



Модернизация конструкций исполнительных органов щитов для проходки тоннелей в сложноструктурированных массивах при строительстве метро Санкт-Петербурга

Д.А. Юнгмейстер¹, М.И. Тимофеев¹✉, Р.И. Королев²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ООО «ПроТех Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ makst2008@rambler.ru

Резюме: Для решения проблемы снижения аварийных остановок проходческой техники предложен модернизированный исполнительный орган щитов для специфических горно-геологических условий Санкт-Петербурга. В статье рассмотрены варианты оснащения исполнительных органов тоннелепроходческих механизированных комплексов виброактивными шарошками и комбинированным (резец совмещенный с шарошкой) инструментом с автоматическим разделением функций в зависимости от свойств разрушаемой породы. Определены конструктивные особенности комбинированных резцов со скальвателями. Обосновано, что внедрение предложенных решений позволит сократить длительность аварийных простоев на 30%, а также исключить вероятность работы проходчиков в опасных условиях обрушения лба забоя. Теоретическое обоснование динамических параметров системы выполнено с помощью дифференциального моделирования. Предложена математическая модель динамики резцового узла. Для верификации параметров и определения граничных усилий резания проведен физический эксперимент на испытательной машине Zwick Roell Z100. Для проведения испытаний был спроектирован и изготовлен специальный лабораторный прототип породоразрушающего инструмента. В ходе эксперимента производилась непрерывная тензометрическая регистрация усилий, действующих на резец. Полученные величины адаптированы под упругопластическую модель Друкера–Прагера для численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива в программном комплексе ANSYS. По предварительной оценке, использование щитов с предложенным модернизированным породоразрушающим оснащением исполнительных органов позволит увеличить скорость проходки при снижении затрат на обслуживание рабочего оборудования не менее чем на 20%.

Ключевые слова: тоннелепроходческий механизированный комплекс, породоразрушающий инструмент, виброактивная шарошка, резцовый инструмент, сложноструктурированные массивы, скорость проходки, аварийные остановки щита

Для цитирования: Юнгмейстер Д.А., Тимофеев М.И., Королев Р.И. Модернизация конструкций исполнительных органов щитов для проходки тоннелей в сложноструктурированных массивах при строительстве метро Санкт-Петербурга. *Горная промышленность*. 2026;(4S):165–171. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-165-171>

Upgrading effector design for heading machine used for tunneling in complex rocks during construction of St. Petersburg metro

D.A. Yungmeister¹, M.I. Timofeev¹✉, R.I. Korolev²

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

² ProTech Engineering LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ makst2008@rambler.ru

Abstract: The authors propose an upgraded effector for heading machines designed for the specific mining and geological conditions of St. Petersburg as a solution to the problem of reducing emergency failures of tunneling equipment. The article discusses options for fitting the effectors of mechanized tunnel-boring complexes with vibroactive roller cutters and combined cutters (a cutting blade combined with a roller cutter) that automatically alternate between the functions depending on the properties of the rock being removed. The required characteristics of the vibroactive roller cutters and the design features of the combined cutters with a rock chipper have been determined. It has been proved that implementation of the proposed solutions will reduce the emergency downtime by 30% and eliminate the risks of tunnel workers operating in hazardous conditions of the tunnel face collapse. A theoretical justification of the system's dynamic parameters was performed using differential simulation.



The authors propose a mathematical model of the cutting assembly dynamics. A physical experiment was performed using a Zwick Roell Z100 testing machine to verify the parameters and define the limiting cutting forces. A dedicated laboratory prototype of the rock-cutting tool was designed and manufactured for the tests. Continuous strain gauge measurements of the forces acting on the cutter were recorded during the experiment. The obtained values were fitted to the Drucker–Prager elastic-plastic model for numerical simulation of the stress-strain state of the rock mass using the ANSYS software suite. According to preliminary estimates, use of the heading machines equipped with the proposed upgraded rock-cutting tools will increase the tunneling speed while reducing maintenance costs for the working equipment by at least 20%.

Keywords: tunnel boring machine, rock-cutting tools, vibroactive roller cutter, cutter, complex rocks, tunneling speed, emergency downtime

For citation: Yungmeister D.A., Timofeev M.I., Korolev R.I. Upgrading effector design for heading machine used for tunneling in complex rocks during construction of St. Petersburg metro. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):165–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-165-171>

Введение

Активное развитие подземной инфраструктуры Санкт-Петербурга неразрывно связано с необходимостью преодоления сложных горно-геологических условий [1; 2]. Ключевой особенностью кембрийских глин и четвертичных отложений данного региона является выраженная гетерогенность массива – преобладание глины, в которой залегают крепкие включения (прослойки песчаника, известняка) [3; 4]. Практика тоннелестроения показывает, что существующие тоннелепроходческие механизированные комплексы (ТПМК) со стандартной компоновкой исполнительного органа недостаточно адаптированы для стабильной работы в подобных смешанных забоях [5; 6].

При встрече ротора с твердыми включениями породоразрушающий инструмент, рассчитанный преимущественно на скалывание и резание мягких пород, испытывает пиковые динамические перегрузки [7; 8]. Если в конструкции щита не предусмотрены специальные средства адаптации к неоднородному забою, это приводит к абразивному износу и выходу инструмента из строя [9; 10]. Подобный перерасход ресурса резцов и шарошек неминуемо влечет за собой внеплановую аварийную остановку проходки, что в условиях городского подземного строительства является критически недопустимым [11; 12].

Основная проблема аварийных остановок заключается в обеспечении безопасности ремонтных работ [13; 14]. В штатном технологическом режиме смена породоразрушающего инструмента производится в специально оборудованных и надежно закрепленных камерах обслуживания [15; 16]. При аварийном выходе инструмента из строя смена должна производиться непосредственно в забое, для чего требуется оборудование рабочего пространства в незакрепленном массиве [17; 18]. Ручное крепление выработки в условиях нестабильных глин сопряжено с колоссальным риском вывалов породы и обрушений [19; 20].

Выбор технических решений

Аварийные остановки не только полностью парализуют процесс сооружения тоннеля, вызывая существенные экономические потери, но и создают прямую угрозу травмирования и гибели персонала, вынужденного работать в опасной зоне [21; 22]. Устранение данных рисков требует комплексного пересмотра подходов к проектированию исполнительных органов ТПМК и внедрения новых технологических решений, способных обеспечить стабильное и безопасное разрушение неоднородных породных массивов [23; 24].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности разрушения твердых включений в смешанных забоях является наложение дополнительной ударной (вибрационной) нагрузки на дисковые шарошки [25; 26]. Данный принцип реализован в конструкции виброактивного исполнительного органа (Патент РФ №2701764, рис. 1, а) [27]. Суть технического решения заключается в том, что шарошка наносит высокочастотные удары по скальным прослоям забоя, инициируя образование опережающей сети микротрещин [28; 29]. Искусственное увеличение трещиноватости массива существенно снижает энергоемкость последующего разрушения прочных пород инструментом [30; 31]. Подробное теоретическое обоснование и расчет параметров ударного механизма (вибратора) для подобного оборудования на базе щита S-782 представлены в работе [32].

Однако анализ условий эксплуатации подобного исполнительного органа выявляет существенный недостаток: несмотря на эффективное разрушение твердых включений шарошками, резцовый инструмент продолжает жестко контактировать с высокопрочной скальной породой [33]. Поскольку резцы предназначены преимущественно для резания мягких глин, их взаимодействие с песчаником или известняком приводит к интенсивному абразивному износу и сколам твердосплавных армирующих пластин, что значительно снижает межремонтный ресурс ротора [34; 35].

Для решения данной проблемы предлагается внедрение адаптивной схемы разрушения с использованием комбинированного виброактивного инструмента (Патент РФ №2796708 С1, рис. 1, б). Предложенная конструкция предполагает автоматическое разделение функций в зависимости от физико-механических свойств разрушаемой породы [36; 37]. При штатной работе по мягким породам (глине) разрушение осуществляет выдвинутый скалывающий резец. При встрече с твердым включением сопротивление породы резко возрастает, воздействуя на специальный отклоняющий элемент. Этот механизм автоматически убирает резец, передавая нагрузку исключительно на дисковую шарошку. После прохождения более твердой породы резец возвращается в рабочее положение.

Материалы и методы

Для теоретического обоснования динамических параметров описанного процесса и определения условий срабатывания отклоняющего элемента предложена математическая модель динамики резцового узла. Взаимо-

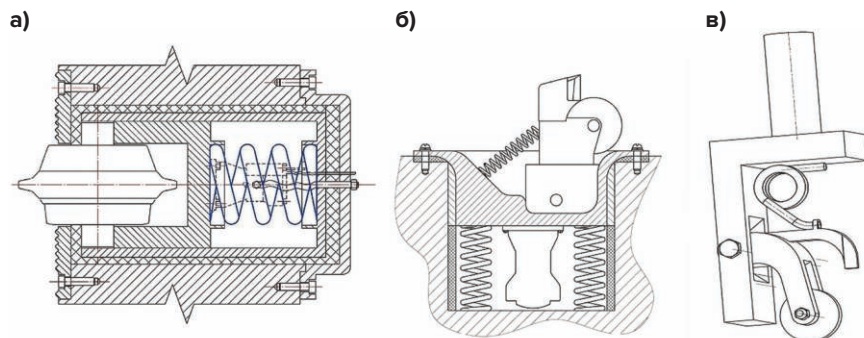


Рис. 1
Виброактивный (а)
и комбинированный (б, в)
породоразрушающий
инструмент

Fig. 1
Vibroactive (a) and
combined (б, в) rock-cutting
tool

действие резца с вмещающей средой в момент контакта с высокопрочным включением описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + c \cdot x = F_{\text{рез}}(t) - F_0,$$

где m – приведенная масса подвижных частей резцового узла, кг; b – коэффициент вязкого демпфирования механизма, Н·с/м; c – жесткость отклоняющего элемента, Н/м; x – величина линейного смещения резца, м; $F_{\text{рез}}(t)$ – функция изменения усилия резания во времени (мгновенное усилие резания, действующее на резец), Н; F_0 – усилие предварительного натяжения системы, Н.

Из предложенной модели следует, что условием отвода убирающего резца из зоны активного контакта является выполнение неравенства:

$$F_{\text{рез}}(t) \geq F_0 = F_{\text{пред}} \cdot k_3,$$

где $F_{\text{пред}}$ – экспериментальный пик усилия резания $F_{\text{пред}} = 1110$ Н; k_3 – коэффициент запаса, $k_3 = 1,06$; F_0 – расчетный порог срабатывания, $F_0 = 1180$ Н.

При $F_{\text{рез}}(t) < F_0$ система абсолютно жесткая ($x = 0$), что обеспечивает стабильное резание пластичной глины, при резании известняка сила на резце будет превышать 4000 Н, что вызовет отклонение резца и его замещение шарошкой.

Ключевой задачей при проектировании комбинированного инструмента является точный расчет жесткости и порога срабатывания отклоняющего элемента. Для корректной настройки механизма необходимо достоверно зафиксировать характер разрушения неоднородного массива и определить максимальные пиковые усилия при резании породы, при которых резец должен оставаться в рабочем положении. С этой целью была разработана программа стендовых экспериментальных исследований.

Физический эксперимент проводился на базе универ-

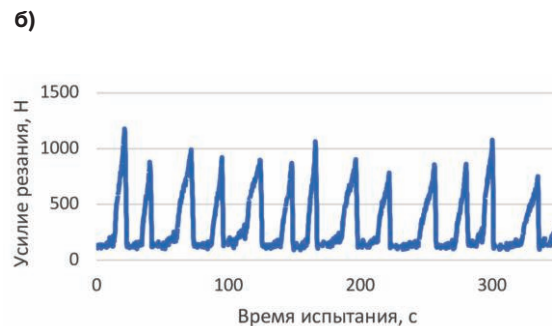


Рис. 2
Экспериментальная
установка с
комбинированным
породоразрушающим
инструментом (а) и график
усилия резания глины
одиночным резцом (б)

Fig. 2
Experimental setup
with a combined cutter
and a diagram of the
cutting force in clay
for a single cutter (б)

сальной электромеханической испытательной машины Zwick Roell Z100. Для проведения испытаний был спроектирован и изготовлен специальный лабораторный прототип породоразрушающего инструмента, кинематически повторяющий конструкцию адаптивного узла по патенту №2796708, но масштабированный под рабочую зону станка (см. рис. 1, в). Подготовленные образцы породы жёстко фиксировались в нижней части станка. Процесс резания осуществлялся с постоянной скоростью подачи инструмента, равной 50 мм/мин.

Величина зафиксированных пиковых усилий резания напрямую детерминирована геометрическими параметрами экспериментального породоразрушающего инструмента. Для обеспечения корректной корреляции результатов физического эксперимента с теоретическими моделями механики грунтов прототип скальвающего резца был спроектирован с заданными размерными характеристиками. Ширина режущей кромки инструмента b составила 7 мм, передний угол α был принят равным 0° . В совокупности с фиксированной глубиной стружки h , равной 10 мм, данная геометрия определяет точный объем вовлекаемой в упругопластическую деформацию породы [38; 39]. Именно конфигурация передней грани инструмента формирует специфическую зону уплотнения перед лезвием, обуславливая циклический характер образования стружки скальвания и пиковые всплески сопротивления на осциллограмме [40].

В ходе эксперимента производилась непрерывная тензометрическая регистрация усилий, действующих на резец (рис. 2, а). Полученные экспериментальные осциллограммы наглядно подтверждают циклический характер разрушения глинистого массива. На графике отчетливо визуализируется процесс формирования стружки скальвания (см. рис. 2, б). По мере внедрения инструмента в глину происходит упругопластическое уплотнение зоны предразрушения, что сопровождается почти линейным ростом сопротивления. При достижении массивом предела прочности формируется трещина, происходит хрупкий скол элемента породы, и усилие резания резко падает до значений силы трения.



Таблица 1
Сравнительные показатели исполнительных органов
тоннелепроходческого механизированного комплекса при
проходке смешанного забоя

Table 1
Comparative performance of the tunnel boring machine effectors
during mixed face tunnelling

Показатель эффективности	Исполнительный орган		Изменение эффективности
	КТ1-5,6М	Модернизированный с комбинированным породоразрушающим оснащением	
Коэффициент аварийных простоев щита	0,24	0,08	Снижение в 3 раза
Средняя скорость технической проходки, м/ч	1,2	1,4	Увеличение на 20%

Результаты

Анализ данных показывает, что пиковые усилия резания при заданных параметрах стружки достигают 1110 Н. Эти экстремумы представляют собой важнейший эмпирический базис: именно величина в 1110 Н (с учетом масштабных коэффициентов перехода от стенда к реальному ТПМК) является тем предельным усилием штатного резания, которое отклоняющий элемент должен воспринимать как нормативное, не иницируя процесс складывания резца.

Полученное пиковое значение является репрезентативным для выбранного масштаба экспериментального стенда. Для экстраполяции этих данных на реальный породоразрушающий инструмент комплекса в дальнейшем будет применен масштабный коэффициент, учитывающий реальную ширину лезвия и глубину внедрения в массив.

Интегрирование площади под кривой осциллограммы на участке формирования единичного скола позволяет определить работу разрушения. Дальнейшее соотнесение этой величины с объемом образованной стружки даст возможность вычислить удельную энергоемкость процесса резания кембрийских глин, что является ключевым параметром для оптимизации режимов работы ТПМК.

Полученная осциллограмма процесса разрушения является необходимой базой для верификации компьютерных моделей. Оцифровка данного графика позволила задать кривую пластичности и параметры модели Друкера–Прагера для последующего численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива в программных комплексах, таких как ANSYS.

Для проведения численного эксперимента в среде ANSYS (модуль Explicit Dynamics) использовался упруго-

пластический критерий прочности Друкера–Прагера, методология применения которого для щитовой проходки подробно описана в работе [Error! Reference source not found.]. Сравнительные предварительные показатели исполнительных органов ТПМК при проходке смешанного забоя, наглядно демонстрирующие потенциал снижения простоев оборудования, приведены в табл. 1.

Заключение

Полученные на исследовательском стенде осциллограммы процесса разрушения различных по структуре массивов пород, отобранных на объектах подземного строительства Санкт-Петербурга, являются необходимой базой для верификации расчётных моделей. Уточненная оцифровка данных графиков позволит корректно задать кривую пластичности и параметры модели Друкера–Прагера для последующего численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива в программных комплексах, таких как ANSYS. Для решения проблемы снижения аварийных остановок проходческой техники предложен модернизированный исполнительный орган щитов для специфических горно-геологических условий Санкт-Петербурга, на котором кроме вибро-активных шарошек предложено внедрение адаптивной схемы разрушения с использованием комбинированного (резец совмещенный с шарошкой) инструмента с автоматическим разделением функций в зависимости от свойств разрушаемой породы. Использование щитов с предложенным модернизированным породоразрушающим оснащением исполнительных органов, по предварительной оценке, позволит увеличить скорость проходки при снижении затрат на обслуживание рабочего оборудования не менее чем на 20%.

Вклад авторов

Д.А. Юнгмейстер – постановка научной проблемы, разработка концепции адаптивной схемы разрушения с использованием комбинированного инструмента, общее научное руководство.

М.И. Тимофеев – проведение стендовых физических экспериментов, разработка математической модели динамики резцового узла, численное моделирование в программном комплексе ANSYS, подготовка текста рукописи.

Р.И. Королёв – оценка практической применимости оборудования в сложных горно-геологических условиях Санкт-Петербурга, анализ сравнительных показателей эффективности модернизированного исполнительного органа.



Author's Contribution

Dmitrii A. Yungmeister – formulation of the research problem, development of a concept for an adaptive rock-cutting scheme using a combined tool, general scientific supervision

Maksim I. Timofeev – conducting physical bench tests, development of a mathematical model of the cutting assembly dynamics, numerical simulation using the ANSYS software suite, text drafting

Roman I. Korolev – assessment of the practical applicability of the equipment in the complex mining and geological conditions of St. Petersburg, analysis of comparative performance indicators for the upgraded effector

Список литературы / References

1. Rostami J. Performance prediction of hard rock Tunnel Boring Machines (TBMs) in difficult ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016;57:173–182. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.009>
2. Mandaglio M.C. Geomechanical characterization of the rock mass along a deep vertical borehole. *Geotechnics*. 2024;4(1):209–228. <https://doi.org/10.3390/geotechnics4010011>
3. Shaterpour-Mamaghani A., Copur H., Balci C., Tumac D., Kocbay A., Dogan E. et al. Suggestion of new models for predicting performance of raise boring machines based on indentation tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023;138:105181. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105181>
4. Shangxin F., Zuyu C., Hua L., Shanyong W., Yufei Z., Lipeng L. et al. Tunnel boring machines (TBM) performance prediction: A case study using big data and deep learning. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021;110:103636. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103636>
5. Shin Y.J., Farrokh E., Jung J., Kang H. Optimizing tunnel boring machine operations in real time within defined constraints. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2025;151(6):15962. <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-15962>
6. Mostafa S., Sousa R.L. Deep learning uncertainty quantification for enhancing TBM operational predictions. *Geodata and AI*. 2024;1:100003. <https://doi.org/10.1016/j.geoai.2025.100003>
7. Xie W., Liu X., Zhang C., Zhou X., Chen J. Response law of rock-cutterhead interaction in intact sandstone through TBM tunnelling test. *Underground Space*. 2026;26:152–174. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2025.06.006>
8. Yang Z., Wang L., Zhou J., Li D., Zhang K., Guo X. Mechanical characteristics of a tunnel boring machine cutterhead during rock breaking: Physical model tests and transient dynamic analysis. *Advances in Mechanical Engineering*. 2023;15(3):16878132231159971. <https://doi.org/10.1177/1687813223115997>
9. Chakeri H., Darbor M., Shakeri H., Mousapour H., Mohajeri V. Experimental and numerical investigation of the TBM disc cutter wear using a new tunnel boring machine laboratory simulator. *Heliyon*. 2024;10(17):e37148. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37148>
10. Babyr N.V., Kuziev D.A., Sazankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 21.03.2026).
11. Jing B.-X., Gao X.-Q., Yang Z.-G., Yang T.-J., Meng X.-Y., Liu Y.-B. Dynamic risk assessment and mitigation effect evaluation of TBM jamming based on BPNN-BN coupling model. *Scientific Reports*. 2026;16:21813. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-52655-9>
12. Yu Z., Li C., Zhou J. Tunnel boring machine performance prediction using supervised learning method and swarm intelligence algorithm. *Mathematics*. 2023;11(20):4237. <https://doi.org/10.3390/math11204237>
13. Вербило П.Э., Карасев М.А., Шишкина В.С. Прогноз геомеханического состояния структурно нарушенных породных целиков с учетом запредельного их деформирования. *Горный журнал*. 2025;(3):41–47. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.06>
Verbilo P.E., Karasev M.A., Shishkina V.S. Geomechanical state of jointed rock pillar with the account of softening behaviour. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(3):41–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.06>
14. Yang Z., Liu Y., Chen C. Correlation analysis of tunnel deformation and internal force in the earthquake based on tunnel inclination. *Buildings*. 2024;14(5):1395. <https://doi.org/10.3390/buildings14051395>
15. Александрова Т.Н., Любянова В.А. Повышение извлечения меди из медных минералов при серноокислотном выщелачивании. *Обогащение руд*. 2025;(6):16–21. <https://doi.org/10.17580/or.2025.06.03>
Aleksandrova T.N., Lyubyanova V.A. Enhancing copper recovery from copper minerals via sulfuric acid leaching. *Obogashchenie Rud*. 2025;(6):16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2025.06.03>
16. Сержан С.Л., Малеванный Д.В. Современное состояние и перспективы развития технологий подъема для комплексов добычи глубоководных твердых полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(12-1):107–128. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_121_0_107
Serzhan S.L., Malevannyj D.V. Lifting technologies for deep-sea solid mineral extraction facilities: current situation and prospects. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(12-1):107–128. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_121_0_107



17. Ads A., Islam S., Iskander M. Longitudinal settlements during tunneling in soft Clay, using transparent soil models. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023;136:105042. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105042>
18. Wang F., Du X., Li P. Predictions of ground surface settlement for shield tunnels in sandy cobble stratum based on stochastic medium theory and empirical formulas. *Underground Space*. 2023;(11):189–203. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.01.003>
19. Malsam A., Walton G. Seasonality of rockfall triggers and conditioning factors interpreted from a lidar-derived rockfall database. *Engineering Geology*. 2024;333:107500. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107500>
20. Ouadfel K., Messast S., Boulfoul K. Seismic response of undrained twin tunnels. *Journal of Mining Science*. 2022;58(2):192–201. <https://doi.org/10.1134/S106273912202003X>
21. Юнгмейстер Д.А., Уразбахтин Р.Ю., Тимофеев М.И., Лавренко С.А. Моделирование и оптимизация использования проходческих комплексов при строительстве вспомогательных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):117–135. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_117
Jungmeister D.A., Urazbakhitin R.J., Timofeev M.I., Lavrenko S.A. Modeling and optimization of the use of tunneling complexes in the construction of auxiliary workings. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):117–135. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_117
22. Юнгмейстер Д.А., Уразбахтин Р.Ю., Нгуен К.Л., Тимофеев М.И. Комплекс для создания хранилищ особо опасных отходов: обоснование конструкции и параметров. *Обогащение руд*. 2023;(6):47–51. <https://doi.org/10.17580/or.2023.06.08>
Yungmeister D.A., Urazbakhitin R.Yu., Nguyen K.L., Timofeev M.I. Tunneling complex for the construction of especially hazardous waste storage facilities: justification of the design and parameters. *Obogashchenie Rud*. 2023;(6):47–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2023.06.08>
23. Муминов Р.О., Рузибаев А.Н., Жураев Н.Н., Равшанов Ж.Р., Кузиев Д.А. Разработка мероприятий по совершенствованию вращательно-падающего механизма бурового станка. *Уголь*. 2024;(1):94–99. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-1-94-99>
Muminov R.O., Ruzibaev A.N., Juraev N.N., Ravshanov J.R., Kuziev D.A. Development of measures to enhance the rotation and feed mechanism of a drill rig. *Ugol'*. 2024;(1):94–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-1-94-99>
24. Yu H., Bo Y., Liu Q., Yang X., Xu S., Monthly advance rate estimation of hard rock tunnel boring machine based on rock mass classification and data augmentation. *Underground Space*. 2025;23:175–192. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2025.02.002>
25. Жабин А.Б., Поляков А.В., Аверин Е.А. Сопоставление отечественных и зарубежных методов расчета усилий на лобовых дисковых шарошках при разрушении горных пород. *Горный журнал*. 2018;12:65–68. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.12.13>
Zhabin A.B., Polyakov A.V., Averin E.A. Comparison of methods to calculate forces on frontal disc cutters in rock breaking process in Russia and abroad. *Gornyi Zhurnal*. 2018;12:65–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.12.13>
26. Жабин А.Б., Лавит И.М., Поляков А.В., Керимов З.Э. Математическая модель разрушения горных пород ударным инструментом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(11):140–150. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-140-150>
Zhabin A.B., Lavit I.M., Polyakov A.V., Kerimov Z.E. Mathematical model of piston/bit interaction in percussive destruction of rocks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(11):140–150. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-140-150>
27. Азимов А.М., Жуков И.А. Повышение энергоэффективности гидромолотов, применяемых при разрушении негабаритов горных пород, на основе эффекта влияния геометрии элементов ударного узла. *Горная промышленность*. 2025;(3):71–79. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-71-79>
Azimov A.M., Zhukov I.A. Increasing energy efficiency of hydraulic hammers used for secondary breaking based on the geometry effect of the impactor parts. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):71–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-71-79>
28. Ромашев А.О., Балашов А.О., Гатиатуллин Б.Л., Николаева Н.В. Исследование вибрационной сегрегации материала для интенсификации процесса грохочения. *Обогащение руд*. 2025;(4):8–14. <https://doi.org/10.17580/or.2025.04.02>
Romashev A.O., Balashov A.O., Gatiatullin B.L., Nikolaeva N.V. Study of vibrational segregation of material to intensify the screening process. *Obogashchenie Rud*. 2025;(4):8–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2025.04.02>
29. Plyushin Y.V., Boronko E.A. Development of a mathematical model of the electromagnetic field formation process based on system analysis methods. *Mathematics*. 2026;14(3):399. <https://doi.org/10.3390/math14030399>
30. Симисинов Д.И., Волков Е.Б., Афанасьев А.И., Зубов В.В. Испытательный стенд для определения момента трения подшипника качения бурового шарошечного долота. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(11-2):106–113. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_112_0_106
Simisinov D.I., Volkov E.V., Afanasyev A.I., Zubov V.V. Test bench for determining the moment of friction rolling bearings of cone drill bit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(11-2):106–113. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_112_0_106
31. Жуков И.А., Верховский М.И. Перспективы применения планетарных механизмов в качестве исполнительных органов роботов-бурильщиков. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):23–36. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_23
Zhukov I.A., Verkhovskiy M.I. Prospects for the use of planetary mechanisms as executive bodies of robot drillers. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):23–36. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_23



32. Хамидов О.У., Шибанов Д.А. Техническое обслуживание и ремонт карьерных экскаваторов по регламенту с учетом фактических условий и режимов их эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):152–167. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_152
Khamidov O.U., Shibonov D.A. Regulated maintenance and repair of quarry excavators considering real-world conditions and operating modes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):152–167. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_152
33. Huang H., Sun Q., Xu T., Zhou W. Mechanism analysis of foam penetration in EPB shield tunnelling with a focus on FER and soil particle size. *Underground Space*. 2024;17:170–187. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.11.012>
34. Ye X., Wang S., Yang J., Sheng D., Xiao C. Soil Conditioning for EPB shield tunneling in argillaceous siltstone with high content of clay minerals: Case study. *International Journal of Geomechanics*. 2017;17(4):05016002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000791](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000791)
35. Lee H., Kim H.K., Hwang B., Yoon Y., Choi H. Coupled DEM-FDM numerical model for EPB shield tunnelling simulation with foam conditioning. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024;147:105718. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105718>
36. Aleksandrova T., Gatiatullin B., Kuznetsov V., Nikita S. Evaluation methods for aeration parameters in flotation separation modelling with neural network applications. *Processes*. 2026;14(4):728. <https://doi.org/10.3390/pr14040728>
37. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A. et al. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals. *Minerals*. 2024;14(1):88. <https://doi.org/10.3390/min14010088>
38. Yao X., Lv K., He J., Ren T., Ye C. Regulating the rheology of drilling fluids under high-temperature conditions with hydrophobically associating polymers. *Polymers*. 2026;18(7):859. <https://doi.org/10.3390/polym18070859>
39. Carigi A., Saltarin S., Di Giovanni A., Todaro C., Peila D. Reuse of EPB mucking for concrete production: A laboratory test campaign. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18:e02187. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02187>
40. Михайлов А.В., Смирнов А.И. Анализ метода выемки торфяного сырья с откоса карьера. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(2-1):197–209. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (дата обращения: 15.03.2026).
Mikhailov A.V., Smirnov A.I. Digging method analyzing organogenic materials mining by in-pit method. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(2-1):197–209. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/2-1/2-1_2026_197-209.pdf (accessed: 15.03.2026).

Информация об авторах

Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7858-8340>

Тимофеев Максим Игоревич – аспирант кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9441-4532>; e-mail: makst2008@rambler.ru

Королев Роман Иванович – кандидат технических наук, главный специалист горно-механического сектора отдела горного проектирования Санкт-Петербургского филиала ООО «ПроТех Инжиниринг», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5247-9453>

Information about the authors

Dmitrii A. Yungmeister – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7858-8340>

Maksim I. Timofeev – Postgraduate Student of the Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9441-4532>; e-mail: makst2008@rambler.ru

Roman I. Korolev – Cand. Sci. (Eng.), Chief Specialist of the Mining and Mechanical Sector of the Mining Design Department of the St. Petersburg branch, ProTech Engineering LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5247-9453>

Article info

Received: 30.05.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 20.08.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.05.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 20.08.2026