

## Разработка системы мониторинга за состоянием здоровья работника в подземном руднике в режиме реального времени

И. М. Новожилов<sup>1</sup>, А. В. Мартиросян<sup>2</sup>, Д. А. Первухин<sup>2</sup>, В. Я. Трофимец<sup>2</sup>,  
Д. Л. Тукеев<sup>2</sup>, Д. М. Лойко<sup>2✉</sup>, Ю. М. Искандеров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ danil\_loiko@mail.ru

**Аннотация.** Проводится анализ актуальности систем мониторинга состояния здоровья сотрудников в условиях подземного рудника в реальном времени и проблем, связанных с их разработкой и функционированием. В результате анализа в качестве объекта исследования выбрана камера ремонта и обслуживания самоходной техники на Кировском руднике АО «Апатит» в Мурманской области. При изучении технологии строительства камеры были представлены примеры использования систем мониторинга на каждом этапе строительства. Статья подчеркивает важность и актуальность разработки и внедрения систем мониторинга состояния здоровья сотрудников в условиях подземного рудника. Это позволит повысить безопасность и эффективность работы, а также снизить риск возникновения аварийных ситуаций и несчастных случаев.

**Ключевые слова:** системы мониторинга, искусственный интеллект, цифровые технологии, нейронные сети, прогнозирование угроз, предупреждение несчастных случаев, предупреждение аварий на рудниках

**Для цитирования:** Разработка системы мониторинга за состоянием здоровья работника в подземном руднике в режиме реального времени / И. М. Новожилов, А. В. Мартиросян, Д. А. Первухин, В. Я. Трофимец, Д. Л. Тукеев, Д. М. Лойко, Ю. М. Искандеров // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 7. С. 62–74. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-7-62-74.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Development of a System for Real-Time Monitoring of Employees' Health Status in an Underground Mine

I. M. Novozhilov<sup>1</sup>, A. V. Martirosyan<sup>2</sup>, D. A. Pervukhin<sup>2</sup>, V. Ya. Trofimets<sup>2</sup>,  
D. L. Tukeev<sup>2</sup>, D. M. Loiko<sup>2✉</sup>, Yu. M. Iskanderov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg Mining University Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,  
Saint Petersburg, Russia

✉ danil\_loiko@mail.ru

**Abstract.** Analyzes the relevance of employee health monitoring systems in an underground mine in real time and the problems associated with their development and operation. As a result of the analysis, a self-propelled machinery repair and maintenance chamber at the Kirovsky mine of JSC Apatit in the Murmansk region was

selected as the object of research. When studying the camera construction technology, examples of the use of monitoring systems at each stage of construction were presented. The article emphasizes the importance and relevance of the development and implementation of employee health monitoring systems in an underground mine. This will improve the safety and efficiency of work, as well as reduce the risk of accidents and accidents.

**Keywords:** monitoring systems, artificial intelligence, digital technologies, neural networks, threat forecasting, accident prevention, mine accident prevention

**For citation:** Development of a System for Real-Time Monitoring of Employees' Health Status in an Underground Mine / I. M. Novozhilov, A. V. Martirosyan, D. A. Pervukhin, V. Ya. Trofimets, D. L. Tukeev, D. M. Loiko, Yu. M. Iskanderov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 7. P. 62–74. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-7-62-74.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** В сфере российской экономики, оказавшейся перед лицом трудностей, принципиально важно применение инновационных подходов в управлении, включая прогрессивные технологии нейронные сети, инструменты искусственного интеллекта и т. п. Они оказывают значительное положительное воздействие на экономические показатели – особенно это заметно в области добычи ресурсов.

Внедрение нейронных сетей для контроля над состоянием здоровья шахтеров может существенно сократить вероятность несчастных случаев и профессиональных заболеваний, а также уменьшить расходы на здравоохранение. Благодаря инновационным системам безопасности добывающие компании не только повышают свою работоспособность, но и улучшают имидж [1].

Применение искусственного интеллекта, в частности нейросетей, становится решающим аспектом в обеспечении безопасности и поддержании здоровья сотрудников в промышленности России. Такие современные системы способны анализировать большие объемы данных и мгновенно отслеживать потенциальные угрозы [2].

Искусственный интеллект и мониторинг как часть современных технических решений играют ключевую роль в улучшении производственных процессов. Они не только усиливают безопасность, особенно в подземных условиях, но и способствуют более эффективному использованию ресурсов, снижая вероятность аварий и происшествий. Эти инновации вносят существенный вклад в экономическую стабильность и конкурентоспособность предприятий за счет улучшения качества товаров и услуг, а также снижения издержек [3]. Внедрение передовых технологий, например нейросетей, преобразует промышленность, делая ее не только более продуктивной, но и безопасной для рабочих.

Внедрение инновационных технологий в мире добычи полезных ископаемых играет ключевую роль в обеспечении безопасности персонала

и уменьшении потенциальных опасностей. Использование алгоритмов искусственного интеллекта, особенно в системах отслеживания состояния здоровья в горных работах, способствует уменьшению вероятности аварий, ускорению рабочих процессов и улучшению экономических показателей компании.

Применение нейронных сетей в процессах контроля здоровья работников играет решающую роль в долгосрочной стабильности предприятия. Такие системы способны распознавать потенциальные опасности, оберегая сотрудников от заболеваний и различных происшествий. Аналитика данных на основе искусственного интеллекта обеспечивает прогнозирование угроз и оптимизацию использования ресурсов, что ведет к повышению эффективности работы.

Применение интеллектуальных систем контроля над работниками, особенно на территориях с повышенными рисками, например в шахтах, значительно уменьшает риски профессиональных заболеваний и различных инцидентов, а также соответствующие издержки. Эти системы, работающие на базе ИИ, мгновенно отвечают на потенциальные угрозы, улучшая тем самым процесс реагирования и упрощая рутинные процедуры. В свою очередь, это способствует увеличению уровня безопасности и надежности производственных процессов, особенно в условиях, где необходим особый контроль безопасности [4].

Отслеживание благополучия сотрудников способствует улучшению климата внутри команды, усиливает верность компании и укрепляет уверенность в управленческом аппарате. Применение технологий на основе искусственного интеллекта для обеспечения безопасности труда снижает вероятность профессиональных рисков и способствует финансовому процветанию бизнеса.

**Постановка задачи.** Создание эффективного инструмента для отслеживания здоровья рабочих на горных предприятиях, особенно при выполне-

нии задач в подземельях, представляет собой ключевой элемент в укреплении безопасности и оптимизации рабочей среды. Ввиду рисков, связанных с работой под землей, и вероятности негативного влияния на здоровье крайне важно иметь систему, позволяющую быстро обнаруживать и нейтрализовать угрозы для здоровья сотрудников. Значимость таких систем обусловлена способностью непрерывно следить за состоянием здоровья сотрудников, что в свою очередь способствует предупреждению нештатных ситуаций и обеспечивает своевременное реагирование и оказание помощи в случае возникновения проблем. Использование передовых методов анализа данных и искусственного интеллекта в системе отслеживания позволит не просто контролировать здоровье сотрудников, но и предсказывать потенциальные угрозы их благополучию, включая болезни и несчастные случаи. Это, в свою очередь, станет ключом к улучшению безопасности на строительной площадке. Группа профессионалов, ответственных за разработку и применение этой системы наблюдения, должна акцентировать внимание на тонкой настройке технологий под уникальные требования горнодобывающей индустрии, на обучении рабочих и на построении прочной инфраструктуры для надежного сбора и обработки информации [5]. Введение подобной системы будет способствовать не просто улучшению рабочих условий и сокращению опасностей для здоровья сотрудников, но и увеличит продуктивность строительства и функционирования подземных объектов на горных работах.

Итоговая цель разработки системы мониторинга за состоянием здоровья рабочих в режиме реального времени в подземных условиях заключается в создании безопасной и эффективной среды труда на горных предприятиях. Эта система позволит оперативно обнаруживать потенциальные угрозы для здоровья сотрудников, предсказывать возможные риски и обеспечивать своевременную медицинскую помощь при нештатных ситуациях. Таким образом, реализация данной системы способствует повышению безопасности, улучшению условий труда и увеличению производительности работ на горных объектах в подземельных условиях [5].

**Основная часть статьи.** Рассмотрим на примере строительства камеры ремонта и обслуживания самоходной техники на Кировском руднике АО «Апатит» горизонта +10 м Кукисвумчоррского крыла основные этапы строительства с приве-

дением примеров использования систем мониторинга для каждого процесса.

*Паспорт буровзрывных работ для камеры.* Коэффициент крепости пород для данной выработки составляет  $f = 14 \dots 16$  по шкале профессора М. М. Протоdjяконова. Площадь выработки  $S = 94.82 \text{ м}^2$ . Раскрытие сечения происходит из передовой выработки площадью сечения  $S = 13.73 \text{ м}^2$ . Размеры выработок приведены на рис. 1.

Применяемый тип взрывчатого вещества (ВВ) – эмульсионное взрывчатое вещество «Сабтэк» производства фирмы «Орика», технические характеристики которого представлены в табл. 1. Способ формирования эмульсионной колонки основного заряда внутри скважины – механизированный, с помощью смесительно-зарядной машины [6].

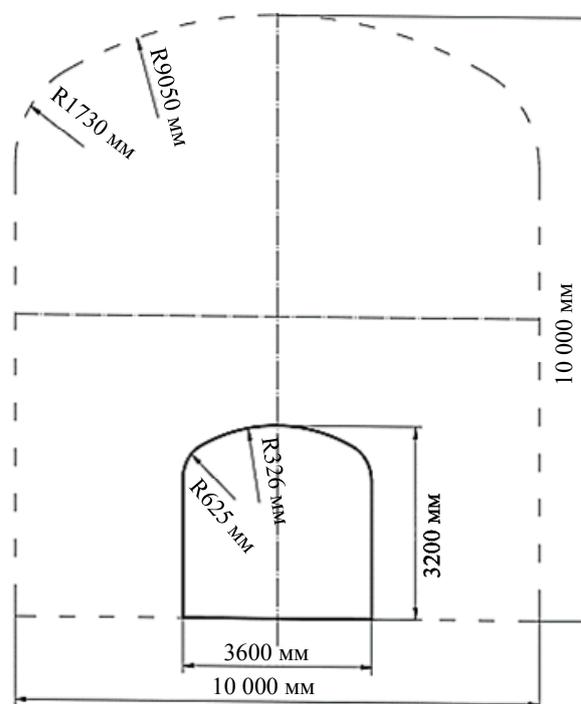


Рис. 1. Сечение выработки  
Fig. 1. Excavation section

Табл. 1. Технические характеристики эмульсионного ВВ «Сабтэк»  
Tab. 1. Technical characteristics the Sabtek explosive emulsion

Показатель	Значение
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0.9
Минимальный диаметр скважины, мм	38
Тип скважины	Сухие и обводненные
Способ доставки	Насосом
Скорость детонации, км/с	4.9
Относительная весовая энергия, %	78
Относительная объемная энергия, %	89
Выход CO <sub>2</sub> , кг/т	183
Работоспособность ВВ, см <sup>3</sup>	460

Все значения используемых в расчетах параметров берутся из источников [6], [7] и учебного пособия Ю. С. Пухова «Рудничный транспорт». М.: Недра, 1991.

Для определения удельного расхода ВВ на отработку массива скважинными зарядами используется формула [6]

$$q = q_3 e_{\text{ВВ}} k_2 k_3 k_4 k_5 k_6, \text{ кг/м}^3,$$

где  $q_3 = 1.25$  – расход ВВ на дробление, кг/м<sup>3</sup> [15];

$e_{\text{ВВ}} = \frac{A}{360} = \frac{460}{360} = 1.27$  – коэффициент относительной работоспособности ВВ, где  $A = 460 \text{ см}^3$  – работоспособность ВВ, см<sup>3</sup>;

$$k_2 = \left( \frac{L_{\text{тр}}}{d_k} \right)^{n_{\text{тр}}},$$

– коэффициент, учитывающий трещиноватость массива и требуемый размер кондиционного куска, где  $L_{\text{тр}} = 0.4$  – среднее расстояние между трещинами в массиве, м;  $d_k = 0.5$  – размер кондиционного куска руды, м;  $n_{\text{тр}} = 0.5$  – показатель степени, зависящий от трещиноватости массива, для трещиноватых пород;

$$k_2 = \left( \frac{0.4}{0.5} \right)^{0.5} = 0.89;$$

$k_3 = 1.2$  – коэффициент, учитывающий схему расположения скважин в массиве, при веерном расположении скважин равен 1, 2, при параллельном расположении скважин равен 1;  $k_4 = 1$  – коэффициент, учитывающий расположения скважин относительно свободной поверхности при отбойке на разрешенную породу (зажатую среду) 1.3, при отбойке на одну обнаженную поверхность равен 1;  $k_5 = 0.95$  – коэффициент, учитывающий способ заряжения, при пневматическом заряжении эмульсионным ВВ.

Для скважин диаметром 53 мм коэффициент, учитывающий диаметр скважины и степень массивности пород,

$$k_6 = \left( \frac{d_{\text{СКВ}}}{0.105} \right)^{n_{\text{тр}}} = \left( \frac{0.053}{0.105} \right)^{0.5} = 0.71,$$

$$q = 1.25 \cdot 1.27 \cdot 0.89 \cdot 1.2 \cdot 1.0 \cdot 0.95 \cdot 0.71 = 1.14 \text{ кг/м}^3.$$

Линия наименьшего сопротивления (ЛНС) скважин диаметром 53 мм определяется по формуле

$$W = d_{\text{СКВ}} \sqrt{\frac{0.785 \Delta_{\text{зар}} K_3}{mq}},$$

где  $\Delta_{\text{зар}} = 1050$  – плотность заряжения ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  $K_3 = 0.6$  – коэффициент заполнения скважин (для веерного 0.6–0.72);  $m = 1.1$  – коэффициент сближения скважин (зависит от ориентировки трещин в направлении заряда). Тогда

$$W = 0.053 \sqrt{\frac{0.785 \cdot 1050 \cdot 0.6}{1.1 \cdot 1.14}} = 1.05 \text{ м.}$$

Максимальное расстояние между концами соседних скважин

$$a_{\text{max}} = (1.5 \dots 1.7) W,$$

$$a_{\text{max}} = (1.5 \dots 1.7) \cdot 1.05 = 1.58 \dots 1.79 \text{ м,}$$

$$a_{\text{max}} \approx 1.6 \text{ м.}$$

Минимальное расстояние между заряженными частями скважин вблизи контура буровой выработки

$$a_{\text{min}} = (0.5 \dots 0.7) W,$$

$$a_{\text{min}} = (0.5 \dots 0.7) \cdot 1.05 = (0.53 \dots 0.74) \text{ м,}$$

$$a_{\text{min}} = 0.6 \text{ м.}$$

По результатам графического построения (рис. 2) число скважин в полувеере  $N = 8$ , общее число скважин в веере равняется  $2N = 16$ .

Суммарная длина 16 скважин (табл. 2)

$$L_{\text{СКВ}} = (3.45 + 3.2 + 3.32 + 3.84 + 5.38 + 6.0 + 6.0 + 6.0) \cdot 2 = 74.38 \text{ м.}$$

Диаметр буровой коронки составляет 51 мм, с учетом интенсивной вибрации бурового инструмента при бурении диаметр скважин принимается 53 мм.

Масса заряда при заряжении гранулированными или эмульсионными ВВ рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{СКВ.зар}} = 0.785 d_{\text{ш}}^2 \Delta_{\text{зар}} l_{\text{зар}},$$

где  $d_{\text{ш}}$  – диаметр скважины, м;  $\Delta_{\text{зар}}$  – плотность заряжения ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  $l_{\text{зар}}$  – длина заряда в скважине, м ( $d_{\text{ш}} = 0.053$  м;  $\Delta_{\text{зар}} = 900$  кг/м<sup>3</sup>;  $l_{\text{зар}} = 2.9$ ).

Масса заряда в первой скважине:

$$Q_{1 \text{ СКВ.зар}} = 0.785 \cdot 0.053^2 \cdot 900 \cdot 2.9 = 5.8 \text{ кг.}$$

Объем ВВ в скважинах:

$$V_{1 \text{ СКВ.ВВ}} = \frac{Q_{\text{СКВ.зар}}}{\rho},$$

где  $\rho = 900$  – плотность эмульсионного ВВ, кг/м<sup>3</sup>.

Табл. 2. Параметры скважин  
Tab. 2. Borehole parameters

Номер скважины в полувеере	Длина скважины $L_{\text{СКВ}}$ , м	Длина заряда $l_{\text{зар}}$ , м	Масса заряда в скважине $Q$ , кг	Объем ВВ в скважине, м <sup>3</sup>
1	3.45	2.9	5.8	0.0064
2	3.2	2.2	4.3	0.0047
3	3.32	1.7	3.3	0.0037
4	3.84	2.8	5.5	0.0061
5	5.38	4.9	9.7	0.0107
6	6	5.0	9.8	0.0109
7	6	4.4	8.7	0.0097
8	6	5.0	9.8	0.0109
Всего в полувеере	37.19	28.6	56.8	0.0631
Всего в веере	74.38	57.26	113.6	0.126262
Всего на заходку	743.8	572.6	1136	1.26

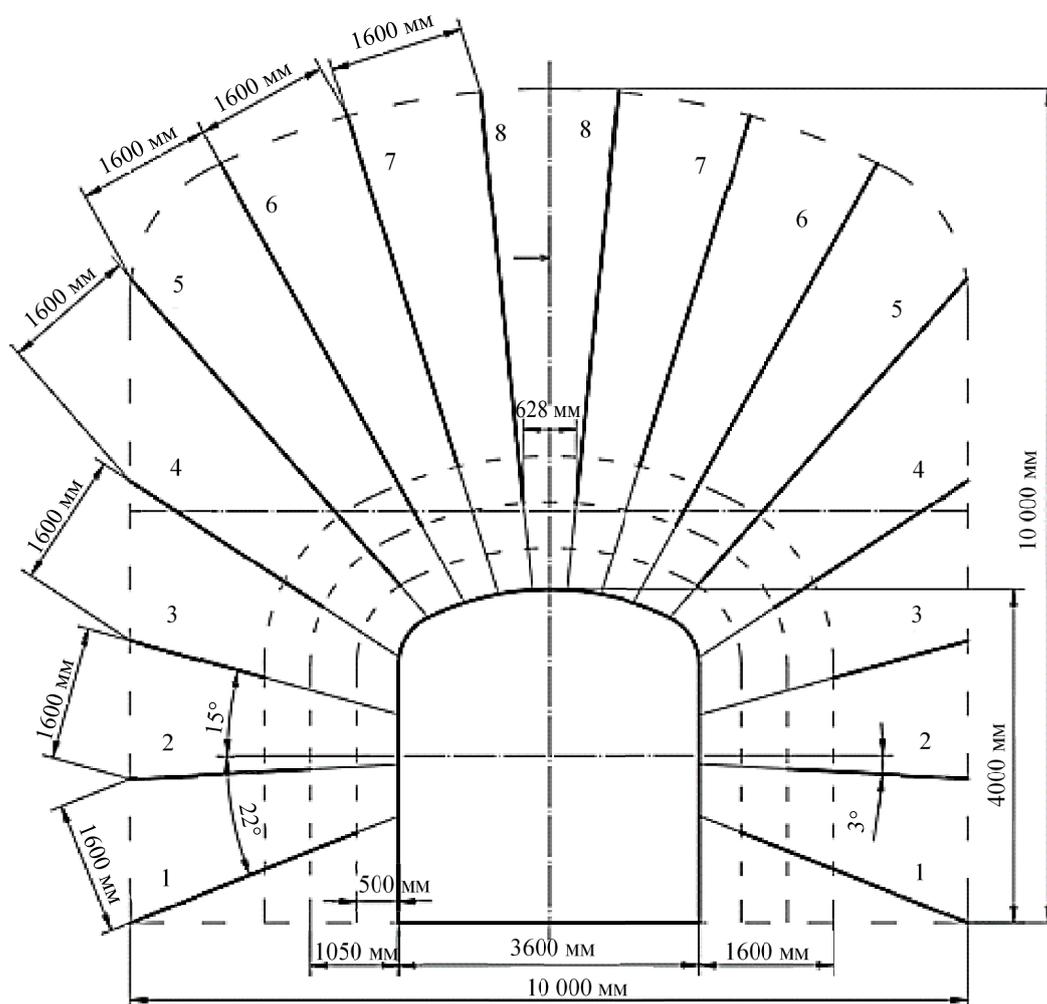


Рис. 2. Схема расположения скважин  
Fig. 2. The layout of wells

Объем ВВ в первой скважине

$$V_{\text{СКВ.ВВ}} = \frac{5.8}{900} = 0.0064 \text{ м}^3.$$

Принимаем заходку равной 10 м, тогда между веерами скважин расстояние 1.0 м, следовательно, на заходку 10 вееров скважин. Параметры

скважин приведены в табл. 2, конструкция скважины представлена на рис. 3, где обозначены: ЭВВ – эмульсионное взрывчатое вещество; ДПМС – детонатор промежуточный малогабаритный ступенчатый;  $L_{\text{СКВ}}$  – длина скважины;  $l_{\text{нед}}$  – длина недозаряда.

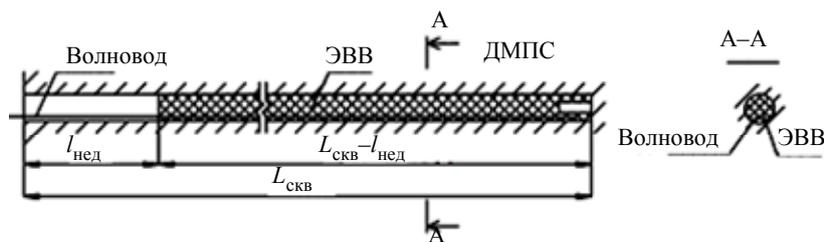


Рис. 3. Конструкция скважины

Fig. 3. Well design

Удельный расход ВВ на 1 м выработки

$$q_{1\text{м}} = \frac{Q}{l_{\text{зах}}},$$

где  $Q = 1136$  кг (табл. 2);  $l_{\text{зах}} = 10$  – длина заходки, м. Тогда

$$q_{1\text{м}} = \frac{1136}{10} = 113.6 \text{ кг/м}.$$

Удельный расход ВВ на 1 м<sup>3</sup> выработки:

$$q_{1\text{м}^3} = \frac{Q}{l_{\text{зах}} S_{\text{св}}},$$

$$S_{\text{св}} = S_{\text{св.расш}} - S_{\text{св.перед}},$$

где  $S_{\text{св.перед}} = 13.73$  – площадь сечения передовой выработки, м<sup>2</sup>;  $S_{\text{св.расш}} = 94.82$  – площадь сечения расширенной выработки, м<sup>2</sup>. Тогда

$$S_{\text{св}} = 94.82 - 13.73 = 81.09 \text{ м}^2,$$

$$q_{1\text{м}^3} = \frac{1136}{10 \cdot 81.09} = 1.4 \text{ кг/м}^3.$$

Объем буровых работ:

$$W_{\text{б}} = N_{\text{в}} L_{\text{свб}},$$

где  $N_{\text{в}} = 10$  – количество вееров скважин на заходку;  $L_{\text{свб}} = 74.38$  м. Тогда

$$W_{\text{б}} = 10 \cdot 74.38 = 743.8 \text{ скв} \cdot \text{м}.$$

Объем буровых работ на 1 м выработки:

$$W_{1\text{м}} = \frac{W_{\text{б}}}{l_{\text{зах}}},$$

$$W_{1\text{м}} = \frac{743.8}{10} = 74.38 \text{ скв} \cdot \text{м/м}.$$

Объем буровых работ на 1 м<sup>3</sup> выработки:

$$W_{1\text{м}^3} = \frac{W_{\text{б}}}{l_{\text{зах}} S_{\text{св}}},$$

$$W_{1\text{м}^3} = \frac{743.8}{10 \cdot 81.09} = 0.92 \text{ скв} \cdot \text{м/м}^3.$$

Объем горной массы после проведения взрывных работ

$$V_{\text{Г.М}} = l_{\text{зах}} S_{\text{св}} K_{\text{р}} K_{\text{и}},$$

где  $K_{\text{р}} = 2.2$  – коэффициент разрыхления горных пород;  $K_{\text{и}} = 1.03$  – коэффициент излишка сечения. Тогда

$$V_{\text{Г.М}} = 10 \cdot 81.09 \cdot 2.2 \cdot 1.03 = 1837.5 \text{ м}^3.$$

Объем горной массы на 1 м выработки:

$$V_{1\text{м}} = \frac{V_{\text{Г.М}}}{l_{\text{зах}}} = \frac{1837.5}{10} = 183.8 \text{ м}^3/\text{м}.$$

Объем горной массы на 1 м<sup>3</sup> выработки:

$$V_{1\text{м}^3} = \frac{V_{\text{Г.М}}}{l_{\text{зах}} S_{\text{св}}} = \frac{1837.5}{10 \cdot 81.09} = 2.27.$$

**Вывод:** при буровзрывных работах в подземных рудниках используются следующие датчики различных систем мониторинга:

- трехкомпонентные датчики деформации для контроля процессов напряженно-деформационного состояния горных пород в выработках. Эти датчики позволяют измерять деформации в трех направлениях (например, вдоль, поперек и по вертикали относительно выработки) [8];

- датчики уровня воды используются для контроля уровня воды в подземных выработках. Они устанавливаются в скважинах или других местах, где необходимо измерять уровень воды;

- датчики температуры и влажности применяются для контроля температуры и влажности воздуха в подземных выработках. Это помогает поддерживать оптимальные условия для работы персонала и оборудования, а также предотвращает образование конденсата и коррозию;

- датчики скорости потока воздуха используются для контроля скорости движения воздушных потоков в подземных выработках. Это важно для обеспечения безопасности работников, так как слишком быстрое движение воздуха может

вызвать опасные ситуации, например внезапное изменение направления движения воздуха или образование завихрений [9].

*Проветривание.* Длина выработки горизонта +10 м равняется 200 м. В расчете учитываются утечки на двух поворотах под 90°. При заданном диаметре вентиляционного трубопровода 0.8 м длина основного звена вентиляционного става равна 10 м. Проветривание осуществляется нагнетательным способом.

Количество воздуха по максимальному количеству людей, находящихся в выработке,

$$Q_{\text{л}} = \frac{K_3 q_{\text{л}} n_{\text{л}}}{60},$$

где  $K_3 = 1.3$  – коэффициент запаса;  $q_{\text{л}} = 6$  – норма воздуха на одного человека в минуту, м<sup>3</sup>/мин;  $n_{\text{л}} = 5$  – максимальное число людей в выработке. Тогда

$$Q_{\text{л}} = \frac{1.3 \cdot 6 \cdot 5}{60} = 0.65 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Количество воздуха по фактору газов, образующимся при взрывных работах

$$Q_3 = \frac{2,25}{t} \sqrt[3]{\frac{BJ_{\text{ВВ}} L_{\text{кр}}^2 S_{\text{св}}^2 K_{\text{обв}}}{K_{\text{ут}}^2}},$$

где  $t = 90$  – время проветривания выработки, мин;  $K_{\text{обв}} = 0.6$  – коэффициент обводненности.

Критическая длина выработки

$$L_{\text{кр}} = \frac{12.5 BJ_{\text{ВВ}} k_{\text{т.д}}}{S_{\text{св}} K_{\text{ут}}^2},$$

где  $B = 1136$  – количество одновременно взрывающегося ВВ, кг;  $J_{\text{ВВ}} = 40$  – газовость ВВ, при взрывании по породе и руде, л/кг;  $k_{\text{т.д}} = 0.41$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $K_{\text{ут}} = 1.29$  – коэффициент утечек [7]. Тогда

$$L_{\text{кр}} = \frac{12.5 \cdot 1136 \cdot 40 \cdot 0,41}{81,09 \cdot 1,29^2} = 1726 \text{ м},$$

$$Q_3 = \frac{2,25}{90} \sqrt[3]{\frac{1136 \cdot 40 \cdot 200^2 \cdot 81,09^2 \cdot 0,6}{1,29^2}} = 406,83 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Количество воздуха по фактору газов, образующихся при работе самоходного дизельного оборудования (СДО),

$$Q_{\text{СДО}} = q_{\text{СДО}} N K_{\text{од}},$$

где  $q_{\text{СДО}} = 3$  – норма расхода свежего воздуха на 1 л. с. используемого оборудования (для самоходных подземных машин с дизельным приводом не менее 3 м<sup>3</sup>/мин;  $N = 84$  л. с. – мощность двигателя Atlas Cospro ST-2D, л. с.;  $K_{\text{од}} = 1$  – коэффициент одновременной работы оборудования [7]. Тогда

$$Q_{\text{СДО}} = 3 \cdot 84 \cdot 1 = 252 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Количество воздуха по минимальной скорости воздушной струи

$$Q_{\text{min}} = v_{\text{min}} S_{\text{св}},$$

$$v_{\text{min}} = \frac{0,1P}{S_{\text{св}}},$$

где  $P = 37,21$  – периметр выработки, м. Тогда

$$Q_{\text{min}} = 0,046 \cdot 81,09 = 3,72 \text{ м}^3/\text{с} = 223,26 \text{ м}^3/\text{мин},$$

$$V_{\text{min}} = \frac{0,1 \cdot 37,21}{81,09} = 0,046 \text{ м/с}.$$

Расчетное количество воздуха, требуемое для подачи в забой тупиковой выработки, принимается по наибольшему расчетному фактору, т. е. по отработанным газам двигателей внутреннего сгорания,  $Q = 406,83 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

Для подачи воздуха к забою используются гибкие брезентовые трубопроводы диаметром 1020 мм.

Необходимое количество воздуха, подаваемое вентилятором,

$$Q_{\text{в}} \geq Q_{\text{max}} K_{\text{ут}} = 406,83 \cdot 1,29 = 524,81 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Для выбора вентилятора местного проветривания (ВМП), кроме его производительности требуется знать напор, необходимый для движения воздуха в трубопроводе при наибольшей его длине.

Необходимый напор вентилятора

$$H_{\text{в}} = h_{\text{тр}}.$$

Здесь  $h_{\text{тр}} = R_{\text{тр}} Q_{\text{в}}^2 \left( \frac{0,59}{K_{\text{ут}}} + 0,41 \right)^2$  – напор, затрачиваемый на преодоление сопротивления трения в трубопроводе, Па;  $R_{\text{тр}}$  – сопротивление гибкого трубопровода с учетом поворотов,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^7$ ,

$$R_{\text{тр}} = r_{\text{тр}} (l_{\text{тр}} + 20d_{\text{тр}}n_1 + 10d_{\text{тр}}n_2),$$

где  $r_{\text{тр}} = 0.158$  – удельное аэродинамическое сопротивление гибкого вентиляционного трубопровода без утечек воздуха,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$  [7];  $l_{\text{тр}} = 200$  – длина трубопровода, м;  $d_{\text{тр}} = 1.0$  – требуемый диаметр вентиляционного трубопровода, м;  $n_1 = 2$ ;  $n_2 = 0$  – количество поворотов трубопровода под углами 90 и 45° соответственно. Тогда

$$R_{\text{тр}} = 0.158 \cdot (200 + 20 \cdot 1.0 \cdot 2) = 37.92 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^7,$$

$$h_{\text{тр}} = 37.92 \cdot \left(\frac{524.81}{60}\right)^2 \left(\frac{0.59}{1.29} + 0.41\right)^2 = 2.182 \text{ Па},$$

$$H_{\text{в}} = h_{\text{тр}} = 2.182 \text{ кПа}.$$

Выбираем вентилятор ВМ-8М, который удовлетворяет условиям проветривания подземных горных выработок – его характеристики приведены в табл. 3. График аэродинамических характеристик представлен на рис. 4.

Табл. 3. Характеристики вентилятора ВМ-8М  
Tab. 3. Characteristics of the VM-8M fan

Показатель	Значение
Диаметр рабочего колеса, мм	800
Частота вращения рабочего колеса, $\text{мин}^{-1}$	2930
Номинальное полное давление, Па	2800
Номинальная производительность, $\text{м}^3/\text{ч}$	10
КПД	0.8
Мощность электропривода, кВт	50
Напряжение, В	380/660

Таким образом, данный вентилятор отвечает параметрам проветривания.

**Вывод:** при проветривании в подземных рудниках используются автоматические системы мониторинга, которые обеспечивают контроль над вентиляцией горных выработок и управление ею. Эти системы включают:

- ручные инструментальные измерения расхода воздуха, его микроклиматических параметров и концентрации горючих и ядовитых примесей [10];
- автоматические системы раннего обнаружения пожаров, которые обнаруживают начальную стадию возникновения пожаров и передают информацию о состоянии системы вентиляции;
- системы аэрогазодинамического контроля, которые отслеживают параметры проветривания горных выработок и прогнозируют развитие аварийного воздухораспределения [11].

Для обеспечения измерительной аппаратурой замерных пунктов и оперативного контроля используются аналитические методы расчета воздухораспределения и математические модели вентиляционных сетей.

**Уборка породы.** В процессе проходки склада ВМ погрузка горной породы в самосвал будет вестись на автоуклоне. Так как существует второй заезд на горизонт +10 м, погрузка не будет приводить к затрудненному движению.

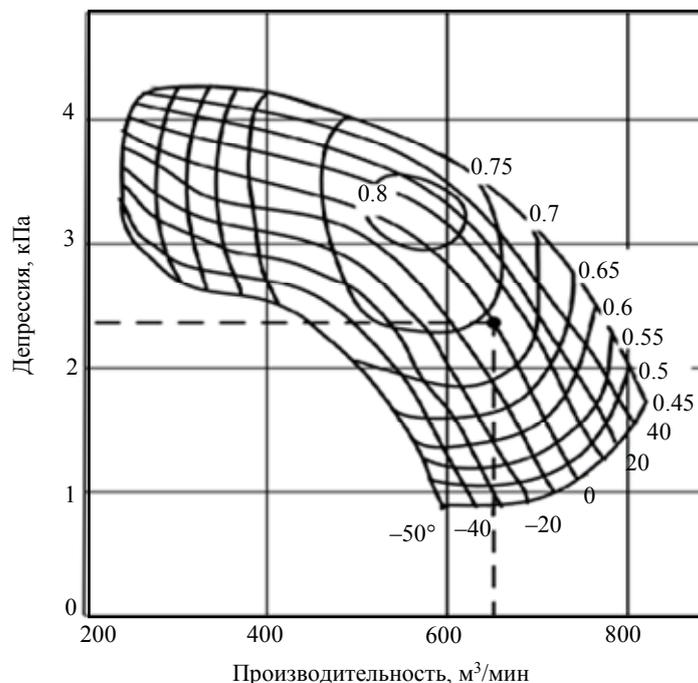


Рис. 4. Проверка правильности выбора вентилятора ВМ-8М  
Fig. 4. Verification of the correctness of the VM-8M fan selection

Эксплуатационная производительность

$$W_{\text{экс}} = \frac{V_{\text{к}}bc}{d g f + L k \left( \frac{1}{j} + \frac{1}{h} \right) + e},$$

где  $V_{\text{к}} = 1.9$  – вместимость ковша, м;  $b = 0.8$  – коэффициент заполнения ковша;  $c = 0.8$  – коэффициент использования ПДМ во времени;  $d = 0.8$  – продолжительность цикла черпания, мин;  $g = 1.15$  – коэффициент, учитывающий раскайловку негабарита;  $f = 1.3$  – коэффициент, учитывающий маневры ПДМ;  $L = 100$  – плечо откатки, м;  $k = 1.25$  – коэффициент, учитывающий неравномерности движения;  $j = 100$  – скорость движения груженого ПДМ, м/мин;  $h = 130$  – скорость движения порожнего ПДМ, м/мин;  $e = 0.5$  продолжительность разгрузки ковша, мин. Тогда

$$\begin{aligned} W_{\text{экс}} &= \\ &= \frac{1.9 \cdot 0.8 \cdot 0.8}{0.8 \cdot 1.15 \cdot 1.3 + 100 \cdot 1.25 \cdot \left( \frac{1}{100} + \frac{1}{130} \right) + 0.5} = \\ &= 0.31 \text{ м}^3/\text{мин} = 18.67 \text{ м}^3/\text{ч}. \end{aligned}$$

Продолжительность уборки породы

$$\begin{aligned} T &= \frac{V_{\text{г.м}}}{W_{\text{экс}}}, \\ T &= \frac{1837.5}{18.67} = 98.42 \text{ ч} \approx 98 \text{ ч } 30 \text{ мин}, \end{aligned}$$

где  $V_{\text{г.м}} = 1837.5$  – объем горной массы, м<sup>3</sup>.

Время погрузки породы в самосвал

$$\begin{aligned} T_{\text{погр}} &= \frac{V_{\text{куз}}}{W_{\text{экс}}}, \\ T_{\text{погр}} &= \frac{9}{18.67} = 0.5 \text{ ч} = 30 \text{ мин}. \end{aligned}$$

где  $V_{\text{куз}} = 9$  – объем кузова, м<sup>3</sup>.

Примем время подъема на поверхность, разгрузки кузова и спуска к месту погрузки за  $T_{\text{выгр}} = 1.5$  ч.

Тогда количество самосвалов

$$\begin{aligned} T &= \frac{T_{\text{выгр}}}{T_{\text{погр}}} + 1, \\ T &= \frac{1.5}{0.5} + 1 = 4 \text{ шт.} \end{aligned}$$

**Вывод:** при уборке породы в подземных рудниках применяются различные системы мониторинга для обеспечения безопасности и эффективности работ. Это включает системы мониторинга

взрывов для контроля взрывов при разрушении породы, системы вентиляции и газоанализа для контроля качества воздуха и безопасности рабочих, системы контроля и управления техникой для оптимизации процессов уборки породы, системы контроля давления и стабилизации горных выработок для предотвращения обрушений породы, системы мониторинга осадков для контроля их уровня и предотвращения опасных ситуаций, а также системы контроля температуры и влажности для обеспечения комфортных условий работы и предотвращения перегрева оборудования [12]. Все эти системы помогают повысить безопасность рабочих, эффективность уборки породы и обеспечить нормальное функционирование подземных рудников.

**Обсуждение результатов.** В рамках применения искусственного интеллекта, в частности нейронных сетей, в горнодобывающей индустрии обозначается значимый вклад данных технологий в обработку массивов данных, которые характерны для этой сферы. Интеллектуальные системы, обученные распознаванию сложных паттернов и выполнению прогностических функций, могут революционизировать процессы планирования и безопасности при разработке подземных пространств.

Специфические применения нейронных сетей включают возможность анализа множественных переменных, влияющих на целостность горных выработок, но не ограничиваются ею. Среди этих переменных могут быть учтены гидрогеологические характеристики, литология породы, а также горное давление [13]. Это способствует раннему выявлению и минимизации рисков, что подразумевает повышение уровня защиты персонала и технических средств в условиях горного производства.

В области геотехнического инжиниринга алгоритмы искусственного интеллекта, в частности нейронные сети, представляют собой перспективные инструменты для решения задач по усилению стабильности горных выработок. Их применение способствует рационализации использования крепежных материалов посредством выявления их наиболее эффективного распределения на основе комплексного учета геотехнических параметров, включая геомеханические свойства пород и деформационные процессы [14].

В дополнение к этому нейронные сети могут быть адаптированы для контроля и оптимизации систем вентиляции и дренажа в подземных условиях. Возможность анализа множественных параметров окружающей среды – качества воздуха,

влажности и температуры, обеспечивает интеллектуализацию управления данными системами, что в свою очередь способствует поддержанию здоровых и безопасных условий труда в подземных сооружениях.

Аналитическое изучение применения искусственных нейронных сетей в сфере разработки месторождений полезных ископаемых демонстрирует их значительный потенциал в оптимизации операций планирования, мониторинга и обеспечения безопасности в процессах разработки и использования горных выработок. В контексте современной горнопромышленной деятельности искусственные нейронные сети оказывают существенное влияние на повышение производительности и уровня безопасности предприятий, занимающихся добычей полезных ископаемых.

**Выводы и заключение.** В целом, разработка и исследование систем мониторинга состояния горнорабочего в режиме реального времени с ис-

пользованием нейросетей имеют огромный потенциал для повышения безопасности, эффективности и экономической эффективности горнодобывающих предприятий. Они позволяют оперативно реагировать на возможные проблемы, прогнозировать и предотвращать аварии, а также улучшать профессиональные навыки рабочих.

В заключение разработка и исследование систем мониторинга состояния горнорабочего в режиме реального времени с помощью нейросетей – это важная и актуальная проблема в горнодобывающей промышленности. Это позволяет повысить безопасность и эффективность деятельности рабочих, а также имеет потенциал для дальнейшего применения в других отраслях промышленности. Однако для успешной реализации таких систем необходимо провести дополнительные исследования и разработки, а также обеспечить надежность и безопасность их работы.

#### Список литературы

1. Ильюшин Ю. В., Сандыга М. С. Программа для моделирования теплофизических свойств высокопарафинистой нефти URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43885992> (дата обращения: 22.04.2024).

2. Ильюшин Ю. В. Анализ и синтез системы управления технологическим процессом добычи высокопарафинистой нефти. СПб.: Сатис, 2023. 204 с.

3. Ильюшин Ю. В., Кухарова Т. В., Афанасьева О. В. Моделирование систем. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50426754> (дата обращения: 30.05.2024).

4. Ильюшин Ю. В., Кухарова Т. В., Ильюхина Я. А. Программа для моделирования системы управления температурным полем методической печи нагрева длинномерных металлических изделий. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54049403> (дата обращения: 30.05.2024).

5. Чжоу К., Рейес М., Гирман М. Электромагнитные помехи (ЭМП) в подземных угольных шахтах: обзор литературы и практические соображения // Горный металл. Разведка. 2022, № 39. С. 421–431.

6. Филиппов В. Н., Христюков Е. А., Волков А. В. Определение оптимальных параметров распределения веерных скважинных зарядов ВВ при отбойке блоков // Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та. 2023, № 2 (156). С. 92–100.

7. Столбченко Е. В. Обоснование рациональных параметров вентиляционных систем местного проветривания. Днепропетровск: НГУ, 2013. 80 с.

8. Пат. № 2799233 С1 РФ, МПК G01R 29/08, G01R 33/07. Устройство для диагностики электромагнитного поля / А. В. Мартиросян, Ю. В. Ильюшин, Н. А. Таланов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образо-

вания «Санкт-Петербургский горный университет». Заявл. 30.03.2023. Оpubл. 04.07.2023.

9. Whatmore R. W., Samuel J. Ward; Pyroelectric infrared detectors and materials – A critical perspective // J. Appl. Physics. 2023, № 133 (8). P. 080902. doi: 10.1063/5.0141044.

10. Wei Chen. Personnel precise positioning system of coal mine underground based on UWB // J. Phys. Conf. Ser. 2021, no. 1920. P. 012115.

11. UWB based localization system with inertial sensor for underground coal mines / M. Li, H. Zhu, S. You, S. Tango // IEEE Sens. J. 2020, no. 20. P. 6652–6669.

12. Подземная угольная шахта 5G Покрытие. URL: <https://www.thefo.com/blog/underground-coal-mine-5g-coverage.html> (дата обращения: 30.05.2024).

13. A survey on the Handover Management in 5G-NR Cellular Networks: Aspects, Approaches and Challenges / A. Haghrah, M. P. Abdollahi, H. Azarkhava, J. M. Niya // J. on Wireless Communications and Networking. 2023, 52. URL: <https://typeset.io/papers/a-survey-on-the-handover-management-in-5g-nr-cellular-32ldht1h?ysclid=lxfcrafq6q371794307> (дата обращения: 28.05.2024).

14. Saliva a physiological fluid with established and potential diagnostic uses / M. Boroumand, A. Olianias, T. Cabras, B. Manconi, D. Fanny, G. Faa, K. Desiderio, I. Messina, M. Castagnola // J. Sep. Sci. 2021, 44, 3677–3690.

15. Филиппов В. Н., Христюков Е. А., Волков А. В. Определение оптимальных параметров распределения веерных скважинных зарядов ВВ при отбойке блоков // Вестн. КузГТУ. 2023, № 2 (156). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-raspredeleniya-veernyh-skvazhinnyh-zaryadov-vv-pri-otboike-blokov> (дата обращения: 30.05.2024).

### Информация об авторах

**Новожилов Игорь Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматике и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [novozhilovim@list.ru](mailto:novozhilovim@list.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

**Мартirosян Александр Витальевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: [Martirosyan\\_AV@pers.spmi.ru](mailto:Martirosyan_AV@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-1455-0930>

**Первухин Дмитрий Анатольевич** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: [pervukhin\\_da@pers.spmi.ru](mailto:pervukhin_da@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

**Трофимец Валерий Ярославович** – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем и вычислительной техники Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: [Trofimets\\_VYa@pers.spmi.ru](mailto:Trofimets_VYa@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-6873-6642>

**Тукеев Дмитрий Леонидович** – д-р техн. наук, профессор Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: [Tukeev\\_DL@pers.spmi.ru](mailto:Tukeev_DL@pers.spmi.ru)

**Лойко Данил Михайлович** – аспирант. Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: [danil\\_loiko@mail.ru](mailto:danil_loiko@mail.ru)

**Искандеров Юрий Марсович** – д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией интеллектуальных систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, 14-я линия, д. 39, В. О., Санкт-Петербург, 199178, Россия.

E-mail: [iskanderov.y@iias.spb.su](mailto:iskanderov.y@iias.spb.su)

<https://orcid.org/0000-0002-1455-0930>

#### **Вклад авторов:**

Новожилов И. М. – общее руководство.

Мартirosян А. В. – введение.

Первухин Д. А. – выводы, заключение.

Трофимец В. Я. – методология исследования.

Тукеев Д. Л. – экспериментальные исследования.

Лойко Д. М. – расчеты технологических процессов.

Искандеров Ю. М. – литературный обзор.

#### References

1. Analiz i identifikacija jelektromagnitnyh polej prostranstvenno raspredelennyh sistem upravlenija / I. M. Novozhilov, O. A. Beljaevskij, Ju. V. Il'jushin, T. V. Kuharova, E. M. Mihajlova // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2022. T. 15, № 2. S. 41–50. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-41-50. (In Russ.).

1. Il'jushin Ju. V., Sandyga M. S. Programma dlja modelirovanija teplofizicheskikh svojstv vysokoparafinistoj

nefti URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43885992> (data obrashhenija: 22.04.2024). (In Russ.).

2. Il'jushin Ju. V. Analiz i sintez sistemy upravlenija tehnologicheskim processom dobychi vysokoparafinistoj nefti. SPb: Satis', 2023. 204 s. (In Russ.).

3. Il'jushin Ju. V., Kuharova T. V., Afanas'eva O. V. Modelirovanie sistem. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50426754> (data obrashhenija: 30.05.2024). (In Russ.).

4. Il'jushin Ju. V., Kuharova T. V., Il'juhina Ja. A. Programma dlja modelirovanija sistemy upravlenija temperaturnym polem metodicheskoy pechi nagreva dlin-nomernyh metallicheskikh izdelij. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54049403> (data obrashhenija: 30.05.2024). (In Russ.).
5. Chzhou K., Rejes M., Girman M. Jelektromagnitnye pomehi (JeMP) v podzemnyh ugol'nyh shahtah: obzor literatury i prakticheskie soobrazhenija // Gornyj metall. Razvedka. 2022, № 39. S. 421–431. (In Russ.).
6. Filippov V. N., Hristoljubov E. A., Volkov A. V. Opre-delenie optimal'nyh parametrov raspredelenija veernyh skvazhinnyh zarjadov VV pri otbojke blokov // Vestn. Kuzbasskogo gos. tehn. un-ta. 2023, №. 2 (156). S. 92–100. (In Russ.).
7. Stolbchenko E. V. Obosnovanie racional'nyh pa-rametrov ventiljacionnyh sistem mestnogo provetriva-nija. Dnepropetrovsk: NGU, 2013. 80 s. (In Russ.).
8. Pat. № 2799233 C1 RF, MPK G01R 29/08, G01R 33/07. Ustrojstvo dlja diagno-stiki jelektromagnitnogo polja / A. V. Martirosjan, Ju. V. Il'jushin, N. A. Talanov; zajavitel' Federal'noe gos. bjuzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija «Sankt-Peterburgskij gornyj universitet». Zajavl. 30.03.2023. Opubl. 04.07.2023. (In Russ.).
9. Whatmore R. W., Samuel J. Ward; Pyroelectric in-ffrared detectors and materials – A critical perspective // J. Appl. Physics. 2023, № 133 (8). P. 080902. doi: 10.1063/5.0141044.
10. Wei Chen. Personnel precise positioning system of coal mine underground based on UWB // J. Phys. Conf. Ser. 2021, no. 1920. P. 012115.
11. UWB based localization system with inertial sen-sor for underground coal mines / M. Li, H. Zhu, S. You, S. Tango // IEEE Sens. J. 2020, no. 20. P. 6652–6669.
12. Podzemnaja ugol'naja shahta 5G Pokrytie. URL: <https://www.thefo.com/blog/underground-coal-mine-5g-coverage.html> (data obrashhenija: 30.05.2024). (In Russ.).
13. A survey on the Handover Management in 5G-NR Cellular Networks: Aspects, Approaches and Chal-lenges / A. Haghrah M. P. Abdollahi, H. Azarkhava, J. M. Niya // J. on Wireless Communications and Network-ing. 2023, 52. URL: <https://typeset.io/papers/a-survey-on-the-handover-management-in-5g-nr-cellular-32ldht1h7ysclid=lxfcrafq6q371794307> (дата обращения: 28.05.2024).
14. Saliva a physiological fluid with established and potential diagnostic uses / M. Boroumand, A. Olianias, T. Cabras, B. Manconi, D. Fanny, G. Faa, K. Desiderio, I. Messana, M. Castagnola // J. Sep. Sci. 2021, 44, 3677–3690
15. Filippov V. N., Hristoljubov E. A., Volkov A. V. Opre-delenie optimal'nyh parametrov raspredelenija veernyh skvazhinnyh zarjadov VV pri otbojke blokov// Vestn. KuzGTU. 2023, № 2 (156). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-raspredeleniya-veernyh-skvazhinnyh-zaryadov-vv-pri-otbojke-blokov> (data obrashhenija: 30.05.2024). (In Russ.).

#### Information about the authors

**Igor M. Novozhilov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [novozhilovim@list.ru](mailto:novozhilovim@list.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

**Alexander V. Martirosyan** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of System Analysis and Management of Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: [Martirosyan\\_AV@pers.spmi.ru](mailto:Martirosyan_AV@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-1455-0930>

**Dmitry A. Pervukhin** – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of System Analysis and Manage-ment of Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: [pervukhin\\_da@pers.spmi.ru](mailto:pervukhin_da@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

**Valery Ya. Trofimets** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Information Systems and Computer En-gineering of Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: [Trofimets\\_VYa@pers.spmi.ru](mailto:Trofimets_VYa@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-6873-6642>

**Dmitry L. Tukeev** – Dr Sci. (Eng.), Professor of Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasi-lievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: [Tukeev\\_DL@pers.spmi.ru](mailto:Tukeev_DL@pers.spmi.ru)

**Danil M. Loiko** – postgraduate student. St. Petersburg Mining University Catherine II Saint Petersburg Mining University, Vasilievsky Island, Vasilyevsky Island, 21<sup>st</sup> line no. 2, Saint Petersburg, 199106, Russia.  
E-mail: danil\_loiko@mail.ru

**Yuri M. Iskanderov** – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head Laboratory of Intelligent Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14<sup>th</sup> line, 39, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199178, Russia.  
E-mail: Tiskanderov.y@iiias.spb.su

**Author contribution statement:**

Novozhilov I. M. – general management.  
Pervukhin D. A. – conclusions, conclusion.  
Martirosyan A. V. – introduction.  
Trofimets V. Ya. – research methodology.  
Tukeev D. L. – experimental studies.  
Loiko D. M. – calculations of technological processes.  
Iskanderov Yu. M. – literary review.

Статья поступила в редакцию 28.05.2024; принята к публикации после рецензирования 11.06.2024; опубликована онлайн 30.09.2024.

Submitted 28.05.2024; accepted 11.06.2024; published online 30.09.2024.

---