ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin,2022;(12-2):70—86
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.65 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_70

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО И ТИПОРАЗМЕРНОГО РЯДОВ МАГНИТНЫХ ПЕРИСТАЛЬТИЧЕСКИХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

М.А. Васильева

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Эффективное транспортирование высококонцентрированных гидросмесей традиционными грунтовыми насосами весьма ограниченно из-за существующей нелинейной зависимости между КПД и концентрацией твердой фазы. Это обуславливает необходимость использования новых конструктивно-технологических решений — магнитных насосных агрегатов, в которых роль привода выполняет рабочая камера-канал, выполненная из магнитоактивного эластомера и реализующая принцип перистальтического транспортирования гидравлической смеси под воздействием магнитного активатора. Принимая во внимание специфику выполняемых операций по закладке и дозакладке выработанного пространства, обязательной является оценка итоговых энергетических характеристик создаваемого оборудования и исследование его влияния на соответствующие параметры всего комплекса оборудования. Выбор рабочих агрегатов, которыми оснащается комплекс оборудования, необходимо выполнять на основе двух равнозначных условий: эффективности технологического процесса закладки выработанного пространства и обеспечения принципа компактности оборудования. Это достигается применением оборудования минимальной мощности, достаточной для обеспечения требуемой производительности. В работе представлена методика разработки параметрического и типоразмерного ряда создаваемого оборудования. В качестве основных параметров оборудования приняты производительность насосного агрегата и потребляемая мощность. Полученный в результате расчетов ряд значений предпочтительной номинальной мощности секции магнитного активатора насосного агрегата рекомендуется к использованию при разработке проектно-конструкторской документации для создания мобильных закладочных комплексов.

Ключевые слова: высококонцентрированная гидросмесь, насосный агрегат, магнитный активатор, параметрический ряд, типоразмер, производительность, номинальная мощность, корреляционный анализ.

Благодарность: Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №19-79-10151.

Для цитирования: *Васильева М. А.* Обоснование параметрического и типоразмерного рядов магнитных перистальтических насосных агрегатов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-2. — С. 70—86. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_70.

Justification of parametric and dimensional series of magnetic peristaltic pump units

M.A. Vasilyeva

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

© М.А. Васильева. 2022

Abstract: Efficient transportation of highly concentrated mixtures by soil pumps is difficult due to the existing non-linear relationship between efficiency and solids concentration. This necessitates the use of new design and technological solutions — magnetic pumping units. In them, the role of the drive is performed by the working chamber-channel. It is made of a magnetically active elastomer and implements the principle of peristaltic transportation of the hydraulic mixture under the influence of a magnetic activator. Taking into account the specifics of the operations performed for backfilling the goaf, it is necessary to conduct studies of the energy parameters of the equipment. The selection of equipment should be carried out not only from the condition of ensuring the efficiency of the technological process of backfilling the mined-out space, while observing the principle of equipment compactness. The fulfillment of the last condition implies the use of equipment of the smallest permissible, in terms of performance, power. A technique for developing a parametric and standard size range of the equipment being created is presented. The performance of the pumping unit and power consumption are taken as the main parameters of the equipment. The range of values of the preferred nominal power of the section of the magnetic activator of the pump unit obtained as a result of the calculations is recommended for use in the development of design documentation for the creation of mobile stowing complexes.

Key words: highly concentrated slurry, pumping unit, magnetic activator, parametric series, standard size, performance, rated power, correlation analysis.

Acknowledgements: The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 19-79-10151.

For citation: Vasilyeva M. A. Justification of parametric and dimensional series of magnetic peristaltic pump units. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):70—86. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_70.

1. Введение

Транспортировка закладочного материала в выработанное пространство является важнейшим технологическим звеном в цепи процессов, связанных с добычей полезных ископаемых [1–3]. Эффективное транспортирование закладочных гидросмесей традиционными грунтовыми насосами ограничена из-за существующей нелинейной зависимости между коэффициентом полезного действия, концентрацией твердой фазы, а также коэффициентом кинематической вязкости [4–6]. Это обуславливает необходимость поиска новых конструктивно-технологических решений, применяемых при проектировании и изготовлении насосного оборудования для подачи в выработанное пространство гидросмеси с высоким содержанием твердой фракции [7–9].

Эффективность гидротранспортирования высококонцентрированных веществ, в том числе для заполнения выработанного пространства на объектах горного производства, во многом зависит от устойчивости режима движения гидросмеси [10–13]. Таким режимом является расчетный заданный режим, обеспечивающий поддержание рациональных параметров транспортирования [14–16]. Устойчивость режима определяется постоянством скорости движения гидросмеси и ее концентрации при условии сохранения требуемого гранулометрического состава наполнителя [17–19].

В разное время были предложены различные варианты конструкций насосных агрегатов, позволяющих транспортировать сильно сгущенные и высоковязкие вещества [20–22]. Идеи применения перистальтических насосов с магнитно-индукционным активатором предлагаются к использованию уже с 70-х годов прошлого столетия [23].

Новым подходом к транспортированию высококонцентрированных и пастообразных веществ является применение разработанного магнитного перистальтического насосного агрегата, конструкция которого сочетает в себе основные достоинства объемных насосов — низкие требования к обслуживанию и возможность работать с абразивными и агрессивными средами, а также обеспечивает необходимую активацию твердых частиц наполнителя на всем протяжении длины транспортирования [24]. Насосный агрегат защищен рядом патентных свидетельств [25,26].

Оборудование относится к перистальтическим насосам с электромагнитным приводом и предназначено для перекачивания высококонцентрированных, пастообразных веществ, а также хрупких жидкостей и гелей [27,28].

Основными элементами конструкции (рис. 1) являются охладители магнитного активатора *1;* источник электромагнитного поля — магнитный активатор *2*, состоящий из набора элементов; рабочая камера-канал *3*, изготовленная из магнитоактивного эластомера. Блок управления (на рис. 1 не показан) располагается дистанционно и может быть совмещен с комплектом контрольно-измерительной аппаратуры.

Насосный агрегат реализует принцип перистальтического транспортирования посредством перемещения волн локальной деформации рабочей камеры-канала (РКК), изготовленной из магнитоактивного эластомера, возникающих под воздействием управляющего импульса магнитного активатора [29–31]. При этом производительность насосной установки находится в прямой зависимости от рабочих характеристик магнитного активатора и определяется алгоритмом его работы. В зависимости от характеристик перекачиваемого вещества и объемов заполняемого выработанного пространства габариты рабочей камеры-канала и, как следствие, всего агрегата варьируются для достижения требуемого уровня производительности и энергоэффективности рабочего процесса [32–34].

2. Методика исследований

В качестве основных предпосылок для разработки параметрического

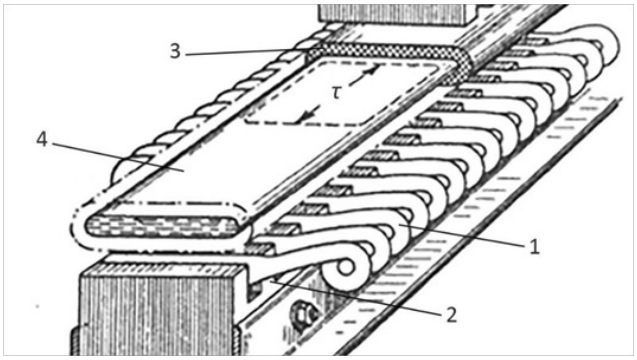

Рис. 1. Принципиальная конструкция магнитного насосного агрегата: 1 — охладитель,*2* — магнитный активатор (показан с выделенной обмоткой); *3* — рабочая камера-канал; *4* — поток гидросмеси, τ — участок взаимодействия с секцией магнитного активатора

Fig. 1. Principal design of the magnetic pumping unit: 1 — cooler,*2* — magnetic activator winding (shown with a selected winding); *3* — working chamber-channel; *4* — slurry flow; τ — the length of the section of interaction with the section of the magnetic activator

и типоразмерного рядов насосного агрегата использовались следующие известные положения, согласно ГОСТ 2.116–84, ГОСТ 16504–81:

1. Параметрический ряд — это упорядоченная совокупность числовых значений главного параметра машин одного или нескольких видов, которые обеспечивают минимум приведенных затрат в процессе производства и эксплуатации.

2. Параметрический ряд, дополненный основными параметрами машин, образует типоразмерный ряд.

Главными параметрами разрабатываемого оборудования выбраны производительность насосного агрегата и мощность, потребляемая его модульной секцией. Это обусловлено результатами проведенных исследований, в ходе которых установлено, что производительность является основной характеристикой, определяющей эффективность функционирования оборудования для заполнения выработанного пространства [35,36]. При этом величина производительности задается согласно требованиям обеспечения параметров процесса заполнения пустот выработанного пространства, а мощность определяется на основе конструктивных особенностей модульной секции насосного агрегата [37].

Принимая во внимание специфику выполняемых операций по закладке и дозакладке выработанного пространства, необходимо проведение исследований для обоснования энергетических параметров оборудования [38,39]. Также обязательной является оценка итоговых энергетических характеристик создаваемого оборудования и исследование его влияния на соответствующие параметры всего комплекса оборудования. Подбор рабочих агрегатов, которыми оснащается комплекс оборудования, необходимо производить на основе выполнения двух равнозначных условий: эффективности технологического процесса закладки выработанного пространства и обеспечения принципа компактности оборудования. Это может быть достигнуто применением оборудования минимальной мощности, достаточной для обеспечения требуемой производительности [40,41].

Производительность насосного агрегата находится в прямой зависимости от живого сечения рабочей камеры-канала и скорости движения волны локальной деформации, возникающей в материале канала под воздействием магнитного активатора.

Также при обосновании типоразмерного и параметрического ряда необходимо принять во внимание, что для достижения полного смыкания живого сечения рабочей камеры-канала ее ширина по внешнему краю должна быть меньше или равна диаметру секции магнитного активатора.

Учитывая вышесказанное, были проведены исследования, в результате которых выполнено обоснование энергетических параметров насосных агрегатов для различных вариантов конструктивного исполнения оборудования для дозакладки выработанного пространства.

Основываясь на теореме подобия Бэкингема, результаты экспериментальных исследований были преобразованы и обработаны в форме критериальных уравнений [42, 43]. При этом определяющие критерии являются аргументами, а неопределяющие — функциями:

$$\begin{cases} P_{\text{ном}} = f(Q, d_{\text{м.а}}) \\ Q = f(S_{\text{РКК}}, \upsilon) \\ \upsilon = f(C_{\text{о.в}}, C_{\text{с.г}}) \\ S_{\text{РКК}} = f(\psi, d_{\text{м.а}}) \end{cases}, \qquad (1)$$

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность секции магнитного активатора, Вт; Q —

производительность секции насосного агрегата, м³/ч; $S_{\text{РКК}}$ — живое сечение рабочей камеры-канала насосного агрегата, м²; υ — скорость транспортирования, м/с; $C_{\text{о.в}}$ — концентрация твердой фракции в осветленном потоке, уходящем на слив, %; $C_{\text{с.г}}$ — концентрация твердой фракции в сгущенной гидросмеси, поступающей в насосный агрегат, %; ψ — коэффициент соотношения сторон рабочей камеры-канала; $d_{\text{м.а}}$ – диаметр магнитоактивного элемента секции насосного агрегата, м.

3. Результаты

Решение полученной системы уравнений при обусловленных параметрах процесса дозакладки позволило определить технические параметры насосного агрегата, обеспечивающие минимальную энергоемкость рабочего процесса. При этом, варьируя значения скорости транспортирования, площади сечения рабочей камеры-канала и габаритов насосного агрегата, стало возможно определение рационального значения мощности насосного агрегата (участка) для различной производительности.

Определяющий параметр $C_{\text{с.г}}$ зафиксирован на уровне 70% [44].

Определение величины потребляемой мощности одним элементом модульной секции насосного агрегата произведены при следующих параметрах процесса дозакладки выработанного пространства:

– производительность секции насосного агрегата Q — от 5 м³/ч до 50 м³/ч с шагом 5 м³/ч;

– скорость транспортирования υ — от 0,1 м/с до 0,3 м/с с шагом 0,1 м/с.

Учитывая, что производительность насосного агрегата определяется согласно условию

$$Q = S_{\text{РКК(var)}} \cdot \upsilon_{(const)}, \qquad (2)$$

был определен ряд значений $S_{\text{РКК}}$, соответствующих заданным величинам производительности при постоянной скорости транспортирования. Для этого был применен метод обобщенных переменных, а именно его условие геометрического подобия, предполагающее, что сходственные размеры первичного и производного объектов должны обладать постоянством отношений их сходственных величин:

$$\frac{S_{\text{РКК}.n}}{S_{\text{РКК}.n+1}} = \frac{L_{\text{вш}.n}}{L_{\text{вш}.n+1}} = \frac{H_{\text{вш}.n}}{H_{\text{вш}.n+1}} = k$$

или $$\frac{S_{РКК.n}}{S_{РКК.n+1}} = \frac{L_{вш.n}}{H_{вш.n}} = \frac{L_{вш.n+1}}{H_{вш.n+1}} = i\,. \qquad (3)$$

Первичный и производный объекты, в данном случае рабочая камера-канал, могут быть подобны друг другу, только если константы или инварианты численно равны [45].

На основании полученных значений площади сечения РКК при условии постоянства величины коэффициента соотношения сторон ψ определен ряд значений, характеризующих габаритные размеры РКК: ширина по внешнему краю $L_{\text{вш}}$ (м) и высота $H_{\text{вш}}$ (м). Толщина стенки принята постоянной величиной [46].

Габариты рабочей зоны элемента секции магнитного активатора ($d_{\text{м.а}}$, м) соответствуют по величине параметру $L_{\text{вш}}$.

Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ элемента секции магнитного активатора определена согласно техническим характеристикам, указанным в паспорте производителя оборудования. Необходимо отметить, что номинальная мощность элемента секции магнитного активатора может отличаться при совпадении конструктивных параметров у различных производителей. Данный расчет основан на использовании зависимости технических характе-

ристик оборудования, производимого компанией Magnet-Schultz GMH.

На первом этапе вычислений параметр скорости транспортирования, находящийся в зависимости от концентрации выходной гидросмеси, принят постоянным и равен 0,1 м/с.

Изменение номинальной мощности элемента секции магнитного поля находится в линейной зависимости от ее диаметра и описывается следующим законом:

$$P_{\text{ном.1}} = 181{,}07 \cdot d_{\text{м.а}} - 1{,}7313 . \quad (4)$$

Полученные в ходе расчетов результаты сведены в табл. 1.

Анализ результатов вычислений, являющихся решением системы для выбранной области производительности МПНА, при выбранных начальных условиях, позволил сформулировать закон роста номинальной мощности в корреляции с ростом габаритных характеристик РКК (рис. 2):

$$P_{\text{ном.1}} = 9{,}085 S_{\text{РКК}} - 1{,}87 . \quad (5)$$

Аналогичным образом на следующих этапах выполнен расчет параметров насосного агрегата при условии транспортирования гидросмеси со скоростью 0,2 м/с и 0,3 м/с соответственно.

На основании полученных результатов вычислений построены графики, отражающие функциональную зависимость $P = f(\upsilon, S)$ (рис. 3).

Далее полученные результаты, представляющие выборочное решение системы в области планируемого применения разрабатываемой секции магнитного насосного агрегата, были подвергнуты статистической обработке.

Полученные значения мощности каждого элемента разрабатываемой секции насосного агрегата составляют интервал от 2 до 89 Вт при реализации разных скоростных режимов перекачивания. Для полученного интервала построены графики динамики распределения величины мощности единичного магнитоактивного элемента, которыми оснащается секция магнитного насосного агрегата. Общее их число в секции от 4 до 8, в зависимости от типоразмера.

Полученная область исследования разбита на соответствующие классы, позволяющие сформулировать типоразмерные ряды. Были исключены недопустимые значения в каждом из распределений, которые представлены на рис. 3, а именно значения уровня мощности элемента секции более 50 Вт, соответству-

Таблица 1

Сводная таблица технических характеристик участка секции магнитного насосного агрегата
Summary table of technical characteristics of the section of the magnetic pumping unit

Q, м³/ч	$S_{\text{РКК}}$, м²	ψ	$d_{\text{м.а}}$, м	$H_{\text{вш}}$, м	$P_{\text{ном.1}}$, В
5	0,013	1,5	0,05	0,013	6,5
10	0,025		0,1	0,023	17
15	0,038		0,15	0,036	26
20	0,05		0,2	0,045	35
25	0,063		0,25	0,057	45
30	0,075		0,3	0,067	53
35	0,088		0,35	0,08	62
40	0,092		0,4	0,083	71
45	0,114		0,45	0,1	80
50	0,125		0,5	0,11	90

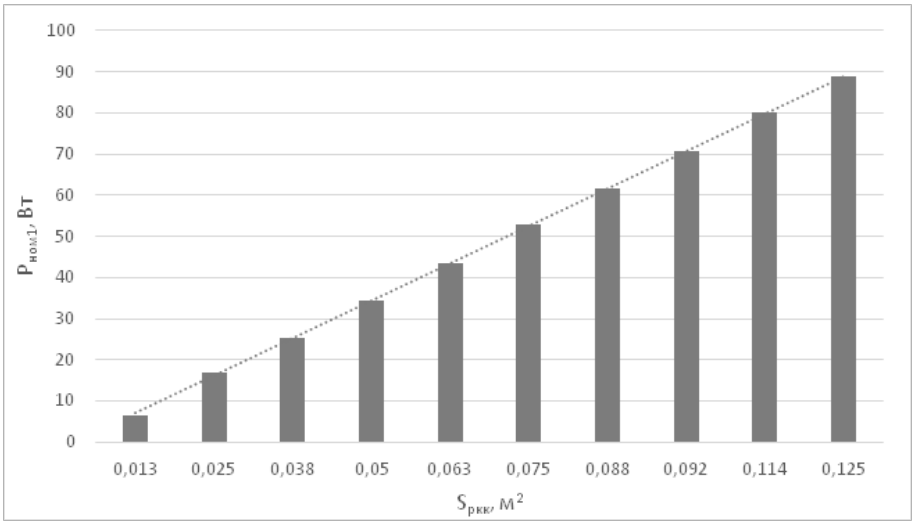

Рис. 2. Распределение значений мощности элемента секции магнитного активатора насосного агрегата в зависимости от диаметра при скорости υ = 0,1 м/с
Fig. 2. Distribution of power values of the section of the magnetic activator of the pumping unit depending on the diameter at a speed υ = 0,1 m/s

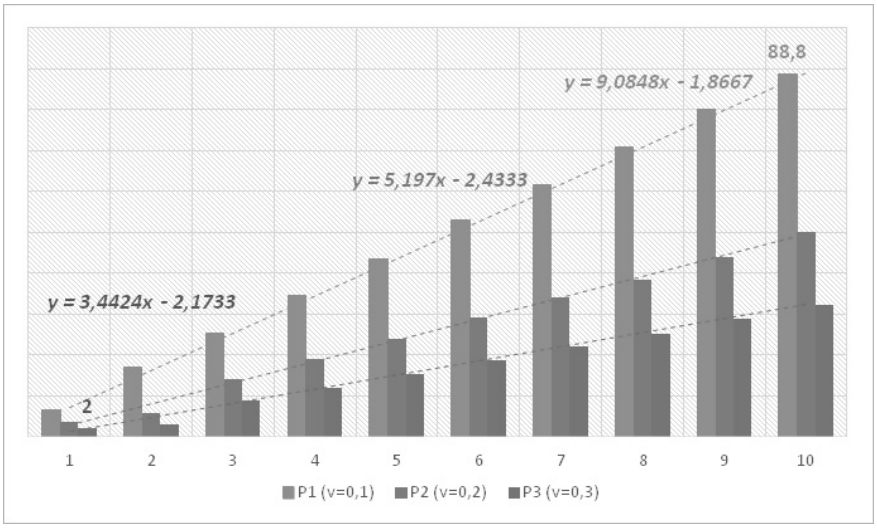

Рис. 3. Распределение значений мощности элемента секции магнитного активатора насосного агрегата в зависимости от сечения рабочей камеры-канала и скорости транспортирования
Fig. 3. Distribution of power values of the section of the magnetic activator of the pumping unit depending on the section of the working chamber-channel and the speed of transportation

ющие диаметру элемента секции магнитного активатора около 0,3 м, а также значения мощности менее 5 Вт, соответствующие диаметру элемента секции магнитного активатора около 0,03 м.

Разбиение на классы можно выполнить по полуэмпирической формуле (правило Штюргеса) [47]:

$$k \approx 1 + 3,32 \cdot \log(n), \qquad (6)$$

где k — количество классов, n – количество опытов.

При n = 22

$$k \approx 1 + 3{,}32 \cdot \log(22) \approx 5 .$$

Для интервала варьирования мощности элемента секции насосного агрегата от 5 до 50 Вт шаг варьирования класса составит (Вт):

$$t = \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{k} = \frac{(50-5)}{5} \approx 9 . \quad (7)$$

В результате выполнения исследований область полученных значений мощности элемента секции насосного агрегата была распределена на классы, в каждом из которых было определено количество выпадений расчетных значений мощности (табл. 2) [48].

По данным, представленным в табл. 2, построеннагистограмма распределения (рис. 4), а также полигон распределения значений мощности элемента секции насосного агрегата (рис. 5).

При аппроксимации полигона распределения логарифмической кривой получена зависимость распределения номинальной мощности элемента секции магнитного активатора для всей области применения МПНА. Уравнение кривой имеет вид

$$n = -1{,}073 \ln(P_{\text{ном}.n}) + 5{,}427 . \quad (8)$$

4. Обсуждение результатов

Основываясь на результатах анализа поля корреляции, выдвинуто предположение, что для генеральной совокупности связь между всеми возможными значениями номинальной мощности элемента секции магнитного активатора и n носит экспоненциальный характер [49].

Экспоненциальное уравнение регрессии принимает вид

$$n = a \cdot e^{b \cdot P_{\text{ном}}} . \quad (9)$$

Оценочное уравнение регрессии (построенное по выборочным данным) примет вид

$$n = a \cdot e^{b \cdot P_{\text{ном}}} + \varepsilon , \quad (10)$$

где e_i — наблюдаемые значения (оценки) ошибок ε_i; a и b — оценки параметров α и β регрессионной модели.

После линеаризации выражение принимает следующий вид:

$$\ln(n) = \ln(a) + bP_{\text{ном}} .$$

Оценка параметров α и β выполнена с применением метода наименьших квадратов.

Система нормальных уравнений в общем виде представлена как система

$$\begin{cases} a \cdot m + b\sum P_{\text{ном}} = \sum n, \\ a\sum P_{\text{ном}} + b\sum P^2_{\text{ном}} = \sum n \cdot P_{\text{ном}}. \end{cases} \quad (11)$$

Для текущих значений ранее выполненных исследований система уравнений принимает вид

$$\begin{cases} 5a + 15b = 3{,}176, \\ 15a + 55b = 8{,}988. \end{cases}$$

Эмпирические коэффициенты регрессии приняли следующее значение:

a = 0,7974, b = 8,988.

Эмпирическое уравнение регрессии принимает вид

Таблица 2

Распределение мощности элемента секции магнитного насосного агрегата в заданном интервале

Power distribution of the magnetic pumping unit in a given interval

$P_{\text{ном}.1}$, Вт	5–14	14–23	23–32	32–41	41–50
n	5	5	5	4	3

$$n = 6{,}27 \cdot e^{-0{,}05 P_{\text{ном}}}.$$

Величина индекса корреляции определялась согласно выражению

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum\left(n_i - n_{P_{\text{ном}}}\right)^2}{\sum\left(n_i - \overline{n}\right)^2}} \qquad (12)$$

Оценка итоговых значений позволила определить значение индекса корреляции, который составил R = 0,874. Это служит достаточным подтверждением адекватности выполненной аппроксимации данных предложенной зависимостью. Полученная величина свидетельствует о том, что фактор значения номинальной мощности элемента секции магнитного активатора существенно влияет на *n*.

Параметрический ряд магнитного насосного агрегата образован из трех исполнений (по признаку кратности скорости транспортирования) и пяти типоразмеров секций магнитных активаторов (в зависимости от уровня предельного расхода) (табл. 3).

Важнейшим статистическим показателем динамики ряда является абсолютный прирост, который определялся в разностном сопоставлении двух уровней ряда динамики в исходных единицах измерения. Также важным показателем в данном расчете выступает темп прироста. Он позволяет характеризовать соотношение двух уровней ряда.

Результаты оценки цепных показателей ряда динамики сведены в таблицу (табл. 4). Для этого, при определении показателей динамики, каждый последующий уровень ряда сравнивался с предыдущим [50].

Анализ темпа прироста показывает, что тенденция ряда убывающая, это свидетельствует о замедлении роста оцениваемого параметра номинальной мощности элемента секции магнитного активатора насосного агрегата.

В классе 5 относительно класса 1 номинальная мощность увеличилась на 36 Вт, что составляет 257,1%.

Средний уровень моментного ряда определялся с применением значений средней хронологической, определяемой согласно выражению:

Таблица 3

Параметрический и типоразмерный ряды магнитного насосного агрегата
Parametric and dimension series of the magnetic pumping unit

Магнитный перистальтический насосный агрегат / Magnetic peristaltic pump unit					
Типоразмер №/Size NO	Предел мощности, Вт / Power limit, W	Расход, м³/ч Flow rate, m³/h	Исполнение / Version		
			N1	N2	N3
			Скорость транспортирования, м/с / Conveying speed, m/s		
			0,1	0,2	0,3
			Номинальная мощность, Вт / Rated power, W		
1	14	10	17	5	–
2	23	20	35	18,8	12
3	32	30	–	28,6	18,6
4	41	40	–	38,3	25
5	50	50	–	49,2	32,3

Таблица 4
Цепные показатели ряда динамики
Chain indicators of a dynamic's series

Номер класса / Class No	Выборка значений / Sample values	Пороговая мощность, Вт Threshold power, W	Абсолютный прирост / Absolute increase	Темп прироста, % / Increase rate, %	Темпы роста, % / Growth rate, %
1	5	14	–	–	100
2	5	23	9	64.29	164.29
3	5	32	18	39.13	139.13
4	4	41	27	28.13	128.13
5	3	50	36	21.95	121.95

$$P_{\text{ном}} = \frac{0,5P_{\text{ном.1}} + P_{\text{ном.2}} + ... + P_{\text{ном.}n-1} + 0,5P_{\text{ном.}n}}{n-1}. \quad (13)$$

Среднее значение номинальной мощности одного элемента секции магнитного активатора насосного агрегата за анализируемый период составило 32 Вт.

Средний темп роста исследуемого параметра определялся согласно выражению

$$T_p = \sqrt[n-1]{\frac{P_{\text{ном.}n}}{P_{\text{ном.1}}}} \quad (14)$$

и составил 1,37, что соответствует среднему темпу прироста номинальной мощности секции магнитного активатора 37,5%.

Заключение

В ходе проведения исследований было выполнено следующее:

1. Определен перечень и уровень технических характеристик для создания насосного оборудования, в основу которого положен метод оценки технического уровня существующей техники. Основными параметрами обозначены производительность насосного агрегата, скорость транспортирования, а также мощность секции магнитного активатора.

2. Разработана методика обоснования технических параметров МЗК для конкретных условия применения с учетом рационализации основных параметров: скорости транспортирования и концентрации гидросмеси.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что полученный в результате расчетов ряд значений предпочтительной номинальной мощности секции магнитного активатора насосного агрегата можно использовать при разработке проектно-конструкторской документации для создания мобильных закладочных комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев В. В.*, *Овсейчук В. А.* Повышение технологических свойств твердеющей закладочной смеси // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 3–2. — С. 71–80. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_32_0_71.

2. *Каплунов Д. Р.*, *Рыльникова М. В.*, *Арсентьев В. А.*, *Квитка В. В.*, *Маннанов Р.* Новая технология и оборудование для высокопроизводительной закладки выработанного

пространства при подземной отработке месторождений // Горный журнал. — 2012. — № 2. — С. 41–43.

3. *Grice A. G.* Underground mining with backfill // Proceedings of the 2nd annual summit — mine tailings disposal systems, Brisbane, Australia. 1998, pp. 234–239.

4. *Sivakugan N., Veenstra R., Naguleswaran N.* Underground Mine Backfilling in Australia Using Paste Fills and Hydraulic Fills // Int. J. of Geosynth. and Ground Eng. 2015, vol. 1, p. 18. DOI 10.1007/s40891-015-0020-8.

5. *Antaya C. L.*, *Adane K.* F, *Sanders R. S.* Modelling Concentrated Slurry Pipeline Flows // Proceedings of the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. 2012, pp. 1659–1671. https://doi.org/10.1115/FEDSM2012–72379.

6. *Овчинников Н. П.*, *Портнягина В. В.*, *Дамбуев Б. И.* Установление предельного технического состояния пульпового насоса без разборки // Записки Горного института, — 2020. — № 241. — С. 53. https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.53.

7. *Wang L., Han Q. S.*, *Chen D. Y.*, *Wu C. Z.*, *Wang X. Y.* Non-linear modelling and stability analysis of the PTGS at pump mode // Renewable Power Generation. 2017, no. 11(6), pp. 827–836. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0707.

8. *Каплунов Д. Р.*, *Рыльникова М. В.*, *Радченко Д. Н.*, *Корнеев Ю. В.* Передвижные закладочные комплексы в системах разработки рудных месторождений с закладкой выработанных пространств // Горный журнал. — 2013. — № 2. — С. 101–104.

9. *Лаутербах Т.* Закладка подземных пустот с помощью поршневых насосов // Глюкауф. — 2006. — № 2(3). — С.40–44.

10. *Atroshchenko V. A.* Avksentiev, S. Y., Makharatkin, P. N., *Trufanova I. S.*. Experimental hydrotransportation unit for testing material resistance of pipelines and parts of dredging pumps to hydro-abrasive wear // Obogashchenie rud. 2021, no. 3, pp. 39–45. https://doi.org/10.17580/or.2021.03.07.

11. *Cheremisina O., Sergeev V., Ponomareva M., Ilina A., Fedorov A.* Kinetics Study of Solvent and Solid-Phase Extraction of Rare Earth Metals with Di-2-Ethylhexylphosphoric Acid // Metals. 2020, no. 10, p. 687. https://doi.org/10.3390/met10050687.

12. *Чернышов С. Е.*, *Галкин В. И.*, *Ульянова З. В.*, *Макдоналд Д. И.* М. Разработка математических моделей управления технологическими параметрами тампонажных растворов // Записки Горного института. — 2020. — № 242. — С. 179. https://doi:10.31897/pmi.2020.2.179.

13. *Stone D.* The evolution of paste for backfill // Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2014, p. 31–38.

14. *Mishra P.*, Ein-*Mozaffari F.* Using flow visualization and numerical methods to investigate the suspension of highly concentrated slurries with the coaxial mixers // Powder Technology. 2021, vol. 390, pp. 159–173. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.078.

15. *Yang Y.*, *Zhu H.* Clustering and modelling of rheological parameters for anaerobic digestion materials (ADMs) and its application for feed pump selection // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 467,012053.

16. *Александров В. И.* Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации. — СПб: СПГГИ (ТУ),2000. — 224 с.

17. *Hatfield R. G. Maher B. A.*, *Pates J. M.*, *Barker P. A.* Sediment dynamics in an upland temperate catchment: Changing sediment sources, rates and deposition // Journal of Paleolimnology. 2008, vol. 40(4), pp. 1143–1158.

18. *Kong H.*, *Yu L.*, *Gu Z.*, *Li Z.*, *Ban X.*, *Cheng L.*, *Hong Y.*, *Li C.* Fine structure impacts highly concentrated starch liquefaction process and product performance // Industrial Crops and Products. 2021, vol. 164,113347. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113347.

19. *Yaghtin M. Yaghtin A.*, *Tang Z.*, *Troczynski T.* Improving the rheological and stability characteristics of highly concentrated aqueous yttria stabilized zirconia slurries // Ceramics International. 2020, vol. 46(17), pp. 26991–26999. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.176.

20. *Бендерович В. А.*, *Лунаци Э. Д.*, *Ноздрин А. В.*, *Шеина А. Е.* Ламинарные насосы и новые технологические возможности // Экспозиция НефтьГАЗ. — 2016. — № 3(49). — С. 44–46.

21. *Васильева М. А.* Обзор тенденций развития насосного оборудования горно-обогатительных комбинатов // Обогащение руд. — 2019. — № 1. — С. 51–56. https://doi.org/10.17580/or.2019.01.08.

22. *Арсентьев В. А.*, *Вайсберг Л. А.*, *Устинов И. Д.* Направление создания маловодных технологий и аппаратов для обогащения тонкоизмельченного минерального сырья // Обогащение руд. — 2014. — № 5(353). — С. 3–9.

23. *Верте Л. А.* Электромагнитный транспорт жидкого металла. — М.: Металлургия,1965. — 236 с.

24. *Fuhrer R. Schumacher C. M.*, *Zeltner M.*, *Stark W. J.* Soft Iron/Silicon Composite Tubes for Magnetic Peristaltic Pumping: Frequency-Dependent Pressure and Volume Flow // Adv. Funct. Mater. 2013, vol. 23, pp. 3845–3849. https://doi.org/10.1002/adfm.201203572.

25. Патент РФ № 2616432,14.04.2017. *Васильева М. А.*, *Александров В. И.*, *Проскуряков Р. М.*, *Кошкина Е. П.* Перистальтический насос-смеситель для сильно сгущенных веществ. 2017. Бюл. № 11.

26. Патент РФ № 2626193,24.07.2017. *Васильева М. А.*, *Сержан С. Л.* Перистальтический насос-смеситель для пастообразных веществ. 2017. Бюл. № 21.

27. *Minakov A. V.*, *Rudyak V.* Ya., *Gavrilov A. A.*, *Dekterev A. A.* On optimization of mixing process of liquids in microchannels // Journal of the Siberian Federal University. Mathematics and physics. 2010, no. 3(2), pp. 146–156.

28. *Aishan Y.*, *Yalikun Y.*, *Shen Y.*, *Yuan Y.*, *Amaya S.*, *Okutaki T.*, *Osaki A.*, *Maeda S.*, *Tanaka Y.* A chemical micropump actuated by self-oscillating polymer gel // Sensors and Actuators, B: Chemical. 2021, vol. 337,129769. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129769.

29. *Nguyen V. Q.*, *Ahmed A. S.*, *Ramanujan R. V.* Morphing Soft Magnetic Composites // Adv. Mater. 2012, vol. 24, pp. 4041–4054. https://doi.org/10.1002/adma.201104994.

30. *Pan Z. Q.*, *Sun R.*, *Zhu S. L.*, *Kang Y. Z.*, *Huang B. S.* The synthesis, characterization and properties of silicone adhesion promoters for addition-cure silicone rubber // Journal of adhesion science and Technology. 2018, vol. 32(14), pp. 1517–1530. https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1428059.

31. *Tian T.*, *Nakano M.* Fabrication and characterisation of anisotropic magnetorheological elastomer with 45 iron particle alignment at various silicone oil concentrations // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2018, vol. 29(2), pp. 151–159. https://doi.org/10.1177/1045389X17704071.

32. *Qin Y.*, *Li D.*, *Zhu Y.*, *Wang H.*, *Wei X.* Influence of geometric factors at runner outlet on the hump characteristics of a pump-turbine // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022, vol. 51,101890. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101890.

33. *Иванов С. Л.*, *Сафрончук К. А.*, *Олт Ю.* Обоснование и выбор конструктивных параметров зубчато-эксцентрикового механизма поршневого смазочно-заправочного агрегата для технического обслуживания горных машин // Записки Горного института. — 2021. — № 248. — С. 290–299. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.2.13.

34. *Egole C. P.*, *Mgbemere H. E.*, *Sobamowo G. M.*, *Lawal G. I.* Micro-macro model for the transient heat and fluid transport in solidification structure evolution during static casting processes // Materials Today Communications. 2021, vol. 28,102613. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102613.

35. *Мырзахметов Б. А.*, *Крупник Л. А.*, *Султабаев А. Е.*, *Токтамисова С. М.* Математическая модель работы струйного насоса в составе скважинной тандемной установки // ГИАБ. — 2019. — № 8. — С. 123–135. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08–0-123–135.

36. *Поветкин В. В.*, *Керимжанова М. Ф.*, *Орлова Е. П.*, *Букаева А. З.* Совершенствование оборудования для транспортировки гидросмеси в обогатительном производстве // ГИАБ. — 2018. — № 6. — С. 161–169. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-161-169.

37. *Alawadhi K.*, *Alzuwayer B.*, *Mohammad T. A.*, *Buhemdi M. H.* Design and optimization of a centrifugal pump for slurry transport using the response surface method // Machines. 2021, v0l. 9(3), no. 60. https://doi.org/10.3390/machines9030060.

38. *Andrii R.*, *Vladimir K.*, *Yevhen M.* Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump // Energy. 2021, vol. 2181,119432. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119432.

39. *Najib A.*, *Orfi J.*, *Alansary H.*, *Ali E.* Application of the Buckingham Π Theorem to Model the Multiple Effect Vacuum Membrane Distillation // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2022, vol. 14(3),031003. https://doi.org/10.1115/1.4051450.

40. *Han X.-J.* Control System Optimization for Adding Coal Slurry into Circulating Fluidized Bed Boiler. Reneng Dongli Gongcheng // Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. 2019, vol. 34(10), pp. 193–198. https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.10.028.

41. *Calabrese F.*, *Regattieri A.*, *Bortolini M.*, *Galizia F. G.*, *Visentini L.* Feature-based multi-class classification and novelty detection for fault diagnosis of industrial machinery // Applied Sciences. 2021, vol. 11(20),9580. https://doi.org/10.3390/app11209580.

42. *Хрусталева И. Н.*, *Любомудров С. А.*, *Ларионова Т. А.*, *Бровкина Я. Ю.* Повышение эффективности технологической подготовки производства комплектующих для изготовления оборудования минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. — 2021. — № 249. — С. 417–426. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.11.

43. *Александров В. И.*, *Васильева М. А.* Гидротранспорт сгущенных хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе по результатам опытно-промышленных испытаний системы гидротранспорта // Записки Горного института. — 2018. — № 233. — С. 471. https://doi.org/10.31897/pmi.2018.5.471.

44. *Maddah S.*, *Goodarzi M.*, *Safaei M. R.* Comparative study of the performance of air and geothermal sources of heat pumps cycle operating with various refrigerants and vapor injection // Alexandria Engineering Journal. 2020, vol. 59(6), pp. 4037–4047. https://doi.org/doi:10.1016/j.aej.2020.07.009.

45. *Harsem T. T.*, *Nourozi B.*, *Behzadi A.*, *Sadrizadeh S.* Design and parametric investigation of an efficient heating system, an effort to obtain a higher seasonal performance factor // Energies. 2021, vol. 14(24),8475. https://doi.org/10.3390/en14248475.

46. *Vasilyeva M. A.*, *Volchikhina A. A.* Analysis of influence of pipeline roughness dispersion on energy consumption during fluid transportation // Journal of Physics: Conference Series. 2018, vol. 1118(1),012047. https://doi.org/10.1016/j.spl.2021.109297.

47. *Matuła P.*, *Adler A. A.* Note on exact laws of large numbers for the range of a sample from Pareto-type distributions // Statistics and Probability Letters. 2022, vol. 182, № 109297. https://doi.org/10.1016/j.spl.2021.109297.

48. *Kevei P.*, *Oluoch L.*, *Viharos L.* Limit laws for the norms of extremal samples // Journal of Statistical Planning and Inference. 2022, vol. 216, pp.. 151–173. https://doi.org/10.1016/j.jspi.2021.06.001.

49. *Keay M.-J.* An exponential endogenous switching regression with correlated random coefficients // Econometrics. 2022, vol. 10(1),1. https://doi.org/10.3390/econometrics10010001.

50. *Soguero-Ruiz C., Mora-Jiménez I., Martínez-Ruiz M. D.P., Rojo-Álvarez J. L.*, Statistical nonlinear analysis for reliable promotion decision-making // Digital Signal Processing: A Review Journal. 2014, vol. 33, pp. 156–168. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2014.06.014. ГИАБ

REFERENCES

1. Medvedev V. V., Ovseychuk V. A. Improving the technological properties of the hardening filling mixture. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 3–2, pp. 71–80. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_32_0_71. [In Russ].

2. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Arsentiev V. A., Kvitka V. V., Mannanov R. New technology and equipment for high-performance backfilling of mined-out space during underground mining. *Mining Journal*. 2012, no. 2, pp. 41–43. [In Russ].

3. Grice A. G. Underground mining with backfill. *Proceedings of the 2nd annual summit — mine tailings disposal systems, Brisbane, Australia*. 1998, pp. 234–239.

4. Sivakugan N., Veenstra R., Naguleswaran N. Underground Mine Backfilling in Australia Using Paste Fills and Hydraulic Fills. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng*. 2015, no. 1, p. 18. DOI 10.1007/s40891-015-0020-8.

5. Antaya C. L., Adane K. F, Sanders R. S. Modelling Concentrated Slurry Pipeline Flows. *Proceedings of the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. 2012, pp. 1659–1671. https://doi.org/10.1115/FEDSM2012–72379.

6. Ovchinnikov N. P., Portnyagina V. V., Dambuev B. I. Establishment of the limiting technical state of a pulp pump without disassembly. *Journal of the Mining Institute,*2020, no. 241, p. 53. https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.53. [In Russ].

7. Wang L., Han Q. S., Chen D. Y., Wu C. Z., Wang X. Y. Non-linear modelling and stability analysis of the PTGS at pump mode. *Renewable Power Generation*. 2017, no. 11(6), pp. 827–836. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0707.

8. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Radchenko D. N., Korneev Yu. Mobile stowing complexes in systems for the development of ore deposits with backfilling of mined-out spaces. *Mining journal*. 2013, no. 2, pp. 101–104. [In Russ].

9. Thomas Lauterbach. Filling underground voids with piston pumps. *Gluckauf*. 2006, no. 2(3), pp. 40–44. [In Russ].

10. Atroshchenko V. A. Avksentiev S. Y., Makharatkin P. N., Trufanova I. S. Experimental hydrotransportation unit for testing material resistance of pipelines and parts of dredging pumps to hydro-abrasive wear. *Obogashchenie rud*. 2021, no. 3, pp. 39–45. https://doi.org/10.17580/or.2021.03.07.

11. Cheremisina O., Sergeev V., Ponomareva M., Ilina A., Fedorov A. Kinetics Study of Solvent and Solid-Phase Extraction of Rare Earth Metals with Di-2-Ethylhexylphosphoric Acid. *Metals*. 2020, no. 10, p. 687. https://doi.org/10.3390/met10050687.

12. Chernyshov S. E., Galkin V. I., Ulyanova Z. V., McDonald D. I. M. Development of mathematical models for controlling the technological parameters of cement slurries. *Journal of the Mining Institute*. 2020, no. 242, p. 179. https://doi:10.31897/pmi.2020.2.179. [In Russ].

13. Stone D. The evolution of paste for backfill. *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill, Australian Centre for Geomechanics, Perth*. 2014, pp. 31–38.

14. Mishra P., Ein-Mozaffari F. Using flow visualization and numerical methods to investigate the suspension of highly concentrated slurries with the coaxial mixers. *Powder Technology*. 2021, vol. 390, pp. 159–173. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.078.

15. Yang Y., Zhu H. Clustering and modelling of rheological parameters for anaerobic digestion materials (ADMs) and its application for feed pump selection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 467,012053.

16. Alexandrov V. I. Methods for reducing energy consumption during hydraulic transportation of high concentration mixtures. St. Petersburg, SPGGI (TU). 2000,224 p. [In Russ].

17. Hatfield R. G. Maher B. A., Pates J. M., Barker P. A. Sediment dynamics in an upland temperate catchment: Changing sediment sources, rates and deposition. *Journal of Paleolimnology*. 2008, vol. 40(4), pp. 1143–1158.

18. Kong H., Yu L., Gu Z., Li Z., Ban X., Cheng L., Hong Y., Li C. Fine structure impacts highly concentrated starch liquefaction process and product performance. *Industrial Crops and Products*. 2021, vol. 164,113347. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113347.

19. Yaghtin M. Yaghtin A., Tang Z., Troczynski T. Improving the rheological and stability characteristics of highly concentrated aqueous yttria stabilized zirconia slurries. *Ceramics International*. 2020, vol. 46(17), pp. 26991–26999. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.176.

20. Benderovich V. A., Lunatsi E. D., Nozdrin A. V. and Sheina A. E. Laminar pumps and new technological possibilities. *Neftgaz Exposition*. 2016, no. 3(49), pp. 44–46. [In Russ].

21. Vasilyeva M. A. Overview of trends in the development of pumping equipment for mining and processing plants. *Obogashchenie rud*. 2019, no. 1, pp. 51–56. https://doi.org/10.17580/or.2019.01.08. [In Russ].

22. Arsentiev V. A., Vaisberg L. A., Ustinov I. D. The direction of the creation of low-water technologies and apparatus for the enrichment of finely divided mineral raw materials. *Obogashchenie rud*. 2014, no. 5(353), pp. 3–9. [In Russ].

23. Werte L. A. Electromagnetic transport of liquid metal. Moscow, Metallurgy. 1965, 236 p. [In Russ].

24. Fuhrer R. Schumacher C. M., Zeltner M., Stark W. J. Soft Iron/Silicon Composite Tubes for Magnetic Peristaltic Pumping: Frequency-Dependent Pressure and Volume Flow. *Adv. Funct. Mater*. 2013, vol. 23, pp. 3845–3849. https://doi.org/10.1002/adfm.201203572.

25. Patent of the Russian Federation No No. 2616432,04/14/2017. Vasilieva M. A., Alexandrov V. I., Proskuryakov R. M., Koshkina E. P. Peristaltic mixing pump for highly condensed substances. 2017, bull. № 11. [In Russ].

26. Patent of the Russian Federation No. 2626193,07/24/2017. Vasilyeva M. A., Serzhan S. L. Peristaltic mixing pump for pasty substances. 2017, bull. № 21. [In Russ].

27. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Gavrilov A. A., Dekterev A. A. On optimization of mixing process of liquids in microchannels. *Journal of the Siberian Federal University. Mathematics and physics*. 2010, no. 3(2), pp. 146–156. [In Russ].

28. Aishan Y., Yalikun Y., Shen Y., Yuan Y., Amaya S., Okutaki T., Osaki A., Maeda S., Tanaka Y. A chemical micropump actuated by self-oscillating polymer gel. *Sensors and Actuators, B: Chemical*. 2021, vol. 337,129769. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129769.

29. Nguyen V. Q., Ahmed A. S., Ramanujan R. V. Morphing Soft Magnetic Composites. *Adv. Mater*. 2012, vol. 24, pp. 4041–4054. https://doi.org/10.1002/adma.201104994.

30. Pan Z. Q., Sun R., Zhu S. L., Kang Y. Z., Huang B. S. The synthesis, characterization and properties of silicone adhesion promoters for addition-cure silicone rubber. *Journal of adhesion science and Technology*. 2018, vol. 32(14), pp. 1517–1530. https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1428059.

31. Tian T., Nakano M. Fabrication and characterisation of anisotropic magnetorheological elastomer with 45 iron particle alignment at various silicone oil concentrations. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2018, vol. 29(2), pp. 151–159. https://doi.org/10.1177/1045389X17704071.

32. Qin Y., Li D., Zhu Y., Wang H., Wei X. Influence of geometric factors at runner outlet on the hump characteristics of a pump-turbine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022, vol. 51,101890. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101890.

33. Ivanov S. L., Safronchuk K. A., Olt Yu. Substantiation and choice of design parameters of the gear-eccentric mechanism of a piston lubricating and filling unit for maintenance of mining machines. *Journal of the Mining Institute*. 2021, no. 248, pp. 290–299. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.2.13. [In Russ].

34. Egole C. P., Mgbemere H. E., Sobamowo G. M., Lawal G. I. Micro-macro model for the transient heat and fluid transport in solidification structure evolution during static casting processes. *Materials Today Communications*. 2021, vol. 28,102613. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102613.

35. Myrzakhmetov B. A., Krupnik L. A., Sultabaev A. E., Toktamisova S. M. Mathematical model of jet pump operation as part of a downhole tandem installation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 123–135. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08–0-123–135. [In Russ].

36. Povetkin V. V., Kerimzhanova M. F., Orlova E. P., Bukaeva A. Z. Improvement of equipment for slurry transportation in processing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 6, pp. 161–169. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-161-169. [In Russ].

37. Alawadhi K., Alzuwayer B., Mohammad T. A., Buhemdi M. H. Design and optimization of a centrifugal pump for slurry transport using the response surface method. *Machines*. 2021, vol. 9(3), no. 60. https://doi.org/10.3390/machines9030060.

38. Andrii R., Vladimir K., Yevhen M. Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. *Energy*. 2021, vol. 2181,119432. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119432.

39. Najib A., Orfi J., Alansary H., Ali E. Application of the Buckingham Π Theorem to Model the Multiple Effect Vacuum Membrane Distillation. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2022, vol. 14(3),031003. https://doi.org/10.1115/1.4051450.

40. Han X.-J. Control System Optimization for Adding Coal Slurry into Circulating Fluidized Bed Boiler. Reneng Dongli Gongcheng. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*. 2019, vol. 34(10), pp. 193–198. https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.10.028.

41. Calabrese F., Regattieri A., Bortolini M., Galizia F. G., Visentini L. Feature-based multi-class classification and novelty detection for fault diagnosis of industrial machinery. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11(20),9580. https://doi.org/10.3390/app11209580.

42. Khrustaleva I. N., Lyubomudrov S. A., Larionova T. A., Brovkina Y. Y. Increasing the efficiency of technological preparation for the production of the manufacture components equipment for the mineral resource complex. Journal *of the Mining Institute*. 2021, no. 249, pp. 417–426. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.11. [In Russ].

43. Alexandrov V. I., Vasilyeva M. A. Hydrotransport of thickened tailings of iron ore enrichment at the Kachkanar mine according to the results of pilot tests of the hydrotransport system. *Journal of the Mining Institute*. 2018, no. 233, p. 471. https://doi.org/10.31897/pmi.2018.5.471. [In Russ].

44. Maddah S., Goodarzi M., Safaei M. R. Comparative study of the performance of air and geothermal sources of heat pumps cycle operating with various refrigerants and vapor injection. *Alexandria Engineering Journal*. 2020, vol. 59(6), pp. 4037–4047. https://doi.org/doi:10.1016/j.aej.2020.07.009.

45. Harsem T. T., Nourozi B., Behzadi A., Sadrizadeh S. Design and parametric investigation of an efficient heating system, an effort to obtain a higher seasonal performance factor. *Energies*. 2021, vol. 14(24),8475. https://doi.org/10.3390/en14248475.

46. Vasilyeva M. A., Volchikhina A. A. Analysis of influence of pipeline roughness dispersion on energy consumption during fluid transportation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1118(1),012047. https://doi.org/10.1016/j.spl.2021.109297.

47. Matuła P., Adler A. A. Note on exact laws of large numbers for the range of a sample from Pareto-type distributions. *Statistics and Probability Letters*. 2022, vol. 182,109297. https://doi.org/10.1016/j.spl.2021.109297.

48. Kevei P., Oluoch L., Viharos L. Limit laws for the norms of extremal samples. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2022, vol. 216, pp. 151–173. https://doi.org/10.1016/j.jspi.2021.06.001.

49. Keay M.-J. An exponential endogenous switching regression with correlated random coefficients. *Econometrics*. 2022, vol. 10(1),1. https://doi.org/10.3390/econometrics10010001.

50. Soguero-Ruiz C., Mora-Jiménez I., Martínez-Ruiz M. D. P., Rojo-Álvarez J. L., Statistical nonlinear analysis for reliable promotion decision-making. *Digital Signal Processing: A Review Journal*. 2014, vol. 33, pp. 156–168. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2014.06.014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Васильева Мария Александровна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры транспортно-технологические процессов и машин, http://orcid.org/0000-0003-2594-74810, Санкт-Петербургский горный университет,199106, г. Санкт-Петербург,21-я линия В. О. 2, Россия, e-mail: saturn.sun@mail.ru.
Автор заявляет, что конфликт интересов отсутствует

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vasilyeva M. A., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, http://orcid.org/0000-0003-2594-74810, St. Petersburg Mining University,199106, St. Petersburg,21st line V. O. 2, Russia, e-mail: saturn.sun@mail.ru.
The author declare that there is no conflict of interest.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.