



УДК 625.76

Опыт применения методов математического моделирования при обследовании существующего котлована

П. А. Кравченко¹, В. М. Полунин^{2,3}, А. Н. Макаров¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

³Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Российская Федерация, 127238, Москва, Локомотивный пр., 21

Для цитирования: Кравченко П. А., Полунин В. М., Макаров А. Н. Опыт применения методов математического моделирования при обследовании существующего котлована // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 984–998. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-984-998

Аннотация

Цель: Оценка возможности применения экспериментальных исследований и наблюдений в процессе мониторинга для оценки неопределенных параметров элементов ограждения котлована, в частности длины шпунта. **Методы:** Рассматриваемые и предложенные в настоящей работе методы основаны на определении фактической жесткости элементов ограждения котлована (стальных шпунтовых свай) в реальных условиях работы (в составе существующих конструкций). Методы, описанные в настоящей работе, являются, по сути, натурным экспериментальным исследованием, проведенным в условиях существующего объекта незавершенного строительства. **Результаты:** В настоящей статье приведены результаты подбора недостающих параметров шпунта (длины шпунта) с применением численного моделирования и натурных исследований — измерения деформаций с последующим сопоставлением значений с расчетными значениями. **Практическая значимость:** Обусловлена, в первую очередь, особенностями строительства и реконструкции зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки, когда не обойтись без освоения подземного пространства. Во-вторых, значимость определяется специфическими грунтовыми условиями Санкт-Петербурга, представленными слабыми глинистыми грунтами, перекрываемыми слоями мелких и пылеватых песков относительно небольшой мощности. В силу различных обстоятельств в работу инженеров-геотехников поступают объекты незавершенного строительства, требующие завершения из-за нестабильности технического состояния на том этапе, на котором строительство было остановлено. Необходимо завершить строительно-монтажные работы, однако уже устроенные подземные конструкции (сваи, элементы ограждения котлована, фундаменты и иные конструкции) не могут быть заменены, поскольку их демонтаж представляет опасность для зданий окружающей застройки. Возникает необходимость сохранения и использования уже возведенных конструкций и их элементов. При этом важно собрать достоверные сведения об этих конструкциях — в частности, их прочностные и деформационные параметры.

Ключевые слова: Сваи, реконструкция, шпунт, ограждение котлована, математическое моделирование, обследование котлована.

Введение

На территории современных городов в связи с различными обстоятельствами, периодически сопутствующими проблемам геополитического, экономического, техногенного или иного характера, в зоне существующей застройки возникают объекты незавершенного строительства (рис. 1).

Нередки случаи, когда в период длительного перерыва в строительстве исполнительная документация утрачивается, а сведения о примененных конструкциях и материалах невозможно восстановить из-за полного или частичного отсутствия архивных материалов.

Такие проблемы существенно усложняют возобновление строительства или реконструкцию существующих сооружений. Если учесть, что в подобных ситуациях, как правило, уже оказано ощутимое влияние на окружающую застройку, проведение работ (например, по извлечению шпунта неизвестной длины с последующим устройством нового ограждения) становится опасным и недопустимым.

Если удастся провести инклинометрические исследования [1], определить параметры шпунтового ограждения достаточно просто. Однако такие исследования возможны не всегда. Методы неразрушающего контроля и геофизические методы далеко не во всех случаях позволяют получить однозначное представление об исследуемой конструкции.

При этом длительная эксплуатация элементов ограждения котлована в непроектных условиях влечет ряд проблем, затрагивающих:

- элементы ограждения котлована [2];
- свайное основание [3];
- набережные, попадающие в зону влияния [4].

Подобные случаи неоднократно отмечались в практике.

1. Строительная площадка

В статье представлены результаты наблюдений и расчетов для объекта незавершенного строительства, расположенного в объединенной



Рис. 1. Состояние заброшенного котлована в центре Санкт-Петербурга
(фото из архива П. А. Кравченко)

охранной зоне памятников архитектуры в центре Санкт-Петербурга.

Проектируемый объект — здание спортивно-оздоровительного комплекса с бассейном. Характеристики объекта:

- высота — до 14 м;
- этажность — 3 надземных этажа;
- наличие подземной части — 1 этаж;
- назначение подвальной части — размещение технических помещений бассейна.

Конструктивная схема здания предусматривает:

- внутренний каркас;
- наружные несущие стены.

Основной несущий каркас выполнен из монолитного железобетона.

1.1. Краткое описание геологических условий площадки

Рассматриваемый участок в геоморфологическом отношении расположен в пределах Приневской низменности.

По результатам инженерно-геологических изысканий, выполненных ЗАО «ЛЕНТИСИЗ» в 2024 г., на площадке выделено 20 инженерно-геологических элементов.

Инженерно-геологические условия площадки типичны для центральной части Санкт-Петербурга. Под толщей насыпных грунтов (мощностью 1,5–3,0 м) вскрыты пески — от пылеватых до крупных, общей мощностью порядка 3–5 м. Пески характеризуются средней плотностью и находятся в водонасыщенном состоянии.

Толща песков подстилается текучими суглинками (в нижней части слоя — текуче-пластичными) общей мощностью 7–10 м, включающими прослой пылеватых песков в рыхлом состоянии мощностью 0,60–1,30 м.

Под слоем суглинков вскрыты пылеватые пластичные супеси с показателем текучести $I_L > 0,5$ мощностью до 3,9 м; ниже залегают супеси

с $I_L < 0,5$ мощностью до 5,5 м. Эти отложения подстилаются пылеватыми суглинками консистенции от полутвердой до твердой. Еще ниже вскрыты легкие пылеватые твердые глины.

На площадке проводилось статическое зондирование. По его результатам мощность «слабых грунтов» на площадке строительства составляет около 9 м (в интервале глубин от 6 до 15 м).

Максимальный уровень грунтовых вод зафиксирован на глубине 0,6 м.

Ниже приведены результаты статического зондирования (рис. 2).

1.2. Краткая оценка геотехнической ситуации

С целью оценки геотехнической ситуации рассмотрим основные факторы, которые могут привести к развитию деформаций проектируемого здания и зданий, находящихся в зоне влияния нового строительства.

Наличие в основании мощной толщи слабых глинистых отложений

В основании проектируемого здания залегают слабые глинистые отложения текучей консистенции. Глинистые грунты обладают существенной сжимаемостью и малой водопроницаемостью, большие неравномерные осадки основания за счет дополнительного нагружения могут продолжаться десятилетиями и даже столетиями. В связи с этим, как правило, в центральной части Санкт-Петербурга строительство новых зданий осуществляется на свайных фундаментах, передающих нагрузку от здания на нижние относительно малосжимаемые слои грунта.

Наличие существующих эксплуатируемых зданий в зоне влияния строительства

Строительство нового здания должно обеспечить безопасную эксплуатацию зданий, находящихся в зоне влияния нового строительства.

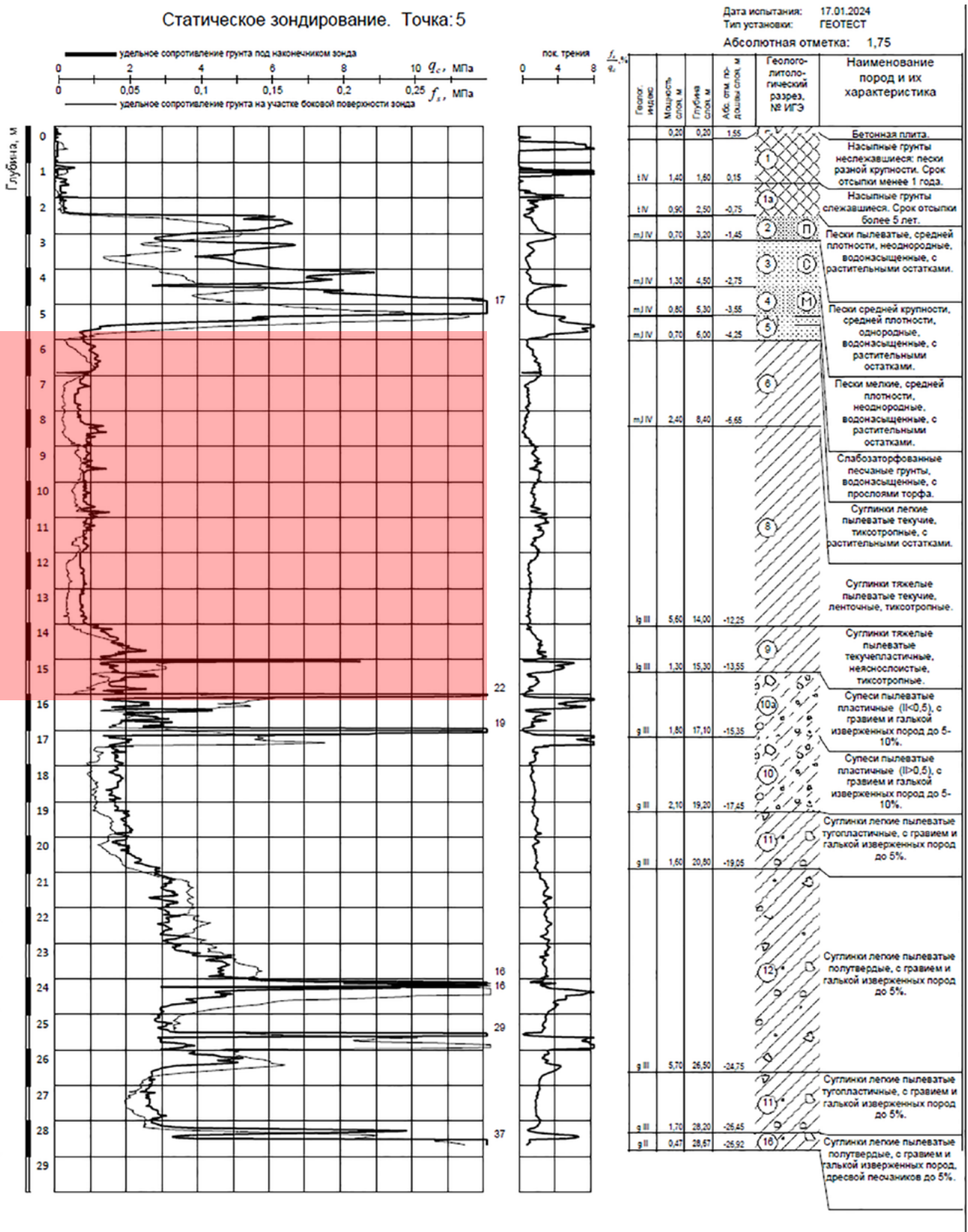


Рис. 2. Статическое зондирование грунтов площадки строительства с выделенной зоной слабых грунтов (зона обозначена красным цветом)

На развитие дополнительных деформаций примыкающей застройки влияют два фактора: нагружение основания весом проектируемого здания, что вызывает развитие воронки оседания вокруг здания, и производство работ нулевого цикла. Исключить недопустимое влияние нового строительства на окружающие сооружения от веса нового здания можно выбором глубины погружения свай и, соответственно, снижением осадки самого проектируемого здания. Опасными технологическими факторами, которые могут вызвать дополнительные осадки примыкающих зданий, являются: процесс устройства свай, устройство ограждения котлована, подвижки ограждения при вскрытии котлована и осушение котлована.

Учитывая эти обстоятельства, а также неблагоприятные в строительном отношении грунтовые условия (характеризуемые наличием мощной толщи слабых глинистых отложений), возведение здания на этой территории следует отнести к третьей, наивысшей категории сложности по ТСН 50-302—2004.

Необходимым требованием при проектировании и строительстве объектов этой категории сложности является осуществление геотехнического сопровождения. На стадии проектирования требуется расчетное геотехническое обоснование не только конструкции, но и щадящей технологии устройства фундаментов. На стадии производства работ — постоянный контроль за принятым в проекте производства работ технологическим регламентом, параметрами колебаний грунта и охраняемых конструкций, а также геодезический контроль осадок соседних зданий.

1.3. Состояние существующих конструкций на момент начала работ по обследованию

Проект реконструкции предусматривает ремонт одного из фасадов, сохранившегося на высоту трех этажей (на всю высоту проектируе-

мого здания), восстановление фасадов боковых флигелей и фасадов во внутренний двор.

Фактически к моменту начала работ по обследованию на строительной площадке сохранилась одна фасадная стена (которая впоследствии должна быть присоединена к вновь возводимому зданию), шпунтовое ограждение котлована и (как было установлено позже) свайное поле (рис. 3).

Демонтаж самого здания, устройство шпунтового ограждения, свай и откопка котлована были выполнены в 2008–2009 гг., и на этом работы были остановлены. Проектирование и строительство здания существенно осложнялись тем, что сохраненная конструкция стены была признана объектом культурного наследия уже после демонтажа здания. С одной стороны котлован примыкает к набережной канала. С этой стороны на этапе строительства была сформирована грунтовая берма. Для проезда спецтехники и временного размещения бытового городка по берме были уложены железобетонные дорожные плиты. Фактическую работу бермы, как отмечалось в исследованиях отечественных ученых [5], достаточно сложно принимать в расчет.

Визуальный осмотр котлована и обследуемых конструкций показал, что специальных консервационных мероприятий, связанных с остановкой производства работ в 2008–2009 гг., не производилось. До начала работ по обследованию (осень 2023 г.) котлован не эксплуатировался, строительные-монтажные работы не производились, что привело в результате к заполнению котлована водой (преимущественно атмосферными осадками) (рис. 4).

Для начала производства работ по обследованию свай и элементов ограждения котлована на основании имеющихся архивных данных и результатов рекогносцировки было выполнено предварительное геотехническое обоснование. Проведение работ по обследованию не пред-



Рис. 3. Сохранившаяся фасадная стена. Вид со стороны строительной площадки (фото из архива П. А. Кравченко)



Рис. 4. Состояние котлована до (слева) и после (справа) откачки воды (фото из архива П. А. Кравченко)

ставлялось возможным без осушения котлована, однако безопасность таких действий вызвала определенные сомнения.

Сечение шпунта было однозначно определено до откачки котлована на доступных для осмотра участках. Было установлено, что применялся

шпунт марки AZ 18 производства Arcelor (установлено по геометрическим размерам сечения шпунтовых свай) (рис. 5).

В результате визуального осмотра установлено, что контур шпунтового ограждения замкнут. Нарушений замковых соединений, следов потери устойчивости или локального разрушения элементов конструкции выявлено не было. По шпунту зафиксирована поверхностная коррозия в объеме, не сказывающемся на работоспособности данных элементов конструкции (рис. 6).

Была предпринята попытка определения длины шпунта свай с применением метода виброакустической диагностики — выполнено измерение параметров распространения акустической волны в теле шпунтовой сваи.

Как видно из графика, в условиях строительной площадки по результатам измерений определить длину шпунтовой сваи не удалось (попытки, предпринятые после откачки котлована, также не увенчались успехом). Это связано с тем, что звуковая волна распределяется в конструкции не только вертикально, но и горизонтально, что создает помехи при обработке результатов диагностики и не позволяет получить корректные данные о длине шпунта.

Свайное основание также было признано непригодным для использования: по результатам исследований установлено, что сваи имеют дефекты, а для учета их как армирующих элементов комбинированного основания [6] сведений недостаточно (дефекты на небольшой глубине не позволяют оценить параметры свай в полном объеме).

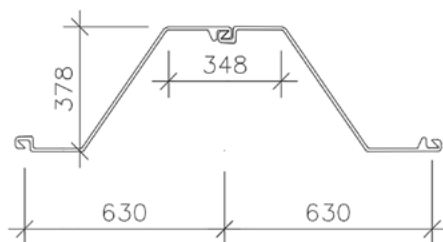


Рис. 5. Шпунт марки AZ 18 производства Arcelor

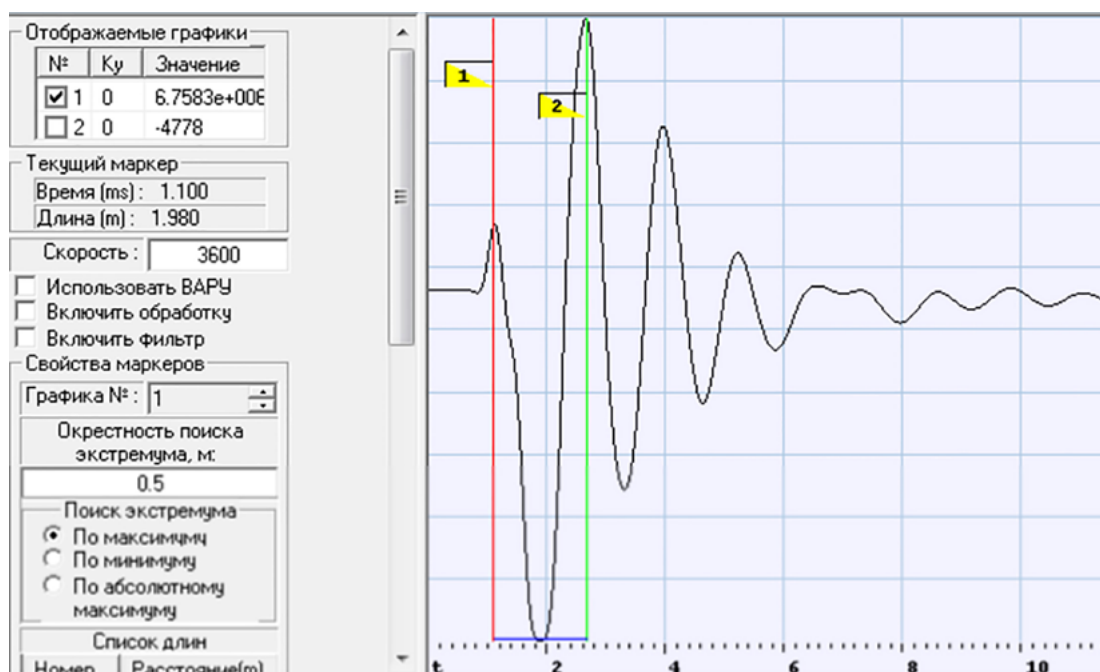


Рис. 6. График распределения ультразвука при обследовании длины шпунта

2. Применение математического моделирования для оценки безопасности работ и подбора параметров шпунта

В результате, с одной стороны, не определена длина шпунта, что, в свою очередь, препятствует дальнейшему прогнозированию. Как неоднократно отмечалось [7, 8], откопка котлованов может оказывать весьма ощутимое влияние на здания окружающей застройки, и для оценки такого влияния параметры элементов ограждения имеют большое значение.

С другой стороны, достоверно известно, что котлован уже был откачан как минимум до отметки оголовков свай и эксплуатировался в таком состоянии некоторое время. Очевидно, деформации шпунтового ограждения и окружающей застройки в результате откопки котлована уже реализовались в 2008–2009 гг., когда на объекте выполнялись буронабивные сваи. Следовательно, откачку можно считать условно безопасной до уровня оголовков свай при обеспечении определенных мероприятий.

В связи с невозможностью установить фактическую длину шпунта методами обследования на предварительно выделенной опытной площадке были выполнены экспериментальные исследования, направленные на определение необходимых параметров.

К моменту откачки котлована с внутренней стороны ограждения за счет имеющейся воды было сформировано гидростатическое давление по внутренней поверхности шпунтового ограждения, препятствующее его деформации.

До момента откачки воды (в состоянии затопленного котлована) выполнены измерения планового положения верха шпунтового ограждения по периметру котлована.

После осушения котлована (снятия гидростатического давления) проведены повторные измерения перемещений верха шпунтового ограждения.

Суть исследования заключалась в следующем: при снятии гидростатического давления происхо-

дит деформация шпунтового ограждения, работающего по консольной схеме. Величина деформации зависит от грунтовых условий, жесткости конструкции (сечение и материал шпунта), величины заделки шпунта в грунт и характера нагружения. В случае если известны все перечисленные параметры, деформация ограждения может быть вычислена.

При решении обратной задачи (при известном перемещении, сечении и материале ограждения, характере нагружения) один из неизвестных параметров прямой задачи (в рассматриваемом случае — величина заделки шпунта) может быть вычислен или подобран.

На основании архивных данных (материалы предыдущего геотехнического обоснования) в первом приближении была принята общая длина шпунта — 19,0 м (3,5 м — глубина котлована, 15,5 м — заделка шпунта в грунты основания).

Перед началом откачки воды из котлована было выполнено моделирование осушения котлована в программном комплексе Plaxis. Для сложных инженерно-геологических условий важен выбор не только программного комплекса, но и моделей грунта, применяемых при расчетах [9, 10]. В связи с этим была выбрана упрочняющаяся модель грунта (Hardening Soil Model).

Ниже (см. рис. 7) приведен вид расчетной схемы существующего котлована с фрагментами прилегающей застройки.

Принимая во внимание, что гидростатическое давление сформировалось после откопки котлована, при моделировании выделялось три этапа.

На первых двух этапах моделировалась откопка котлована и его последующее затопление водой (рис. 8, 9).

На третьем этапе деформации обнулялись (как уже реализовавшиеся на момент обследования) и моделировалась откачка воды из котлована, оценивалась деформация ограждения котлована и окружающей застройки (рис. 10).

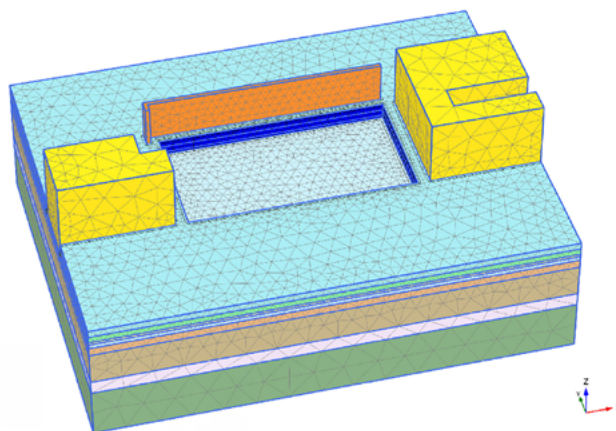


Рис. 7. Модель котлована с примыкающими зданиями и сооружениями

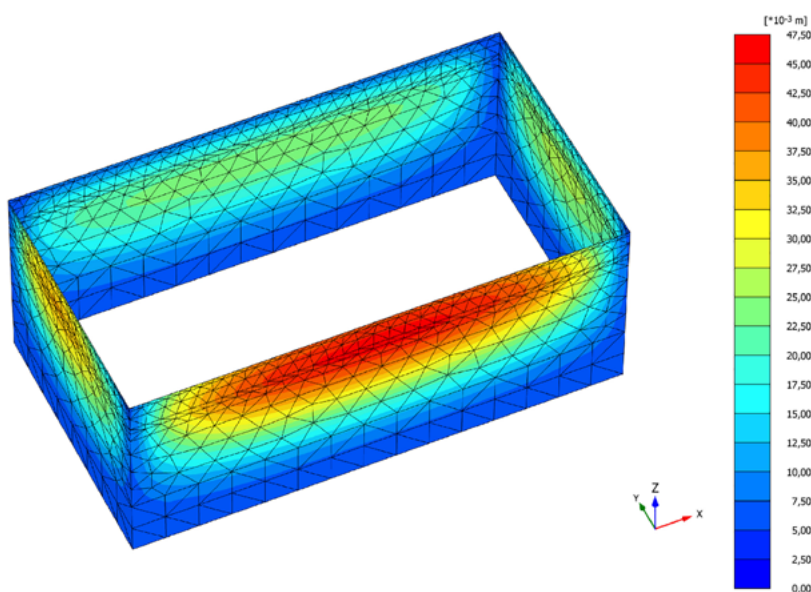


Рис. 8. Изолинии горизонтальных перемещений ограждения после экскавации котлована

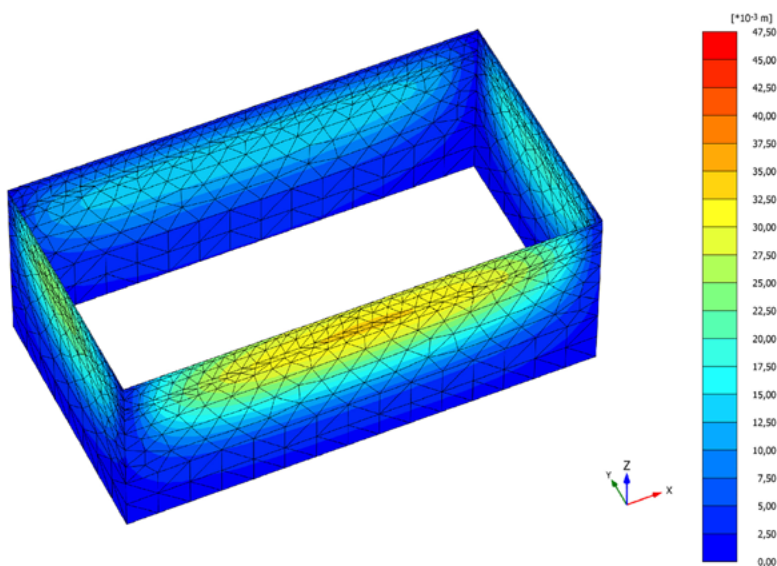


Рис. 9. Изолинии горизонтальных перемещений ограждения после затопления котлована

Результаты математического моделирования этапа осушения котлована показали, что максимальные осадки получает сохраняемая стена здания — не более 2,5 мм. При этом дополнительные осадки примыкающих зданий не превысят 1,4 мм. Анализ полученных результатов внутренних усилий, возникающих на этапе осушения котлована, показал, что откачка воды из

котлована не приводит к существенному изменению НДС окружающего грунта и ограждения котлована (рис. 11).

Были сделаны выводы том, что смещение верха шпунта, не превышающие расчетных значений, не приведут к существенным осадкам окружающей застройки. Результаты расчета показали возможность осушения и расчистки

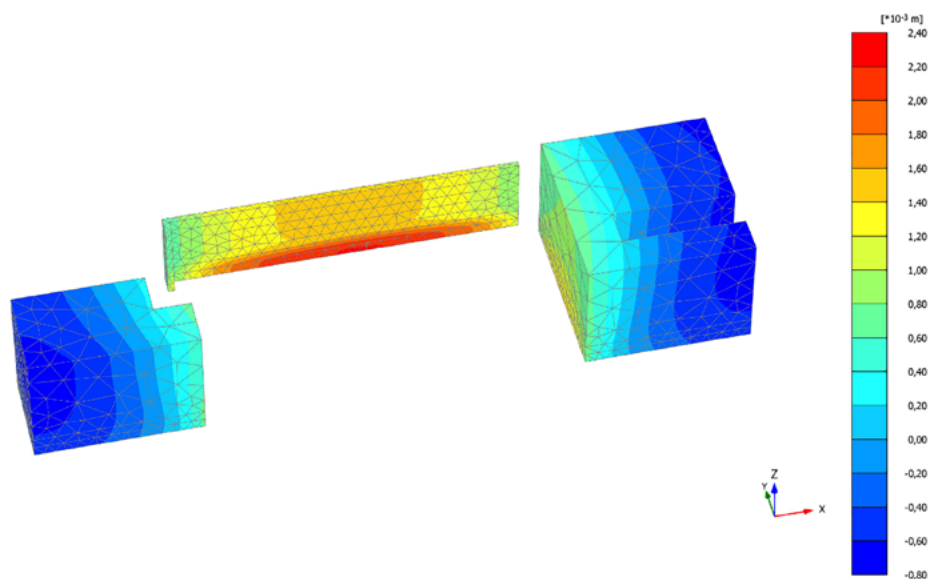


Рис. 10. Дополнительные деформации окружающей застройки после осушения котлована

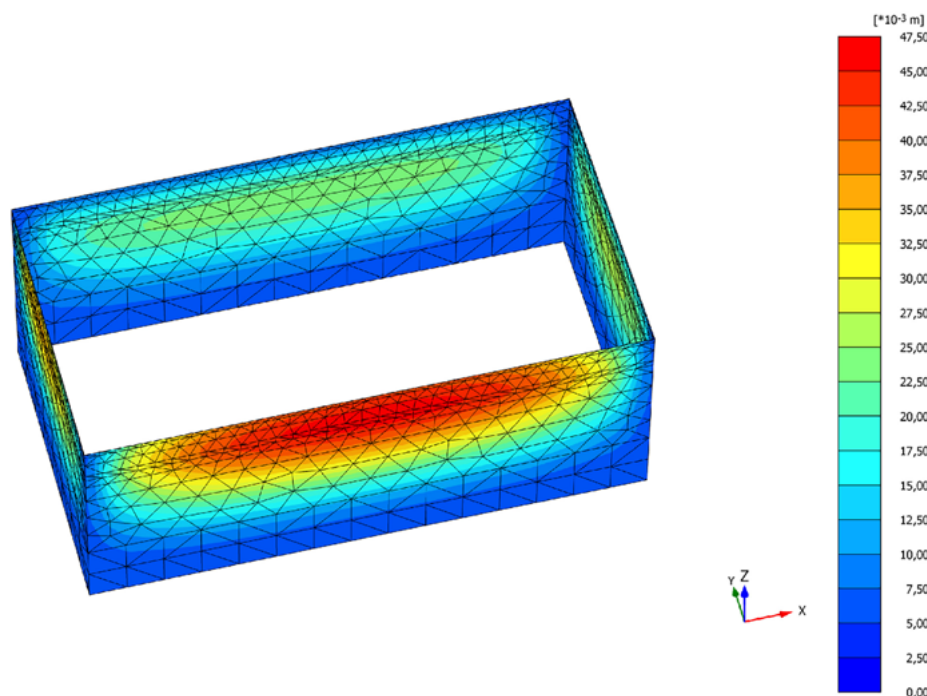


Рис. 11. Изолинии горизонтальных перемещений ограждения после осушения котлована

котлована до уровня планировки, реализованного предыдущими производителями работ (ориентировочно в 2008–2009 гг.).

Перед откачкой котлована были размещены геодезические марки для наблюдений за смещением верха шпунта. Для наблюдений за горизонтальными перемещениями применялся электронный тахеометр Leica FlexLine TS10 R1000 1". Наблюдения выполнялись в период всего процесса откачки и в течение месяца после ее завершения. Измерения деформации шпунта выполнялись силами заказчика. Результаты сопоставления расчетных и фактических деформаций приведены ниже (рис. 12).

Из результатов сопоставления видно, что фактические деформации не превышают расчетных значений при условии, что в расчетах принят шпунт марки AZ 18 длиной от уровня дневной поверхности 19,0 м. Значения фактических деформаций (ниже расчетных) свидетельствуют о том, что при прочих определенных параметрах и характеристиках длина шпунта 19,0 м обеспечивает помимо достаточной точности расчета

достаточный запас в части деформаций шпунта и воздействия на окружающую застройку. В дальнейших геотехнических расчетах был принят шпунт марки AZ 18 длиной от уровня дневной поверхности 19,0 м.

3. Проверка принятых решений в процессе откопки котлована

Моделирование более поздних этапов строительства здания выполнялось с принятыми параметрами шпунта. Велись регулярные наблюдения за деформациями. Проектом предполагалось устройство распорной системы с докопкой котлована на 1,0 м (до глубины 4,5 м) (рис. 13).

На момент написания статьи (октябрь 2024 г.) на площадке завершены работы нулевого цикла, распорные системы демонтированы. Наблюдаемые деформации ограждения котлована и окружающей застройки на различных этапах (докопка котлована, устройство подземного этажа, монтаж распорной системы) составляли менее расчетных. При этом отклонение составляло от 5 % до 10 % на различных этапах.

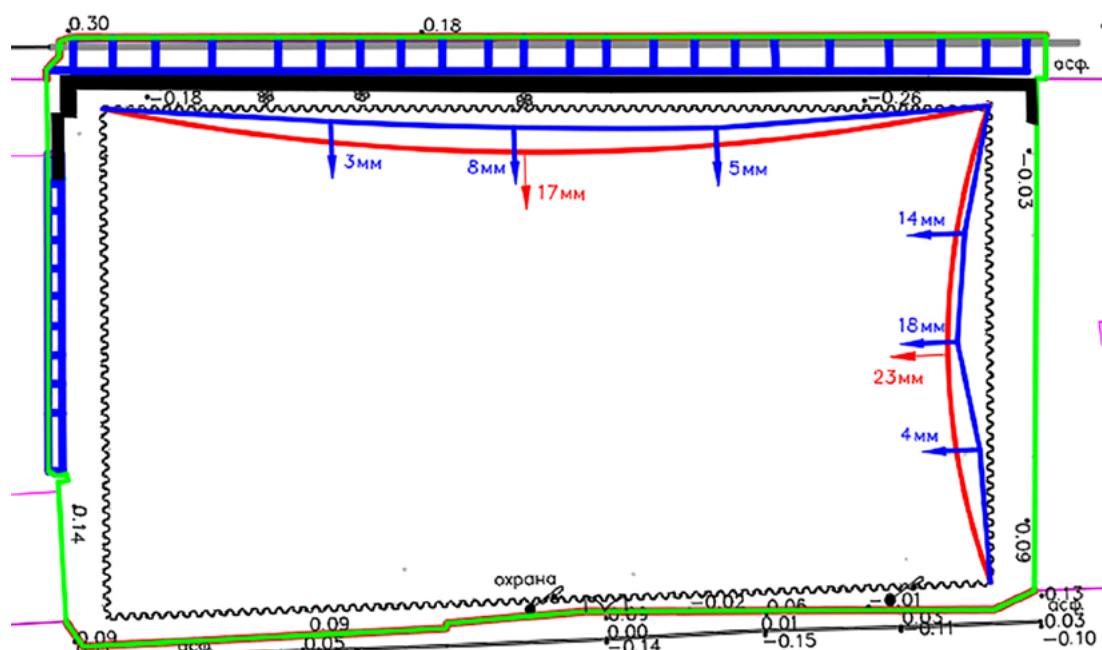


Рис. 12. Результаты сопоставления расчетных (красный цвет) и фактических (синий цвет) деформаций при откачке воды из котлована

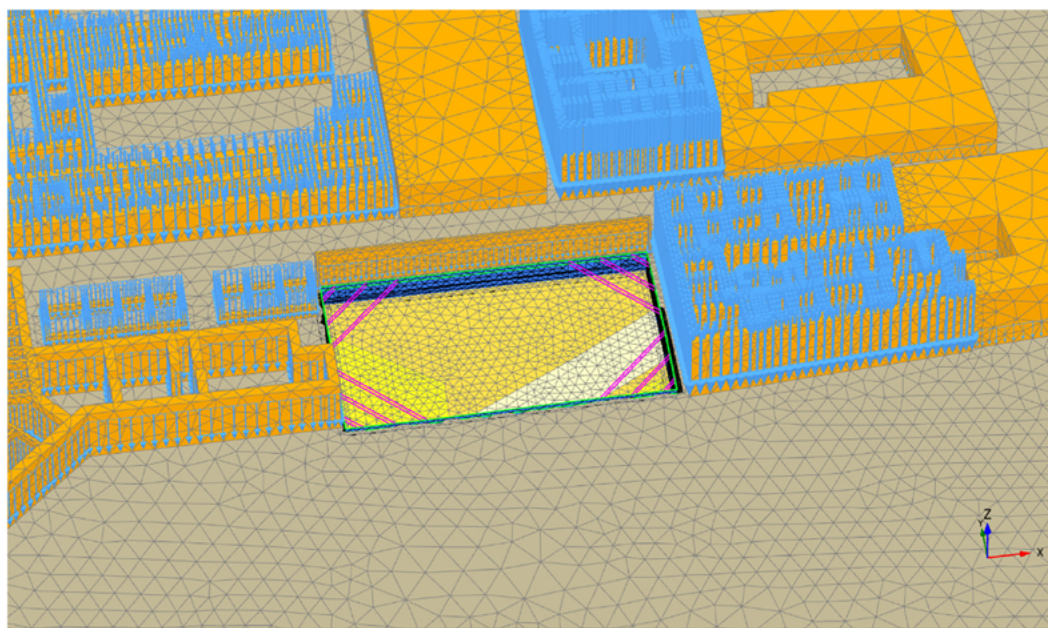


Рис. 13. Вид схемы на этапе откопки котлована с учетом устройства дополнительной распорной системы

Заключение

Нередко проведение опытных исследований на строительных площадках, совмещенное с математическим моделированием, является единственным способом собрать недостающие сведения на объекте о примененных конструктивных решениях. В условиях объектов незавершенного строительства сложность задачи многократно возрастает при необходимости использования существующих конструкций, сведения о которых утрачены. Особенно остро такие проблемы стоят в отношении конструкций, работающих в грунте, где невозможно прямыми методами выполнить измерения искомых параметров, даже геометрических. Одной из таких конструкций является шпунт при отсутствии достоверных сведений о его длине, как было описано в настоящей статье.

В рассмотренном в статье случае величина деформации шпунта может быть вычислена при известных деформационных характеристиках грунта, изгибной жесткости шпунта и величине заделки шпунта в грунт. В случае, когда от определенной нагрузки известно перемещение, реше-

ние обратной задачи позволяет определить неизвестный параметр — в рассмотренном случае длину шпунта.

Проведенное на объекте исследование показало, что при невозможности определения точной длины шпунтового ограждения методами диагностики или при высокой степени опасности его извлечения для осмотра возможно применение опытных исследований на отдельных участках или площадках либо, как описано в статье, на отдельных этапах работ.

Неотъемлемой частью таких исследований является мониторинг конструкций на всех этапах выполнения работ и сопоставление результатов мониторинга с расчетными деформациями, определенными для каждого этапа строительства.

Список источников

1. Osokin A. Determination of the Bending Moment in the Diaphragm Wall by Inclino-metric Observations / A. Osokin, M. Paramonov, I. Dyakonov, I. Bashmakov // E3S Web of Conferences: International Scientific Conference “Fundamental and Applied Scientific Research in the

Development of Agriculture in the Far East” (AFE 2022), Tashkent, Uzbekistan, 25–28 January 2023. — Vol. 371. — Tashkent, Uzbekistan: EDP Sciences, 2023. — P. 02015. — DOI: 10.1051/e3sconf/202337102015.

2. Метелкин С. В. Морозное пучение и его влияние на распорную систему ограждающих конструкций глубоких котлованов / С. В. Метелкин, В. Н. Парамонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 133–142. — DOI: 10.20295/1815-588X.2022.1.133.

3. Парамонов В. Н. Горизонтальные смещения свай при разработке котлована // Геотехника. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 46–57.

4. Kudryavtsev S. Numerical Simulation of the Work of a Low-Settlement Embankment on a Pile Foundation in the Process of Permafrost Soil Thawing / S. Kudryavtsev, T. Valtseva, S. Bugunov, Z. Kotenko et al. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. — Vol. 2: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019. — Pp. 73–81.

5. Башмаков И. Б. Аналитические подходы к расчету пассивного давления грунта при устройстве грунтовых берм / И. Б. Башмаков, М. С. Баранков, К. В. Сливец // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности : материалы межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов, Санкт-Петербург, 4–6 апреля 2023 г. — М.: Перо, 2023. — С. 14–19.

6. Козловский В. Е. Об осадках конструкций на комбинированных основаниях / В. Е. Козловский, Е. В. Городнова, С. С. Колмогорова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. —

2020. — Т. 22. — № 1. — С. 164–170. — DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-164-170.

7. Парамонов В. Н. Экспериментальная проверка применимости некоторых моделей грунта для расчета ограждений котлованов / В. Н. Парамонов, К. В. Сливец // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2008. — № 4. — С. 139–145.

8. Полищук А. И. Методы расчета влияния котлованов на дополнительные осадки существующих зданий / А. И. Полищук, В. А. Демченко // Материалы Юбилейной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ / отв. за выпуск А. Г. Коцаев. — Краснодар, 2022. — 147 с.

9. Парамонов В. Н. Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геотехники / В. Н. Парамонов. — СПб.: Геореконструкция, 2011. — 262 с.

10. Парамонов В. Н. Факторы риска при устройстве подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях / В. Н. Парамонов // Жилищное строительство. — 2009. — № 2. — С. 35–37.

Дата поступления: 22.08.2025

Решение о публикации: 23.10.2025

Контактная информация:

КРАВЧЕНКО Павел Александрович — канд. техн. наук; pasha.sky@gmail.com

ПОЛУНИН Вячеслав Михайлович — канд. техн. наук; n1ce2u@yandex.ru

МАКАРОВ Алексей Николаевич — аспирант; StroiGidroSpas@yandex.ru

The Application of Mathematical Modelling in the Survey of an Existing Excavation Pit

P. A. Kravchenko¹, V. M. Polunin^{2,3}, A. N. Makarov¹

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Krasnoarmeiskaya str., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

³Scientific Research Institute of Structural Physics, Russian Academy of Architecture and Construction, 21, Lokomotivny pr., 127238, Moscow, Russian Federation

For citation: Kravchenko P. A., Polunin V. M., Makarov A. N. The Application of Mathematical Modelling in the Survey of an Existing Excavation Pit // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 984–998. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-984-998

Summary

Purpose: To assess the feasibility of employing experimental studies and observations in the monitoring process to estimate the uncertain parameters of excavation retaining wall elements, specifically focusing on sheet pile lengths. **Methods:** The methods proposed in this paper are centered on determining the actual rigidity of the excavation retaining wall elements (steel sheet piles) under real working conditions within the context of existing structures. Essentially, the methods outlined herein represent a full-scale experimental study conducted at an active construction site. **Results:** This paper presents the findings related to the identification of the missing sheet pile parameters, specifically sheet lengths, through numerical modelling and field investigations that included deformation measurements, which were then compared to the calculated values. **Practical significance:** The practical relevance of this research is largely attributed to the distinctive challenges faced in the construction and renovation of buildings and structures in densely populated urban environments, where the effective use of underground space is vital. Furthermore, the significance is heightened by the specific ground conditions of St. Petersburg, which are marked by weak clay soils that are topped by relatively thin layers of fine and dusty sands. Geotechnical engineers often face the challenge of incomplete construction projects that necessitate completion due to the instability of the technical condition at the point where construction was interrupted. It is crucial to finalize the ongoing construction and installation works; however, the existing underground structures, such as piles, excavation retaining elements, foundations, or other installations, cannot be removed, as their dismantling could jeopardize adjacent buildings. Consequently, it is imperative to maintain and make use of the existing structures and their components while collecting accurate information about these structures, particularly, about their strength and deformation characteristics.

Keywords: Piles, reconstruction, sheet piling, excavation retaining wall, mathematical modelling, excavation survey.

References

1. Osokin A., Paramonov M., Dyakonov I., Bashmakov I. Determination of the Bending Moment in the Diaphragm Wall by Inclino-metric Observations. E3S Web of Conferences: International Scientific Conference “Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East” (AFE 2022), Tashkent, Uzbekistan, 25–28 January 2023, vol. 371. Tashkent, Uzbekistan: EDP Sciences, 2023, p. 02015. DOI: 10.1051/e3sconf/202337102015.
2. Metelkin S. V., Paramonov V. N. Moroznoe puchenie i ego vliyanie na raspornuyu sistemu ograzhdayushchikh konstruktsiy glubokikh kotlovanov [Frost heaving and its impact on the bracing system of deep excavation walls].

Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, Iss. 19(1), pp. 133–142. DOI: 10.20295/1815-588X.2022.1.133. (In Russian)

3. Paramonov V. N. Gorizontaľnye smeshcheniya svay pri razrabotke kotlovana [Horizontal displacements of piles during excavation]. *Geotekhnika* [Geotechnics]. 2018, Iss. 10(4), pp. 46–57. (In Russian)

4. Kudryavtsev S., Valtseva T., Bugunov S., Kotenko Z. et al. Numerical Simulation of the Work of a Low-Settlement Embankment on a Pile Foundation in the Process of Permafrost Soil Thawing. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions*, 2019, vol. 2: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019, pp. 73–81.

5. Bashmakov I. B., Barankov M. S., Slivets K. V. Analiticheskie podkhody k raschetu passivnogo davleniya grunta pri ustroystve gruntovykh berm [Analytical approaches to calculating passive earth pressure in soil berm construction]. *Sovremennye vyzovy transportnoy otrasli: novye vozmozhnosti, Sankt-Peterburg, 4–6 aprelya 2023 g.* [Modern challenges of the transport industry: new opportunities: materials of the interuniversity scientific-practical conference of transport universities, Saint Petersburg, 4–6 April 2023]. Moscow: Pero Publ., 2023, pp. 14–19. (In Russian)

6. Kozlovskiy V. E., Gorodnova E. V., Kolmogorova S. S. Ob osadkakh konstruktsey na kombinirovannykh osnovaniyakh [On settlements of structures on combined foundations]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building]. 2020, Iss. 22(1), pp. 164–170. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-164-170. (In Russian)

7. Paramonov V. N., Slivets K. V. Eksperimental'naya proverka primenimosti nekotorykh modeley grunta dlya rascheta ograzhdeniy kotlovanov [Experimental verification of applicability of some soil models for calculating excava-

tion supports]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Building]. 2008, Iss. 4, pp. 139–145. (In Russian)

8. Polishchuk A. I., Demchenko V. A. Metody rascheta vliyaniya kotlovanov na dopolnitel'nye osadki sushchestvuyushchikh zdaniy [Methods for calculating the impact of excavations on additional settlements of existing buildings]. *Materialy Yubileynoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu Kubanskogo GAU* [Materials of the Jubilee scientific-practical conference dedicated to the 100th anniversary of Kuban State Agrarian University]. Krasnodar, 2022, 147 p. (In Russian)

9. Paramonov V. N. *Metod konechnykh elementov pri reshenii nelineynykh zadach geotekhniki* [Finite element method in solving nonlinear geotechnical problems]. Saint Petersburg: Georekonstruktsiya Publ., 2011, 262 p. (In Russian)

10. Paramonov V. N. Faktory riska pri ustroystve podzemnykh sooruzheniy v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh [Risk factors in constructing underground structures in complex engineering-geological conditions]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2009, Iss. 2, pp. 35–37. (In Russian)

Received: August 22, 2025

Accepted: October 23, 2025

Author's information:

Pavel A. KRAVCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; pasha.sky@gmail.com

Vyacheslav M. POLUNIN — PhD in Engineering, Associate Professor; n1ce2u@yandex.ru

Alexey N. MAKAROV — Postgraduate Student; leshchenko2004m@gmail.com