

Исследование оседания земной поверхности при строительстве подземного перехода с применением защитного экрана из труб

М. А. Роенко✉

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,

г. Москва, Российская Федерация

✉ maxsupra2017@yandex.ru

Резюме. Рассмотрено оседание земной поверхности, возникающее при строительстве подземного пешеходного перехода с использованием защитного экрана из труб под железнодорожной линией Московского центрального диаметра № 1, в районе Дмитровского шоссе, 29. На основе данных мониторинга выполнен анализ оседания грунта и влияющих на него факторов на различных стадиях строительства. Установлено, что оседание обусловлено недостаточным уплотнением и сохранением структурных свойств грунта, нарушением этапности строительных работ, а также отсутствием заполнения пустот между трубами и грунтом. Подчеркивается значимость комплексного мониторинга и превентивных мер, включая укрепление грунтов и использование стабилизирующих материалов. Полученные результаты позволяют определить основные направления для минимизации осадки и обеспечения безопасности сооружений при строительстве в сложных инженерно-геологических условиях. Рекомендации статьи могут быть применимы при проектировании аналогичных объектов.

Ключевые слова: строительство тоннелей, оседание земной поверхности, защитный экран из труб, продавливание труб, полевые измерения

Благодарность: Автор выражает благодарность научному руководителю кандидату технических наук, доценту кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института НИТУ «МИСИС» Г. О. Абрамьяну за ценные рекомендации и указания при подготовке статьи.

Для цитирования: Роенко М.А. Исследование оседания земной поверхности при строительстве подземного перехода с применением защитного экрана из труб. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026;26(1):50-56. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-1-50-56>.

Study of ground surface settlement during the construction of an underground pedestrian crossing using a pipe-roof structure

М. А. Roenko✉

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education

“National Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russian Federation

✉ maxsupra2017@yandex.ru

Rezume. This paper investigates the ground surface settlement induced by the construction of an underground pedestrian crossing using a pipe-roof structure beneath the railway line of the Moscow Central Diameter No. 1 near 29 Dmitrovskoye Highway. An analysis of soil settlement and the influencing factors at various construction stages was performed based on monitoring data. It was determined that the settlement was caused by insufficient soil compaction and the preservation of its structural properties, deviations from the planned sequence of construction operations, and the absence of void filling between the pipes and the surrounding soil. The study highlights the importance of comprehensive monitoring and preventive measures, including soil reinforcement and the use of stabilizing materials. The obtained results help identify the primary strategies for minimizing settlement and ensuring structural safety during construction in complex engineering-geological conditions. The recommendations provided can be applied to the design of similar structures.

Keywords: Pipe-roof structure, pipe jacking, ground surface settlement, field measurements, tunnel construction

Acknowledgments: The author expresses gratitude to his scientific supervisor, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Department of Geology and Mine Surveying at the Mining Institute of NUST MISIS, G. O. Abramyan, for his valuable recommendations and guidance in the preparation of this article.

For citation: Roenko M.A. Study of ground surface settlement during the construction of an underground pedestrian crossing using a pipe-roof structure. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026;26(1):50-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-1-50-56>.

Введение

Метод возведения защитного экрана из труб (ЗЭТ) впервые был применен при строительстве метро в Антверпене, Бельгия, описан Муссо в 1979 году [1] и Хемерийксом в 1983 году [2, 3]. Этот бестраншейный метод превосходит традиционную открытую раскопку траншеи, особенно в районах с чувствительными грунтами и близлежащей инфраструктурой. ЗЭТ включает постепенное продавливание в грунт стальных труб для формирования ограждения для будущего подземного перехода. Эти трубы стыкуются между собой с помощью замков, усиливаются армированными каркасами и заполняются бетоном, создавая прочную конструкцию. После достижения необходимой прочности и жесткости бетона внутри труб конструкции начинается раскопка грунта для дальнейшего возведения подземного перехода.

Текущие исследования ЗЭТ в основном сосредоточены на двух аспектах. Во-первых, как на методе защиты грунтов от нарушений, вызванных подземным строительством, значительное внимание уделяется изучению его поддерживающей способности, что привело к разработке множеств оценочных моделей и технологических улучшений [4–6]. Во-вторых, вопросы, возникающие в процессе продавливания труб, привлекают все большее внимание ученых, включая оседание поверхности [7–10], силу продавливания [11, 12], реакцию упорной стены [13, 14]. Кроме того, недавнее внедрение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования поведения установки по продавливанию [15] дают результаты в направлении более высокого уровня контроля продавливания труб с использованием методов искусственного интеллекта.

Однако исследования причин оседания и методов контроля на протяжении всего периода реализации ЗЭТ остаются относительно ограниченными. Кроме того, замечен недостаток внимания к этой проблеме в Российской Федерации.

Цель работы. Данная работа направлена на устранение этих пробелов путем изучения строительства экрана под Мо-

сковским центральным диаметром № 1, вблизи Дмитровского шоссе, 29.

Путем комплексного анализа данных мониторинга выяснена достаточность и эффективность принятых мер по минимизации осадки и обеспечения целостности окружающих зданий и линейных объектов.

Описание проекта

Строительство подземного перехода под Дмитровским шоссе и железнодорожными путями Московской центральной диаметральной линии № 1, как показано на рисунке 1, осуществляется с целью уменьшения количества дорожно-транспортных происшествий и повышения безопасности пешеходов. Построить пешеходный переход под железной дорогой традиционными методами не получится в связи с угрозой повреждения железнодорожных путей, вызванных оседанием земной поверхности в ходе раскопки перехода, а также возможного обрушения строящегося тоннеля из-за нагрузок, создаваемых движущимся по линии железнодорожным подвижным составом.

Поэтому необходимо построить конструкцию, которая одновременно предотвратит обрушение тоннеля и значительно снизит оседание поверхности земли, что позволит поездам продолжать движение по железнодорожным путям.

В этих целях была выбрана опережающая ограждающая крепь (защитный экран из труб), показанная на рисунке 1–4, чтобы минимизировать влияние строительства на Пути 1 и 2.

Строительство ЗЭТ происходило в следующей последовательности:

1. Раскопка стартового, приемного котлованов.
2. Изготовление упорной стены и монтаж установки для продавливания труб.
3. Продавливание труб для создания системы ограждения.
4. Вставка арматурных каркасов и заполнение труб бетоном.

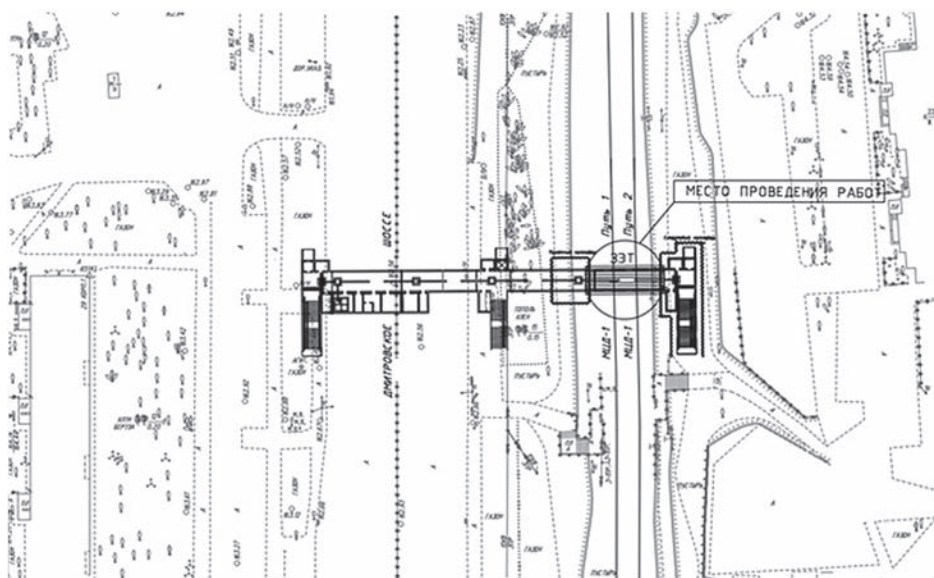


Рис. 1. Ситуационный план строительной площадки / Fig. 1. Site plan of the construction area

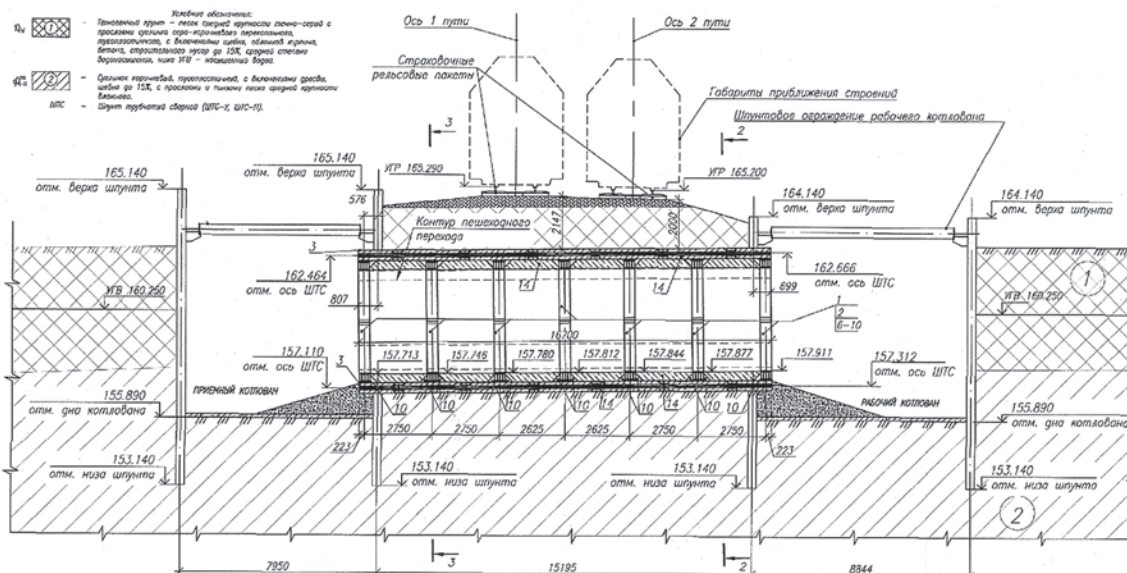


Рис. 2. Продольный разрез защитного экрана из труб / Fig. 2. Longitudinal section of the pipe-roof structure

5. Укрепление грунта с помощью грунтоцементных свай (ГЦС) (сваи имели диаметр 800 мм, содержание цемента составляло 20 %).

6. Раскопка внутренней части с установкой опорных рам.

сегментов. Общая длина продавливания каждой трубы составила 16,7 м. Для обеспечения целостности и герметичности ЗЭТ было принято использование наружных замков для труб.

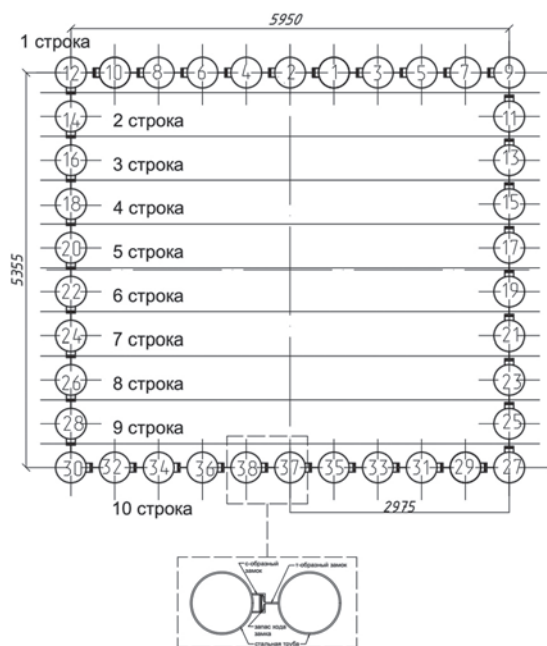


Рис. 3. Поперечный разрез защитного экрана / Fig. 3. Cross-section of the pipe-roof structure

Как показано на рисунке 3, в проекте продавливания ЗЭТ было использовано 38 труб малого диаметра (426×10 мм в соответствии с ГОСТ 10704-99¹), изготовленных из низколегированной конструкционной стали 09Г2С (произведенной в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 19281² и другими нормативными документами). Каждая труба была собрана путем сварки концов семи трубных

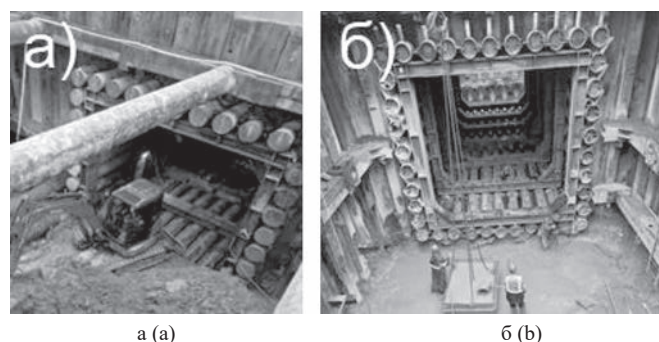


Рис. 4. Виды на защитный экран: а – со стартового котлована; б – с приемного котлована /

Fig. 4. Views of the pipe-roof: a - from the launching pit; b - from the receiving pit

Продавливание труб осуществлялось буровой установкой Perforator PBA 200 (рис. 5). При прокладке стальных трубопроводов по методу PERFORATOR сначала производится управляемое пилотное бурение, далее – продавливание стального футляра требуемого диаметра по заданной пилотом оси. При управляемом пилотном бурении задается ось прокладываемой впоследствии трубы. Оператор станка непрерывно контролирует положение пилотной головки с использованием монитора с мишенью Perforlux и может оперативно реагировать на любые отклонения от заданной траектории продавливания. На втором этапе пилотные стержни соединяются с расширяющим устройством, соединяющим пилотные стержни с укладываемыми трубами. Оператор толкает трубы в направлении, заданном пилотными стержнями, и почва, попадающая внутрь труб, размалывается буровой головкой и транспортируется через трубы с помощью шнеков до стартовой ямы. Пилотные стержни предотвращают отклонение труб от оси бурения, постепенно толкая их при увеличении длины трубы, и демонтируются из приемного котлована.

¹ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент. М., 1993. 46 с.

²ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 48 с.

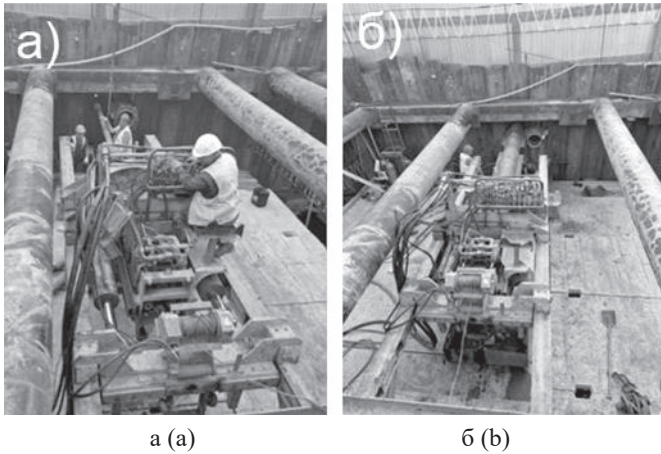


Рис. 5. Буровая установка: а – загрузка пилотного стержня; б – продавливание трубы /
Fig. 5. Drilling rig: a – loading the pilot rod; b – pipe jacking

Инженерно-геологические условия

Инженерно-геологические условия территории относятся ко II (средней) категории сложности³ и расположена в пределах моренной равнины. Абсолютные высотные отметки поверхности колеблются от 162,40 до 164,95 м. Территория техногенно изменена и освоена, пересекает железнодорожные пути Савеловского направления Московской железной дороги.

В геологическом строении участка до разведанной глубины 25,0 м (сверху вниз) принимают участие четвертичные отложения различного возраста и генезиса: современные техногенные отложения (tQIV), среднечетвертичные моренные отложения московского оледенения (gQI-IIms); нижнечетвертичные флювиогляциальные, ледниковоозерные отложения донского-московского горизонтов (flgQI-Ild). Четвертичные отложения подстилаются глинами титонского яруса верхней юры (J3tt).

Гидрогеологические условия характеризуются двумя водоносными горизонтами: надморенным и надбюрским. Первый, безнапорный, находится на глубинах от 2,1 до 4,7 м, в то время как второй, напорный, располагается на глубинах от 13,7 до 16,4 м. Исследуемая площадка оценивается в основном как подтопленная (глубина залегания уровня подземных вод менее 3 м). На участке расположения железнодорожной насыпи территория неподтопленная, так как уровень подземных вод более 3 м. В периоды гидрологических максимумов вероятно колебание уровня подземных вод. Максимальный прогнозный уровень располагается на 1,0 м выше зафиксированного при изысканиях. Площадка оценивается как неопасная в отношении возможности проявления карстово-суффозионных процессов.

Сейсмическая активность, оцениваемая по шкале MSK-64, составляет 5 баллов. Другие опасные инженерно-геологические процессы, такие как эрозия и оползни, на поверхности не наблюдаются и не могут негативно повлиять на устойчивость грунтового массива территории, на строительство и эксплуатацию объекта.

³В соответствии с СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные принципы. Дата введения 01.07.2013. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200096789> (дата обращения: 30.01.2026).

Методы исследования

Для обеспечения безопасной эксплуатации выполнялись наблюдения за деформациями земной поверхности, рельсов железнодорожных путей, близлежащих зданий, труб защитного экрана и шпунтового ограждения котлована (шпунт Ларсена). Поскольку в зоне влияния отсутствуют здания, соответствующие наблюдения не проводились. В рамках данной работы наибольший интерес представляет исследования оседания земной поверхности над возводимым защитным экраном тоннеля (ЗЭТ).

Земная поверхность над ЗЭТ представлена засыпкой техногенного грунта в нижнем слое и балластовой призмой в верхнем слое, на котором уложены железнодорожные пути, с расстоянием между верхом ЗЭТ и низом шпал, составляющим всего 2 м. Для проведения мониторинга земной поверхности были установлены земляные марки, представляющие собой глубоко забитые металлические стержни с углублением в верхней части (рис. 6б). Марки размещены по пять штук вдоль одной линии, пересекающей оба пути, с расстоянием 7 м между линиями. Такая схема максимально охватывает зону влияния деформаций на железнодорожную насыпь (рис. 6а).

Мониторинг начался за шесть месяцев до начала продавливания ЗЭТ, чтобы фиксировать возможные деформации во время вибропогружения шпунта Ларсена в землю и раскопки котлованов. Мониторинг осуществлялся три раза в день, каждые шесть часов, с изменением частоты в зависимости от интенсивности деформаций и этапов строительства. Мониторинг проводился методом геометрического нивелирования 2-го класса с помощью электронного нивелира⁴.

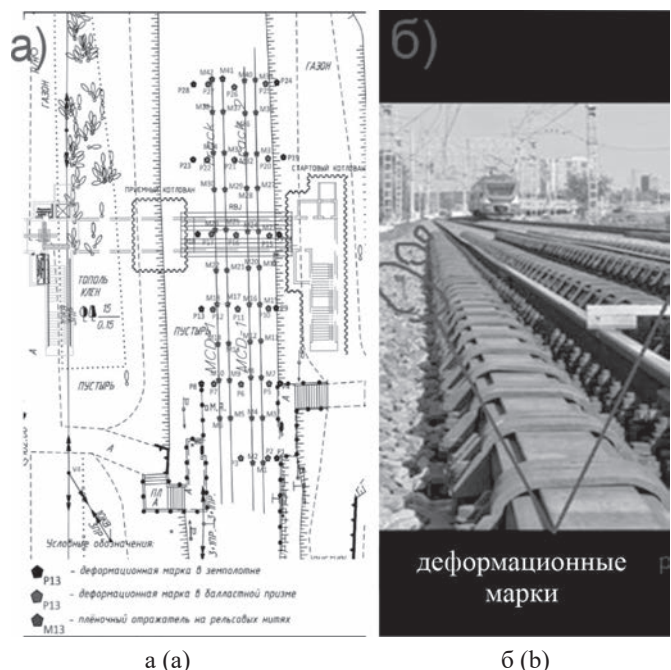


Рис. 6. Мониторинг поверхности земли:
а – схема расположения деформационных марок;
б – деформационные марки в балластной призме /
Fig. 6. Ground surface monitoring: a – layout of deformation markers;
b – deformation markers in the ballast bed

⁴Инструкция о порядке осуществления государственного геодезического надзора в Российской Федерации: ГКИНП 17-002-93; утв. Роскартографией 15.10.1993; зарег. в Минюсте России 08.12.1993 № 425 [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=24535> (дата обращения: 30.01.2026).

Результаты и их обсуждение

В результате мониторинга зафиксирована максимальная величина оседания балластной призмы в точке P15 (расположенной у стартового котлована) величиной ~85 мм. Минимальная величина оседания наблюдалась у приемного котлована, где она не превышала 40 мм (рис. 7) (см. цв. вклейку на стр. 31). Анализ поперечного профиля показал, что при удалении на 7 м от линии P15–P17 (ось тоннеля) величина оседания снижается в 2–4 раза, а при расстоянии от оси свыше 14 м «чаша оседания» практически затухает и становится незначительной.

Как видно из рисунка 8 (см. цв. вклейку на стр. 31), среднее оседание земной поверхности вдоль оси строительства ЗЭТ (по линии точек P15–P17) достигло 60 мм, причем наибольшее влияние отмечено на Путь 2 вблизи стартового котлована.

Проанализировав деформации на разных этапах работ, установили, что 65 % всех деформаций накопилось во время продавливания защитного экрана (ЗЭТ), а оставшиеся (35 %) сформировались главным образом при раскопках грунта внутри конструкции. Как только завершился этап полной выемки грунта, скорость оседания существенно снизилась (менее 1 мм/день).

При этом итоговая суммарная величина оседания в районе стартового котлована (80–85 мм) превысила предельное значение в 40 мм, рекомендованное для действующих железнодорожных линий⁵. Данное превышение представляет потенциальную угрозу для безопасной эксплуатации пути, потребовало дополнительных компенсационных мер (выправочных путевых работ).

Таким образом, результаты мониторинга подтверждают, что самые большие осадки сконцентрированы в зоне стартового котлована (около оси ЗЭТ), а при удалении на 7–14 м в стороны они существенно уменьшаются. Основной вклад в оседание внесла операция продавливания труб, тогда как завершающая раскопка внутри ЗЭТ дала меньшее, но все же значимое увеличение деформации грунта.

Причины оседания земной поверхности на каждом этапе

Основным фактором оседания земной поверхности является процесс продавливания труб, нарушающий целостность грунта при бурении шнеком. Второй причиной значительной просадки грунта могла бы служить откачка воды из грунта. Поскольку уровень грунтовых вод превышал уровень середины глубины котлованов, работы по строительству ЗЭТ потенциально могли привести к затоплению котлованов. Чтобы избежать этого, часто используется водопонижение, отрицательно сказывающееся на оседании. Однако в данном проекте системное водопонижение не применялось; поступающая вода удалялась насосом в зумпфе, расположенном на дне котлована.

Заметная разница в оседании у стартового и приемного котлованов вызвана значимым проектным наклоном тоннеля (12 мм/м) от стартового к приемному котловану, а также постоянным давлением, оказываемым проходческой машиной на стартовый котлован.

Этап 1. Продавливание труб защитного экрана первой строки. Во время продавливания первой строки труб про-

исходит нарушение структуры грунта и разгрузка напряжений, что меняет его физико-механические свойства и вызывает осадку поверхности. Факторы, усиливающие просадку, включают смещения труб из проектного положения, высокую скорость продавливания. Кроме того, последующие операции продавливания усиливают нарушение почвы, что приводит к увеличению осадки поверхности, сокращение расстояния между существующими и новыми трубами усиливает их взаимодействие, дополнительно влияя на осадку поверхности, а также негативно влияет отсутствие укрепления грунта. Начальные темпы осадки достигают ~1 мм/день с кумулятивным итогом 3–4 мм.

В ходе последующих фаз продавливания (рис. 3, строки 2–9) и завершающего слоя (строка 10) операции выполняются на уровне грунтовых вод, в результате чего водонасыщенный грунт вымывается через нижележащие трубы. Это приводит к усилению осадки (до 1 мм/день, суммарно ~16 мм). С замыканием защитного экрана и установкой порталных рам завершается продавливание финального слоя труб. На этом этапе осадка продолжается со скоростью ~1 мм/день, достигая кумулятивно 13 мм.

Этап 2. Вставка арматурных каркасов и заполнение труб бетоном. Добавленный вес арматуры и бетона увеличивает осадку в основном у первой строки труб. Темпы достигают ~1 мм/день, суммарная осадка – еще ~3 мм.

Этап 3. Устройство грунтоцементных свай (ГЦС). Производится укрепление грунта с целью снижения осадки первой строки труб и повышения общей устойчивости перед предстоящими раскопками. Хотя возведение ГЦС обычно уменьшает просадку, здесь оно лишь частично компенсирует накопленную осадку и замедляет ее рост. Отмечено локальное «восстановление» уровня земли ~25 мм (вероятно, вследствие уплотнения). После временной остановки работ кумулятивная осадка достигает 23 мм.

Этап 4. Постепенная выемка грунта внутри ЗЭТ и установка опорных рам. На этом этапе грунт внутри защитного экрана последовательно извлекается, а для компенсации нагрузок монтируются металлические рамные опоры. Удаление ранее укрепленного грунта (в том числе ГЦС) ведет к дополнительной осадке. Темпы достигают до 2 мм/день, суммарно ~25 мм.

Меры контроля оседания земной поверхности

Перед началом строительства трубного защитного экрана и работ по прокладке труб следовало выполнить укрепление грунта по сторонам и внутри зоны будущего экрана либо производить эти мероприятия параллельно с продавливанием. Однако в данном проекте укрепление проводилось после возведения защитного экрана, что было обусловлено сжатými сроками и невозможностью совместного монтажа оборудования для продавливания труб и бурения свай в одном котловане, а также неполной раскопкой приемного котлована на момент начала проходки, что не позволило провести усиление грунта со стороны приемного.

В зонах, критичных с точки зрения фильтрации (особенно в начале и конце прокладки труб), приваривались перегородивающие стальные пластины между трубами и прорезанным шпунтовым ограждением (рис. 9), то есть отсутствовала нормальная герметизация, например съемные стальные кольца с герметизирующими устройствами, что усилило вынос воды с грунтом в котлован и повышало риск оседания.

⁵Инструкция по текущему содержанию путевого полотна железных дорог. Утверждена Министерством транспорта Российской Федерации Приказом № ЦП-774. Утв. 01.06.2000. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=304921#zOhQEAVW2haoMh9q> (дата обращения: 30.01.2026).



Рис. 9. Приваренные пластины между шпунтовым ограждением котлована и трубами защитного экрана /

Fig. 9. Welded plates between the sheet pile wall of the pit and the pipes of the pipe-roof

Неиспользование бетонитового раствора в процессе и после установки труб (в том числе по экономическим причинам) лишило грунт потенциального стабилизирующего эффекта, препятствующего вымыванию частиц и формированию водопроницаемых пустот.

Смещения труб из проектного положения (включая расстыковку замков) ухудшили целостность защитного экрана и усугубили осадочные деформации (рис. 10).

После завершения продавливания были установлены порталные рамы вдоль периметра экрана в обоих котлованах, что снизило осадку вблизи котлованов. Однако их влияние на зону между котлованами остается ограниченным.

Последующие усилия по стабилизации грунта включали установку ГЦС вокруг и внутри конструкции ЗЭТ (рис. 11). Грунтоцементные сваи повышают несущую способность грунта и снижают осадку за счет перераспределения нагрузок на более широкую зону массива.

Устройство металлических балочных опор в процессе раскопки (рис. 12, 13) облегчило передачу нагрузок от труб ЗЭТ и прилегающего грунта, уменьшив осадочные явления и снизив деформации защитной конструкции.



Рис. 10. Расстыковка замков смежных труб защитного экрана /
Fig. 10. Disengagement of the locks on adjacent pipes of the pipe-roof

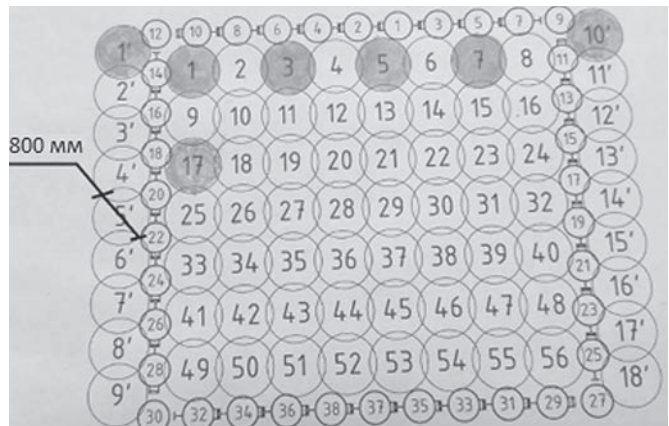


Рис. 11. Схема возведения грунтоцементных свай /
Fig. 11. Schematic diagram of soil-cement pile installation

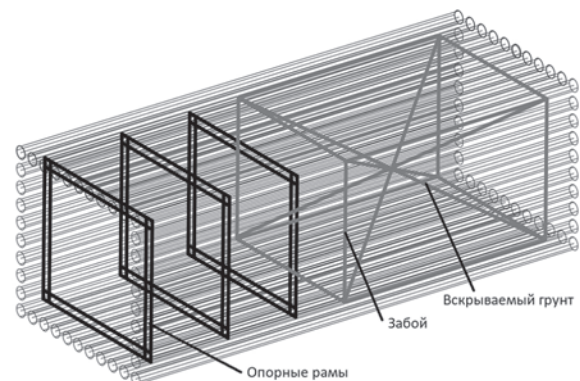


Рис. 12. Схема раскопки защитного экрана из труб /
Fig. 12. Schematic of the pipe-roof excavation



а (а)

б (b)



в (c)

Рис. 13. Выемка внутренней части защитного экрана из труб: а – разработка забоя с помощью отбойного молотка; б – рытье забоя экскаватором; в – установка опорной рамы /

Fig. 13. Excavation of the interior of the pipe-roof: а – face excavation using a pneumatic hammer; б – face excavation by excavator; в – installation of a support frame

Заключение

В статье представлены результаты мониторинга оседания земной поверхности при строительстве защитного экрана под путями МЖД-1.

Анализ данных оседания на каждом этапе и обзор примененных мер контроля позволяют сделать следующие выводы:

Недостаточные меры были приняты для предотвращения выноса воды вместе с грунтом при сооружении защитного экрана, что усиливало оседание поверхности.

Бентонитовый раствор не применялся во время продавливания труб, пустоты между трубами и грунтом не были заполнены, что привело к дополнительным просадкам.

Очередность возведения ГЦС была нарушена, что привело к значительному увеличению проседанию грунта.

Указанные факторы спровоцировали в определенных точках превышение допустимой величины оседания, способной повлиять на нормальное функционирование железнодорожной линии и требующее оперативных мер.

Для будущих проектов рекомендованы следующие меры:

- своевременное укрепление грунта (инъекция, ГЦС);
- избегание простоев, нарушение этапности строительства;
- применение стабилизирующего раствора (бентонит, полиуретановые компаунды и др.);
- герметизация стыков труб и тщательный контроль выноса грунтовых вод с породой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Musso G. Jacked pipe provides roof for underground construction in busy urban area. *Civil Engineering*. 1979; 49 (11): 79-82. URL: <https://www.worldcat.org/oclc/10480594>.
2. Hemerijckx E. Tubular thrust jacking for underground roof construction on the Antwerp Metro, Part 1. *Tunnels and Tunnelling International*. 1983; 15 (6): 13-16.
3. Hemerijckx E. Tubular thrust jacking for underground roof construction on the Antwerp Metro. Part 2. *Tunnels and Tunnelling International*. 1983; 15(6): 27-30.
4. Park J., Cho I., Lee L., et al. Tunnel reinforcement by using pressure-induced inflatable pipes methods. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2012. 1483-1491. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000725](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000725).
5. Zhang Z.Q., Li H.Y., Liu H., et al. Load transferring mechanism of pipe umbrella support in shallow-buried tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2014; 43 (7): 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.018>.
6. Heng C.Y., Sun S.S., Zhang J.T., et al. Calculation method of underground passage excavation on interactive effects among pipe-roof, steel bracing and foundation soil. *KSCE J. Civ. Eng.* 2022; 26 (1): 448-459. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0500-4>.
7. Sun J., Yu X.F., Sun M., et al. Analysis and prediction on soft ground deformation of a super-large shallow buried "pipe-roofing and box-culvert" jacking project under construction. *Rock and Soil Mechanics*. 2006; 27 (7): 1021-1027.
8. Wei G., Wu H.J., Chen C.L. Prediction of settlement induced by ground loss during pipe jacking construction. *Rock Soil Mechanics*. 2007; 28 (2): 359-363.
9. Su R.J. Settlement analysis of Steel pipe roof jacking in ultra-shallow covered soft ground. *Tunnel Construction*. 2018; 38 (7): 1236-1242.
10. Yang X., Zhang K.N., Li Y.S., et al. Theoretical and experimental analyses of jacking force during deep-buried pipe jacking. *Rock and Soil Mechanics*. 2013; 34 (3), 757-761.
11. Yang S.S., Wang M., Du J.N., et al. Research of jacking force of densely arranged pipe jacks process in pipe-roof pre-construction method. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2020; 97: 103277. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103277>.
12. Mao H.H., 2007. Reaction distribution investigation and structural analysis of composite thrust wall of rectangular pipe jacking shaft. *Rock and Soil Mechanics*. 2007; 28 (1), 1212-1216.
13. Sun Y., Su J.B., Xia X.H., et al. Numerical analysis of soil deformation behind the reaction wall of an open caisson induced by horizontal parallel pipe-jacking construction. *Can. Geotech. J.* 2015; 52 (8): 1-9. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0024>.
14. Bai X.D., Cheng W.C., Sheil B.B., et al. Pipejacking clogging detection in soft alluvial deposits using machine learning algorithms. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2021; 113: 103908. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103908>.
15. Bai X.D., Cheng W.C., Li G. A comparative study of different machine learning algorithms in predicting EPB shield behaviour: a case study at the Xi'an metro, China. *Acta Geotechnica*. 2021; 16 (12), 4061-4080. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01383-7>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Максим Артемович Роенко –

аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: maxsupra2017@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.11.2025

Поступила после рецензирования: 19.01.2026

Принята к публикации: 04.02.2026

ABOUT THE AUTHOR

Maxim A. Roenko –

PhD student, Department of Geology and Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation; e-mail: maxsupra2017@yandex.ru

Article info

Received: 02.11.2025

Revised: 19.01.2026

Accepted: 04.02.2026