

Научная статья  
УДК 624.191:621.865.8:621.924.93  
doi:10.52170/1815-9265\_2026\_81\_80

## **Синтез технологий гидроабразивной резки и роботизированного проходческого комплекса на базе промышленных роботов-манипуляторов для сооружения тоннелей Донецкого метрополитена**

**Денис Валериевич Хохлов<sup>1✉</sup>, Владимир Александрович Гусаков<sup>2</sup>,  
Александр Николаевич Бирюков<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> Государственное бюджетное учреждение «Проектно-конструкторский технологический институт», Донецк, Россия

<sup>3</sup> Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> hohlov.denis1@mail.ru✉

<sup>2</sup> votraytop1@gmail.com

<sup>3</sup> aleks\_bir@mail.ru

**Аннотация.** Строительство метрополитена в Донецке сталкивается с проблемой проходки тоннелей в толще крепких горных пород (аргиллиты, алевролиты, песчаники), имеющих предел прочности на сжатие до 150 МПа. Традиционные механизированные тоннелепроходческие комплексы (ТПМК) и буровзрывной метод обладают низкой эффективностью из-за износа инструмента и механизмов, повышенной вибрации, воздействующей на поверхностную инфраструктуру, а также больших объемов отходов породы.

Цель исследования – разработка концепции роботизированного комплекса для сооружения тоннелей в крепких породах на основе синтеза гидроабразивной резки (ГАР) и роевой роботизации. Методология включает системный анализ мирового опыта, теорию гидроструйного разрушения и принципы адаптивного управления роботизированным комплексом с техническим зрением. Предложена схема мобильного роботизированного комплекса из двух режущих роботов-манипуляторов с давлением струи до 6 000 бар, одного транспортного робота-манипулятора, системы лазерного сканирования и модуля ИИ для создания цифрового двойника забоя.

Научная новизна заключается в обосновании применения промышленных роботов-манипуляторов, организованных по роевым принципам, с гидроабразивным режущим инструментом для проходки в крепких породах, обеспечивающим высокую точность контура выработки ( $\pm 5$ –15 мм), отсутствие вибрационного воздействия на поверхностную застройку и замкнутый цикл утилизации извлекаемой породы (до 85 %) с ее переработкой в строительные материалы (облицовочная плитка, клинкерный кирпич, заполнители для бетона). Прогнозируемая скорость проходки выработки – 2,5–4,0 м/сут, ожидаемое снижение себестоимости строительства на 30–40 %. Полученные результаты ориентированы на применение при сооружении тоннелей Донецкого метрополитена и могут быть распространены на аналогичные горно-геологические условия.

**Ключевые слова:** роботизированный проходческий комплекс, гидроабразивная резка, промышленные роботы-манипуляторы, тоннелестроение, метрополитен, крепкие горные породы, роевая роботизация, цифровой двойник, замкнутый цикл, импортозамещение

**Для цитирования:** Хохлов Д. В., Гусаков В. А., Бирюков А. Н. Синтез технологий гидроабразивной резки и роботизированного проходческого комплекса на базе промышленных роботов-манипуляторов для сооружения тоннелей Донецкого метрополитена // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 4 (81), спецвыпуск. С. 80–85. DOI 10.52170/1815-9265\_2026\_81\_80.

Original article

## **Synthesis of hydro-abrasive cutting technologies and a robotic tunneling complex based on industrial robotic arms for the construction of tunnels in the Donetsk Metro**

**Denis V. Khokhlov<sup>1✉</sup>, Vladimir A. Gusakov<sup>2</sup>, Alexander N. Biryukov<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> State Budgetary Institution 'Design and Technological Institute', Donetsk, Russia

<sup>3</sup> Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> hohlov.denis1@mail.ru✉

<sup>2</sup> votraytop1@gmail.com

<sup>3</sup> aleks\_bir@mail.ru

**Abstract.** The construction of the Donetsk Metro faces the challenge of tunneling through hard rock strata (mudstones, siltstones, sandstones) with a compressive strength of up to 150 MPa. Traditional mechanized tunnel boring machines (TBMs) and drilling-and-blasting methods have low efficiency due to tool and machinery wear, increased vibration affecting surface infrastructure, and large volumes of excavated waste rock.

The purpose of the study is to develop a concept of a robotic complex for tunneling in hard rocks based on the synthesis of abrasive waterjet cutting (AWJC) and swarm robotics. The methodology includes a systematic analysis of global experience, the theory of waterjet rock destruction, and the principles of adaptive control of a robotic complex with technical vision. A scheme of a mobile robotic complex is proposed, consisting of two cutting robotic manipulators with a jet pressure of up to 6000 bar, one transport robotic manipulator, a laser scanning system, and an AI module for creating a digital twin of the tunnel face.

The scientific novelty lies in the substantiation of the use of industrial robotic manipulators organized according to swarm principles with an abrasive waterjet cutting tool for hard rock tunneling, providing high accuracy of the excavation contour ( $\pm 5$ –15 mm), the absence of vibration impact on surface infrastructure, and a closed-loop recycling of excavated rock (up to 85 %) with its processing into construction materials (facing tiles, clinker bricks, concrete aggregates). The predicted excavation rate is 2.5–4.0 m/day, and the expected reduction in construction cost is 30–40 %. The obtained results are intended for application in the construction of Donetsk Metro tunnels and can be extended to similar geological conditions.

**Keywords:** robotic tunnelling complex, abrasive waterjet cutting, industrial manipulators, tunnelling, metro, hard rocks, swarm robotics, digital twin, closed cycle, import substitution

**For citation:** Khokhlov D. V., Gusakov V. A., Biryukov A. N. Synthesis of hydro-abrasive cutting technologies and a robotic tunneling complex based on industrial robotic arms for the construction of tunnels in the Donetsk Metro. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(81):80–85. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265\_2026\_81\_80.

## Введение

Развитие городской транспортной инфраструктуры Донецкой агломерации требует строительства метрополитена, трассы которого залегают в крепких породах с пределом прочности на сжатие до 120–150 МПа. Традиционные методы проходки в таких условиях имеют существенные ограничения. Буровзрывной способ создает сейсмические и шумовые нагрузки, ограничивающие его применение в плотной городской застройке [1]. Механизированные щиты с дисковыми шарошками демонстрируют критический износ режущего инструмента (до 0,5–1,0 шт./м<sup>3</sup>) и частые аварийные остановки [2]. Оба метода генерируют значительные объемы пустой породы (до 23 000 м<sup>3</sup> на 1 км тоннеля), требующей складирования в отвалы, что противоречит принципам устойчивого развития.

По данным зарубежных и отечественных источников [3, 4], концепция «Индустрия 4.0» опирается на использование информационных и цифровых технологий промышленных процессов. Одним из важных компонентов «Индустрии 4.0» является технология роботизации производственных процессов, которая должна повышать уровень безопасности труда наряду с ростом его производительности [5].

В 2022 г. компания HyperTunnel (Великобритания) продемонстрировала прорывной подход – строительство тоннеля рядами роботов hyperBot по принципу 3D-печати и выемки

грунта в мягких породах [6]. Однако прямое копирование для крепких пород Донбасса невозможно из-за недостаточной энерговооруженности. В горной промышленности накоплен успешный опыт гидроабразивной резки ГАР, разрушающей высокопрочные материалы струей воды сверхвысокого давления (до 6 000 бар) с добавлением абразива без вибраций и нагрева [7]. Работы по роботизации ГАР подтвердили возможность интеграции промышленных роботов-манипуляторов с системами технического зрения для роботизированного щелеобразования [8, 9].

Цель исследования – разработка концептуальной схемы роботизированного проходческого комплекса на базе промышленных роботов-манипуляторов с гидроабразивным инструментом для тоннелей Донецкого метрополитена.

Задачи: анализ ограничений существующих методов; обоснование применимости ГАР; разработка концептуальной схемы и технологических циклов; оценка преимуществ по критериям импортозамещения и замкнутого цикла использования извлекаемой породы.

## Материалы и методы исследования

В основу положены следующие теоретические и экспериментальные предпосылки.

Модель гидроабразивного разрушения по работам В. А. Бреннера и А. Б. Жабина: эффективное щелеобразование в породах до 200 МПа достигается при давлении струи 4 000–6 000 бар, расходе абразива гранатового песка

0,5–1,0 кг/мин [7]. Критические параметры: расстояние от сопла до забоя 10–20 мм, угол атаки 70–90°.

Кинематика роботов-манипуляторов: используются характеристики промышленных роботов типа «вертикальная рука» с шестью степенями свободы, грузоподъемностью до 120 кг, повторяемостью позиционирования  $\pm 0,1$  мм (аналог KUKA KR QUANTEC). Для забоя диаметром 6,0 м требуется два режущих и один транспортный роботы-манипуляторы на поворотной платформе. Принципы роевой роботизации адаптированы из технологии HyperTunnel [6] с модификацией для последовательной работы режущих и транспортных роботов в стесненных условиях.

Цифровое моделирование и техническое зрение используются для построения цифрового двойника забоя, используется комбинация лазерного сканера (дальность до 15 м, точность  $\pm 1$  мм) и стереокамер. Система технического зрения позволяет в реальном времени корректировать траекторию режущего инструмента с учетом трещиноватости и анизотропии [9]. Для обработки облаков контрольных точек применены методы ИИ.

Оценка экономической эффективности базировалась на сравнении с ТПМК стоимостью 80–120 млн р. и буровзрывным методом с учетом стоимости вывоза породы (500–800 р./м<sup>3</sup> в ценах 2024 г.) и возможности реализации продукции из извлекаемой породы.

Анализ проведен для типового перегона Донецкого метрополитена: диаметр 6 м, длина 1,8 км, породы – аргиллиты (60 %), алевролиты (30 %), песчаники (10 %).

## Результаты исследования

Сравнительный анализ методов сооружения тоннелей представлен в таблице.

Предлагаемый роботизированный комплекс уступает ТПМК по абсолютной скорости проходки выработки, но превосходит по безопасности, точности, переработке отходов и импортозамещению.

Концептуальная схема комплекса (рисунок) включает модули:

- модуль лазерного сканирования и цифрового двойника – формирует 3D-модель забоя, идентифицирует трещиноватость;

- модуль управления с ИИ – рассчитывает оптимальные траектории режущих роботов для минимизации энергозатрат;

- два режущих робота-манипулятора – с гидроабразивными головками (6 000 бар, сопло 0,8–1,2 мм) синхронно нарезают систему щелей, формируя извлекаемые блоки 0,3×0,3×0,3 м;

- насосная станция сверхвысокого давления – плунжерного типа (250 кВт, 8–12 л/мин);

- транспортный робот-манипулятор с вакуумным захватом или грейфером для извлечения и сортировки извлекаемых блоков по геометрии с паллетированием на транспортную тележку.

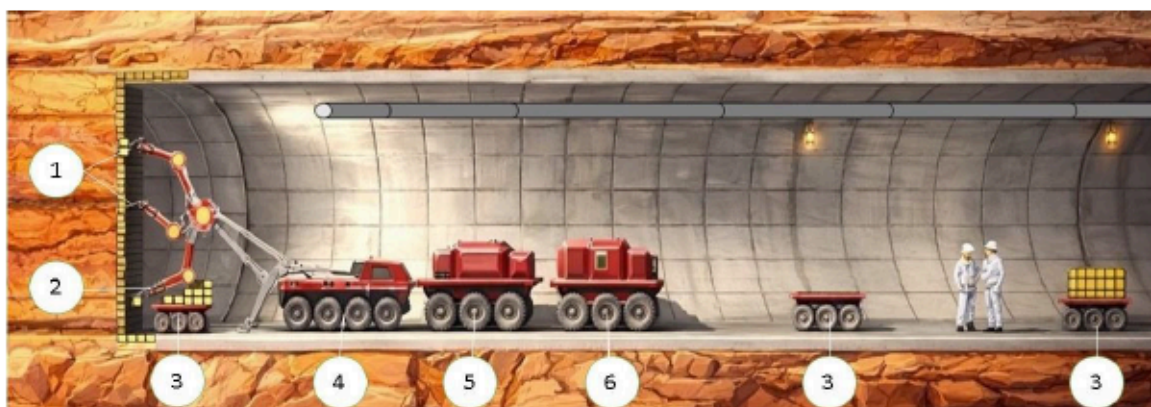
Технологический цикл проходки продолжительностью 3–5 ч:

- 1) сканирование (15 мин) – формируется облако контрольных точек, цифровой двойник забоя;

- 2) планирование траектории (5 мин) – оптимальная сетка резов рассчитывается с помощью ИИ;

Сравнительная оценка методов сооружения тоннелей

| Показатель                                     | ТПМК (крепкие породы)            | Буровзрывной (крепкие породы) | HyperTunnel (мягкие грунты) | Предлагаемый роботизированный комплекс ГАР (крепкие породы) |
|------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Зависимость от импорта                         | Критическая (90–100 %)           | Низкая (ВВ)                   | Критическая                 | Низкая (отечественные компоненты)                           |
| Скорость проходки, м/сут                       | 6–8 (высокий износ оборудования) | 1,5–2,5                       | До 10 (в мягких грунтах)    | 2,5–4,0 (прогноз)                                           |
| Вибрационное воздействие на поверхность (мм/с) | Средние (5–10)                   | Высокие (до 50)               | Отсутствуют                 | Отсутствуют                                                 |
| Точность контура выработки, мм                 | $\pm 50$ –100                    | $\pm 100$ –200                | $\pm 10$ –20                | $\pm 5$ –15                                                 |
| Использование породы, %                        | 0 (отвал)                        | 0 (отвал)                     | 0 (отвал)                   | До 85 (стройматериалы)                                      |



Концептуальная схема роботизированного проходческого комплекса в забое тоннеля:  
 1 – режущие роботы-манипуляторы с гидроабразивными головками; 2 – робот-манипулятор для сортировки и паллетирования; 3 – транспортная тележка; 4 – робототехническая платформа ГАР; 5 – насосная станция; 6 – станция подготовки воды

3) ГАР-резка породного массива (3–4,5 ч) – последовательное щелеобразование на глубину до 300–350 мм;

4) извлечение блоков (1–2 ч) – транспортный робот извлекает, сортирует и паллетизирует блоки на транспортную тележку;

5) мониторинг геометрии и контроль точности контура выработки.

Крепление тоннеля тьюбингами и наращивание вентиляционного става выполняются последовательно с отставанием от проходки и не учитываются в рассмотренном технологическом цикле.

Комплекс не требует присутствия людей в призабойной зоне, операторы работают дистанционно. Роботизация позволяет вести работы в зонах, опасных для человека. Операторы управляют комплексом дистанционно из защищенного пульта. Это позволяет избежать многих рисков для персонала, так как роботы могут работать в крайне опасных условиях без присутствия человека [10].

Внедрение принципов бережливого производства для утилизации породного массива представляет собой замкнутый цикл использования извлекаемой породы и является ключевым отличием от традиционных методов проходки.

Вместо дробления и вывоза на отвал, порода аккуратно вырезается на блоки заданной формы с учетом архитектурного и дизайнерского замысла для строительства и отделки помещений:

– аргиллиты и алевролиты режутся на плитку и клинкерный кирпич для внутренней

отделки станций и вестибюлей Донецкого метрополитена;

– более прочные песчаники могут использоваться в виде блоков для полигональной кладки, применяемые в архитектурном оформлении;

– мелкофракционная порода и шлам (<5 мм) используется для производства тьюбингов, бордюрного камня, бетона В25–В40 и других строительных материалов.

Очищенная вода возвращается в систему ГАР.

Экономический эффект для тоннеля длиной 1 км (объем породы ~23 000 м³) оценивается в 120–150 млн р. за счет снижения затрат на вывоз породы в отвал (традиционно 500 р./м³) и получения строительных материалов.

### Выводы

По результатам проведенного исследования для условий сооружения тоннелей Донецкого метрополитена в крепких породах Донбасса ( $\sigma_{сж}$  до 150 МПа) обоснована возможность синтеза технологий гидроабразивной резки и роевой роботизации. Отсутствие вибраций и высокая точность контура выработки ( $\pm 5 \dots 15$  мм) дают преимущество перед буровзрывным методом и механизированными щитами в плотной городской застройке. В результате можно сделать следующие выводы.

1. Разработана концептуальная схема роботизированного проходческого комплекса, включающая два режущих робота-манипулятора с гидроабразивными головками со струей воды сверхвысокого давления (до 6 000 бар),

транспортного робота-манипулятора, систему лазерного сканирования и модуль ИИ для создания цифрового двойника забоя. Предложен технологический цикл проходки (3–5 ч) с прогнозируемой скоростью проходки выработки 2,5–4,0 м/сут.

2. Предложена схема замкнутого цикла использования извлекаемой породы при проходке тоннелей: получение облицовочной

плитки, клинкерного кирпича, заполнителей для бетона. Ожидаемое снижение себестоимости строительства за счет переработки отходов составляет 30–40 %.

3. Применение отечественной компонентной базы (промышленные роботы, насосы высокого давления) позволяет снизить зависимость от импортных ТПМК, что критически важно в условиях санкционных ограничений.

### Список источников

1. Штумпф Г. Г., Брылов С. А., Каменских А. А. Тоннелестроение в сложных горно-геологических условиях: опыт и перспективы. Москва : Изд-во МГТУ, 2018. 312 с.
2. Рыбин В. В., Коськин А. Ю. Износ режущего инструмента механизированных тоннелепроходческих комплексов при проходке в крепких породах // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 4. С. 28–35.
3. Liu L., Song W., Liu Y. Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4 technologies // Computers & Industrial Engineering. 2023. Vol. 178. P. 109113. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113>.
4. Elnadi M., Omar Y. Industry 4.0: critical investigations and synthesis of key findings // Management Review Quarterly. 2024. Vol. 74, No. 2. P. 711–744. <https://doi.org/10.1007/s11301-022-00314-4>.
5. Хазин М. Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г. И. Носова. 2020. Т. 18, № 1. С. 4–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>.
6. HyperTunnel представила первый тоннель, построенный роботами // Железные дороги мира. 2022. URL: <https://zdmira.com/news/britanskaya-kompaniya-hypertunnel-predstavila-tekhnologiyu-stroitelstva-tonnelej-robotami> (дата обращения: 10.04.2026).
7. Бреннер В. А., Жабин А. Б., Щеголевский М. М. Гидроабразивная резка горных пород: монография. Москва : Горная книга, 2008. 280 с.
8. Роботизированный комплекс гидроабразивной резки композитных материалов // Национальная ассоциация участников рынка робототехники. URL: <https://robotunion.ru/projects/robotizationcases/tpost/0s8820doul-robotizirovannii-kompleks-gidroabrazivno> (дата обращения: 10.04.2026).
9. Wightman E., Jalali P. Swarm robotics in underground construction: the HyperTunnel approach // Tunnelling and Underground Space Technology. 2024. Vol. 145. Art. 105602. DOI 10.1016/j.tust.2024.105602.
10. Коваленко В. С., Зырянов И. В. Автоматизация и роботизация горного производства – современный этап перехода к высокопроизводительному и безопасному ведению открытых горных работ // Горная промышленность. 2025. № 5. С. 124–130. URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-124-130> (дата обращения: 10.04.2026).

### References

1. Shtumpf G. G., Brylov S. A., Kamenskikh A. A. Tunnelling in difficult geological conditions: experience and prospects. Moscow: MGGU Publ.; 2018. 312 p. (In Russ.).
2. Rybin V. V., Koskin A. Yu. Wear of cutting tools of mechanized tunnelling complexes in hard rocks. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2021;(4):28–35. (In Russ.).
3. Liu L., Song W., Liu Y. Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4 technologies. *Computers & Industrial Engineering*. 2023;178:109113. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113>.
4. Elnadi M., Omar Y. Industry 4.0: critical investigations and synthesis of key findings. *Management Review Quarterly* 2024;74(2):711–744. <https://doi.org/10.1007/s11301-022-00314-4>.
5. Khazin M. L. Robotic equipment for mining operations. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2020;18(1):4–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>.
6. HyperTunnel unveiled the first tunnel built by robots. *Railways of the World*. 2022. (In Russ.). URL: <https://zdmira.com/news/britanskaya-kompaniya-hypertunnel-predstavila-tekhnologiyu-stroitelstva-tonnelej-robotami>.

7. Brenner V. A., Zhabin A. B., Shchegolevskiy M. M. Abrasive waterjet cutting of rocks: monograph. Moscow: Gornaya kniga; 2008. 280 p. (In Russ.).
8. Robotic complex for abrasive waterjet cutting of composite materials. *National Association of Robotics Market Participants*. (In Russ.). URL: <https://robotunion.ru/projects/robotizationcases/tpost/0s8820dou1-robotizirovannii-kompleks-gidroabrazivno>.
9. Wightman E., Jalali P. Swarm robotics in underground construction: the HyperTunnel approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024;145:105602. DOI 10.1016/j.tust.2024.105602.
10. Kovalenko V. S., Zyryanov I. V. Automation and robotization of mining production – the current stage of transition to high-performance and safe open-pit mining. *Mining Industry*. 2025;(5):124–130. (In Russ.). URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-124-130>.

### **Информация об авторах**

*Д. В. Хохлов* – ведущий инженер Государственного бюджетного учреждения «Проектно-конструкторский технологический институт».

*В. А. Гусаков* – техник-конструктор Государственного бюджетного учреждения «Проектно-конструкторский технологический институт».

*А. Н. Бирюков* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии, организации и экономики строительства Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева.

### **Information about the authors**

*D. V. Khokhlov* – Lead Engineer, State Budgetary Institution 'Design and Technological Institute', Donetsk.

*V. A. Gusakov* – Design Engineer, State Budgetary Institution 'Design and Technological Institute', Donetsk.

*A. N. Biryukov* – Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Technology, Organization and Economics of Construction Department, Military Institute (Engineering and Technical) of the Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev.

Статья поступила в редакцию 12.03.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 12.03.2025; approved after reviewing 17.06.2025; accepted for publication 29.09.2025.