

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.002.5

DOI: 10.22227/2305-5502.2022.4.2

Технологические решения по разработке грунта при реализации технологии «сверху вниз»

Валентин Алексеевич Ермаков, Екатерина Ивановна Белова*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Освоение подземного пространства при точечной застройке в стесненных условиях мегаполисов является перспективным направлением развития строительства. Для экономии рабочего пространства может использоваться технология «сверху вниз», при этом значительная часть подземных работ относится к разработке и разрыхлению грунтов под защитой перекрытий, что актуально для мерзлых грунтов в условиях средней полосы России. Проведенный анализ нормативной документации и исследований в данной области показал отсутствие методических рекомендаций по организации разработки грунтов в стесненных условиях. Цель исследования — анализ и систематизация существующих методов разработки и разрыхления грунта, и оценка их применимости в условиях замкнутого пространства.

Материалы и методы. Рассмотрены методы разработки грунта, нашедшие широкое применение (механические, гидромеханические, взрывные), и менее распространенные методы (электроимпульсный, термический). Отмечена целесообразность мини-техники для выполнения земляных работ в условиях замкнутого пространства. Проанализировано навесное гидравлическое и электромагнитное оборудование для разрыхления грунта. При анализе методов показаны их достоинства и недостатки, возможность использования при реализации технологии «сверху вниз».

Результаты. Сформированы комбинации машин для разработки и рыхления грунта в условиях полужакрытой работы под защитой перекрытий с целью дальнейшей оценки технико-экономических показателей и их сравнительного анализа. Предлагаются комбинации землеройной техники, в основе которых легкие или мини-машины с навесными средствами для рыхления грунта и мини-техника для перемещения грунта.

Выводы. Практическая ценность исследования заключается в анализе имеющихся методов разработки и рыхления грунта и оценке их применимости для стесненных условий замкнутого пространства при строительстве подземной части здания по технологии «сверху вниз», что актуально при строительстве в средней полосе России. Сформированы комбинации машин на основе преимущественно механических методов. Предлагается рассмотреть возможность использования мини-техники и навесного оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: разработка грунта, технология «сверху вниз», механизированный способ, гидромеханический способ, разрыхление грунта, взрывной способ, мини-техника, навесное гидравлическое оборудование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ермаков В.А., Белова Е.И. Технологические решения по разработке грунта при реализации технологии «сверху вниз» // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12. Вып. 4. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.4.2

Автор, ответственный за переписку: Валентин Алексеевич Ермаков, Ermakov@mgsu.ru.

Technological solutions for excavation works in the process of implementation of the “top-down” approach

Valentin A. Ermakov, Ekaterina I. Belova*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Underground space development in the course of infill construction in confined spaces of megalopolises is a promising development trend in construction. To save the workspace, the “top-down” approach can be used. In this case, a substantial portion of the underground work consists in the soil development and loosening under the protection of beams, which is relevant for frozen soils in Central Russia. The analysis of regulatory documents and the studies, conducted in this area, has proven that there are no methodological recommendations on the arrangement of soil excavation in confined spaces. The purpose of the study is to analyze and systematize current methods of soil development and loosening and to evaluate their applicability in confined spaces.

Materials and methods. The authors consider widely used excavation techniques (mechanical, hydro-mechanical, and explosive ones) and less widely spread soil development methods (electric pulse and thermal ones). The expediency of excavation mini-technologies, designed for works in confined spaces, is emphasized. Attachable hydraulic and electromagnetic machinery, used to loosen soils, is analyzed. The analysis of these methods shows their strengths and weaknesses, as well as the applicability of the “top-down” technique.

Results. Combinations of machines designated for soil excavation and loosening within the framework of the “top-down” technique are made to further estimate the engineering and economic performance and their comparative analysis. The authors propose combinations of excavating machines that represent lightweight or mini-items having mounted soil loosening and excavation mini-machines.

Conclusions. The practical value of the study consists in the analysis of available methods of soil excavation and loosening and the assessment of their applicability to the confined conditions of construction of substructures of buildings using the top-down technology, which is relevant for Central Russia. The authors made combinations of machines whose operation is mostly based on mechanical methods. The authors suggest considering the use of mini-machines and attachments.

KEYWORDS: soil development, “top-down” technology, mechanical method, hydromechanical method, soil loosening, explosive method, mini-machinery, mounted hydraulic equipment

FOR CITATION: Ermakov V.A., Belova E.I. Technological solutions for excavation works in the process of implementation of the “top-down” approach. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2022; 12(4):2. URL: <http://nsso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2022.4.2

Corresponding author: Valentin A. Ermakov, Ermakov@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Растущие потребности мегаполисов, с одной стороны, требуют строительства новых объектов, с другой — реализация данной задачи затруднительна ввиду стесненных условий плотной городской застройки. Решением в этом случае служит применение технологии «сверху вниз», при которой в ходе строительства подземная часть возводится сверху вниз [1].

В соответствии с методом строительства подземной части начинается с возведения стены в грунте. В дальнейшем грунт выбирается на высоту первого подземного этажа, бетонируется перекрытие, которое воспринимает распорные усилия от стен [2]. Следующие этапы состоят в последовательном бетонировании перекрытий подземных этажей и выемке грунта через технологические проемы в них [3].

Работы исследователей по рассматриваемой тематике посвящены усовершенствованию возводимых конструкций [4], вопросам бетонирования перекрытий [5], оценке эффективности технологии по сравнению с традиционной [6], а также опыту проведения строительства [7, 8]. Отдельно стоит отметить публикацию [9], в которой ставится задача формирования системы организационно-технологических решений, связанных с производством земляных работ при строительстве методом «сверху вниз», а также исследование [10], посвященное оптимизации устройства подземного пространства при реконструкции существующих зданий.

Анализ нормативной документации показал, что технологии «сверху вниз» посвящен пункт 14.1.30 СП¹, в котором этот способ рекомендуется использовать для строительства многоуровневых подземных сооружений при плотной городской застройке. Дополнительные рекомендации по проектированию и организации работ отсутствуют.

Открытые интернет-источники свидетельствуют о том, что разработку грунта при реализации технологии «сверху вниз» под защитой перекрытий необходимо осуществлять малогабаритными экска-

торами и бульдозерами, а выемку — грейферами через технологические отверстия² без указания оптимального состава и количества строительных машин. Данная задача на сегодняшний день решается проектировщиками исходя из индивидуальных инженерно-геологических условий, опыта строительства и возможностей застройщика.

Таким образом, актуальной задачей является анализ и систематизация существующих методов разработки и разрыхления грунта с целью оценки их применимости при строительстве методом «сверху вниз».

Цель исследования — подготовка авторами материалов для дальнейшей оценки технико-экономических показателей машин и механизмов, их сравнительного анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

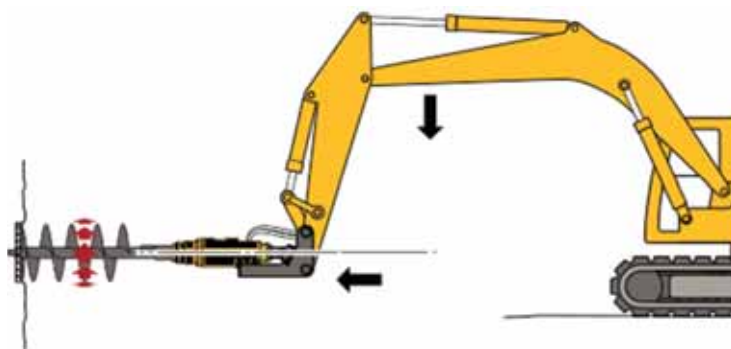
Рассмотрим имеющиеся технологии разработки и выемки грунта, их достоинства и недостатки, а также перспективы применения при реализации метода строительства «сверху вниз». Среди основных методов разработки грунта можно выделить разработку:

- резанием (механизированный способ);
- разрывом струей воды (гидромеханический способ);
- взрывным способом.

При разработке открытых котлованов может быть использован широкий спектр землеройных, землеройно-транспортных и землеройно-планировочных машин. Комплексный подход к составу машин позволяет эффективно отделять грунт от массива, перемещать, осуществлять выемку и, если необходимо, укладку насыпи. Тщательный подбор машин, соответствующих друг другу по технико-экономическим и технологическим параметрам, дает возможность оптимально спланировать работу и избежать необоснованного простоя техники [9–12].

² TOP-DOWN. Полузакрытый метод подземного строительства «Сверху-Вниз». URL: <https://merakom.ru/technology/top-down/>

¹ СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты.



a



b



c

Использование навесного гидравлического оборудования: *a* — для горизонтального шнекового бурения³; *b* — экскаватор с гидромолотом⁴; *c* — мини-погрузчик с баровой установкой⁵

Достоинство механизированного способа заключается в его универсальности, так как он пригоден для любых условий и размеров сооружений, однако применительно к технологии «сверху вниз», когда работа ведется в замкнутом пространстве, круг применяемых машин сужается. Например, экскаваторы с объемом ковша 1,6 м³ имеют массу от 25 до 38 т в зависимости от производителя, что создает дополнительные трудности по доставке техники и организации работ. Исходя из этого, целесообразным может быть использование легких экскаваторов весом около 13 т и мини-экскаваторов, мини-тракторов, мини-грейдеров и мини-погрузчиков весом до 5 т. Вместе с тем вследствие маленьких размеров и массы мини-экскаваторов они имеют малую глубину копания и небольшое усилие на кромке ковша [13], что значительно снижает производительность, а в ряде случаев, особенно при разработке мерзлых грунтов средней полосы России, может потребовать дополнительного разрыхления грунта. Дополнительно стоит отметить начало проведения работ по нормированию трудозатрат при использовании мини-экскаваторов [14], что позволит в будущем осуществлять

технично-экономическую оценку при разработке проекта производства работ.

Для первоначальной выемки грунта через технологическое отверстие в перекрытии нулевого уровня обычно применяется грейфер. После создания углубления в него опускается строительная техника, которой предстоит разрабатывать грунт вокруг себя и насыпать в одном месте для извлечения. При увеличении свободной площади состав техники возможно дополнить экскаваторами и разрыхлителями грунта для повышения производительности разработки.

В условиях замкнутого пространства уплотненный и утрамбованный грунт практически не осыпается, таким образом, становится актуальной задача его разрыхления. Среди машин для бурения и разработки грунта в горизонтальной плоскости можно выделить проходческие комбайны Roadheader, стационарные установки направленного шнекового бурения, навесное гидравлическое оборудование для шнекового бурения, баровые установки и гидромолоты.

Область применения проходческих комбайнов (даже их мини-версий) — разработка скальных грунтов [15], а стационарные установки не обладают требуемой мобильностью и применяются для проколов

³ Гидробур DIGGA для горизонтального бурения. URL: <https://remtechstroy.ru/news/gidrovrashchateli-digga/gidroburdigga-dlya-gorizontalnogo-bureniya/>

⁴ Услуги экскаватора с гидромолотом. URL: <https://www.tk38.ru/gidromolot/>

⁵ Что такое баровая машина. URL: <https://furra.ru/oborudovanie/gruntorez-mtz.html>

большой длины. Перспективно для разрыхления грунта в стесненных условиях использование навесного гидравлического оборудования для шнекового бурения (рис., *a*), гидромолотов (рис., *b*) и баровых установок (рис., *c*).

Гидромеханическую разработку грунта применяют при возведении гидротехнических сооружений, устройстве больших водоемов, дорожных насыпей и выемок. Данный способ подразумевает прокладку трубопроводов, устройство эстакад и других сооружений. При этом он позволяет снизить стоимость и трудоемкость работ по сравнению с использованием землеройных и землеройно-транспортных машин. Разработка грунта включает следующие операции: размыв грунта под давлением и перевод его в полужидкую массу, называемую пульпой; перемещение и укладку (намыв) пульпы в сооружение или отвал. После доставки пульпы к месту образования насыпи вода из нее отфильтровывается, а грунт осаждается.

Размыв грунта и транспортирование пульпы в стесненных условиях строительства по технологии «сверху вниз» не представляется целесообразным для широкого применения ввиду сложности организации, энергоемкости и большого потребления воды [16], однако в уникальных случаях метод может быть использован как вспомогательный.

Другим вспомогательным методом можно считать взрывной способ, при котором грунт отделяется от массива за счет энергии взрыва зарядов, предварительно помещенных в скважинах, шпурах и щелях. Этот метод применяется в редких случаях, когда традиционные механические и гидромеханические методы не позволяют достичь результата, например для разрыхления скальных и мерзлых грунтов. Метод также сложен в организации, требует значительных свободных пространств, повышенной техники безопасности, привлечения дополнительных квалифицированных специалистов и точного расчета мощности зарядов [17, 18].

Для разрушения горных пород, кроме описанных выше способов, могут использоваться менее распространенные, но перспективные электромагнитные, электроимпульсные, термические [19] и ультразвуковые методы.

Опытный образец электромагнитного молота, разработанный авторами работы [20], прост в устройстве и эксплуатации, не требует дополнительного оборудования и имеет регулируемую величину энергии удара.

При электроимпульсном методе происходит электровзрыв в горной породе за счет воздействия импульсного тока высокого напряжения. Рабочий орган, в отличие от механических методов, не изнашивается в процессе эксплуатации. Эффективность метода подтверждается исследованиями [21–23].

При выборе метода разработки и разрыхления грунта следует оценивать физические свойства грунтов, размеры и формы выработок, внешние условия

проведения строительства (энергия, водоснабжение, водоотведение), технико-экономические показатели, сроки производства работ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На сегодняшний день существует широкий спектр методов и средств для разработки грунтов (механические, гидромеханические, взрывные и т.д.), их разрушения и разрыхления (механические, ультразвуковые, электроимпульсные и т.д.).

Каждый метод имеет свою область применения, обладает достоинствами и недостатками. Выбор конкретного метода для производства работ не регламентируется нормативными документами и устанавливается проектировщиками на основе результатов инженерно-геологических изысканий, опыта строительства и технико-экономических показателей.

Опыт выполнения земляных работ в средней полосе России зачастую показывает необходимость разрыхления мерзлых грунтов с помощью дополнительной техники с использованием навесного оборудования.

Применительно к условиям проведения строительства подземной части при реализации технологии «сверху вниз» в средней полосе России с учетом свойств грунтов для дальнейшего рассмотрения целесообразно сформировать комбинации на основе механических средств разработки и разрыхления, например:

1. Легкий экскаватор без дополнительных средств разрыхления и легкий бульдозер для перемещения грунта к зоне выемки грейфером.
2. Несколько мини-экскаваторов с дополнительными машинами с навесным гидравлическим и электромеханическим оборудованием для разрыхления грунта, легкий или мини-бульдозер.
3. Несколько машин для разрыхления с навесным оборудованием для горизонтального шнекового бурения и легкий бульдозер для перемещения грунта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проанализированы методы разработки и разрыхления грунтов, проведена оценка их применимости при строительстве подземной части по технологии «сверху вниз». Сделаны выводы о недостаточности методических материалов и нормативной базы по выбору состава средств для эффективного производства работ.

На основе результатов исследования сформированы комбинации машин, для которых будет проведена технико-экономическая оценка эффективности и их сравнительный анализ. Данное исследование может быть полезно для проектных институтов, занимающихся разработкой технологических решений по разработке и рыхлению грунтов. В дальнейшем рассмотренные комбинации могут быть дополнены методами локального размыва грунта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лебедев И.О., Нагманова А.Н. Технология «Тор-Down» эффективный способ развития современных городов // Молодые ученые — развитию Национальной технологической инициативы (поиск). 2021. № 1. С. 209–210.
2. Лебедев И.О., Кириллов А.И., Чузунов А.С. Технология «Тор Down» — современное технологическое решение в строительстве // Вестник Студенческого научного общества. 2018. Т. 9. № 2. С. 142–144.
3. Ткаченко А.И. Технология строительства методом «Тор&Down» // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 821–823.
4. Шаленный В.Т. Развитие технологии подземного многоэтажного каркасного строительства по методу «сверху-вниз» со сталебетонными сваями колоннами усовершенствованной конструкции // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 12 (64). С. 57–62.
5. Шаленный В.Т. Принципиальная организационно-технологическая схема бетонирования железобетонных перекрытий многоэтажной подземной части зданий методом «сверху-вниз» // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 13 (65). С. 99–106.
6. Олейник П.П., Мааруф А.Г. Эффективность способа «сверху вниз» при возведении монолитных зданий // Строительное производство. 2020. № 3. С. 53–60. DOI: 10.54950/26585340_2020_3_53
7. Бучацкий Г.В., Зайцев А.Н., Черняков Е.В., Бартошевич И.К., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Опыт строительства подземных частей зданий по схеме «сверху вниз» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2001. № 4. С. 25–28.
8. Зувев С.С., Маковецкий О.А. Опыт использования метода «Up – Down» при строительстве подземной и надземной части здания // Жилищное строительство. 2019. № 9. С. 24–30. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-9-24-30
9. Бидов Т.Х., Коновалов В.С., Байсякина К.С. Оптимизация процессов, связанных с производством земляных работ, при строительстве здания методом «Up-Down» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 246–254.
10. Зигангирова Л.И., Галиев И.Х., Ибрагимов Р.А., Шакирзянов Ф.Р. Оптимизация технологических решений при устройстве подземного пространства существующих зданий // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 11. С. 1528–1536. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1528-1536
11. Фирцева А.А., Лисовская К.Ю., Янковский Ф.И. Формирование экскаваторного комплекта машин на основе теории массового обслуживания // Новые идеи нового века : мат. Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. 2014. Т. 3. С. 398–404.
12. Parente M., Cortez P., Correia A.G. An evolutionary multi-objective optimization system for earthworks // Expert Systems with Applications. 2015. Vol. 42. Issue 19. Pp. 6674–6685. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.04.051
13. Ананин В.Г., Эмилов А.Б. О рентабельности применения, достоинстве и недостатках мини-экскаваторов в промышленности и народном хозяйстве // Символ науки: международный научный журнал. 2016. № 6–1 (18). С. 36–41.
14. Ахмадулина Н.Р., Галиев И.Х., Ибрагимов Р.А. Нормирование работ мини-экскаваторов // Эксперт: теория и практика. 2022. № 4 (19). С. 19–25. DOI: 10.51608/26867818_2022_4_19
15. Deshmukh S., Raina A.K., Murthy V.M.S.R., Trivedi R., Vajre R. Roadheader — A comprehensive review. Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 95. P. 103148. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103148
16. Шипилова Н.А., Погодина П.В., Ищук Ю.П. Особенности разработки котлована гидромеханизированным способом // Электронный сетевой полиграфический журнал «Научные труды КубГТУ». 2020. № 8. С. 1053–1060.
17. Гришин А.Н. Способ повышения качества взрывных работ при проходке тоннелей // Транспортное строительство. 2016. № 11. С. 27–30.
18. Liu D., Lu W., Yang J., Gao J., Yan P., Hu S., Yao C. Relationship between cracked-zone radius and dominant frequency of vibration in tunnel blasting // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2022. Vol. 160. P. 105249. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105249
19. Ананьев В.П., Алексеев В.Н. Термическое разрушение горных пород // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2012. Т. 5. № 5 (5). С. 28–31.
20. Едыгенов Е.К. Перспективы развития механических методов безвзрывного разрушения горных пород // Комплексное использование минерального сырья. 2018. № 4 (307). С. 6–10. DOI: 10.31643/2018/6445.24
21. Потокин А.С., Климов А.А. Сравнительный анализ эффективности электроимпульсного разрушения различных типов горных пород Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11. № 7 (19). С. 92–97. DOI: 10.37614/2307-5252.2020.7.19.012
22. Адам А.М. Ректор ТПИ А.А. Воробьев — изобретатель электроимпульсного способа разрушения горных пород // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. № 2. С. 191–196.
23. Юшков А.Ю. Электроимпульсное разрушение горных пород // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 4–2 (48). С. 67–71.

Поступила в редакцию 14 декабря 2022 г.

Принята в доработанном виде 22 декабря 2022 г.

Одобрена для публикации 22 декабря 2022 г.

О Б АВТОРАХ: Валентин Алексеевич Ермаков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры испытания сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 671368, Scopus: 57202806137, ResearcherID: AFZ-4645-2022, ORCID: 0000-0002-8862-8139; Ermakov@mgsu.ru;

Екатерина Ивановна Белова — магистрант кафедры испытания сооружений; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Ekaterina.belov2015@yandex.ru.

Вклад авторов:

Ермаков В.А. — научное руководство, концепция исследования, редактирование исходного текста, анализ полученных результатов, составление итоговых выводов, анализ полученных результатов.

Белова Е.И. — подбор материала, составление исходного текста, анализ полученных материалов, составление результатов и выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The evolving needs of megacities, on the one hand, require the construction of new facilities, but, on the other hand, the implementation of this task is complicated because of the confined conditions of dense urban development. The solution in this case is the use of the “top-down” technology, that encompasses the construction of the substructure from top to bottom [1].

Within the framework of this method construction of the substructure begins with the erection of a diaphragm wall. Subsequently, soil is excavated to the level of the first underground floor, the slab is concreted, which takes the expansion forces from the walls [2]. The following stages consist of consecutive concreting of the underground floor slabs and excavation of soil through the openings that they have [3].

Researchers focus on improving the constructions [4], solve problems of the floor slab concreting [5], evaluate the technology efficiency in comparison with the traditional one [6], and analyze the construction experience [7, 8]. Apart from that, the authors of [9] set the task of developing a system of procedures and engineering solutions associated with excavation in the course of construction work performance using the “top-down” method. In [10], the authors concentrate on the optimization of underground space during the reconstruction of existing buildings.

The analysis of regulatory documents showed that the “top-down” technology is regulated by paragraph 14.1.30 of SP (Construction Regulations)¹ which recommends this method for the construction of multi-level underground structures in dense urban developments. There are no additional recommendations on the design and arrangement of work.

According to open-access Internet sources, excavation of soil in the course of implementation of the top-down technology under the protection of the slabs should be carried out using small excavators and bulldozers, and excavated soil should be removed by grabs through access holes² without specifying the optimal composition and number of construction machines. To date, this problem is solved by designers on the basis of individual engineering and geological conditions, construction experience and the capabilities of the builder.

Hence, the relevant task is to analyze and systematize existing methods of soil excavation and loosening to assess their applicability within the framework of the “top-down” construction method.

The aim of the research is to prepare materials for the further evaluation of engineering and economic performance of machines and mechanisms and their comparative analysis.

MATERIALS AND METHODS

Let's consider the currently available technologies of excavation and soil removal, their strengths and weaknesses, as well as their potential application within the framework of the “top-down” method. The principal methods of excavation include:

- cutting (a mechanized method);
- erosion using a jet of water (a hydromechanical method);
- an explosive method.

A wide range of earthmoving, earthmoving-transporting and earthmoving-surfacing machines can be used in the process of excavating open pits. An integrated approach to the composition of machines allows to effectively separate soil from the mass, remove,

¹ SP 45.13330.2017. Earth structures, foundations and foundations.

² TOP DOWN. Semi-closed top-down method of underground construction. URL: <https://merakom.ru/technology/top-down/>

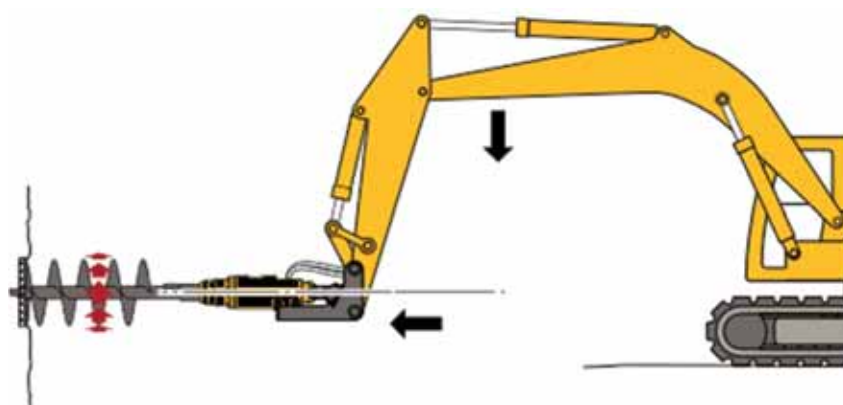
excavate soil and, if necessary, make an embankment. Careful selection of compatible machines corresponding to each other in terms of engineering, economic, and technological parameters makes it possible to optimally plan the work and avoid unreasonable downtime of machinery [9–12].

The advantage of the mechanized method is its versatility, as it is suitable for all conditions and sizes of structures. As for the “top-down” technology, when the work is performed in a confined space, the range of applicable machines is narrowed. For example, excavators with a bucket volume of 1.6 m³ weighs from 25 to 38 tons, depending on the manufacturer, which is an additional challenge in terms of the equipment delivery and work arrangement. Hence, it may be appropriate to use lightweight excavators weighing about 13 tons, mini excavators, mini tractors, mini graders and mini loaders weighing up to 5 tons. However, due to the small size and weight of mini excavators, they have a small digging depth and small pressure on the bucket edge [13], which significantly reduces productivity.

In some cases, especially when frozen soils of Central Russia are excavated, additional soil loosening may be required. Besides, the authors have launched the rationing of labour costs for the case of use of mini-excavators [14], to make sure that the engineering and economic evaluation can be made in the future when the project schedule is developed.

For the initial excavation of soil through access holes made in the zero level slab, a grapple is usually used. After the hole is made, construction equipment is installed in it. It will be used to excavate soil around it and concentrate it in one place for extraction. If the area of the available space increases, more excavators and rippers can be used.

Compacted and tamped soil does not crumble in a confined space, so the task of loosening it becomes urgent. Roadheaders, stationary auger drilling rigs, hydraulic auger drilling attachments, bar rigs and hydraulic breakers are among the machines for drilling and excavation of soil in the horizontal plane.



a



b



c

Use of hydraulic attachments: *a* — for horizontal auger drilling³; *b* — excavator with a hydraulic hammer⁴; *c* — mini loader with a bar unit⁵

³ DIGGA hydraulic drill for horizontal drilling. URL: <https://remtechstroy.ru/news/gidrovrashchateli-digga/gidrobur-digga-dlya-gorizontalnogo-bureniya/>

⁴ Excavator services with a hydraulic hammer. URL: <https://www.tk38.ru/gidromolot/>

⁵ What is a bar machine. URL: <https://furra.ru/oborudovanie/gruntorez-mtz.html>

Roadheaders (even their mini versions) develop rocky soils [15], and stationary units do not have the required mobility and are used for long penetrations. Attachable hydraulic equipment for auger drilling (figure, *a*), hydraulic hammers (figure, *b*) and bar units (figure, *c*) can be effectively used to loosen soils in confined environments.

Hydro-mechanical methods are used to make hydraulic structures, large reservoirs, road embankments and excavations. This method implies the laying of pipelines, construction of overpasses and other structures. Moreover, it allows to reduce the cost and labour intensity of works as compared to the use of earth-moving and excavation-transporting machines. Soil excavation includes the following operations: soil washout and transformation into a semi-liquid mass called pulp; the movement and laying (reclamation) of pulp in a structure or a dumping site. Once the slurry is delivered to the embankment site, water is filtered from the slurry, and soil is deposited.

No large-scale application of the “top-down” technology is reasonable for the soil washout and slurry transportation in confined construction conditions due to the complexity of making arrangements, energy intensity and high water consumption [16]. However, in unique cases this method can be used as an auxiliary one.

Another auxiliary technique is an explosive method, whereby some soil is separated from the massif by the energy of the explosion of charges previously placed in wells, boreholes and slots. This method is used in rare cases if conventional mechanical and hydromechanical methods are ineffective, for example, for loosening rocky and frozen soils. The method is also difficult to organize; it requires considerable free spaces, tighter safety requirements, involvement of additional qualified specialists and accurate calculation of the power of charges [17, 18].

In addition to the methods described above, less common, but promising electromagnetic, electric pulse, thermal [19] and ultrasonic methods can be used to destroy rocks.

The prototype of an electromagnetic hammer developed by the authors of [20] is simple in terms of its design and operation; it does not require additional equipment, and its impact energy is adjustable.

If the electric pulse method is used, an electric explosion occurs in the rock due to the impact of high voltage pulsed current. The work tool, unlike mechanical methods, does not wear out during operation. The effectiveness of this method is proven by several studies [21–23].

When choosing a method for soil development and loosening, one should evaluate the physical properties

of soil, the size and shape of excavations, the construction environment and conditions (energy, water supply, drainage), technical and economic performance, the timing of the work.

RESEARCH RESULTS

Today there is a wide range of methods and instruments for the development of soils (mechanical, hydro-mechanical, explosive, etc.), their destruction and loosening (mechanical, ultrasonic, electric pulse, etc.).

Each method has its own area of application, strengths and weaknesses. The choice of a particular method is not regulated by any rules, and it is selected by designers on the basis of engineering geological surveys, construction experience, technical and economic indicators.

In Central Russia, excavation works were often accompanied by the need to loosen frozen soils using additional machinery that had supplementary mounted equipment.

With regard to the conditions of underground construction performed using the “top-down” technology in Central Russia and the properties of soils, it is advisable to make combinations of mechanical construction machines for soil excavation and loosening, for example:

1. A lightweight excavator without additional loosening equipment and a lightweight bulldozer to move soil to the excavation area using a grapple.
2. Several mini-excavators with additional machines and attached hydraulic and electro-mechanical equipment used to loosen soil, a lightweight or a mini-bulldozer.
3. Several loosening machines with attachments for horizontal auger drilling and a lightweight bulldozer for earth moving.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Methods of soil excavation and loosening were analyzed; their applicability in the construction of substructures using the “top-down” technology was evaluated. Conclusions were made about the insufficiency of guidelines and the regulatory framework in respect of the choice of machines that ensure the efficient performance of work.

Based on the results of the study, the authors made a combination of machines make a technical and economic evaluation of their performance and comparative. This study may be useful for design institutions involved in devising engineering solutions for the development and loosening of soils. In the future, these combinations can be supplemented by local soil washout methods.

REFERENCES

1. Lebedev I.O., Nagmanova A.N. “Top-Down” technology is an effective way to develop modern cities. *Young scientists — development of the National Technological Initiative (search)*. 2021; 1:209-210. (rus.).
2. Lebedev I.O., Kirillov A.I., Chugunov A.S. “Top Down” technology is a modern technological solution in construction. *Bulletin of the Student Scientific Society*. 2018; 9(2):142-144. (rus.).
3. Tkachenko A.I. Construction technology by the “Top&Down” method. *Investments, construction, real estate as a material basis for modernization and innovative development of the economy : materials of the VIII International Scientific and Practical Conference*. 2018; 821-823. (rus.).
4. Shalenny V.T. Development of technology of underground multi-storey frame construction by top-down method with steel and concrete piles-columns improved design. *Construction and Technogenic Safety*. 2018; 12(64):57-62. (rus.).
5. Shalenny V.T. The concept of organizational and technological scheme of concreting ferro-concrete overlappings multi-storey underground parts of buildings by “Top-Down”. *Construction and Technogenic Safety*. 2018; 13(65):99-106. (rus.).
6. Olejnik P.P., Maaruf A.H. The effectiveness of the “Top-Down” method in the construction of monolithic buildings. *Construction Production*. 2020; 3:53-60. DOI: 10.54950/26585340_2020_3_53 (rus.).
7. Buchatskii G.V., Zaitsev A.N., Chernyakov E.V., Bartoshevich I.K., Konovalov P.A., Nikiforova N.S. Experience with construction of underground sections of buildings by the “from top down” scheme. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2001; 4:25-28. (rus.).
8. Zuev S.S., Makovetsky O.A. Experience in using the “Up – Down” method when constructing the underground and aboveground parts of the building. *Housing Construction*. 2019; 9:24-30. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-9-24-30 (rus.).
9. Bidov T.K., Konovalov V.S., Baysyakina K.S. Optimization of processes associated with the production of earthworks during the construction of a building using the “Up-Down” method. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2020; 5:246-254. (rus.).
10. Zigangirova L.I., Galiev I.Kh., Ibragimov R.A., Shakirzyanov F.R. Optimization of engineering solutions used to develop the underground spaces of existing buildings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(11):1528-1536. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1528-1536 (rus.).
11. Firtseva A.A., Lisovskaya K.Y., Yankovskiy F.I. The formation of excavator car set based on the mass service theory. *New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD TOGU*. 2014; 3:398-404. (rus.).
12. Parente M., Cortez P., Correia A.G. An evolutionary multi-objective optimization system for earthworks. *Expert Systems with Applications*. 2015; 42(19):6674-6685. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.04.051
13. Ananin V.G., Emilov A.B. About profitability of application, advantages and disadvantages of mini excavators in industry and national economy. *Symbol of Science: International Scientific Journal*. 2016; 6-1(18):36-41. (rus.).
14. Akhmadulina N.R., Galiev I.K., Ibragimov R.A. Rationing of mini-excavators’ work. *Expert: Theory and Practice*. 2022; 4(19):19-25. DOI: 10.51608/26867818_2022_4_19 (rus.).
15. Deshmukh S., Raina A.K., Murthy V.M.S.R., Trivedi R., Vajre R. Roadheader — A comprehensive review. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020; 95:103148. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103148
16. Shipilova N.A., Pogodina P.V., Ishchuk Yu.P. Features of the development of the pit hydromechanized way. *Electronic network polythematic journal “Scientific works of KubSTU”*. 2020; 8:1053-1060. (rus.).
17. Grishin A.N. Method for increase in quality of blasting operations during tunneling. *Transport Construction*. 2016; 11:27-30. (rus.).
18. Liu D., Lu W., Yang J., Gao J., Yan P., Hu S., Yao C. Relationship between cracked-zone radius and dominant frequency of vibration in tunnel blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022; 160:105249. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105249
19. Anan’ev V.P., Alekseev V.N. Thermal destruction of rocks. *Introduction of Modern Structures and Advanced Technologies in the Track Economy*. 2012; 5(5):28-31. (rus.).
20. Edygenov E.K. Future development of mechanical rocks destruction methods without blasting. *Complex Use of Mineral Materials*. 2018; 4(307):6-10. DOI: 10.31643/2018/6445.24 (rus.).
21. Potokin A.S., Klimov A.A. Efficiency comparative analysis of electric pulse destruction of different types rocks of the Murmansk region. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020; 11(7):92-97. DOI: 10.37614/2307-5252.2020.7.19.012 (rus.).
22. Adam A.M. Rector of TPI A.A. Vorobyov — inventor of the electric pulse method of rock destruction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013; 322(2):191-196. (rus.).
23. Yushkov A.Y. Electropulse destruction of rocks. *Modern Scientific Researches and Innovations*. 2015; 4-2(48):67-71. (rus.).

Received December 14, 2022.

Adopted in revised form on December 22, 2022.

Approved for publication on December 22, 2022.

B I O N O T E S : **Valentin A. Ermakov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Structures Testing; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 671368, Scopus: 57202806137, ResearcherID: AFZ-4645-2022, ORCID: 0000-0002-8862-8139; Ermakov@mgsu.ru;

Ekaterina I. Belova — undergraduate of the Department of Structures Testing; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Ekaterina.belov2015@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Valentin A. Ermakov — scientific guidance, research concept, editing of the source text, analysis of the results obtained, drawing up final conclusions, analysis of the results obtained.

Ekaterina I. Belova — selection of material, compilation of the source text, analysis of the received materials, compilation of results and conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interests.