ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-3):117–135
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 624.191.6 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_117

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Д. А. Юнгмейстер[1], Р. Ю. Уразбахтин[1], М. И. Тимофеев[1], С. А. Лавренко[1]

[1] Санкт Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, rectorat@spmi.ru

Аннотация: Статья посвящена анализу и разработке эффективных технологий строительства тоннелей в условиях неоднородных геологических массивов, характерных для Санкт-Петербурга. Основные проблемы строительства связаны с неоднородными массивами, высоким уровнем подземных вод, наличием плывунов и необходимостью в условиях ограниченного пространства и близости исторической застройки. В качестве основной цели исследования определено повышение эффективности и безопасности проходки выработок малого сечения. Обоснована рациональность использования проходческих комбайнов со стреловидным исполнительным органом, а также адаптация оборудования к изменяющимся геологическим условиям. Рассмотрены конструктивные и кинематические особенности рабочих органов, влияние скорости деформации на прочностные характеристики пород, а также проведено имитационное моделирование технологического процесса. Выявлены ключевые параметры, влияющие на производительность: крепость пород, шаг передвижки и частота замены исполнительного органа. Предложена методика оптимизации проходческого цикла за счёт параллелизации операций. Полученные результаты демонстрируют значительное преимущество механизированной проходки перед ручной, особенно при строительстве временных и постоянных вспомогательных выработок в сложных геологических условиях.

Ключевые слова: Тоннелестроение, выработки малого сечения, проходческий комбайн, стреловидный исполнительный орган, роботизированные комплексы.

Для цитирования: *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. – С. 117–135. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_117.

Modeling and optimization of the use of tunneling complexes in the construction of auxiliary workings

Jungmejster D.A.[1], Urazbahtin R.J.[1], Timofeev M.I.[1], Lavrenko S.A.[1]

[1] St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Russia

Abstract: The article is devoted to the analysis and development of efficient tunneling technologies in heterogeneous geological conditions typical for Saint Petersburg. The main

construction challenges are associated with geological heterogeneity, a high level of groundwater, the presence of quicksand, and the need to work within confined urban environments and in proximity to historical buildings. The primary objective of the study is to enhance the efficiency and safety of small-diameter tunnel excavation. The rationale for using roadheaders with boom-type cutting heads is substantiated, as well as the need to adapt equipment to changing geological conditions. The study examines structural and kinematic features of cutting tools, the impact of deformation rate on the strength characteristics of rocks, and includes simulation modeling of the tunneling process. Key parameters influencing productivity were identified: rock strength, advance step length, and the frequency of cutting head replacement. A method is proposed for optimizing the tunneling cycle through the parallelization of operations. The obtained results demonstrate a significant advantage of mechanized tunneling over manual methods, especially in the construction of temporary and permanent auxiliary workings under complex geological conditions.

Key words: Tunneling, small-diameter workings, roadheader, boom-type cutting head, mechanization, robotic systems, rock strength, geological heterogeneity, tunnel simulation, underground construction.

For citation: Jungmejster D. A., Urazbahtin R. J., Timofeev M. I., Lavrenko S. A. Modeling and optimization of the use of tunneling complexes in the construction of auxiliary workings. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-3):117–135. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_117.

Введение

Строительство тоннелей в условиях неоднородных геологических массивов, таких как в Санкт-Петербурге, представляет собой сложную инженерную задачу. Город расположен в зоне, где чередуются водонасыщенные пески, глины, плывуны и твердые коренные породы, что создает значительные трудности при проходке. Особую сложность добавляют высокий уровень грунтовых вод и близость исторической застройки. В таких условиях традиционные методы строительства, такие как использование щитовых комплексов, не всегда применимы или экономически оправданы, особенно для тоннелей малого сечения. В статье рассматриваются альтернативные методы проходки с использованием проходческих комбайнов со стреловидным исполнительным органом. Особое внимание уделено адаптации оборудования к сложным геологическим условиям и минимизации воздействия на окружающую среду.

Описание существующей проблематики строительства тоннелей

Санкт-Петербург, характеризуется сложной и неоднородной геологической структурой, что связано с его географическим положением и историей формирования территории.

Территория Санкт-Петербурга сформировалась в результате деятельности последнего ледникового периода. Ледник оставил после себя мощные толщи моренных, флювиогляциальных, озёрно-ледниковых отложений.

Верхние слои грунта представлены преимущественно четвертичными отложениями: песками, супесями, суглинками и глинами. Эти отложения имеют различную мощность и свойства, что создает неоднородность грунтов.

На больших глубинах залегают коренные породы Балтийского щита, представленные древними кристаллическими породами, такими как граниты. Эти породы имеют высокую прочность, но их залегание неоднородно.

В некоторых районах города коренные породы выходят близко к поверхности, что создает дополнительные сложности при строительстве.

Санкт-Петербург расположен в зоне высокой обводненности. Наличие подземных вод (грунтовых и межпластовых) также влияет на устойчивость грунтов и их несущую способность.

Активная застройка города, осушение территорий, прокладка тоннелей и других инженерных сооружений значительно изменили естественную геологическую среду. Насыпные грунты, техногенные отложения и изменения гидрологического режима добавляют неоднородности массивам.

Неоднородность геологических массивов требует тщательного инженерно-геологического изучения перед строительством. Необходимо выявить водонасыщенные грунты, плывуны, а также при строительстве необходимо минимизировать воздействие на окружающую среду в близи с исторической застройкой.

Механизация строительства

Большинство тоннелей метро в Санкт-Петербурге построены с использованием щитового метода. Для защиты от грунтовых вод применяются специальные гидроизоляционные материалы. Строительство тоннелей под Невой требует особых мер по герметизации и укреплению грунтов. В центре города необходимо минимизировать вибрации и деформации, чтобы не повредить исторические здания [1].

Гибкость является ключевым требованием при создании вспомогательных выработок, будь то в городской инфраструктуре или в процессе добычи полезных ископаемых. В то время как крупные шахтные выработки, механизированные на 70–80%, используются преимущественно для добычи, разведочные и вспомогательные выработки малого сечения до сих пор проходятся вручную.

Проходка разведочных выработок сопряжена со значительными трудностями. Характерные для них параметры (длина до 50 м, сечение до 4 м^2) создают стесненные условия. Эта ограниченность пространства и малая протяженность делают невозможным использование стандартного, громоздкого проходческого оборудования. Дополнительным фактором, удлиняющим сроки работ, становится необходимость применения буровзрывного метода при встрече крепких прослоек в горном массиве.

По продолжительности эксплуатации горные выработки классифицируются на временные и постоянные. Временные выработки (например, соединительные сбойки, транспортные ходы, складские помещения) функционируют на ограниченном этапе строительства. В отличие от них, постоянные вспомогательные выработки малого профиля обеспечивают устойчивую работу инфраструктуры объекта: они служат для размещения инженерных систем, организации воздухообмена (включая аварийную вентиляцию), а также создают маршруты для перемещения персонала, включая доступ к техническим зонам, например, к артезианским скважинам, размещённым с интервалом в 500 м [2].

Трудоемкость создания вспомогательных выработок малого сечения при отсутствии механизации подчеркивает острую необходимость в создании компактных и эффективных механизированных решений, способных работать в породах различной прочности и при неодинаковой устойчивости кровли.

При строительстве вспомогательных выработок, которые зачастую имеют

меньший диаметр, чем перегонные тоннели, а также меньшую протяжённость использование комбайна со стреловидным исполнительным органом становится рациональным Стреловидный исполнительный орган позволяет работать в тоннелях сложной формы и адаптироваться к изменяющимся геологическим условиям. Компактные размеры комбайна делают его подходящим для работы в ограниченных пространствах. Может использоваться как в мягких, так и в твердых грунтах благодаря сменным режущим инструментам и имеет более низкую стоимость по сравнению с щитовыми комплексами [3,4]. Комбайн обеспечивает более высокую скорость и безопасность, особенно в сложных грунтах, чем механизированная работа при помощи отбойных молотков, которая широко распространена при строительстве [5,6].

Влияние скорости деформации на прочностные свойства горных пород и классификация их поведения

Для повышения безопасности проходки, улучшения условий труда и увеличения производительности сооружения подземных выработок метрополитена предлагается использовать стандартную компоновку проходческого комбайна со стреловидным исполнительным органом.

При расчёте необходимой мощности комбайна необходимо учитывать существующую зависимость прочностных свойств горных пород от скорости деформации. Эта зависимость проявляется в том, что при увеличении скорости деформации прочностные характеристики породы, такие как предел прочности на сжатие, растяжение или сдвиг, могут изменяться [7,8,9].

Это явление связано с несколькими факторами:

1. Вязкоупругие свойства породы: при высокой скорости деформации порода может вести себя более хрупко, а при низкой скорости — более пластично [10,11,12].

2. Эффект ползучести: при медленных деформациях порода может испытывать ползучесть (медленное накопление деформаций под действием постоянной нагрузки), что снижает её прочность.

3. Микроструктурные изменения: Скорость деформации может влиять на процессы разрушения на микроуровне, такие как образование и распространение трещин. При высоких скоростях деформации трещины не успевают развиваться, что может увеличивать прочность породы.

Исследования показывают, что при динамических нагрузках (например, при ударных нагрузках) прочность некоторых пород может быть выше, чем при статических нагрузках [13,14,15].

Горные породы можно распределить на несколько типов по их качественному поведению при изменении скорости деформирования. Это распределение основано на их механических свойствах, реакции на нагрузку и характере разрушения [16,17,18].

1. Хрупкие породы.

При низких скоростях деформации ведут себя как упругие материалы, разрушаясь с минимальной пластической деформацией. При высоких скоростях деформации склонны к мгновенному разрушению с образованием трещин.

2. Пластичные породы.

Способны выдерживать деформации без разрушения, при низких скоростях деформации проявляют свойства ползучести.

3. Пористые и трещиноватые породы содержат нарушения сплошности, которые влияют на их прочность и деформационные свойства. При низких скоростях деформации поры и трещины могут закрываться, что приводит

к увеличению прочности. При высоких скоростях деформации трещины быстро развиваются, что снижает прочность.

4. Анизотропные породы характеризуются тем, что их свойства зависят от направления приложения нагрузки (например, вследствие слоистости или текстуры). При низких скоростях деформации разрушение таких пород часто происходит по слабым плоскостям, тогда как при высоких скоростях проявление анизотропии может снижаться из-за быстрого развития трещин.

Для ряда хрупких пород характерно явление дополнительного ослабления материала в приповерхностной зоне под действием напряжений, создаваемых вышележащими слоями. Это приводит к снижению прочности и, соответственно, уменьшению удельной энергоёмкости, необходимой для разрушения породы. Учитывая такие особенности поведения хрупких материалов, целесообразно рассматривать более энергоэффективные методы воздействия при их разработке и проходке. Примером слабой хрупкой породы, в которой проявляется подобный эффект, является сухая глина [19,20,21].

Использование робототехники

На данный момент вспомогательные выработки составляют весомую часть трудозатрат при строительстве метрополитена и осуществляются с частичной механизацией работ: разрушение породы производят при помощи устройств малой механизации, таких как отбойные молотки.

В условиях ограниченного пространства и при возникновении аварийных ситуаций, таких как завалы или разрушения в выработках малого сечения, необходимо использование специализированного оборудования.

Повышение уровня механизации, особенно при освоении нестандартных горных выработок, стимулирует разработку беспроводных роботизированных комплексов [22]. Многофункциональные мобильные комплексы, разрабатываемые как российскими, так и зарубежными специалистами, оснащаются модулями газоанализа, видеонаблюдения и навигации, что позволяет им функционировать при недостаточном освещении и в задымлённой атмосфере. Их использование особенно оправдано в начальной стадии проведения выработок в труднодоступных и нестабильных зонах. Автоматизация таких работ не только повышает производительность, но и значительно снижает уровень риска для горнорабочих, что особенно важно в выработках с высоким уровнем газоопасности или высокой возможностью обрушения, например, вспомогательные выработки метрополитена строительство которых является наиболее опасным [23,24,25].

Первая роботизированная платформа для подземных условий была создана в США (1998 г.). Устройство включало газовый детектор, ИК-камеру, гироскоп и радиочастотный модуль, однако примитивная система управления ограничивала радиус действия 76 метрами. [26,27,28].

В 2001 году был изготовлен робот на гусеничном ходу с манипулятором и дистанционным управлением “ANDROS Wolverine V2” для угольных шахт США, однако в 2006 году во время шахтных испытаний после преодоления 790 метров аппарат застрял из-за недостатков конструкции ходовой части.

Китай представил свою разработку для угольных шахт «CUMT-I» (Университет горного дела и технологий, 2006 г.). Однако модель не нашла прак-

тического применения из-за чрезвычайной сложности условий в разрушенных выработках.

Первые попытки внедрения роботизированных средств в российских угольных шахтах датируются 2016 годом. Основным направлением их применения стала дистанционная инспекция горных выработок на расстояниях до 1 километра. Эти платформы оснащались камерами, сенсорами и приборами контроля окружающей среды. Однако в условиях разрушенной породы и завалов их мобильность оставалась ограниченной, что сдерживало их широкое распространение в аварийных службах шахт.

Моделирование процесса строительства при помощи комплекса со сменным исполнительным органом

Для использования в строительстве вспомогательных выработок предлагается использование сменного исполнительного органа, который будет установлен на базу проходческого комбайна со стрелой. На стрелу будет установлен корончатый исполнительный орган, который будет разрушать только поверхностную часть забоя, толщина стружки будет меньше аналогичной при работе коронкой, а значит разрушаться будет только та часть забоя, которая имеет наименьшую прочность, что будет повышать энергоэффективность всего процесса [29].

Корончатый исполнительный орган позволяет осуществлять выборочную выемку (что является преимуществом перед комбайнами неизбирательного типа действия), а также максимизировать использование свойств ослабленных пород [30, 31, 32]. В расчётах также будет рассмотрено применение ударного инструмента

Для достижения высокой скорости проходки в выработках малого сечения требуется детальный анализ временных затрат на все этапы проходческого цикла и создание специального комплекса, обеспечивающего их параллельное выполнение.

Расчет производительности корончатого исполнительного органа вращательного действия может быть произведен по формуле (м³/ч):

$$Q_{тех} = m_{сл} B \upsilon_{п} k_{тех} \quad (1)$$

где $m_{сл}$ – толщина снимаемого коронкой слоя; B – величина заглубления коронки в массиве породы; $\upsilon_{п}$ — скорость перемещения коронки; $к_{тех}$ = 0,7–0,9 [33,34].

Толщина снимаемого слоя корончатым исполнительным органом определяется по формуле (м):

$$m_{сл} = \frac{D_{к}}{1{,}5} \quad (2)$$

где $D_{к}$ – максимальный диаметр конической коронки по резцам ($D_{к}$ = 0,3 м).

Усредненные значения величины заглубления коронки исполнительного органа в массив пород определяются по формуле (м):

$$B = \frac{D_{к}}{f \cdot 0.5} \quad (3)$$

где f – крепость породы.

Значение максимально возможной скорости перемещения корончатого исполнительного органа по забою:

$$\upsilon_{п} = \frac{N_{киo} \eta_{киo}}{60 H_{W} m_{сл} B} \quad (4)$$

где $N_{КИС}$ — мощность привода исполнительного органа, кВт ($N_{КИС}$ = 70 кВт); $\eta_{КИО}$ — КПД привода исполнительного органа ($\eta_{КИО}$ = 0,8–0,9); H_{w} — удельная энергоемкость процесса разрушения, кВт·ч/м³ (H_{w} = 0,8–2,9 кВт·ч/м³).

Расчет производительности ударного исполнительного органа:

$$Q_{тех} = \frac{l_{ск} h_{ск} b}{\left(t_{р.уд.} + t_{вс}\right)} \quad (5)$$

где $l_{ск}$, $h_{ск}$, b — ширина, глубина и высота скола ($l_{ск}$ = 0,3 м, b = 0,3 м), $t_{р.уд}$, $t_{вс}$– соответственно время удара и время на переустановку, с ($t_{р.уд}$ = 3 с; $t_{вс}$ = 6 с).

$$h_{ск} = h n_{уд}\, t_{р.уд.} \cdot 10^3 \quad (6)$$

где h — среднее заглубление за один удар, мм/уд; $n_{уд}$ — количество ударов производимое ударником ($n_{уд}$ = 30…70 уд/с) [35,36].

Учитываются время разработки забоя, цикл крепления, подготовительные операции. В табл. 1 приведены изначальные данные для расчёта.

Глубину заглубления h (м) пики ударного инструмента можно определить по формуле:

$$h = \sqrt{\frac{A_{уд}}{Z \cdot d \cdot \sigma_{сжс} \cdot \left(tg\left(\alpha/2\right) + \mu\right) K}} \quad (7)$$

где $\sigma_{ск} = K_{\sigma} \sigma_{сж}$,

а $K_{\sigma} = 0{,}25 \cdot \left(\frac{1 - \left(\sigma_{сж} - 50\right)}{1000}\right)$,

$\sigma_{сж} = 10f$, Z — число лезвий долота; d — диаметр долота, м; α — угол заточки лезвия долота, град; μ — коэффициент трения инструмента о породу; K — коэффициент затупления лезвий

Таблица 1

Исходные данные структуры имитационной модели [составлено авторами]
The initial data of the simulation model structure [compiled by the authors]

Наименование	Обозначение	Величина	Единицы измерения	Примечания
Сечение выработки в проходке	$S_п$	2,25	м^2	
Ширина выработки в проходке	$b_п$	1,5	м	
Высота выработки в проходке	$h_п$	1,5	м	
Крепость породы по шкале проф. М. М. Протодьяконова	f	2 — 10	—	
Плотность горной массы	γ	1300 — 2800	кг/м^3	
Угол наклона выработки	α	0	град	
Длина выработки в проходке	L	60	м	
Подвигание забоя за цикл проходки	$L_{цикл}$	0,5	м	
Число циклов проходки	n	120	—	
Рамная крепь	—	—	—	
Тип исполнительного органа (ИО)	КИО, УИО, ДИО	—	—	Используется сменные ИО: корончатый, ударный, дополнительный

долота; $\sigma_{сж}$ — предел прочности горной породы на зажатие, Па; $A_{уд}$ — энергия удара, Дж.

Определение времени обработки забоя:

$$T_{обр.заб} = \frac{V}{Q_{техн}} = \frac{Sl}{Q_{техн}} \quad (8)$$

где V — объем выработанного пространства, м³; S — площадь сечения выработки (S = 2,25 м²); l — глубина выработанного пространства (l = 0,5 м); $Q_{тех}$ — техническая производительность отбойки породы, м³/ч. Дополнительно учитывается время замены исполнительного органа (ИО) и длительность цикла перемещения шагающей крепи, включающего операции опускания, выдвижения и подъема ее секций посредством гидродомкратов распора и передвижки.

На рис. 1 представлена планограмма работ, наиболее быстрая проходка осуществляется при условиях устойчивой кровли, т.к. количество параллельных операций максимально, и шаг крепления также максимален [37].

Анализ структуры основных операций проходческого цикла позволяет сформировать алгоритм для механизированной проходки малых сечений. Ключевой задачей является минимизация последовательных этапов и максимизация параллельно выполняемых операций для сокращения сроков работ [38,39,40]. Разработанный алгоритм принимает во внимание три ключевых блока факторов. Первый — геолого-технические характеристики, такие как: прочность пород (f), стабильность кровли и глубина залегания выработки. Второй — производственные и эксплуатационные требования, в числе которых: обеспечение безопасности, достижение высокой скорости проходки и сокращение времени, затрачиваемого на логистику и установку оборудования. И третий –временные составляющие: разработка забоя, установка крепи, вспомогательные операции.

Разработка структуры имитационной модели проходки основана на последовательности технологических операций проходческого комплекса. [37]. Моделирование проводилось с использование *Mathcad*.

Данные рис. 2 свидетельствуют о превосходстве производительности вращательного ИО над ударным при разработке мягких пород. Однако рост крепости массива (f) приводит к значительному снижению эффективности корончатого органа. Для пород с $f \geq 5$ рекомендован переход на сменный ИО ударного действия.

Моделирование (рис. 2, 3) выявило ключевые факторы, существенно влияющие на скорость проходки:

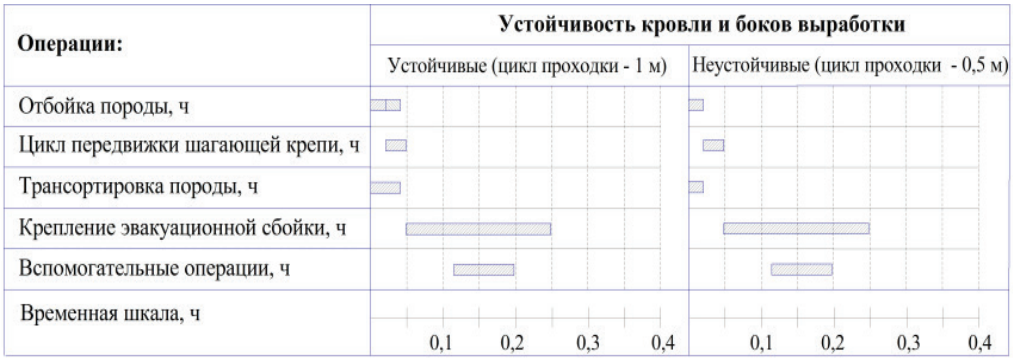

Рис. 1. Планограмма работ [составлено авторами]
Fig. 1. Planogram of works [compiled by the authors]

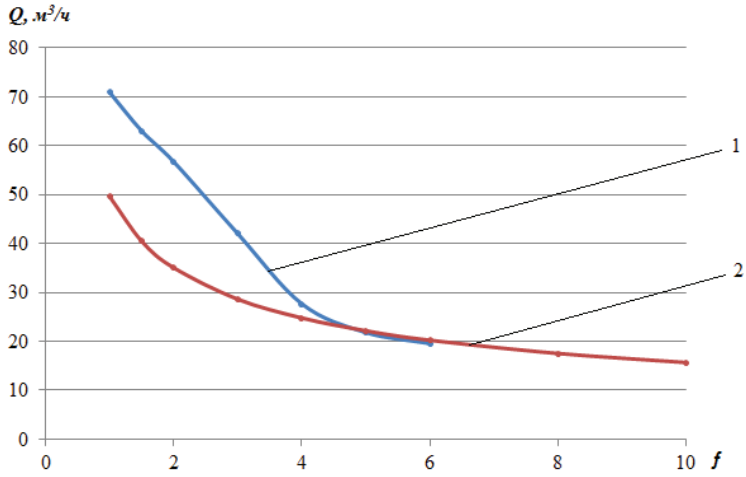

Рис. 2. Зависимость изменения производительности отбойки проходческим комбайном от крепости пород при использовании исполнительного органа: 1 — корончатого; 2 — ударного [составлено авторами]
Fig. 2. The dependence of the change in the productivity of punching by a tunneling combine on the strength of the rocks when using the executive body: 1 — crown; 2 — impact [compiled by the authors]

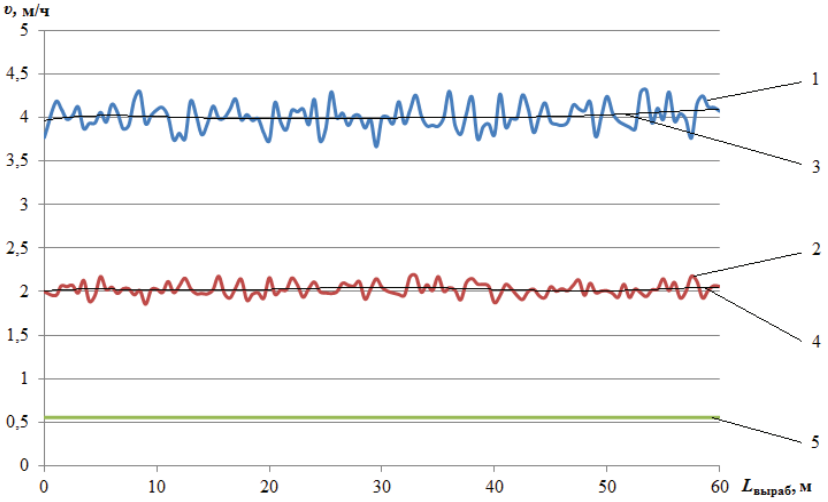

Рис. 3. График зависимости скорости проходки выработки малого сечения от ее длины при использовании: 1 — проходческого комплекса с шагом передвижки (частотой крепления) каждый 1 м; 2 — проходческого комплекса с шагом передвижки каждые 0,5 м; 3, 4 — проходческого комплекса с шагом передвижки каждый 0,5 — 1 м (усредненные значения скоростей проходки); 5 — ручного труда (усредненные значения скорости проходки выработки) [составлено авторами]
Fig. 3. Graph of the dependence of the rate of penetration of a small—section mine on its length when using: 1 — a tunneling complex with a step of movement (fastening frequency) every 1 m; 2 — a tunneling complex with a step of movement every 0.5 m; 3, 4 — a tunneling complex with a step of movement every 0.5–1 m (average values penetration rates); 5 — manual labor (average values of the penetration rate of the mine) [compiled by the authors]

• коэффициент крепости пород (*f*) по М. М. Протодьяконову;

• шаг передвижки проходческого комплекса;

• частота замены ИО, обусловленная неоднородностью породного состава забоя в малых сечениях.

Анализ графика (рис. 3) показывает, что при значении крепости массива *f* = 2 и увеличении шага передвижения до 1 метра, производительность механизированной проходки возрастает вдвое по сравнению с аналогичной операцией при шаге 0,5 м. Более того, эффективность в таком случае оказывается в четыре раза выше по сравнению с ручным способом, предполагающим установку крепи через каждые полметра [41,42].

Рис. 4 демонстрирует, что даже в неоднородных породах (*f* = 2–6), требующих замены ИО и частого крепления (каждые 0,5 м), производительность комплекса минимум на 250% (в 3,5 раза) превосходит ручную проходку однородного забоя (*f* = 2) с базовым оснащением (с применением ручных инструментов).

На величину скорости проведения выработки значительное влияние оказывают крепость породы по шкале проф. М. М. Протодьяконова (*f*), наличие пропластков различной твердости, шаг передвижки проходческого комплекса, а также частота замен исполнительного органа (ИО) вследствие наличия неоднородного состава пород забоя при прохождении выработки малого сечения, этим обусловлены колебания графика .

Проведённое моделирование (рисунок 5) выявило три основных параметра, оказывающих наибольшее влияние на темп прохождения малогабаритных выработок:

– прочностной коэффициент массива (*f*),

– расстояние между точками установки крепи ($L_{цикл}$), обусловленное устойчивостью окружающих пород,

– интервал замены режущего инструмента.

Совокупное воздействие факторов (прочностной коэффициент массива (*f*), расстояние между точками установки крепи ($L_{цикл}$), обусловленное устойчивостью окружающих пород, интервал замены режущего инструмента) позволяет точно прогнозировать динамику выемки при различных сценариях. Рисунок 6 иллюстрирует динамику временных затрат при сооружении выработки сечением 2,25 м² в зависимости от ее протяженности для механизированного и ручного методов проходки.

Результаты моделирования подтверждают, что применение проходческого комплекса для выработок 2.25 м² экономически целесообразно при длине от 10 м в неустойчивых породах ($f \leqslant 2$) с креплением каждые 0.5 м (с учетом 12 ч на МДР). Верхняя граница эффективности определяется производительностью системы транспортировки породы. При этом скорость проходки комплекса линейно зависит от коэффициента крепости (*f*) породного массива.

Результаты и их обсуждение

В ходе работы была проведена систематизация проблем, возникающих при строительстве тоннелей в условиях геологической неоднородности, характерной для Санкт-Петербурга и схожих регионов. Установлено, что чередование слабых и крепких пород, высокий уровень грунтовых вод и наличие плывунов значительно осложняют строительство, особенно в случае выработок малого сечения.

Показано, что применение сменных исполнительных органов, адаптируемых к прочности конкретного участка

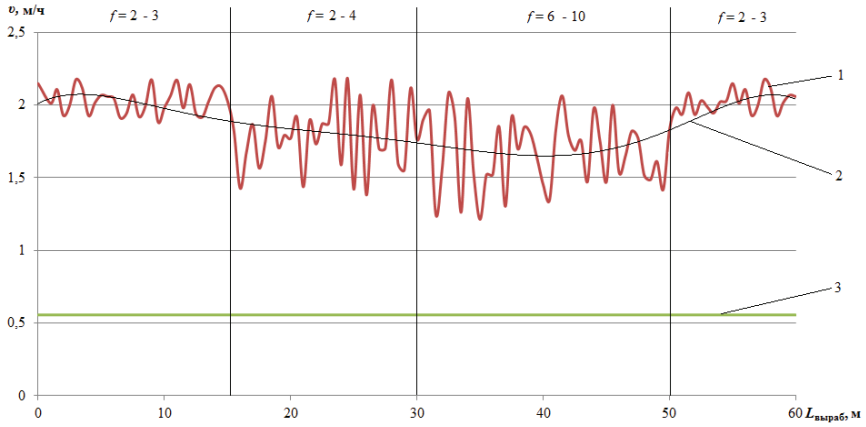

Рис. 4. График зависимости скорости проходки выработки малого сечения выработки от ее длины с использованием: 1 — проходческого комплекса со сменными исполнительными органами; 2 — проходческого комплекса (усредненные значения скорости проходки выработки); 3 — ручного труда (усредненные значения скорости проходки выработки) [составлено авторами]

Fig. 4. Graph of the dependence of the rate of penetration of a small section of the workings on its length using: 1 — a tunneling complex with replaceable executive bodies; 2 — a tunneling complex (average values of the speed of penetration of the workings); 3 — manual labor (average values of the speed of penetration of the workings) [compiled by the authors]

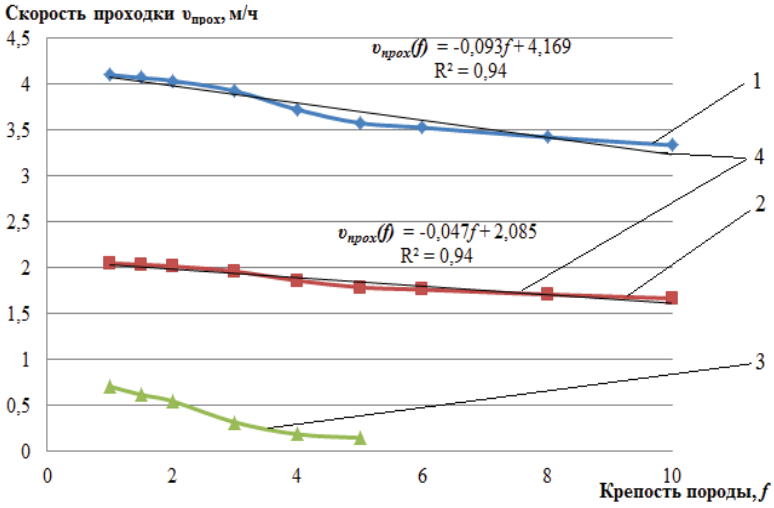

Рис. 5. График зависимости скорости проведения выработки малого сечения от крепости пород (f) при использовании: 1 — проходческого комплекса с шагом передвижки (частотой крепления) каждый 1 м; 2 — проходческого комплекса с шагом передвижки каждые 0,5 м; 3 — ручного труда; 4 — проходческого комплекса (усредненные значения скоростей проходки) [составлено авторами]

Fig. 5. Graph of the dependence of the speed of small—section mining on the rock strength (f) when using: 1 - a tunneling complex with a step of movement (frequency of attachment) every 1 m; 2 — a tunneling complex with a step of movement every 0.5 m; 3 — manual labor; 4 — a tunneling complex (average values of the speeds of penetration) [compiled by the authors]

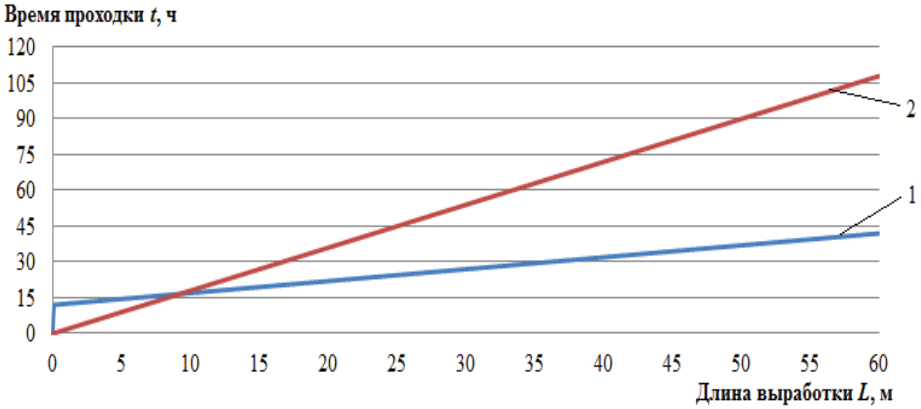

Рис. 6. Изменение времени проведения выработки малого сечения 2,25 м2 от длины выработки по породам горного массива крепостью f≤2 в выработках с неустойчивой кровлей, шагом установки рамной крепи каждые 0,5 м при проходке: 1 — механизированной; 2 — ручной [составлено авторами]

Fig. 6. Change in the time of working out a small section of 2.25 m2 from the length of the workings along the rocks of the mountain massif with a fortress of f<2 in workings with unstable roofing, the step of installing the frame support every 0.5 m during drilling: 1 — mechanized; 2 — manual [compiled by the authors]

массива, позволяет повысить энергоэффективность процесса за счёт минимизации ненужного разрушения прочных включений. Анализ показал, что доля времени, затрачиваемая на смену ИО, является критически важным фактором при проходке выработок в условиях резкой неоднородности массива.

Также выявлено, что проходческий комплекс обеспечивает более высокую скорость работ по сравнению с ручной проходкой, особенно в условиях нестабильной кровли и частой необходимости установки крепи. Использование стреловидных ИО позволит проводить селективную выемку, что дополнительно повысит технологическую гибкость оборудования.

Представленные расчёты и графические зависимости подтверждают ключевую роль коэффициента крепости пород, частоты замены ИО и длины монтажных операций в общей производительности. Полученные результаты служат обоснованием для проектирования новых компактных проходческих комплексов, оптимизированных для вспомогательных выработок малого сечения, в том числе в стеснённых условиях и при экстремальных горно-геологических обстоятельствах.

Заключение

Строительство тоннелей в условиях неоднородных геологических массивов требует применения современных технологий и адаптивных методов проходки. В условиях Санкт-Петербурга, где преобладают водонасыщенные грунты, плывуны и чередование мягких и твердых пород, использование щитовых комплексов не всегда экономически оправдано, особенно для тоннелей малого сечения. В таких случаях эффективными альтернативами являются микротоннелирование, горизонтальное направленное бурение и проходческие комбайны со стреловидным исполнительным органом.

Проведённый анализ подтвердил, что при строительстве вспомогательных выработок малого сечения в усло-

виях геологической неоднородности применение стандартных щитовых технологий не всегда является технически и экономически обоснованным.

Имитационное моделирование показало, что применение проходческого комплекса со сменными исполнительными органами позволяет увеличить скорость проведения выработок малого сечения в 3–4 раза по сравнению с ручной проходкой. Также выявлено, что эффективность механизации возрастает при длине выработки более 10 м, а при наличии нестабильной кровли механизированная проходка остаётся предпочтительной даже при частой установке крепи. Полученные результаты подтверждают, что ключевыми параметрами, влияющими на производительность, являются коэффициент крепости пород, шаг установки крепи и частота замены инструмента.

Таким образом, предложенный подход может служить основой для разработки специализированных проходческих комплексов для сложных геологических условий. Его применение способствует повышению эффективности строительства, снижению доли ручного труда и улучшению безопасности работ.

Вклад авторов

Юнгмейстер Д. А. — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, методологическое руководство и формирование структуры статьи

Уразбахтин Р. Ю. — сбор и систематизация литературных и эмпирических материалов, выполнение расчётов и инженерных обоснований, формулирование выводов и рекомендаций

Тимофеев М. И. — анализ результатов моделирования, оформление библиографического списка и ссылок

Лавренко С. А. — редактирование и подготовка рукописи к публикации, подготовка графического материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bilgin, N., Acun, S.*The effect of rock weathering and transition zones on the performance of an EPB-TBM in complex geology near Istanbul, Turkey // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. — 2021. — 80 (4), pp. 3041–3052. DOI: 10.1007/s10064-021-02142-4

2. Структура системы технического обслуживания и ремонта горных машин / Е. С. Недашковская, Е. И. Шешукова, А. С. Корогодин [и др.] // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2024. — № 25. — С. 155–162. — DOI 10.26160/2658-3305-2024-25-155-162

3. *Geng J.*, *Sun Q.*, *Zhang Y.*, et al. Studying the dynamic damage failure of concrete based on acoustic emission // Construction and Building Materials. — 2017. — Vol. 149. — P. 9–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.054

4. *Bobet A.*, *Einstein H. H.* Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 1998. — Vol. 35, No. 7. — P. 863–888. DOI: 10.1016/S0148-9062(98)00005-2

5. *Xinbo Ma, Fuming Qu, Wenxuan He, Liancheng Wang, Xiaobo Liu.* Intelligent detection method for internal fractures in mine rock masses based on borehole camera images // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering — 2024, https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.10.027

6. *Михайлов А. В., Казаков Ю. А.*, *Соловьев И. В.* Анализ элементов блочной технологии поверхностной выемки органогенного сырья Горная промышленность. 2025. №1. pp. 129–136.

7. *Mahanta B.*, *Singh T. N.*, *Ranjith P. G.*, *Vishal V.* Experimental investigation of the influence of strain rate on strength; failure attributes and mechanism of Jhiri shale // Journal of Natural Gas Science and Engineering. — 2018. — Vol. 58. — P. 178–190. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.08.001

8. *Wang J.*, *Chen G.*, *Xiao Y.* Effect of strain rate on mechanical properties and AE characteristics of hard rock under the impact of uniaxial compression // Geotechnical and Geological Engineering. — 2022. — Vol. 40, No. 4. — P. 1321–1335. DOI: 10.1007/s10706-022-02145-2

9. *Brantut N.* Rate- and strain-dependent brittle deformation of rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2015. — Vol. 120, No. 4. — P. 2785–2806. DOI: 10.1002/2013JB010448

10. *Wu Y.*, *Zhang Y.*, *Liu J.*, *Wang H.* Experimental study on the tensile properties of rock-mortar interface under different strain rates // Advances in Materials Science and Engineering. — 2018. — Article ID 5241848. DOI: 10.1155/2018/5241848

11. *Donath F. A.*, *Fruth L. S.* Dependence of strain-rate effects on deformation mechanism and rock type // The Journal of Geology. — 1971. — Vol. 79, No. 3. — P. 301–319. DOI: 10.1086/627630

12. *Harbord C.*, *Brantut N.*, *Wallis D.* Grain-size effects during semi-brittle flow of calcite rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2023. — Vol. 128, No. 8. — Article e2023JB026458. DOI: 10.1029/2023JB026458

13. *Li Y.*, *Huang D.*, *Li X. A.* Strain rate dependency of coarse crystal marble under uniaxial compression: strength, deformation and strain energy // Rock Mechanics and Rock Engineering. — 2014. — Vol. 47, No. 4. — P. 1153–1164. DOI: 10.1007/s00603-013-0443-0

14. *Qi C. Z.*, *Wang M. Y.*, *Qian Q. H.* Strain-rate effects on the strength and fragmentation size of rocks // International Journal of Impact Engineering. — 2009. — Vol. 36, No. 12. — P. 1355–1364. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.04.008

15. *Zhang Q. B.*, *Zhao J.* Quasi-static and dynamic fracture behavior of rock materials: phenomena and mechanisms // International Journal of Fracture. — 2014. — Vol. 189, No. 1. — P. 1–32. DOI: 10.1007/s10704–014–9959-z

16. *Chen X.*, *Yu J.*, *Tang C.*, et al. Experimental and numerical investigation of permeability evolution with damage of sandstone under triaxial compression // Rock Mechanics and Rock Engineering. — 2017. — Vol. 50, No. 6. — P. 1529–1549. DOI: 10.1007/s00603-017-1169-3

17. *He J.*, *Afolagboye L.*, *Zheng B.*, et al. Effect of strain rate on anisotropic mechanical behavior of shale under uniaxial compression conditions // Rock Mechanics and Rock Engineering. — 2022. — Vol. 55, No. 11. — P. 5297–5305. DOI: 10.1007/s00603–022–02892-x

18. *Meng Q.*, *Wang Z.*, *Zhang Y.*, et al. Strain rate effects on characteristic stresses and acoustic emission in rocks // Frontiers in Earth Science. — 2022. — Vol. 10. — Article 960812. DOI: 10.3389/feart.2022.960812

19. Jason Emery, Ismet Canbulat, Chengguo Zhang. Fundamentals of modern ground control management in Australian underground coal mines // International Journal of Mining Science and Technology — 2020. — Vol. 30, Iss. 5,2020, pp. 573–582, https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.04.003

20. *He M.*, *Cheng T.*, *Qiao Y.*, et al. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations // J. Rock Mech. Geotech. Eng. — 2022. — Vol. 15, No. 5. — P. 1312–1353. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.07.014

21. *Zhao J.*, *Li H.*, *Li X.*, et al. Experimental study on mechanical properties of brittle coal under different strain rates // Int. J. Mining Sci. Technol. — 2014. — Vol. 24, No. 4. — P. 509–513. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.05.008

22. *Шибанов, Д. А.* Цифровые двойники в горном машиностроении, как инструмент повышения эффективности эксплуатации горных машин / Д. А. Шибанов, С. Л. Иванов,

А. А. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — № S3–1. — С. 3–13. — DOI 10.25018/0236_1493_2022_5_3_13

23. *Björn Lindqvist, Samuel Karlsson, Anton Koval, Ilias Tevetzidis, Jakub Haluška, Christoforos Kanellakis, Ali-akbar Agha-mohammadi, George Nikolakopoulos*. Multimodality robotic systems: Integrated combined legged-aerial mobility for subterranean search-and-rescue // Robotics and Autonomous Systems. — 2022. — Vol. 154, https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104134.

24. *Heonmoo Kim, Yosoon Choi*. 3D location estimation and tunnel mapping of autonomous driving robots through 3D point cloud registration on underground mine rampways // Underground Space. — 2025. — Vol. 22, pp. 1–20. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2024.10.003.

25. *Zhongbin Wang, Lei Si, Dong Wei, Jinheng Gu, Fulin Xu*. Coal-rock drilling states recognition of drilling robot for rockburst prevention based on multi-sensor information fusion // Journal of Engineering Research. — 2024. — Vol. 12, Iss. 4, pp. 878–885. https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.08.004.

26. *Manchao He, Qi Wang, Qunying Wu*. Innovation and future of mining rock mechanics // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering — 2021. — Vol. 13, Iss. 1. pp. 1–21. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.005.].

27. *Zhang X.*, *Wang J.*, *Li H*. Coal Mine Rescue Robots Based on Binocular Vision: A Review of the State of the Art // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — 16 p. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009387

28. *Khalimonenko A. D.*, Shmakova Yu. R., *Admakina O. N.*, *Kufaev V. G.* High-speed face milling features of deformable aluminum alloys. Tsvetnye Metally. 2024. No. 6. pp. 81–88.

29. *Chen Y.*, *Wang H.*, *Zhang L.* Investigating the Obstacle Climbing Ability of a Coal Mine Search-and-Rescue Robot with a Hydraulic Mechanism // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12, № 15. — P. 12. — DOI: 10.3390/app12157805

30. *Михайлов А. В.*, *Казаков Ю. А.* Методология оценки многократной проходимости горнотранспортного агрегата по слабым грунтам // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. №8. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_95

31. *Габов В. В.*, *Задков Д. А.*, *Нгуен К. Л.* Особенности формирования элементарных сколов в процессе резания углей и изотропных материалов эталонным резцом горных машин // Записки Горного института. — 2019. — Том 236. С. 153. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.153

32. *Klevtsov V. A.*, *Timofeev D. Y.*, *Khalimonenko A. D.* Improved Design of Manufacturing Processes for Mining Machines: Basing Concepts / Russian Engineering Research, № 43, V 11, 2023. pp. 1367 — 1375 DOI: 10.3103/S1068798X23110151

33. *Алиева Л. А.* , *Жуков И. А.* Повышение эффективности ударно-поворотного бурения горных пород высокой крепости совершенствованием структуры породоразрушающего безлезвийного инструмента Устойчивое развитие горных территорий. 2024. №4. pp. 1681–1694. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694

34. *Zhukov I. A.* , *Martyushev N. V.*, *Zyukin D. A.*, *Azimov A. M.* , *Karlina A. I.* Modification of hydraulic hammers used in repair of metallurgical units Metallurgist. 2023. №12. pp. 1644–1652. doi.org/10.1007/s11015-023-01480-w

35. *Габов Виктор Васильевич, Задков Д. А., Нгуен В. С., Хамитов М. С. , Молчанов В. В.* К проблеме совершенствования рабочего инструмента горных выемочных машин Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. №6. pp. 205–222. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_205

36. *Gu Q.*, *Ma Q.*, *Tan Y.*, et al. Acoustic emission characteristics and damage model of cement mortar under uniaxial compression // Construction and Building Materials. — 2019. — Vol. 23. — P. 377–385. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.090

37. *Zhdankin N. A.* Effect of tunneling rate on the stress-strain state of a rock mass // Soviet Applied Mechanics. — 1985. — Vol. 21, No. 10. — P. 919–922. DOI: 10.1007/BF00888206

38. *Belyakov N. A.*, *Lobanov M. L.* Numerical simulation of failure evolution in heterogeneous rock massifs using particle methods // Computational Geosciences. — 2021. — Vol. 25. — P. 1189–1207. DOI: 10.1007/s10596–021–10075-w

39. *Urazbakhtin, R.Yu.* The results of studies of the tunneling rescue complex for coal mines/ R.Yu. Urazbakhtin, D.A. Yungmeyster. 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 560 012130. [Электронный ресурс]. — URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757–899X/560/1/012130/pdf

40. *Peter Kolapo, Steven Schafrik, Hejia Zhang, Stefanos Nikolaidis, Zach Agioutantis.* Integrating robotic systems in underground roof support machine // Journal of Industrial Safety. — 2024. — Vol. 1, Iss. 1. https://doi.org/10.1016/j.jinse.2024.100002

41. *Hatoum, H. M., Mustafin, M. G.* (2020). Optimization of locating robotic total stations for determining the deformations of buildings and structures. Geodezia i Kartografia, 963(9), 2–13. doi:10.22389/0016-7126-2020-963–9-2–13

42. *Lebedev, M. O., Karasev, M. A., Belyakov, N. A., Basova, L. A.* (2022). Face stability in heavy clay: Theory and practice. Journal of Mining Science, 58(2), 234–245. doi:10.1134/S1062739122020077 GIAB

REFERENCES

1. Bilgin, N., Acun, S. The effect of rock weathering and transition zones on the performance of an EPB-TBM in complex geology near Istanbul, *Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021. Vol. 80, no. 4. pp. 3041–3052. DOI: 10.1007/s10064-021-02142-4.

2. Nedashkovskaya, E. S., Sheshukova, E. I., Korogodin, A. S., et al. Structure of the maintenance and repair system for mining machines. *Transport, Mining, and Construction Machinery: Science and Production*. 2024. no. 25. pp. 155–162. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-25–155–162.

3. Geng, J., Sun, Q., Zhang, Y., et al. Studying the dynamic damage failure of concrete based on acoustic emission. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 149. pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.054.

4. Bobet, A., Einstein, H. H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1998. Vol. 35, no. 7. pp. 863–888. DOI: 10.1016/S0148–9062(98)00005–2.

5. Ma, X., Qu, F., He, W., Wang, L., Liu, X. Intelligent detection method for internal fractures in mine rock masses based on borehole camera images. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.10.027.

6. Mikhailov A. V., Kazakov Y. A., Soloviev I. V. V Analysis of block technology elements for surface excavation of organogenic material. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):129–136. [In Russ.] https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-129–136

7. Mahanta, B., Singh, T. N., Ranjith, P. G., Vishal, V. Experimental investigation of the influence of strain rate on strength, failure attributes and mechanism of Jhiri shale. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018. Vol. 58. pp. 178–190. DOI: 10.1016/j.jngse.2018.08.001.

8. Wang, J., Chen, G., Xiao, Y. Effect of strain rate on mechanical properties and AE characteristics of hard rock under the impact of uniaxial compression. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022. Vol. 40, no. 4. pp. 1321–1335. DOI: 10.1007/s10706-022-02145-2.

9. Brantut, N. Rate- and strain-dependent brittle deformation of rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2015. Vol. 120, no. 4. pp. 2785–2806. DOI: 10.1002/2013JB010448.

10. Wu, Y., Zhang, Y., Liu, J., Wang, H. Experimental study on the tensile properties of rock-mortar interface under different strain rates. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Article ID 5241848. DOI: 10.1155/2018/5241848.

11. Donath, F. A., Fruth, L. S. Dependence of strain-rate effects on deformation mechanism and rock type. *The Journal of Geology*. 1971. Vol. 79, no. 3. pp. 301–319. DOI: 10.1086/627630.

12. Harbord, C., Brantut, N., Wallis, D. Grain-size effects during semi-brittle flow of calcite rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2023. Vol. 128, no. 8. Article e2023JB026458. DOI: 10.1029/2023JB026458.

13. Li, Y., Huang, D., Li, X. A. Strain rate dependency of coarse crystal marble under uniaxial compression: strength, deformation and strain energy. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2014. Vol. 47, no. 4. pp. 1153–1164. DOI: 10.1007/s00603-013-0443-0.

14. Qi, C. Z., Wang, M. Y., Qian, Q. H. Strain-rate effects on the strength and fragmentation size of rocks. *International Journal of Impact Engineering*. 2009. Vol. 36, no. 12. pp. 1355–1364. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.04.008.

15. Zhang, Q. B., Zhao, J. Quasi-static and dynamic fracture behavior of rock materials: phenomena and mechanisms. *International Journal of Fracture*. 2014. Vol. 189, no. 1. pp. 1–32. DOI: 10.1007/s10704–014–9959-z.

16. Chen, X., Yu, J., Tang, C., et al. Experimental and numerical investigation of permeability evolution with damage of sandstone under triaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017. Vol. 50, no. 6. pp. 1529–1549. DOI: 10.1007/s00603-017-1169-3.

17. He, J., Afolagboye, L., Zheng, B., et al. Effect of strain rate on anisotropic mechanical behavior of shale under uniaxial compression conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022. Vol. 55, no. 11. pp. 5297–5305. DOI: 10.1007/s00603–022–02892-x.

18. Meng, Q., Wang, Z., Zhang, Y., et al. Strain rate effects on characteristic stresses and acoustic emission in rocks. *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. Article 960812. DOI: 10.3389/feart.2022.960812.

19. Emery, J., Canbulat, I., Zhang, C. Fundamentals of modern ground control management in Australian underground coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020. Vol. 30, no. 5. pp. 573–582. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.04.003.

20. He, M., Cheng, T., Qiao, Y., et al. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022. Vol. 15, no. 5. pp. 1312–1353. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.07.014.

21. Zhao, J., Li, H., Li, X., et al. Experimental study on mechanical properties of brittle coal under different strain rates. International *Journal of Mining Science and Technology*. 2014. Vol. 24, no. 4. pp. 509–513. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.05.008.

22. Shibanov, D. A., Ivanov, S. L., Ivanov, A. A. Digital twins in mining machinery as a tool for improving the efficiency of mining machine operation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022. no. S3–1. pp. 3–13. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_3_13.

23. Lindqvist, B., Karlsson, S., Koval, A., et al. Multimodality robotic systems: Integrated combined legged-aerial mobility for subterranean search-and-rescue. *Robotics and Autonomous Systems*. 2022. Vol. 154. DOI: 10.1016/j.robot.2022.104134.

24. Kim, H., Choi, Y. 3D location estimation and tunnel mapping of autonomous driving robots through 3D point cloud registration on underground mine rampways. *Underground Space*. 2025. Vol. 22. pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.undsp.2024.10.003.

25. Wang, Z., Si, L., Wei, D., Gu, J., Xu, F. Coal-rock drilling states recognition of drilling robot for rockburst prevention based on multi-sensor information fusion. *Journal of Engineering Research*. 2024. Vol. 12, no. 4. pp. 878–885. DOI: 10.1016/j.jer.2023.08.004.

26. He, M., Wang, Q., Wu, Q. Innovation and future of mining rock mechanics. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 13, no. 1. pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.11.005.

27. Zhang, X., Wang, J., Li, H. Coal Mine Rescue Robots Based on Binocular Vision: A Review of the State of the Art. IEEE Access. 2020. Vol. 8. 16 p. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009387.

28. Khalimonenko A. D., Shmakova Yu. R., Admakina O. N., Kufaev V. G. High-speed face milling features of deformable aluminum alloys. *Tsvetnye Metally*. 2024. no. 6. pp. 81–88.

29. Chen, Y., Wang, H., Zhang, L. Investigating the Obstacle Climbing Ability of a Coal Mine Search-and-Rescue Robot with a Hydraulic Mechanism. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 15. P. 12. DOI: 10.3390/app12157805.

30. Mikhailov, A. V., Kazakov, Yu.A. Methodology for assessing the repeated passability of a mining transport unit on weak soils. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022. no. 8. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_95.

31. Gabov, V. V., Zadkov, D. A., Nguyen, K. L. Features of the formation of elementary chips during the cutting of coals and isotropic materials by a standard cutter of mining machines. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. pp. 153–161. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.153.

32. Klevtsov, V. A., Timofeev, D. Y., Khalimonenko, A. D. Improved Design of Manufacturing Processes for Mining Machines: Basing Concepts. *Russian Engineering Research*. 2023. Vol. 43, no. 11. pp. 1367–1375. DOI: 10.3103/S1068798X23110151.

33. Aliyeva, L. A., Zhukov, I. A. Improving the efficiency of percussive-rotary drilling of high-strength rocks by optimizing the structure of a non-blade rock-cutting tool. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024. no. 4. pp. 1681–1694. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694.

34. Zhukov, I. A., Martyushev, N. V., Zyukin, D. A., Azimov, A. M., Karlina, A. I. Modification of hydraulic hammers used in repair of metallurgical units. *Metallurgist*. 2023. no. 12. pp. 1644–1652. DOI: 10.1007/s11015-023-01480-w.

35. Gabov, V. V., Zadkov, D. A., Nguyen, V. S., Khamitov, M. S., Molchanov, V. V. On the problem of improving the working tool of mining machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022. no. 6. pp. 205–222. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_205.

36. Gu, Q., Ma, Q., Tan, Y., et al. Acoustic emission characteristics and damage model of cement mortar under uniaxial compression. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 23. pp. 377–385. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.090.

37. Zhdankin, N. A. Effect of tunneling rate on the stress-strain state of a rock mass. Soviet Applied Mechanics. 1985. Vol. 21, no. 10. pp. 919–922. DOI: 10.1007/BF00888206.

38. Belyakov, N. A., Lobanov, M. L. Numerical simulation of failure evolution in heterogeneous rock massifs using particle methods. Computational Geosciences. 2021. Vol. 25. pp. 1189–1207. DOI: 10.1007/s10596-021-10075-w.

39. Urazbakhtin, R.Yu., Yungmeyster, D. A. The results of studies of the tunneling rescue complex for coal mines. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. Article 012130. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012130.

40. Kolapo, P., Schafrik, S., Zhang, H., Nikolaidis, S., Agioutantis, Z. Integrating robotic systems in underground roof support machine. *Journal of Industrial Safety*. 2024. Vol. 1, no. 1. DOI: 10.1016/j.jinse.2024.100002.

41. Hatoum, H. M., & Mustafin, M. G. (2020). Optimization of locating robotic total stations for determining the deformations of buildings and structures. *Geodezia i Kartografia,* 963(9), 2–13. doi:10.22389/0016-7126-2020-963-9-2-13

42. Lebedev, M. O., Karasev, M. A., Belyakov, N. A., & Basova, L. A. (2022). Face stability in heavy clay: Theory and practice. *Journal of Mining Science*, 58(2), 234–245. doi:10.1134/S1062739122020077

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич — докт. техн. наук, профессор, http://orcid.org/0000-0001-7858-8340, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, email: Yungmeyster_DA@pers.spmi.ru;
Уразбахтин Рустам Юсуфович — канд. техн. наук, исполнительный директор Научно-образовательного центра коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием, https://orcid.org/0000-0002-2913-5641, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, urazbakhtin_ryu@pers.spmi.ru;
Тимофеев Максим Игоревич — аспирант, http://orcid.org/0000-0002-9441-4532, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, email: s245061@stud.spmi.ru;
Лавренко Сергей Александрович — канд. техн. наук, заведующий кафедрой практических навыков и опыта, https://orcid.org/0000-0003-1760-310X, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский Горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: Lavrenko_SA@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Jungmejster D. A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, https://orcid.org/0000-0001-7858-8340, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21st line V. O., 2, Russia, e-mail: Yungmeyster_DA@pers.spmi.ru;
Urazbahtin R. Ju., Cand. Sci. (Eng.), Executive Director of the Scientific and Educational Center for the Collective Use of High-tech Equipment, https://orcid.org/0000-0002-2913-5641, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21st line V. O., 2, Russia, e-mail: urazbakhtin_ryu@pers.spmi.ru;
Timofeev M. I., Postgraduate student, http://orcid.org/0000-0002-9441-4532, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21st line V. O., 2, Russia, s245061@stud.spmi.ru, ttps://orcid.org/0000-0003-1760-310X;
Lavrenko S. A., Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Practical Skills and Experience, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21st line V. O., 2, Russia, e-mail: Lavrenko_SA@pers.spmi.ru

Получена редакцией 02.10.2025; получена после рецензии 17.11.2025; принята к печати 24.11.25.
Received by the editors 02.10.2025; received after the review 17.11.2025; accepted for printing 24.11.25.