

Влияние шва бетонирования на распорную систему котлована при аварийном воздействии

Антон Вячеславович Исаев

Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — ЦНИИПромзданий; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с возрастающим использованием подземного пространства в городах все чаще прибегают к более глубоким котлованам. В данных котлованах становится больше элементов и повышается шанс выхода одного из элементов из строя. При обрушении котлованов наносится экономический ущерб и возможны человеческие потери. Рассмотрен текущий уровень исследований в части защиты котлованов от прогрессирующего обрушения и произошедшие аварии. Целью исследования является оценка влияния моделирования швов бетонирования между захватками траншейной стены на перераспределение усилий при аварийном воздействии в виде выхода из строя одной распорки.

Материалы и методы. Проведено численное моделирование методом конечных элементов котлована глубиной 16 м, сооруженного под защитой стены в грунте с распорной системой. Швы моделировались интерфейсными элементами с учетом их деформируемости и прочности.

Результаты. При моделировании швов бетонирования идет перераспределение усилий в распорках в пределах одной захватки стены. При нормальном сочетании нагрузок усилия в распорках в среднем не изменяются в зависимости от моделирования шва, однако при аварийном воздействии усилия в расчетном случае со швами бетонирования увеличиваются. В случае прогрессирующего обрушения внутри стены меняется направление действия изгибающих моментов. Перемещения поверхности грунта при моделировании швов меньше, чем при традиционном способе моделирования.

Выводы. Полученные результаты позволяют более точно моделировать ограждение котлована, что делает их использование более прогнозируемым и безопасным. В качестве дальнейших исследований предполагается применение более совершенных моделей поведения бетонного контакта. Также в качестве конструктивных мероприятий для предотвращения прогрессирующего обрушения рекомендуется использование одинаковых арматурных сеток на противоположных гранях стены в грунте.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стена в грунте, распорная система, шов бетонирования, прогрессирующее обрушение, частичное обрушение, особое воздействие, метод конечных элементов

Благодарности. Автор выражает благодарность Михаилу Григорьевичу Зерцалову за наставничество исследований, а также анонимным рецензентам за конструктивную критику.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Исаев А.В. Влияние шва бетонирования на распорную систему котлована при аварийном воздействии // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 1. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.4

Автор, ответственный за переписку: Антон Вячеславович Исаев, isaevav98@yandex.ru.

Influence of the concrete joint on the spacer system of the excavation under accidental impact

Anton V. Isaev

Central Research and Design-Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures — TsNIIPromzdaniy; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Due to the increasing use of underground space in cities, deeper excavations are increasingly being used. These excavations contain more elements and increase the chance of failure of one of the elements. When excavations collapse, there is economic damage and possible loss of life. The current level of research regarding the protection of excavations from progressive collapse and the accidents that have occurred are reviewed. The purpose of the study is to evaluate the influence of modelling of concreting joints between trench wall sections on the redistribution of forces in case of an accidental impact in the form of failure of one strut.

Materials and methods. Numerical finite element modelling of a 16 m deep excavation constructed under the protection of a wall in the ground with a spacer system was carried out. The joints were modelled by interface elements taking into account their deformability and strength.

Results. The modelling of the concreting joints results in a redistribution of the forces in the struts within the same wall section. In the case of normal load combinations, the forces in the struts do not change on average depending on the joint modelling, but in the case of accidental impact, the forces in the design case with concreting joints increase. In the case of progressive collapse within the wall, the direction of action of the bending moments changes. The displacements of the ground surface in the case of joint modelling are smaller than in the traditional modelling method.

Conclusions. The results obtained will allow more accurate modelling of excavation enclosures, making their use more predictable and safer. As further research, more advanced models of concrete contact behaviour are envisaged. The use of identical reinforcement meshes on opposite faces of the wall in the ground is also recommended as a structural measure to prevent progressive collapse.

KEYWORDS: diaphragm wall, strut system, concrete joint, progressive collapse, partial collapse, specific impact, finite element model

Acknowledgements. The author expresses gratitude to Mikhail Grigorievich Zertsalov for research mentoring, as well as to anonymous reviewers for constructive criticism.

FOR CITATION: Isaev A.V. Influence of the concrete joint on the spacer system of the excavation under accidental impact. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(1):4. URL: <http://ns-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.4

Corresponding author: Anton V. Isaev, isaevav98@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

По мере роста городов все чаще возникает необходимость использования подземного пространства для размещения коммуникаций, железнодорожных и автомобильных путей. Так как подземные работы нередко ведутся при уже существующей застройке, важно предусмотреть меры по защите близлежащих зданий и сооружений. При возведении котлованов открытым способом для таких сооружений, как станции метро или тоннели, требуется создание массивных ограждений для котлованов, которые могут оставаться на месте более года. Сложность этих ограждений повышает риск выхода из строя одного из их компонентов, что может привести к разрушению всей конструкции и чрезмерному деформированию окружающей застройки.

При строительстве ограждений котлована в условиях высокого уровня грунтовых вод зачастую применяют возведение траншейной стены методом «стена в грунте». Данный метод имеет несколько преимуществ, таких как: высокая прочность, водонепроницаемость, возможность глубокого заложения и долговечность. Особенностью строительства траншейной стены с использованием этого метода является разделение стены на захватки. На рис. 1 показаны типовые схемы устройства траншейной монолитной стены в грунте. Рассматриваемый способ возведения вводит слабый элемент в траншейной стене — холодный шов бетонирования, который при деформировании стены начинает растрескиваться, и через него в котлован проникает вода.

При расчете напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «грунт — ограждение котлована — котлован» эти швы обычно не моделируются из-за сложности [1–21]. Авторами статьи [2] предлагается метод моделирования данных швов с помощью анизотропных пластинчатых элементов и линейных упругих стержневых элементов для точного воспроизведения поведения стыков между за-

хватками траншейной стены. По результатам моделирования сделаны выводы об увеличении влияния швов на НДС ограждения при увеличении глубины котлована. Модель доказала свою эффективность, особенно для коротких сторон выемки, где традиционные методы давали заниженные смещения.

Исследованиями по теме прогрессирующего обрушения в котлованах занимаются ученые из разных стран, в том числе Китая и России. В работе [3] рассмотрен выход из строя одной распорки в центре котлована и на расстоянии 2 м от угла с целью определения изменения эффективных напряжений в грунте и усилий в распорной системе. Для установления эффективных напряжений рассмотрены 6 случаев котлованов глубиной 16,8–30,8 м, для определения перераспределения усилий — один котлован глубиной 16,8 м с 4 ярусами распорок. По результатам исследования зона влияния отключения распорки

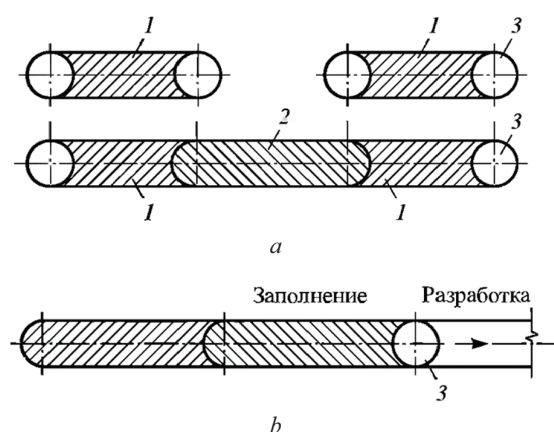


Рис. 1. Виды траншейных и свайных стен, выполненных в грунте [1]: *a* — из соприкасающихся траншей; *b* — из непрерывных траншей с секционным заполнением
Fig. 1. Types of trench and pile walls made in the ground [1]: *a* — from contiguous trenches; *b* — from continuous trenches with sectional filling

в центре котлована больше, чем в углу, что, скорее всего, показывает влияние углового эффекта. В котлованах меньшей глубины наблюдается большее понижение эффективных напряжений в грунтах в зоне влияния отключения распорки, что, видимо, объясняется большими перемещениями грунтовых масс, которые, возможно, понижают эффективные напряжения. При отказе распорки 4 яруса отмечается разгрузка 1 яруса распорок, а наибольший прирост — в распорке над отключаемой.

В статьях [4, 5] рассмотрено ограждение котлована глубиной 16,5 м, сооруженного под защитой траншейной стены в грунте с шириной захватки 6 м, закрепленной 3 ярусами преднапряженных анкеров с шагом 1,5 м без использования распределительной балки. По результатам моделирования выхода из строя одного анкера последнего яруса усилие в соседних анкерах возросло на 15–20 %. По результатам моделирования были сделаны выводы, что на прирост усилий при разрушении одного из анкеров в значительной степени влияет расположение анкера, жесткость траншейной стены и длина блока, а также что при расчете железобетонной траншейной стены без распределительных балок следует учитывать пространственный характер работы конструкции ограждения.

Авторами статьи [6] исследовано прогрессирующее обрушение котлованов, удерживаемых консольными железобетонными сваями при глубинах котлованов 4,5; 6 и 7,5 м. По результатам моделирования выхода из строя одной из свай ограждения изгибающие моменты в соседних к ней увеличивались до 2,75 раз.

Одним из эффективных методов предотвращения прогрессивного обрушения является установка непрерывной балки поверх свай. Балка распределяет усилия между сваями, что позволяет перераспределить нагрузки от арок эффекта на более удаленные от зоны разрушения сваи. Это значительно уменьшает максимальный коэффициент передачи нагрузки и может предотвратить дальнейшие разрушения. Эффект угла также существенно влияет на поведение котлована. В квадратных котлованах замечено, что прогрессивное обрушение, начавшееся с центральной части одной из сторон, постепенно ослабляется по мере приближения к углу. Угол создает условия для естественного завершения прогрессирующего обрушения, так как коэффициенты передачи нагрузки снижаются по мере разрушения свай. Также на коэффициент передачи нагрузок (отношение пикового изгибающего момента после частичного разрушения к моменту до разрушения) сильно влияют грунтовые условия и глубина котлована. Физическое моделирование выхода из строя различных типов крепления из строя проанализировано в труде [7].

Проводится сравнение работы упругой и упруго-пластической работы распорки [8]. По результатам исследования выявлено, что в плоской постанов-

ке разница между методами моделирования мала, но при моделировании в объемной постановке для глубоких выемок сложного очертания происходит перераспределение усилий в ограждающей конструкции. Разница продольных усилий при различных методах моделирования в объемной постановке достигает 500 кН, что составляет треть от усилий в упругой постановке.

В статьях [9–11] проведен анализ уже произошедших аварий котлованов различных конфигураций, в которых причиной разрушения стали различные факторы, такие как недостаточность изысканий (как грунтового массива, так и окружающей застройки [10]), некорректность проектных решений (в части расчетов и узлов крепления [11]) и несоблюдение технологий выполнения строительных работ (отсутствие геотехнического мониторинга и перекопка котлована ниже проектной отметки [9]).

И.В. Колыбиным [12] предложена классификация аварийных ситуаций с описанием категорий аварийной ситуации и их зависимости от состояний строящегося сооружения, окружающей застройки, инженерных коммуникаций и грунтового массива.

Цель настоящего исследования — изучение влияния моделирования швов на перераспределение усилий в распорной системе и перемещения ограждения котлована при аварийном воздействии в виде исключения одного распорного элемента из работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При аварийном воздействии в виде исключения распорного элемента из удерживающей системы ограждение котлована испытывает сложное НДС в виде изгиба в двух направлениях: изгиб в плоскости поперечного сечения котлована и изгиб в плоскости расположения яруса распорок. Поскольку данное состояние невозможно замоделировать в плоской постановке, была принята объемная постановка задачи.

Объект исследования — котлован глубиной 16 м, сооруженный под защитой железобетонной стены в грунте толщиной 800 мм из бетона класса В35 и арматуры класса А500С. Ярусы ограждения выполнены в виде распорок из трубы 720 × 14 стали класса С255. Шаг распорок в распорной системе: горизонтальный — 3 м; вертикальный — 4 м, ширина захватки стены в грунте — 6 м. Крепление ограждения котлована осуществляется распорной системой. Поперечный и продольный разрез котлована представлен на рис. 2. При расчете на сопротивление траншейной стены шов между захватками — холодный шов бетонирования — находится на расстоянии 1 м от удаляемого элемента. Характеристики грунтов представлены в табл. 1, уровень грунтовых вод принят на 2 м ниже уровня дневной поверхности грунта. На период строительства предусмотрено местное водопонижение внутри котлована до уровня дна.

Для постановки задачи использовался программный комплекс Midas FEA NX, основанный на методе

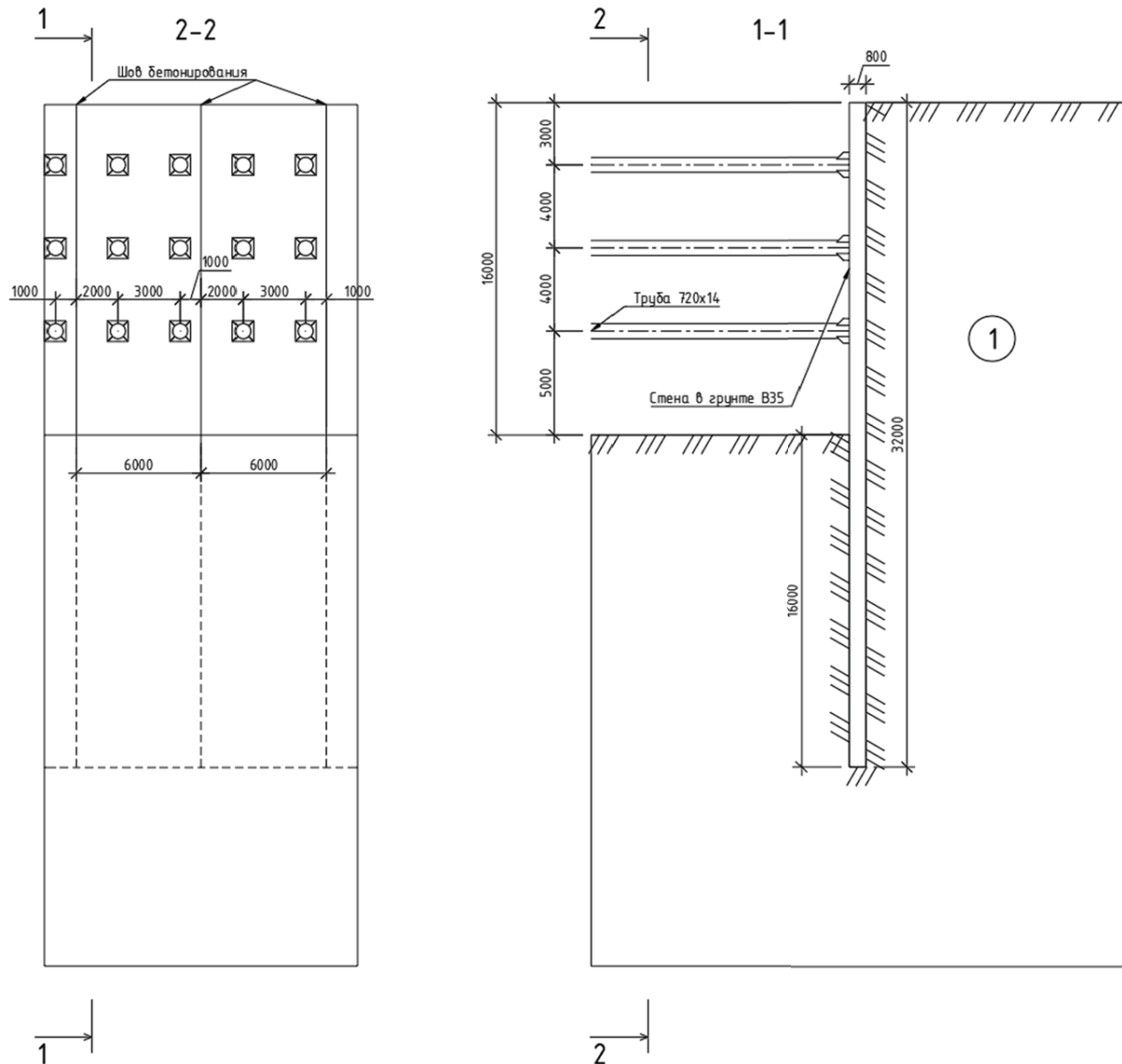


Рис. 2. Поперечное и продольное сечение котлована

Fig. 2. Cross-section and longitudinal of excavation

конечных элементов. Применяемая модель поведения грунта — Hardening Soil, модель поведения конструкций — Elastic. Расчетная схема представляет собой центральную часть котлована и представлена на рис. 3. Габариты расчетной схемы — $36 \times 76 \times 37(h)$ м. Граничные условия:

- нижняя грань — запрет на перемещения в трех направлениях;
- грани, не соприкасающиеся с котлованом, — запрет на перемещение в направлении, перпендикулярном грани;
- грани, соприкасающиеся с котлованом, — запрет на перемещения в направлении, перпендикулярном грани; запрет на поворот в плоскостях вне грани.

После расчета НДС грунта при финальном возведении котлована добавляется стадия с исключением распорки нижнего яруса центрального ядра сечения. Этот выбор распорки обусловлен наибольшим усилием по сравнению с остальными распорками.

После вычисления усилий в окружающих распорках от отключаемой производится расчет и в случае необходимости замена сечения с учетом дополнительных коэффициентов условий работы при аварийном воздействии, равных 1,1. Данные итерации заканчиваются при соблюдении условий прочности соседних распорок при возросших усилиях, возникших из-за исключенного элемента.

Для моделирования шва между захватками применен контактный элемент (интерфейс), который введен после введения интерфейсов между стенкой и окружающим грунтом. С целью вычисления нормальной и касательной жесткости контакта между двумя бетонными элементами класса В35 использовались следующие значения:

$$K_n = \frac{E}{t} = \frac{34\,500}{0,8} = 43\,125 \text{ МПа};$$

$$K_t = \frac{G}{t} = \frac{E}{2t(1+\nu)} = \frac{34\,500}{2 \cdot 0,8(1 + 0,2)} = 17\,968,75 \text{ МПа},$$

где E — модуль упругости бетона, для бетона класса В35 составляет 34 500 МПа; t — толщина контактного элемента (равняется толщине стены в грунте).
Помимо моделирования жесткости интерфейсного элемента моделировалась так же его прочность,

которая принята для нормального и касательного направления равной расчетному сопротивлению бетона осевому растяжению $Rbt = 1,3 \text{ МПа}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам расчета получено НДС системы «котлован – ограждение котлована – грунт» с учетом и без учета шва бетонирования между захватками. На рис. 4 и в табл. 2 приведено сравнение усилий

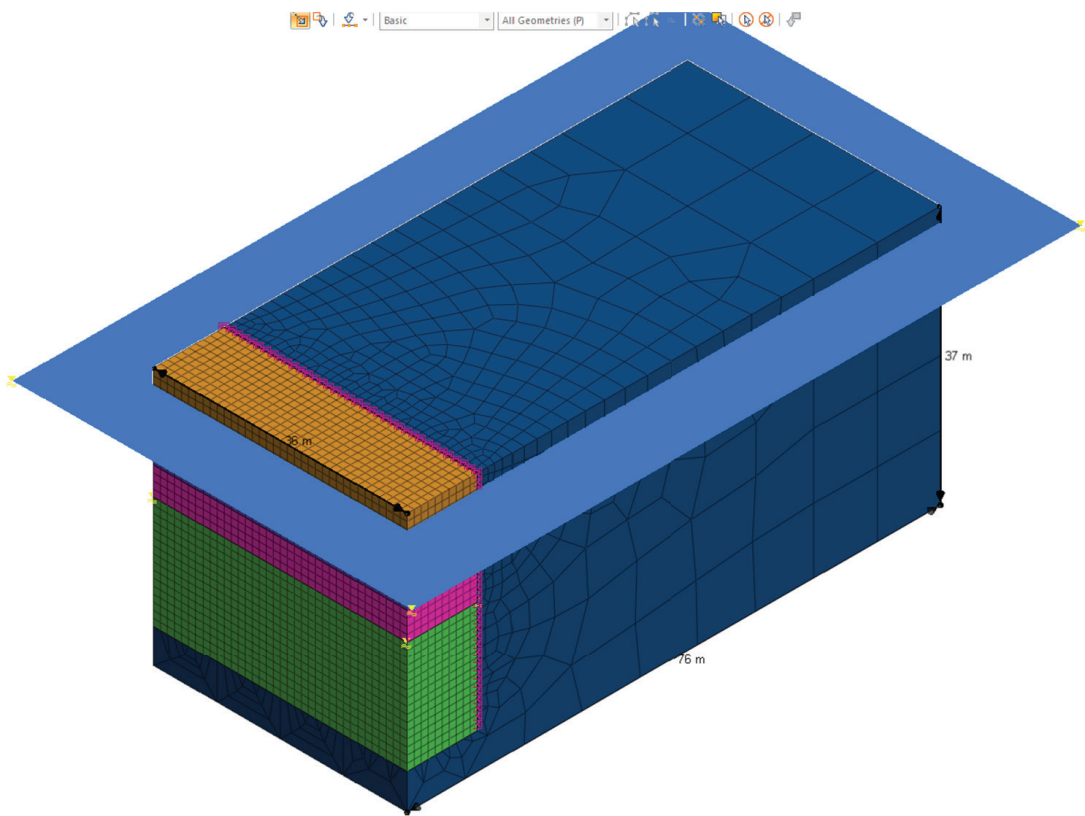


Рис. 3. Расчетная схема
Fig. 3. Calculation scheme

Табл. 1. Физико-механические характеристики грунтов
Table 1. Physical and mechanical properties of soils

Наименование характеристики Characteristic Name	Песок средней крупности средней плотности Medium coarse sand of medium density
Удельный вес грунта, кН/м³ Apparent specific gravity, kN/m³	19,4
Масса частиц грунта, г/см³ Weight of soil particles, g/cm³	27,0
Коэффициент пористости Air void ratio	0,657
Удельное сцепление, кПа Cohesion, kPa	0
Угол внутреннего трения, град. Angle of internal friction, °	31
Модуль деформации, МПа Modulus of deformation, MPa	31
Модуль деформации вторичной ветви загрузки, МПа Deformation modulus of the secondary loading branch, MPa	68

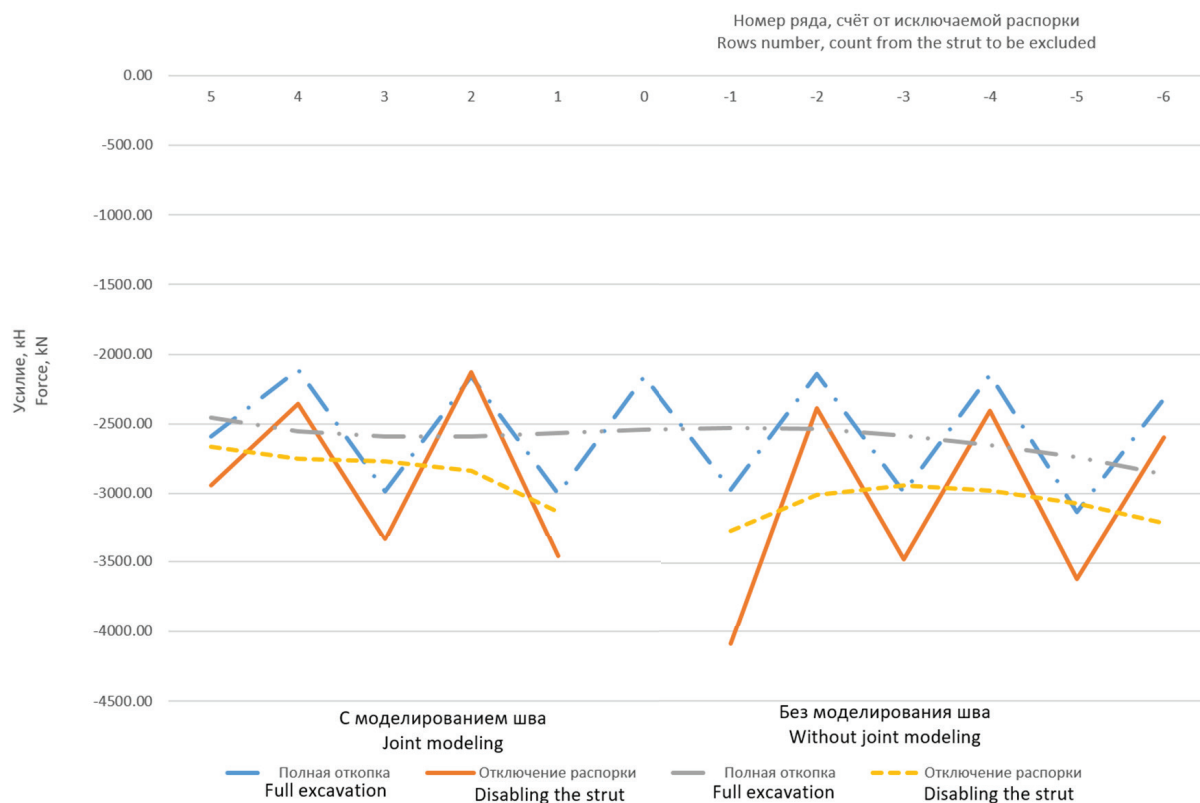


Рис. 4. Сравнение усилий в распорках последнего ряда на различных стадиях

Fig. 4. Comparison of forces in the struts of the last row at different stages

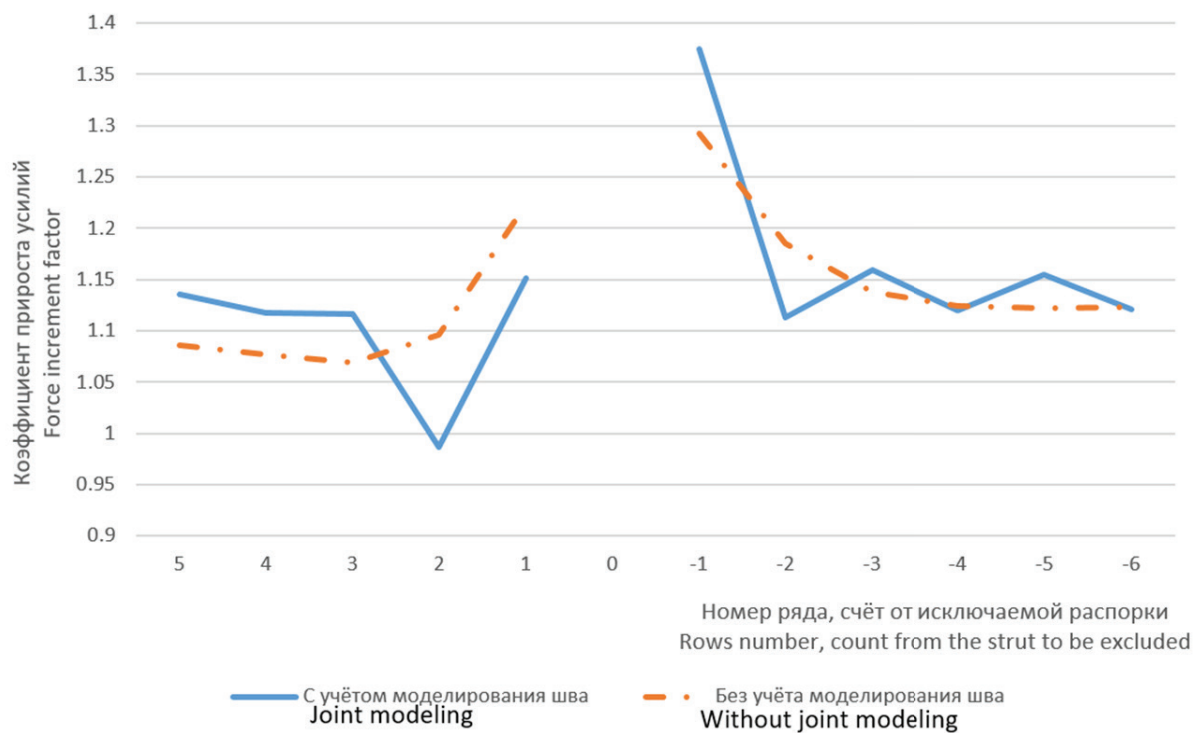


Рис. 5. Прирост усилий в распорках последнего яруса, д. е.

Fig. 5. Force increment in the struts of the last tier, d. q.

Табл. 2. Сравнение изгибающих моментов в стене в грунте

Table 2. Bending moment comparison in diaphragm wall

M_y , кН·м/м M_y , kN·m/m	Без моделирования швов Without joint modelling			С моделированием швов With joint modelling			
1	2	3	4	5	6	7	8
Точка / Point	Полная откопка Full excavation	Отключение распорки Disabling the strut	3/2	Полная откопка Full excavation	Отключение распорки Disabling the strut	6/5	6/3
Распорка над отключаемой Strut above disabling strut	-479,64	628,56	-1,31	443,62	838,46	1,89	1,33
Точка отключения распорки Disabling strut point	290,86	-273,73	-0,94	333,71	-384,22	-1,15	1,40
Уровень дна котлована Excavation level	-1271,23	-1279,64	1,01	-1206,51	-1370,39	1,14	1,07

в распорках и траншейной стене. Как видно на рис. 4, усилия в распорках при моделировании шва бетонирования на стадии полной откопки неравномерно распределяются по длине одной захватки. Распорки, которые находятся ближе к центру захватки (распорки 1 и -1 на рис. 4, расстояние до шва 2 м), нагружены больше, чем распорки, расположенные ближе к шву (распорка 0; 2; -2, расстояние до шва 1 м). Также заметно, что в среднем усилия в распорках при моделировании шва равняются усилиям в распорках без моделирования шва.

При выходе из строя распорки 0 при моделировании шва происходит большее перераспределение усилий на распорку, находящуюся в пределах захватки с отключаемой. На рис. 5 показано сравнение прироста усилий в распорках последнего яруса при моделировании и без моделирования шва бетонирования. Максимальный прирост между стадиями при моделировании шва составляет 37 %, без моделирования шва — 29 %. При моделировании шва бетонирования на стадии откопки котлована усилия в распорке -1 составляли порядка 2980 кН, если шов не моделировать,

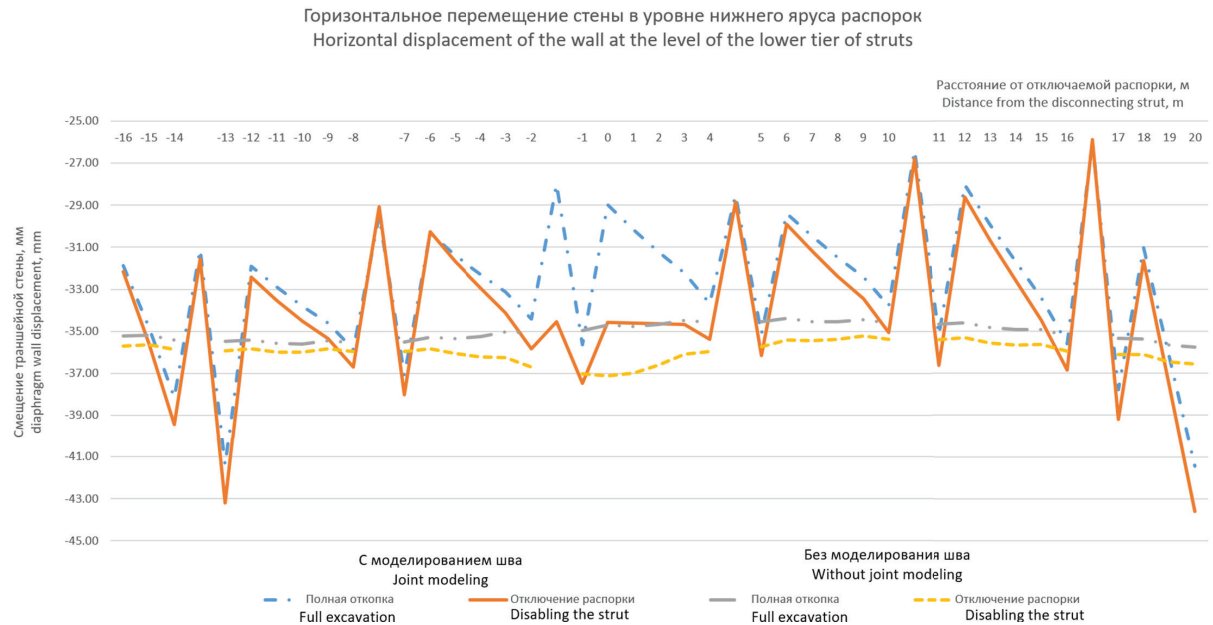


Рис. 6. Перемещения стены в грунте внутри котлована в уровне последнего яруса
Fig. 6. Displacements of the diaphragm wall inside the excavation at the level of the last tier

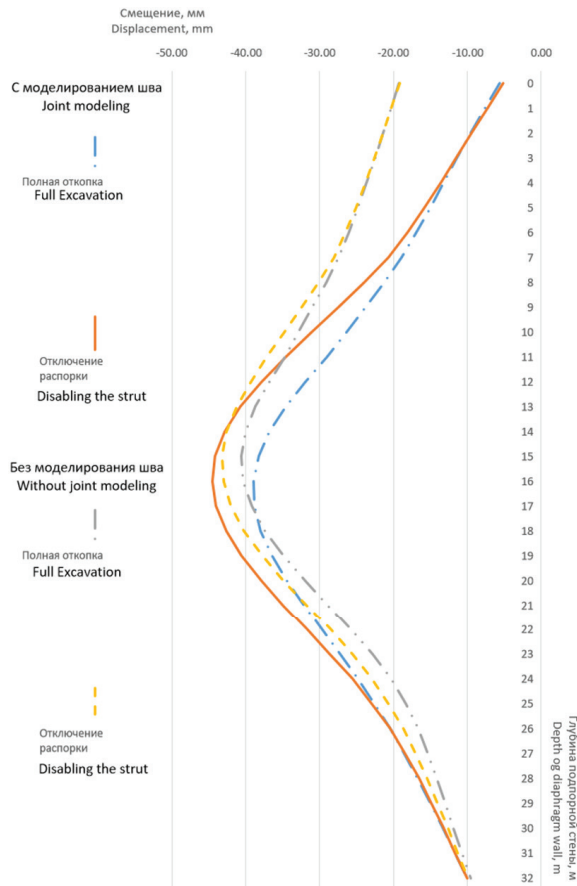


Рис. 7. Перемещения стены в грунте внутри котлована в плоскости поперечного сечения котлована

Fig. 7. Displacements of the diaphragm wall inside the excavation in the cross-sectional plane of the excavation

то усилие будет составлять порядка 2500 кН. При аварийном воздействии усилия в данной распорке с учетом работы шва возрастают до 4090 кН, а без моделирования шва — 3230 кН (разница 26 %).

Изгибающие моменты в стене в плоскости поперечного сечения котлована тоже изменяются в зависимости от моделирования шва. На стадии полной откопки котлована разница между учетом/неучетом шва невелика, однако моменты имеют разные знаки, что означает растяжение на противоположных гранях. При аварийном воздействии в обоих случаях в зоне отказа знак момента меняется. В зоне распорки над отключаемой распоркой (на 1 ярус выше) при традиционном методе моделирования знак момента меняется, но при моделировании шва момента знак не меняется, а увеличивает свое значение на 89 %. Общая разница усилий при различных методах достигает до 40 %.

Перемещения стены в грунте по двум сечениям показаны на рисунках ниже. На рис. 6 приведены пе-

ремещения стены в грунте внутри котлована в уровне последнего яруса распорной системы. По результатам численного моделирования перемещения стены в грунте при моделировании шва бетонирования оказались меньше, чем без данного шва. В зонах расположения швов показывается неравенство перемещений. Разница в перемещениях также видна на рис. 7, перемещения стены в грунте в пределах котлована меньше при моделировании швов и составляют до 39 мм на стадии полной откопки котлована. Перемещения верха стены также меньше при моделировании шва и составляют порядка 5–6 мм, тогда как при отсутствии данного шва перемещения стены на уровне дневной поверхности грунта — 20 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам сравнения двух схем можно сделать следующие выводы:

1. Предложен способ моделирования шва бетонирования при помощи интерфейсных элементов, получены жесткостные и прочностные характеристики шва.

2. Моделирование шва бетонирования влияет на напряженное состояние грунта, деформации массива уменьшаются, однако увеличиваются усилия в ограждающих конструкциях.

3. При аварийном воздействии со швом происходят перераспределения усилий приоритетно на распорки, расположенные внутри захватки, в которой была исключена распорка. Разница усилий по сравнению с традиционной схемой достигает 40 %.

4. При прогрессирующем обрушении в траншейной стене моменты меняют свой знак. Это означает, что в качестве конструктивных мероприятий по недопущению прогрессирующего обрушения рекомендуется устройство одинаковых арматурных сеток на противоположные грани.

5. В качестве дальнейших исследований возможно применение других моделей для моделирования шва бетонирования из строя, таких как Discrete Cracking и Concrete Smeared Crack, однако для них необходимы дополнительные испытания.

6. Прогрессирующее обрушение котлована легче предупредить, чем бороться с его последствиями. Качественный геотехнический мониторинг за конструкциями котлована и окружающей застройкой позволит увидеть проблему и быстрее принять решения, основываясь на объективных показателях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ильичев В.А., Мангушев Р.А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. 3-е изд-е, доп. и перераб. М. : АСВ, 2023. 1084 с.
2. Yang M., Wu R., Tong C., Chen J., Tang B. Displacement Analyses of Diaphragm Wall in Small-Scale Deep Excavation Considering Joints between Panels // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 5. P. 1449. DOI: 10.3390/buildings14051449
3. Phan H.K. Behaviours and mechanism analysis of deep excavation in sand caused by one-strut failure. 2019.
4. Znamenskiy V., Morozov E., Pekin D., Chunyaev D. The modelling of the “diaphragm wall” with the anchor without the use of distribution beams // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 04021. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704021
5. Авасенов В.С., Гримальо И.А. Расчет ограждения котлована при выходе грунтового анкера из строя // Геотехника. 2019. Т. XI. № 2/2019. С. 54–63. DOI: 10.25296/2221-5514-2019-11-2-54-63
6. Cheng X.S., Zheng G., Diao Y., Huang T.M., Deng C.H., Lei Y.W. et al. Study of the progressive collapse mechanism of excavations retained by cantilever contiguous piles // Engineering Failure Analysis. 2017. Vol. 71. Pp. 72–89. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.06.011
7. Zheng G., Lei Y.W., Cheng X.S., Li X.Y., Wang R.Z. Experimental study on progressive collapse mechanism in braced and tied-back retaining systems of deep excavations // Canadian Geotechnical Journal. 2021. Vol. 58. Issue 4. Pp. 540–564. DOI: 10.1139/cgj-2019-0296
8. Ter-Martirosyan A., Sidorov V. Studying the influence of taking into account the elastic-plastic behavior of strut elements on the retaining system equilibrium // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Issue 1. P. 012030. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012030
9. Chen R.P., Li Z.C., Chen Y.M., Ou C.Y., Hu Q., Rao M. Failure Investigation at a Collapsed Deep Excavation in Very Sensitive Organic Soft Clay // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2015. Vol. 29. Issue 3. P. 04014078. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000557
10. Hu J., Ma F. Failure Investigation at a Collapsed Deep Open Cut Slope Excavation in Soft Clay // Geotechnical and Geological Engineering. 2018. Vol. 36. Issue 1. Pp. 665–683. DOI: 10.1007/s10706-017-0337-2
11. Endicott J. Lessons learned from the collapse of the Nicoll Highway in Singapore April 2004 // IABSE Reports. 2013. Pp. 1–6. DOI: 10.2749/222137813808626722
12. Колыбин И.В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях. СПб. : Георекострукция-Фундаментпроект, 2008. Т. 3. С. 89–124.
13. Алмазов В.О. Проблемы прогрессирующего разрушения // Строительство и Реконструкция. 2014. № 6 (56). С. 3–10.
14. Алмазов В.О. Сопротивление прогрессирующему разрушению: расчеты и конструктивные мероприятия // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений». 2009. № 1. С. 179–193.
15. Петрухин В.П., Колыбин И.В., Разводовский Д.Е. Ограждающие конструкции котлованов, методы строительства подземных и заглубленных сооружений. 2008. С. 212–219.
16. Казаченко С. Оценка влияния устройства котлованов на близлежащие инженерные коммуникации и окружающую застройку для условий города. М. : 2023. 183 с.
17. Zhang Q., Liu S., Feng R., Li X. Analytical Method for Prediction of Progressive Deformation Mechanism of Existing Piles Due to Excavation Beneath a Pile-Supported Building // International Journal of Civil Engineering. 2019. Vol. 17. Issue 6. Pp. 751–763. DOI: 10.1007/s40999-018-0309-9
18. Тамразян А.Г. К задачам мониторинга риска зданий и сооружений // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 3 (170). С. 19–21.
19. Bazar M.H., Ghadamgahi A., Brennan A.J. Numerical analysis of collapse in a deep excavation supported by ground anchors // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 174. Issue 3. Pp. 263–278. DOI: 10.1680/jgeen.19.00122
20. Поспехов В.С. Исследование углового эффекта конструкции ограждения котлована // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 2. С. 238–248.
21. Поспехов В.С., Шулятьев О.А., Бауков А.Ю. Исследование углового эффекта конструкции ограждения опытного котлована в песчаных грунтах // Геотехника. 2020. Т. 12. № 1. С. 16–30. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-1-16-30

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Антон Вячеславович Исаев** — аспирант, инженер 2-й категории, отдел конструктивных систем; **Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений** — ЦНИИПромзданий; 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, 46, корп. 2; isaevav98@yandex.ru.

REFERENCES

1. Il'ichev V.A., Mangushev R.A. *Handbook of Geotechnical Engineering. Foundations, foundations and underground structures. 3rd edition, supplemented.* Moscow, 2023; 1084. (rus.).
2. Yang M., Wu R., Tong C., Chen J., Tang B. Displacement Analyses of Diaphragm Wall in Small-Scale Deep Excavation Considering Joints between Panels. *Buildings*. 2024; 14(5):1449. DOI: 10.3390/buildings-14051449
3. Phan H.K. *Behaviours and mechanism analysis of deep excavation in sand caused by one-strut failure.* 2019.
4. Znamenskiy V., Morozov E., Pekin D., Chunyaev D. The modelling of the “diaphragm wall” with the anchor without the use of distribution beams. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:04021. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704021
5. Avasenov V.S., Grimajlo I.A. Calculation of excavation enclosure in case of soil anchor failure. *Geotechnics*. 2019; XI(2/2019):54-63. DOI: 10.25296/2221-5514-2019-11-2-54-63 (rus.).
6. Cheng X.S., Zheng G., Diao Y., Huang T.M., Deng C.H., Lei Y.W. et al. Study of the progressive collapse mechanism of excavations retained by cantilever contiguous piles. *Engineering Failure Analysis*. 2017; 71:72-89. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.06.011
7. Zheng G., Lei Y.W., Cheng X.S., Li X.Y., Wang R.Z. Experimental study on progressive collapse mechanism in braced and tied-back retaining systems of deep excavations. *Canadian Geotechnical Journal*. 2021; 58(4):540-564. DOI: 10.1139/cgj-2019-0296
8. Ter-Martirosyan A., Sidorov V. Studying the influence of taking into account the elastic-plastic behavior of strut elements on the retaining system equilibrium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012030. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012030
9. Chen R.P., Li Z.C., Chen Y.M., Ou C.Y., Hu Q., Rao M. Failure Investigation at a Collapsed Deep Excavation in Very Sensitive Organic Soft Clay. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2015; 29(3):04014078. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000557
10. Hu J., Ma F. Failure Investigation at a Collapsed Deep Open Cut Slope Excavation in Soft Clay. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018; 36(1):665-683. DOI: 10.1007/s10706-017-0337-2
11. Endicott J. Lessons learned from the collapse of the Nicoll Highway in Singapore April 2004. *IABSE Reports*. 2013; 1-6. DOI: 10.2749/222137813808626722
12. Koly`bin I.V. *Lessons from emergency situations in excavation construction in urban settings.* St. Petersburg, Georeconstruction-Fundamentproekt, 2008; 3:89-124. (rus.).
13. Almazov V.O. Problems of progressive fracture. *Construction and Reconstruction*. 2014; 6(56):3-10. (rus.).
14. Almazov V.O. Resistance to progressive fracture: calculations and design actions. *Bulletin CZNIISK Im. V.A. Kucherenko, Studies on the Theory of Structures*. 2009; 1:179-193. (rus.).
15. Petruxin V.P., Koly`bin I. V., Razvodovskij D.E. *Enclosing structures of excavations, methods of construction of underground and buried structures.* 2008; 212-219. (rus.).
16. Kazachenko S. *Evaluation of the impact of excavations on nearby utilities and surrounding buildings for the conditions of the city.* Moscow, 2023; 183. (rus.).
17. Zhang Q., Liu S., Feng R., Li X. Analytical Method for Prediction of Progressive Deformation Mechanism of Existing Piles Due to Excavation Beneath a Pile-Supported Building. *International Journal of Civil Engineering*. 2019; 17(6):751-763. DOI: 10.1007/s40999-018-0309-9
18. Tamrazyan A.G. To the tasks of monitoring the risk of buildings and structures. *Building Materials, Equipment, Technologies of the 21st Century*. 2013; 3(170):19-21. (rus.).
19. Baziar M.H., Ghadamgahi A., Brennan A.J. Numerical analysis of collapse in a deep excavation supported by ground anchors. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering*. 2021; 174(3):263-278. DOI: 10.1680/jgeen.19.00122
20. Pospexov V.S. Investigation of the Corner Effect of the Excavation Barrier Structure. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2014; 2:238-248. (rus.).
21. Pospexov V.S., Shulyat`ev O.A., Baukov A.Yu. Investigation of the Corner Effect of the Experimental Pit Fencing Construction in Sandy Soils. *Geotechnics*. 2020; 12(1):16-30. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-1-16-30 (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on September 20, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

BIONOTES: Anton V. Isaev — postgraduate student, 2nd category engineer, department of structural systems; Central Research and Design-Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures — TsNIIPromzdaniy; build. 2, 46 Dmitrovskoe highway, Moscow, 127238, Russian Federation; isaevav98@yandex.ru.