Владимир Юрьевич*, e-mail: nv.nstu@ngs.ru.

Авторы заявляют о конфликте интересов при его наличии.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Neyman V. Yu., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department, <http://orcid.org/0000-0002-8433-1610>, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 20, Russia, e-mail: nv.nstu@ngs.ru.

Neyman L. A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, <http://orcid.org/0000-0002-3442-6531>, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 20, Russia, e-mail: neyman31@gmail.com.

For contacts: *Neyman V. Yu.*, e-mail: nv.nstu@ngs.ru.

The authors declare a conflict of interest if any.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 05.06.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 05.06.2023; accepted for printing 10.10.2023.

