

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.154

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.203-215

Оценка устойчивости грузоподъемных средств при разработке котлованов в стесненных условиях

Надежда Сергеевна Никитина, Николай Константинович Мельников

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИИ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Показаны необходимость и место задачи оценки устойчивости грузоподъемных средств при разработке котлованов в стесненных условиях, характерных для городских территорий с плотной городской застройкой при прокладке подземных транспортных объектов на примере открытого способа работ по сооружению Московского метрополитена.

Материалы и методы. В целях исследования влияния геотехнических параметров на устойчивость и безопасность работы подъемных средств большой грузоподъемности рассмотрены два участка на территории г. Москвы и различные грузоподъемные краны компании Liebherr; проведено численное моделирование для определения перемещений и деформаций при различном расположении грузоподъемного крана относительно ограждения котлована.

Результаты. С помощью численного моделирования с применением геотехнических программных комплексов PLAXIS 2D и PLAXIS 3D получены горизонтальные и вертикальные перемещения и общие деформации ограждения котлована, в том числе при использовании аэродромных гладких плит, а также при устройстве верхнего яруса распорной системы с использованием инвентарных плит $1,5 \times 1,5$ м.

Выводы. Вопрос аналитического расчета для ситуаций, которые могут возникать при решении практических задач, в частности при разработке проекта производства работ при установке подъемного средства вблизи котлована с ограждением, актуален. Особое и первостепенное влияние на результат расчета оказывают поверхностные слои грунтов (до 6 м). При установке подъемного средства в условиях насыпного грунта природного происхождения обязательна его замена на более твердый или укладка дополнительных бетонных плит большей площади, уменьшающих непосредственную нагрузку на грунт. В особых случаях, при применении тяжелых автокранов грузоподъемностью 250 т и более, при условии, что ограждение выполнено без распорной системы («консольного типа»), численное моделирование целесообразно проводить индивидуально.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геотехнические характеристики, грузоподъемный кран, инженерно-геологические условия, котлован, метрополитен, открытый способ работ, численное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никитина Н.С., Мельников Н.К. Оценка устойчивости грузоподъемных средств при разработке котлованов в стесненных условиях // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 203–215. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.203-215

Автор, ответственный за переписку: Надежда Сергеевна Никитина, nsnikitina@mail.ru.

Estimation of stability of lifting equipment during excavation of pits in cramped conditions

Nadezhda S. Nikitina, Nikolay K. Melnikov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper illustrates the necessity and place of the problem of stability assessment of lifting devices applied for excavation in cramped conditions, which are typical for urban areas with dense urban development when laying underground transport facilities on the example of the open method of works on the construction of the Moscow Metro.

Materials and methods. Two sites on the territory of Moscow and different cranes of Liebherr company were considered in order to investigate the influence of geotechnical parameters on stability and safety of heavy lifting equipment. In addition, numerical modelling was carried out to determine displacements and deformations at different locations of the crane with respect to the excavation fence.

Results. Horizontal and vertical displacements and total deformations of the pit fence were obtained by means of numerical modelling with the use of geotechnical software systems PLAXIS 2D and PLAXIS 3D. Among other things, we analyzed the usage of PAG slabs, as well as construction of the top tier of the spacing system with the use of 1.5×1.5 m inventory slabs.

Conclusions. The relevant issue is an analytical calculation for situations that can arise in solving practical problems, in particular, in the development of the project of works for the installation of a lifting device near the pit with a fence. Surface layers of soils (up to 6 m) have a special and primary influence on the result of the calculation. If the lifting device is installed

in bulk soil of natural origin, it is mandatory to replace it with a harder soil or to lay additional concrete slabs with a larger area to reduce the direct load on the ground. In special cases, the numerical modelling should be performed separately for heavy truck cranes with a lifting capacity of 250 tons and more, provided that the guardrail is made without a spacing system ("cantilever type").

KEYWORDS: geotechnical characteristics, lifting crane, engineering and geological conditions, pit, underground, open method of works, numerical modelling

FOR CITATION: Nikitina N.S., Melnikov N.K. Estimation of stability of lifting equipment during excavation of pits in cramped conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):203-215. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.203-215 (rus.).

Corresponding author: Nadezhda S. Nikitina, nsnikitina@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Территория большого современного города простирается на сотни квадратных километров и тем не менее испытывает проблемы, обусловленные плотностью застройки, в том числе связанные с освоением подземного пространства, включая прокладку транспортных коммуникаций. Это отмечается во многих публикациях [1–6].

В плотно застроенных районах города, в наибольшей степени нуждающихся в прокладке подземных коммуникаций, часто приходится по разным причинам прибегать к открытым способам ведения строительных работ, что сопряжено с необходимостью принятия специфических конструктивно-технологических решений, среди которых обеспечение безопасности соседних зданий, сооружений и других объектов при устройстве котлованов¹ [7–9].

В настоящее время одним из вариантов разработки котлована под строительство метрополитена является открытый способ с помощью мощных подъемных сооружений и средств (ПС). Однако в технологии организации строительного производства безопасные способы перемещения землеройной техники по вертикали (в котлован и из него) слабо раскрыты и зачастую не могут быть применимы в условиях строительной площадки на плотно застроенной территории, нередко создавая угрозу расположенным поблизости зданиям и сооружениям [10, 11].

В связи с необходимостью проведения работ с участием ПС большой грузоподъемности актуален вопрос об их безопасной установке [12, 13]. В нормативных источниках не учитываются тип и конструктивные особенности ограждения котлована, реальные инженерно-геологические условия, стесняющие факторы и многое другое. В частности, речь должна идти о предотвращении обрушения грунтового массива, находящегося под воздействием передаваемых на опоры усилий с учетом конструктивных особенностей ограждающих конструкций стенок котлована по результатам математического моделирования и аналитических расчетов

по строительным нормам, включая напряженно-деформированное состояние (НДС) грунта при заданных нагрузках от опор грузоподъемного механизма и степень влияния типа конструктива ограждающих конструкций котлована.

Эти и другие вопросы рассмотрены в исследовании, проведенном в НИУ МГСУ и описываемом далее на примере котлована под строительство на одном из участков Московского метрополитена с устройством ограждения стенок способом «стена в грунте» (СВГ) при вертикальном нагружении грунтового массива.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В соответствии с п. 111 действующего приказа Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения»»² краны стрелового типа, краны-манипуляторы, подъемники (вышки) на краю откоса котлована (канавы) должны быть установлены с соблюдением расстояний, указанных в Приложении № 1 к указанному нормативному документу. При глубине котлована более 5 м и невозможности соблюдения расстояний, указанных в табл. 1, откос должен быть укреплен согласно проекту производства работ (ППР).

Однако в больших городах с плотной застройкой не всегда есть площадь, достаточная под устройство откосов. Кроме того, сегодня практикуется разработка открытым способом и глубоких котлованов (более 5 м). В современной геотехнике эту задачу решают с помощью защиты стенок котлована разными конструкциями и способами.

Несмотря на широкое распространение технологии подъема землеройной техники с применением подъемных средств вблизи котлованов, на практике зачастую возникает вопрос о несущей способности ограждений.

¹ Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения: издание второе, дополненное и переработанное / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. М.: Изд-во АСВ, 2016. 1040 с.

² Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения»: приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461.

Табл. 1. Минимальные расстояния от основания откоса котлована до оси ближайших опор крана при ненасыпном грунте, м

Table 1. Minimum distances from the base of the excavation slope to the axis of the nearest crane supports for unfilled soil, m

Глубина котлована, м Excavation depth, m	Грунт Soil				
	песчаный и гравийный sand and gravel	супесчаный sandy loam	суглинистый loamy	лессовый сухой loess dry	глинистый clay
1	1,5	1,25	1,00	1,0	1,00
2	3,0	2,40	2,00	2,0	1,50
3	4,0	3,60	3,25	2,5	1,75
4	5,0	4,40	4,00	3,0	3,00
5	6,0	5,30	4,75	3,5	3,50

Для анализа инженерно-геологических условий^{3, 4, 5, 6} [12–15] рассмотрены два участка в г. Москве. Один из них — в пос. Сосенское в Новомосковском административном округе. В геоморфологическом отношении изучаемая территория находится в пределах поверхности 3-й надпойменной террасы Москва-реки и ее притоков. Часть территории освоена (проложены коммуникации, временные дороги, установлены электрические подстанции). Поверхность относительно ровная. Абсолютные отметки поверхности обследуемой площадки изменяются от 149,40 до 148,30 м.

В геолого-литологическом строении принимают участие (сверху вниз): техногенные грунты (tQIV), аллювиально-флювиогляциальные отложения 3-й надпойменной террасы (a,f3QIIms), флювиогляциальные отложения селенско-донского межледниковья (f,lqQIs-ds), отложения верхней средней юры (J2-3vd-cr).

В геологическом отношении под асфальтобетонным покрытием, а в местах его отсутствия — с поверхности до глубины 1,0–5,9 м — площадка изысканий повсеместно перекрыта современными техногенными отложениями (tIV), представленными насыпными грунтами.

Насыпной грунт песчано-глинистого состава с включением строительного мусора — слежавшийся, влажный и водонасыщенный.

Мощность современных техногенных отложений в пределах площадки составляет 1,0–5,9 м.

³ ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. М. : МНТКС, 2013.

⁴ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия : утв. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. М., 2016. 104 с.

⁵ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений : утв. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. М., 2016. 220 с.

⁶ Автокраны Liebherr. Технические характеристики. URL: <https://kran-liebherr.ru/avtokrany-liebherr-tehnicheskie-harakteristiki/>

Насыпные грунты подвержены самоуплотнению, продолжительность которого зависит от гранулометрического состава и способа отсыпки. С учетом давности их образования насыпные грунты (ИГЭ-1) следует отнести к слежавшимся.

Специфические особенности насыпных грунтов включают:

- высокую пористость;
- малую прочность и большую сжимаемость с длительной консолидацией при уплотнении;
- существенное изменение деформационных и прочностных свойств при нарушении их естественного сложения, а также под воздействием динамических и статических нагрузок;
- анизотропию прочностных, деформационных и фильтрационных характеристик;
- повышенную агрессивность к бетонам и коррозионную агрессивность к металлическим конструкциям.

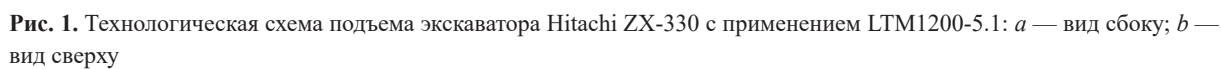
Под насыпными грунтами на глубине 1,0–5,9 м от уровня дневной поверхности на абсолютных высотных отметках порядка 124,60–135,60 м залегают верхнечетвертичные современные аллювиально-делювиальные (a,dIII–IV) отложения, представленные глинами. Глины серые, тугопластичной консистенции, с примесью органических веществ. Мощность отложений составляет 0,4–6,0 м.

К специфическим особенностям вышеперечисленных грунтов (ИГЭ-3) относятся:

- высокая пористость;
- малая несущая способность;
- большая изменчивость деформационных и прочностных свойств в массиве грунта;
- неравномерные осадки при уплотнении.

В рамках описываемого исследования получены численными методами оценки НДС массива грунта при взаимодействии с подъемными средствами в непосредственной близости от котлована.

Для моделирования было принято несколько типов ПС различной грузоподъемности, более подходящих для подъема специальной техники из котлована. Наиболее практичной задачей производи-



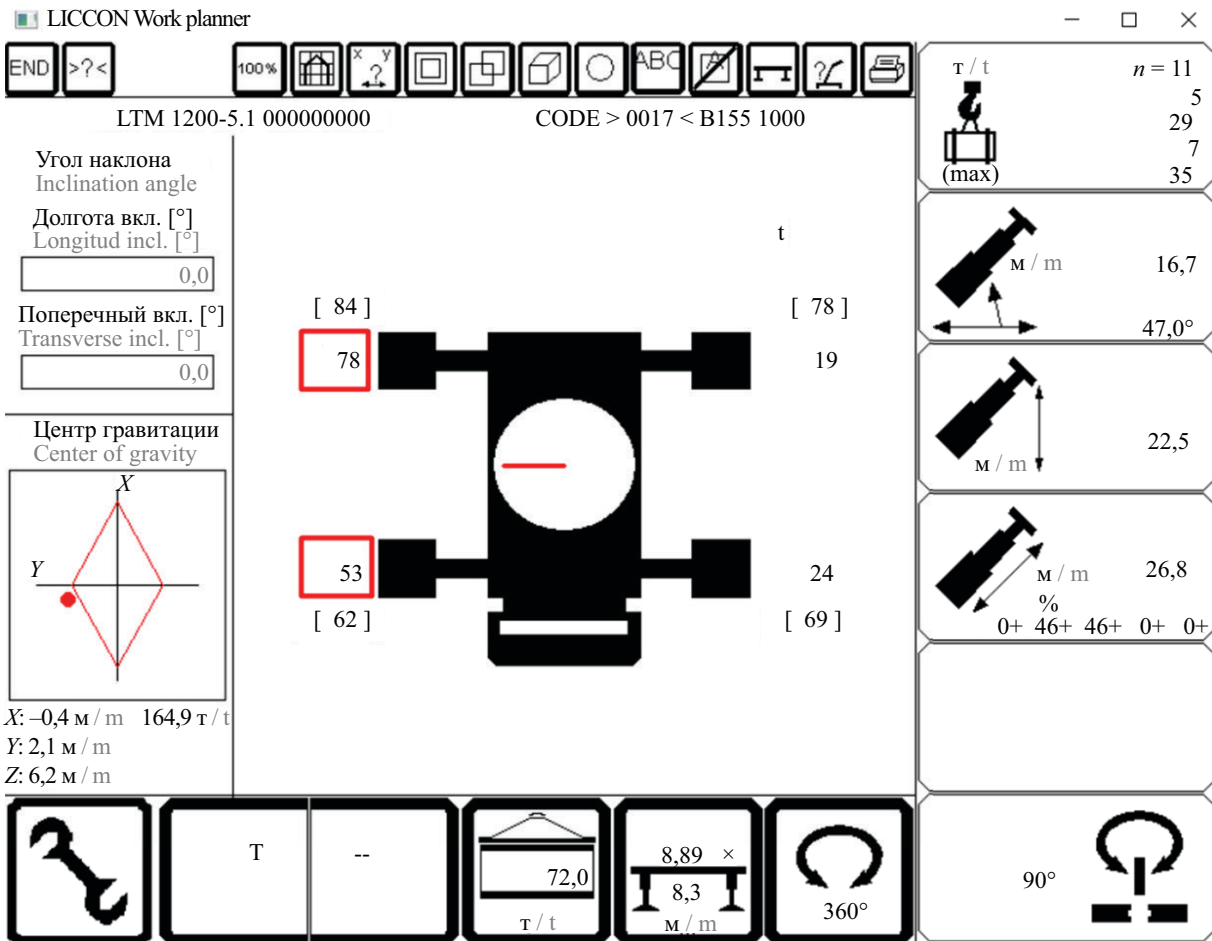


Рис. 2. Нагрузки, действующие на аутригеры автокрана

Fig. 2. Loads acting on truck crane outriggers

телей работ на стройплощадках г. Москвы, а также в других густонаселенных городах с развитым метростроением, в частности открытым способом, является подъем гусеничных экскаваторов общей массой 25–35 т. В зависимости от условий на площадке выбирают ПС необходимой грузоподъемности.

В ходе исследований проанализирован ряд ПС, наиболее подходящих для рассматриваемой ситуации:

- автокран грузоподъемностью 150 т (Liebherr LTM 1150-6.1);
- автокран грузоподъемностью 200 т (Liebherr LTM 1200-5.1);
- автокран грузоподъемностью 250 т (Liebherr LTM 1250-6.1)⁷.

При проектировании расчетной схемы определяли усилия от ПС с грузом, приходящиеся на плиту, опирающуюся на внешнюю часть грунтового массива.

Для обеспечения достоверности численных исследований выбран лицензионный программный комплекс (ПК) Liccon Work Planner.

⁷ Экскаваторы среднего класса. URL: <https://www.hitachicm.ru/produkcija/eksavatory/eksavatory-srednego-klassa/zx330-5a/>

В качестве исходных данных по инженерно-геологическим условиям для расчета принят описанный участок. Ограждение котлована выполнено методом СВГ из бетона марки В25 толщиной 600 мм с устройством распорных труб диаметром 625 мм, $t = 8$ мм в два яруса. Груз — экскаватор Hitachi ZX-3306 снаряженной массой 29 500 кг расположен в 5500 мм от края ограждения.

Ввиду ограниченных условий на площадке по размещению ПС по ширине 9500 мм было принято расположение, показанное на рис. 1. Соответственно, нагрузки от аутригера показаны на рис. 2.

Немаловажным фактором служит размер подкладок под силовые опоры автокрана (аутригеры). В зависимости от модели автокрана в комплектации представлены инвентарные металлические подкладки размерами 1,0 × 1,0 ... 2,5 × 2,5 м и толщиной 200–350 мм. В описываемом исследовании приняты подкладки габаритами 1500 × 1500 × 250 мм.

Для математического моделирования задачи под воздействие распределенной нагрузки на бровку котлована в процессе испытания проводились с помощью геотехнических ПК PLAXIS 2D по схеме, представленной на рис. 3.

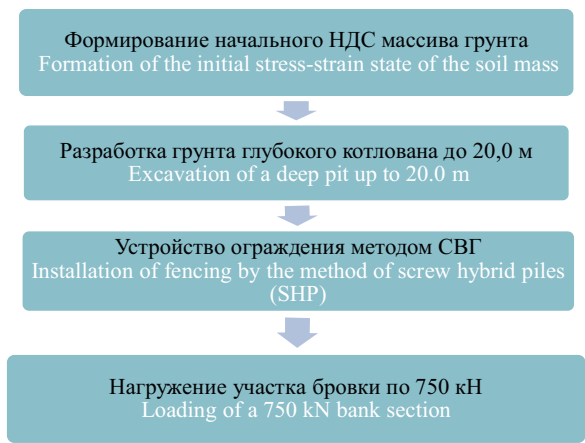


Рис. 3. Этапы исследования
Fig. 3. Stages of the study

Принципиальная схема для численного исследования приведена на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью ПК PLAXIS 2D получены горизонтальные (рис. 5), вертикальные перемещения (рис. 6) и общие деформации (рис. 7).

В результате моделирования выявлено, что при работе описанной системы с участием ПС образуются горизонтальные и вертикальные деформации массива грунта, вследствие чего одна из выносных опор теряет устойчивость и вызывает перемещения на 500 мм. Установка крана возможна на площадке с уклоном не более 5 % (3°). Следовательно, в данном случае максимально возможное отклонение одной из выносной опоры составит не более 400 мм.

Для обеспечения устойчивости ПС потребуется увеличение площади опоры установкой бетонных аэродромных гладких плит (ПАГ) с габаритами 6000 × 2000 × 140 мм под инвентарные подкладки 1500 × 1500 × 250 мм. Тогда картина деформаций изменится (рис. 8).

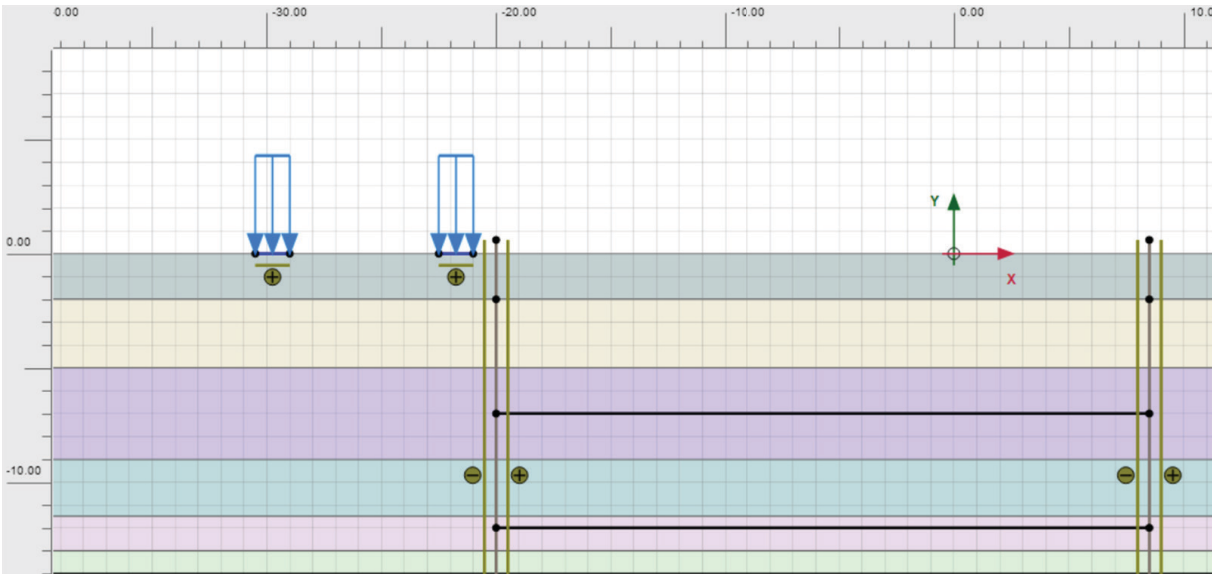


Рис. 4. Расчетная схема для исследования с помощью программного комплекса PLAXIS 2D применения подъемных средств при разработке котлована
Fig. 4. Calculation scheme for the study of lifting devices application during excavation using the PLAXIS 2D software package

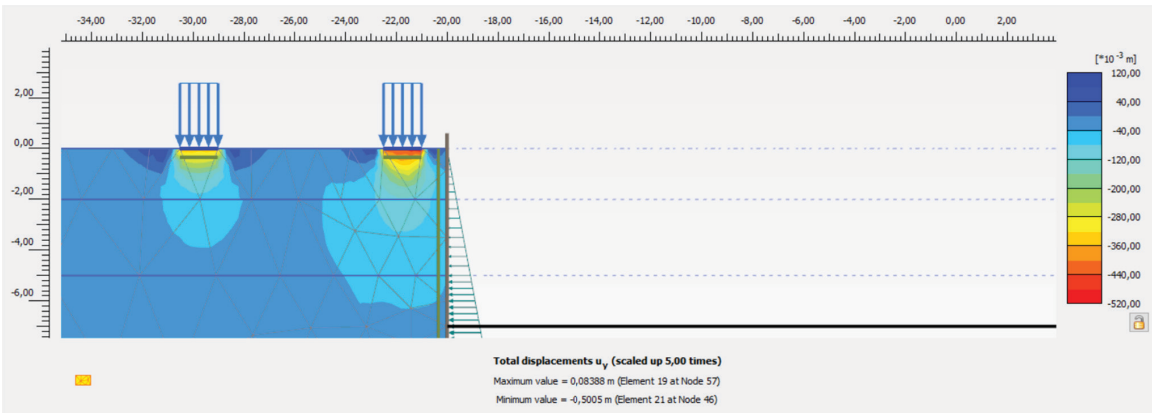


Рис. 5. Эпюра вертикальных перемещений
Fig. 5. Vertical displacement diagram

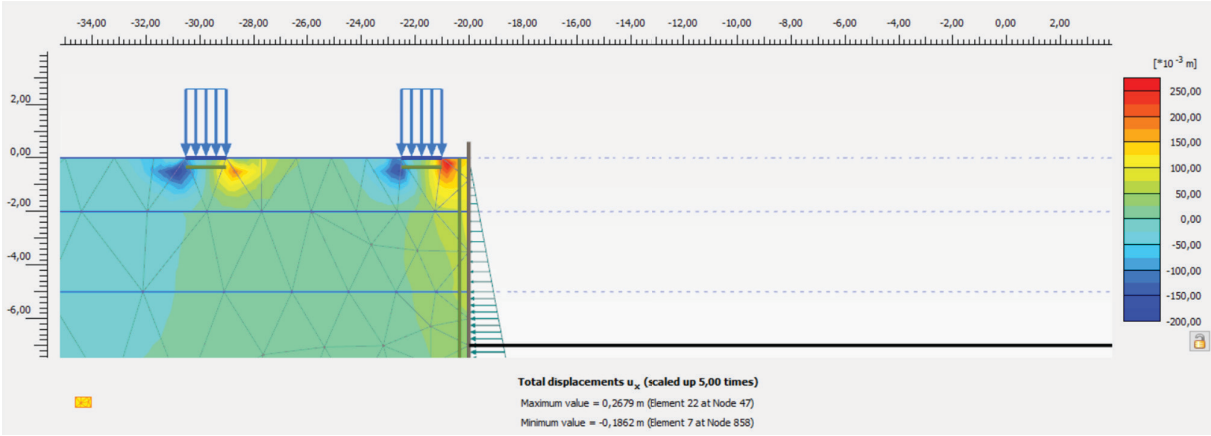


Рис. 6. Эпюра горизонтальных перемещений

Fig. 6. Horizontal displacement diagram

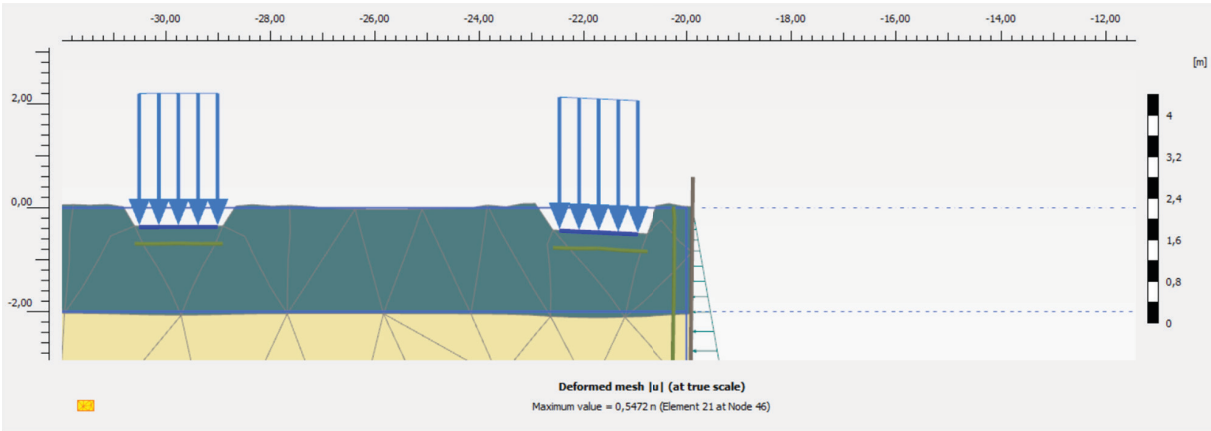


Рис. 7. Эпюра общих деформаций

Fig. 7. Total deformation diagram

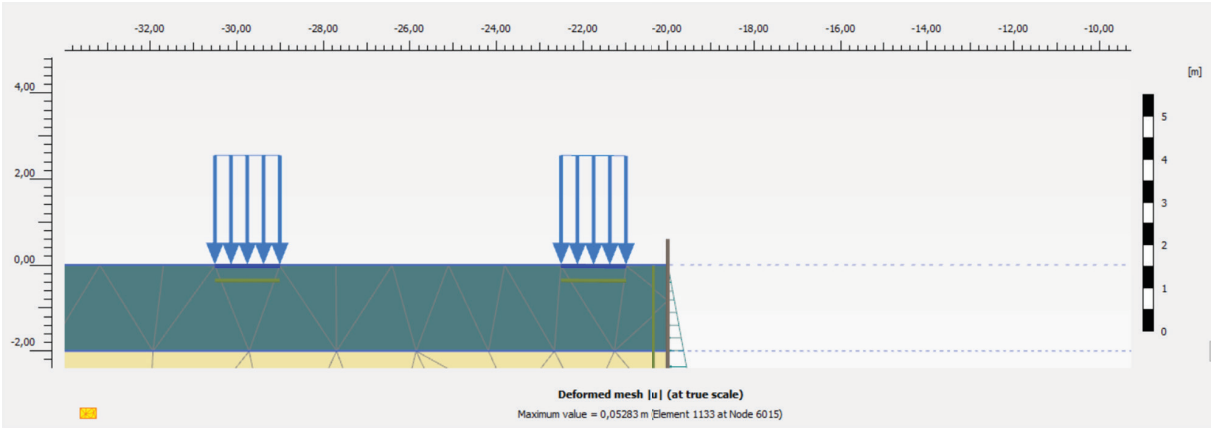


Рис. 8. Эпюра общих деформаций при использовании ПАГ

Fig. 8. Total deformation diagram for the use of PAG slabs

Ввиду распределения нагрузки, равной 78 т, на жесткую плиту 6×2 м максимальная деформация массива под выносной опорой уменьшилась до 50 мм, однако на практике не всегда имеется возможность установки дополнительных бетонных плит. В случае их отсутствия обязательным мероприятием

является подготовка площадки под установку крана посредством замены верхнего слоя насыпного грунта на более плотный, имеющий более высокий модуль деформации. Например, это может быть песок средней крупности с обязательным послойным уплотнением. Коэффициент уплотнения — не менее 0,95.

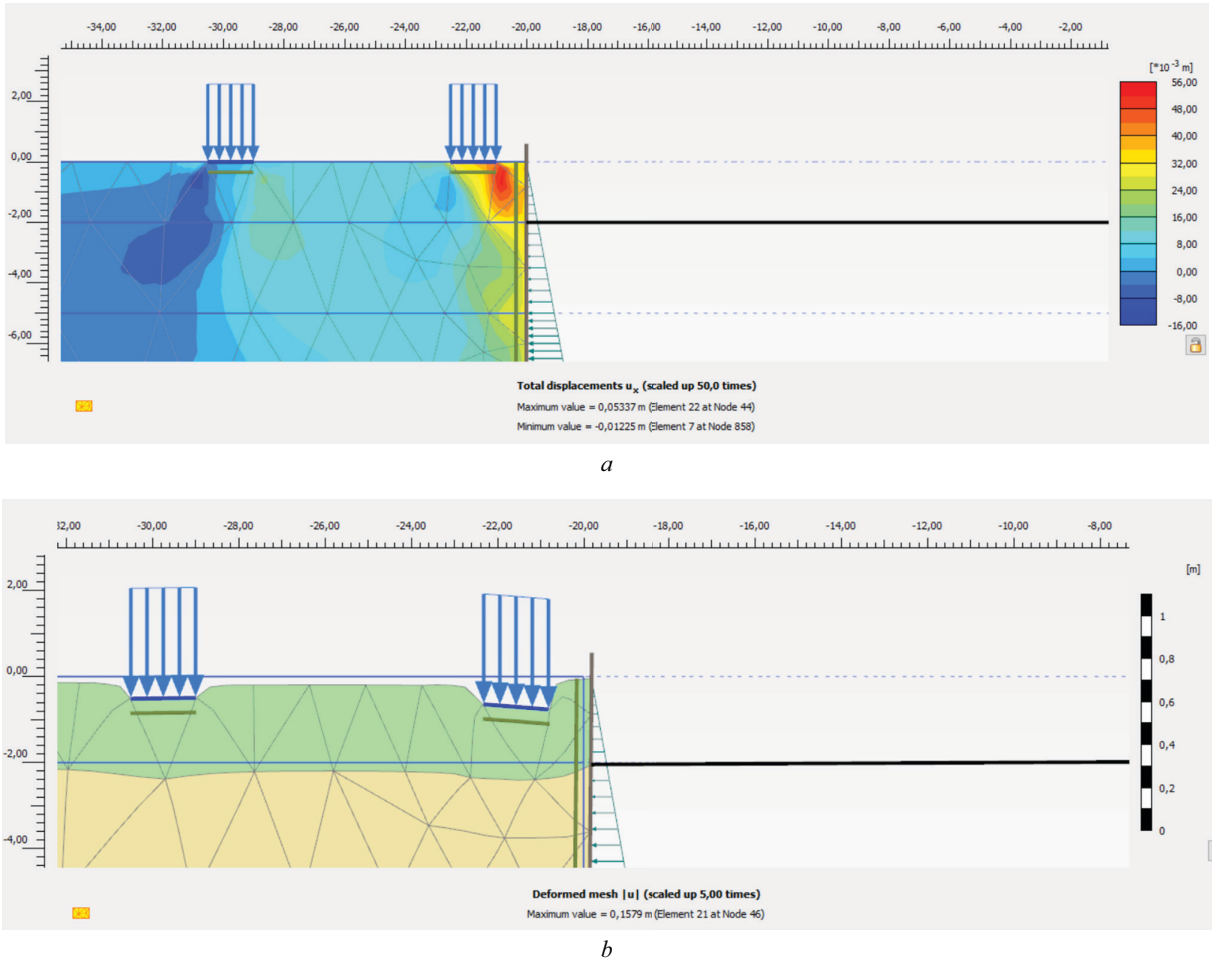


Рис. 9. Эпюры горизонтальных перемещений (а) и общих деформаций (b) при устройстве верхнего яруса распорной системы с использованием инвентарных плит $1,5 \times 1,5$ м

Fig. 9. The diagram of horizontal displacements (a) and total deformation diagram (b) during the construction of the top tier of the spacing system using inventory slabs 1.5×1.5 m

Табл. 2. Рекомендации по минимальному безопасному расстоянию при установке ПС вблизи котлованов с устройством ограждения «консольного типа» («стена в грунте», забирка между металлических труб, шпунт Ларсена)

Table 2. Recommendations on the minimum safety distance for installation of the lifting device near excavations with “cantilever type” fencing (“slurry wall”, barrier between metal pipes, Larssen sheet pile)

Минимальное расстояние от края ограждения до оси приложения нагрузки, м Minimum distance from the edge of the fence to the axis of load application, m	Самоходный автокран грузоподъемностью, т Mobile truck crane with lifting capacity, tons		
	100	150	200
На насыпном грунте при использовании ПАГ On bulk soil when using PAG slabs	1,5	1,5	1,5
На подготовленной площадке при использовании инвентарных подкладок On the prepared site using inventory pads	4,0	4,0	5,0

Кроме того, немаловажным фактором служит расстояние от опор до края ограждения котлована. В зависимости от технических характеристик ПС указанное расстояние выбирается индивидуально в зависимости от каждого конкретного случая. Однако зачастую площадка в стесненных условиях имеет ограниченное пространство. В этом случае

необходим анализ, учитывающий несущую способность стенок котлована. По результатам исследования при близком расположении вертикальной нагрузки к краю ограждения, не имеющего верхнего яруса на уровне 2–4 м, возникают большие горизонтальные деформации массива, ведущие к обрушению стенок котлована. Тогда требуется усиление

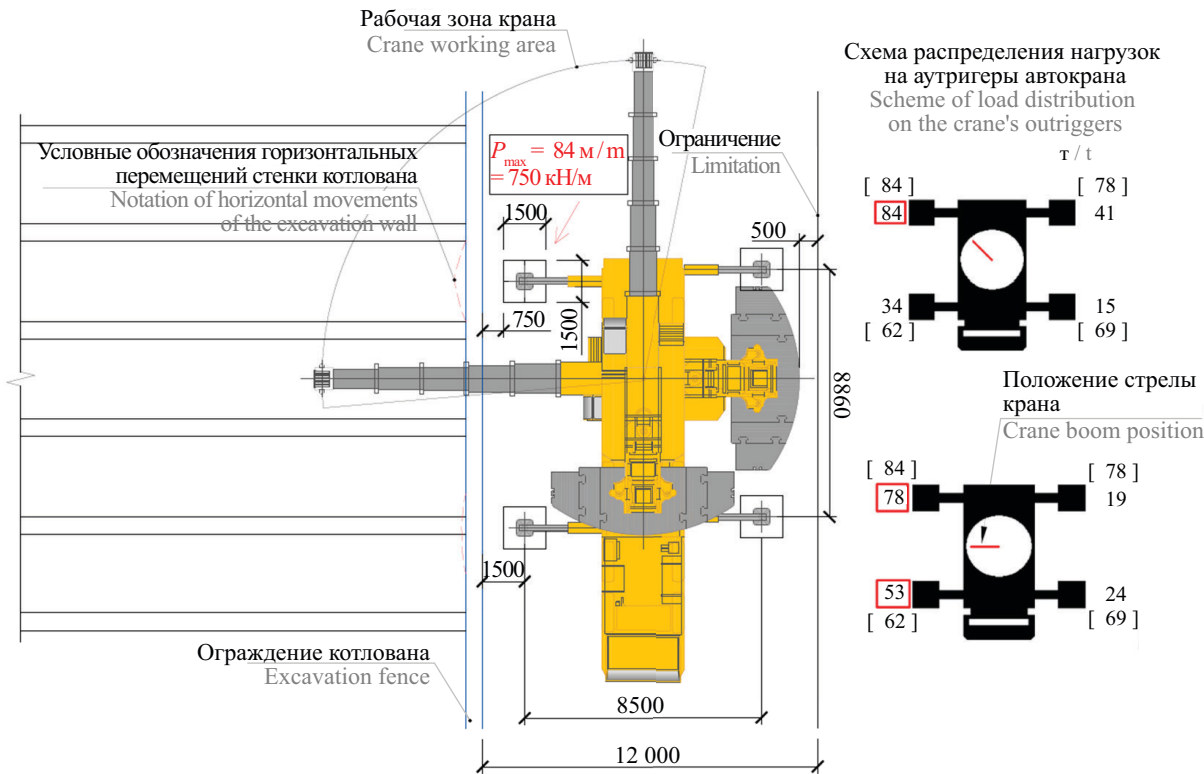


Рис. 10. Схема размещения ПС относительно распорных труб. Вид сверху

Fig. 10. Layout of the lifting device with respect to the spacing pipes. Top view

верхней части ограждения с помощью дополнительных распорных труб.

При устройстве верхнего яруса распорных труб горизонтальные смещения (рис. 9, а) существенно уменьшаются (до 50 мм) и не влияют на устойчивость ПС в рабочем положении (рис. 9, б).

Расчеты для двух площадок на территории г. Москвы показали, что большее влияние на ре-

зультат расчета устойчивости ПС вблизи котлованов оказывают поверхностные слои грунтов, а нижележащие слои важны для проектирования непосредственно ограждения котлована, а не решения задачи.

Результаты 2D-моделирования свидетельствуют, что установка ПС грузоподъемностью 100–200 т и более вблизи котлованов с ограждением «консольного типа» на неподготовленной площадке не допускается ввиду больших горизонтальных напряжений со стороны грунтового массива. Решением такой задачи является укрепление откоса или смещение ПС на безопасное расстояние (табл. 2).

Расположение ПС близ прилегающего опорного контура также влияет и на существующее запроектированное положение распорных труб котлована. Для моделирования этой задачи с помощью ПК PLAXIS 3D, позволяющего рассматривать пространственную задачу, в качестве исходных данных (стесненные условия, инженерно-геологические характеристики, параметры ограждения котлована, нагрузки от ПС) приняты уже описанные ранее.

Для решения новой задачи разместим один из аутригеров крана между распорными трубами (рис. 10). Исследуем, насколько изменится момент, действующий на ограждение, относительно соседнего и насколько критично такое расположение спецтехники.

Модель и расчетная схема показаны на рис. 11.

Результаты численных расчетов приведены на рис. 12.

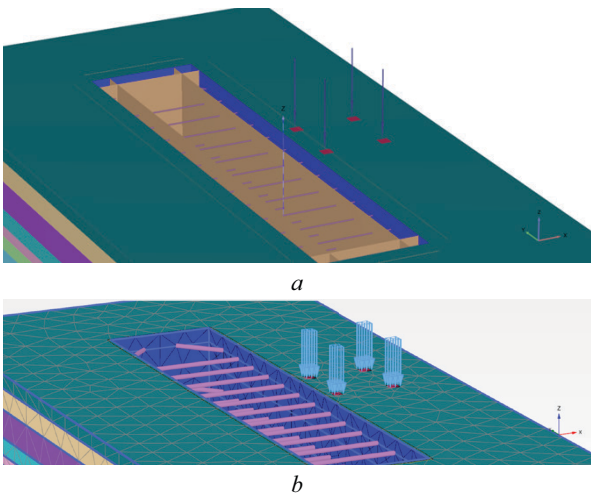


Рис. 11. Общий вид модели в PLAXIS 3D (а) и общая расчетная схема (б) в виде конечно-элементной сетки

Fig. 11. General view of the model in PLAXIS 3D (a) and general calculation scheme (b) in the form of finite element mesh

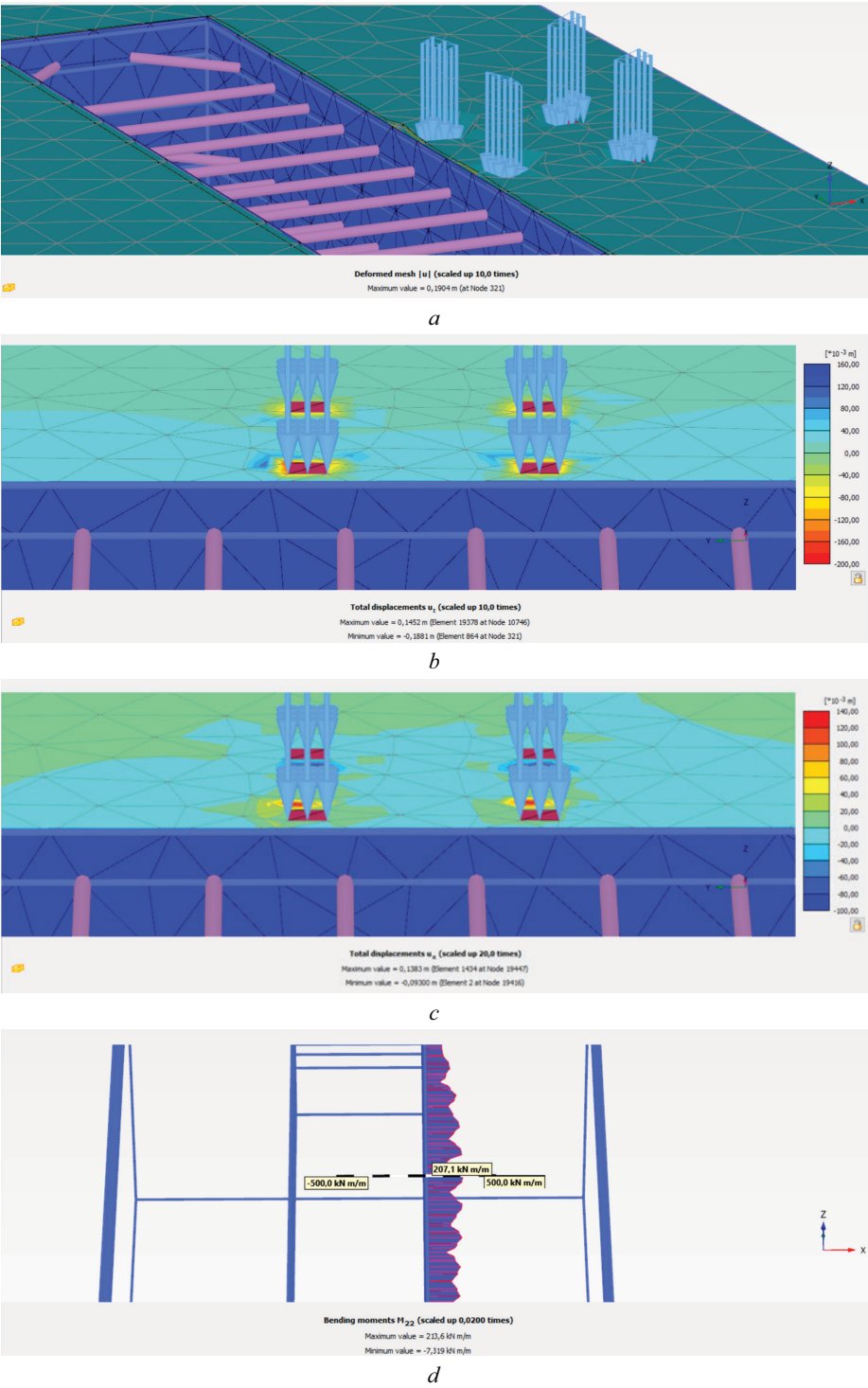


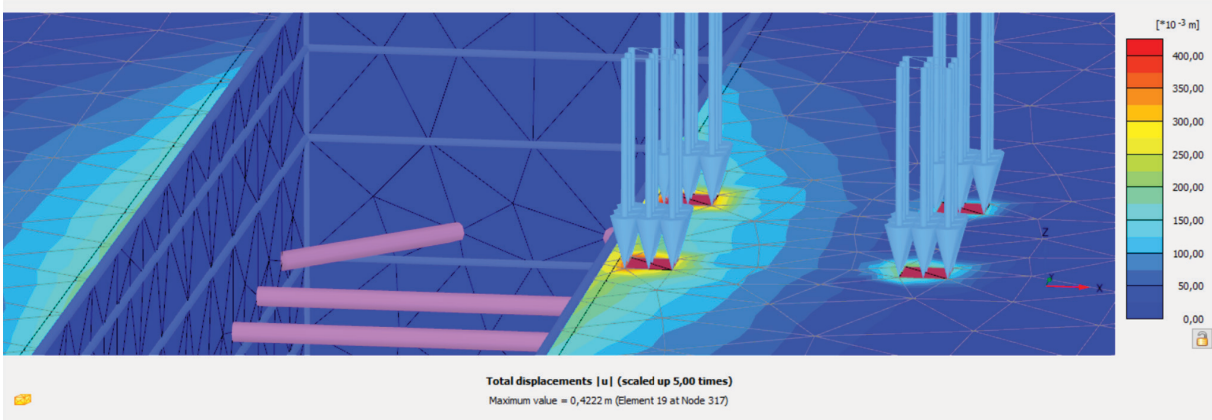
Рис. 12. Результаты численных расчетов: *a* — максимальное перемещение 19 см; *b* — изополя вертикальных перемещений массива грунта при полном нагружении 750 кН; *c* — изополя горизонтальных перемещений; *d* — изгибающий момент ограждения котлована («стена в грунте» $t = 400$ мм) в зоне нагружения

Fig. 12. Results of numerical calculations: *a* — maximum displacement of 19 cm; *b* — isopoles of vertical displacements of the soil mass at total loading of 750 kN; *c* — the same horizontal displacements; *d* — bending moment of the excavation enclosure (“slurry wall” $t = 400$ mm) in the loading zone

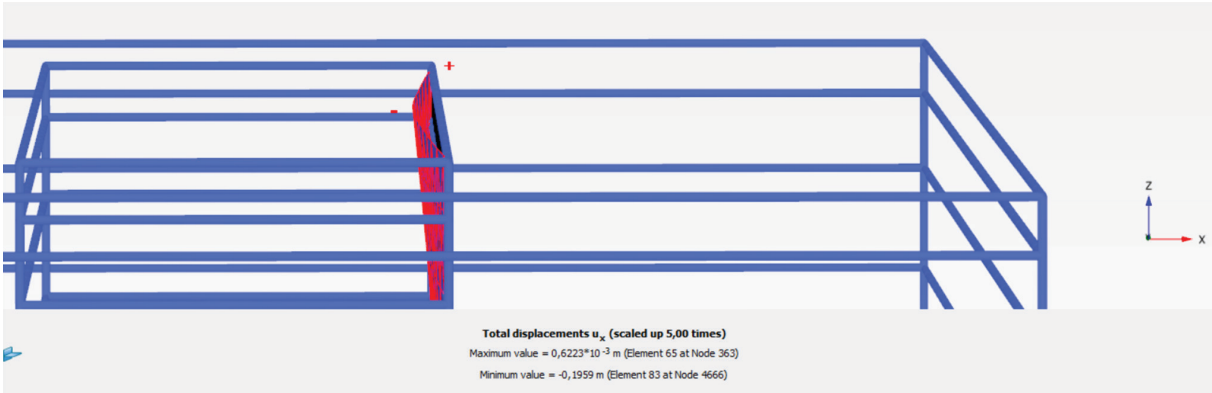
При установке ПС грузоподъемностью до 200 т вблизи ограждений котлована, выполненных толщиной 400 мм, марка бетона В30; при устройстве распорной системы из стальных труб сечением $420 \times 8 \dots 630 \times 8$ мм (в ходе исследований были смо-

делированы несколько типов) выбор расположения силовых опор относительно труб не имеет значения.

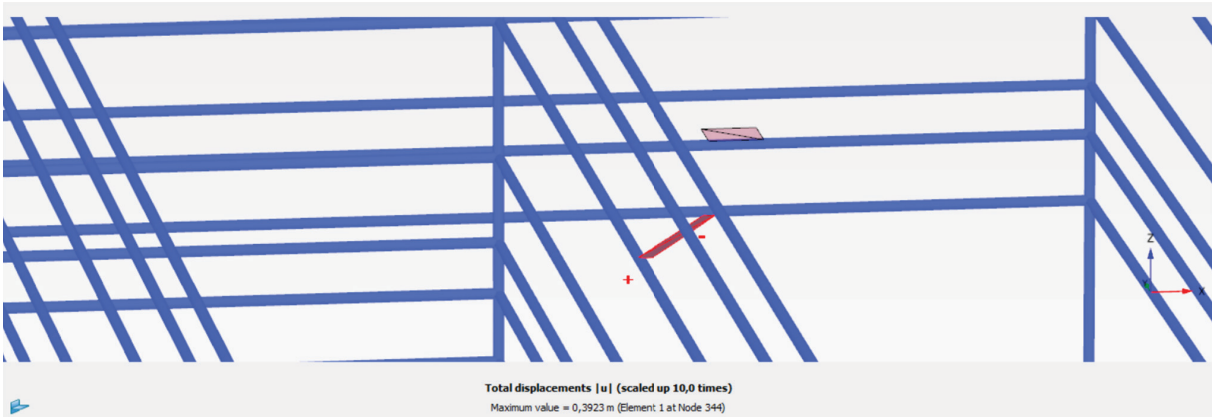
Полученные результаты показывают, что при нагружении с внешней стороны бровки котлована горизонтальные перемещения не критические и меньше вер-



a



b



c

Рис. 13. Результаты численного моделирования для нагружения краном LTM 1250-6.1, нагрузка 970 кН: *a* — изополя общих перемещений; *b* — горизонтальные перемещения ограждения котлована $U_{x(max)} = 19,6$ см; *c* — полное перемещение нагруженной плиты $U_{x(max)} = 39,2$ см

Fig. 13. Results of numerical modelling for loading by crane LTM 1250-6.1, load 970 kN: *a* — isopoles of total displacements; *b* — horizontal displacements of the excavation fence $U_{x(max)} = 19.6$ cm; *c* — total displacement of the loaded slab $U_{x(max)} = 39.2$ cm

тикальных. Следовательно, ограждение, не имеющее дополнительный ярус жесткости, обладает необходимой несущей способностью, достаточной для исключения обрушения. Однако для уменьшения вертикальных перемещений до 50–100 мм рекомендуется:

- использовать плиты ПАГ, увеличивающие площадь опирания в 5–6 раз и, соответственно, уменьшающие точечную нагрузку;

- заменять насыпной, рыхлый грунт, имеющий плохие прочностные показатели, на более твердый грунт, с обязательным послойным уплотнением с коэффициентом не менее 0,95.

Для определения критических показателей, при которых расположение ПС недопустимо, исследуем ПС грузоподъемностью 250 т и более. Расположение инвентарных подкладок крана сместим

на расстояние 1,0 м от края ограждения. Результаты расчетов показаны на рис. 13.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенных теоретических исследований и анализа результатов численного расчета, выполненного в геотехнических ПК PLAXIS 2D и PLAXIS 3D соответственно в двухмерной и пространственной постановках, вытекают следующие основные выводы:

- ввиду отсутствия в нормативных источниках рекомендаций по установке ПС вблизи котлована с ограждением актуален вопрос аналитического расчета для ситуаций, которые могут возникать при решении практических задач, в частности при разработке проекта производства работ;

- при проектировании нулевого цикла особое внимание необходимо уделять проработке условий на площадке в зоне котлована;

- особое и первостепенное влияние на результат расчета оказывают поверхностные слои грунтов (до 6 м). При установке ПС в условиях насыпного грунта природного происхождения обязательна его замена на более твердый или укладка дополнительных бетонных плит большей площади, уменьшающих непосредственную нагрузку на грунт;

- в особых случаях, при применении тяжелых автокранов грузоподъемностью 250 т и более, при условии, что ограждение выполнено без распорной системы («консольного типа»), проведение численного моделирования выполняется индивидуально.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голубев Г.Е. Метрополитены и город // Подземное пространство мира. 1995. № 2. С. 21–22.

2. Зерцалов М.Г., Конюхов Д.С., Меркин В.Е. Комплексное освоение подземного пространства. М. : Изд-во АСВ, 2015.

3. Конюхов Д.С. Основные принципы комплексного освоения подземного пространства при реновации жилой застройки Москвы // Метро и тоннели. 2019. № 2. С. 38–40. EDN HRVIXW.

4. Конюхов Д.С., Андреев А.А., Вдовин А.А., Петунина Д.С. Освоение подземного пространства — как решение градостроительных проблем // Метро и тоннели. 2017. № 3–4. С. 2–5. EDN ZJTQJQ.

5. Admiral H., Cornado A. Dankable and investment-ready underground space developments // 16th World Conference of the Associated Research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS 2018). 2018.

6. Tang H., Behbahani S.S., Iseley T. Utility tunnelling: A solution for managing the urban underground space in China // ITA — AITES World Tunnel Congress, 21–26 April 2018. 2018. Pp. 348–354.

7. Конюхов Д.С. Критериальный анализ современных технологий подземного строительства // Геотехника. 2021. Т. 13. № 1. С. 40–55. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-40-54. EDN QGZRZK.

8. Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства. М. : Изд-во АСВ, 2017. 160 с.

9. Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Конюшков В.В., Осокин А.И., Сапин Д.А. Проектирование

и устройство подземных сооружений в открытых котлованах. М. : Изд-во АСВ, 2017. 256 с.

10. Atzl G. Challenges and solutions for large scale tunnelling in urban environment // Proceeding of the World Tunnel Congress 2017. Surface challenges — Underground solutions. 2017.

11. Perminov N., Perminov A. Geotechnical protection of engineering infrastructure objects in large cities under intense anthropogenic impact and long term operation // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 455–460. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.720. EDN WIJHUR.

12. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А., Конюхов Д.С. Исследование влияния разработки котлована на окружающую застройку // Вестник МГСУ. 2014. № 6. С. 77–86. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.6.77-86

13. Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Шевченко С.М. Организация безопасной эксплуатации подземных сооружений на строительном предприятии // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-прак. конф. 2018. С. 73–77. EDN YRIXLC.

14. Эпов Д.А. Использование приборов и устройств безопасности на подъемных сооружениях // Вестник современных исследований. 2021. № 3–5 (41). С. 12–15. EDN LUJGBD.

15. Yang T., Sun N., Chen H., Fang Y. Motion trajectory-based transportation control for 3-D boom cranes: Analysis, design, and experiments // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. Vol. 66. Issue 5. Pp. 3636–3646. DOI: 10.1109/tie.2018.2853604

Поступила в редакцию 7 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 28 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 26 ноября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Надежда Сергеевна Никитина — кандидат технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; Национальный исследовательский Московский государственный строитель-

ный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1138117; ORCID: 0000-0002-8309-8511; nsnikitina@mail.ru;

Николай Константинович Мельников — магистрант кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; k.wethepeople@yandex.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

REFERENCES

1. Golubev G.E. *Metropolitans and the City. Underground Space of the World*. 1995; 2:21-22. (rus.).
2. Zertsalov M.G., Konyukhov D.S., Merkin V.E. *Comprehensive Development of Underground Space*. Moscow, ASV Publishing House, 2015. (rus.).
3. Konyukhov D.S. Basic principles of comprehensive development of underground space in the renovation of residential areas in Moscow. *Metro and Tunnels*. 2019; 2:38-40. EDN HRVIXW. (rus.).
4. Konyukhov D.S., Andreev A.A., Vdovin A.A., Petunina D.S. Development of Underground Space as a Solution to Urban Planning Problems. *Metro and Tunnels*. 2017; 3-4:2-5. EDN ZJTGQJ. (rus.).
5. Admiral H., Coronado A. Dankable and investment-ready underground space developments. *16th World Conference of the Associated Research Centers for the Urban Underground Space (ACUUS 2018)*. 2018.
6. Tang H., Behbahani S.S., Iseley T. Utility tunnelling: A solution for managing the urban underground space in China. *ITA — AITES World Tunnel Congress, 21–26 April 2018*. 2018; 348-354.
7. Konyukhov D.S. *Criteria analysis of contemporary technologies of underground construction. Geotechnics*. 2021; 13(1):40-55. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-40-54. EDN QGZRZK. (rus.).
8. Mangushev R.A., Nikiforova N.S. *Technological Settlements of Buildings and Structures in the Zone of Influence of Underground Construction*. Moscow, ASV Publishing House, 2017; 160. (rus.).
9. Mangushev R.A., Nikiforova N.S., Konyushkov V.V., Osokin A.I., Sapin D.A. *Design and Construction of Underground Structures in Open Excavations*. Moscow, ASV Publishing House, 2017; 256. (rus.).
10. Atzl G. Challenges and solutions for large scale tunnelling in urban environment. *Proceeding of the World Tunnel Congress 2017. Surface challenges — Underground solutions*. 2017.
11. Perminov N., Perminov A. Geotechnical protection of engineering infrastructure objects in large cities under intense anthropogenic impact and long term operation. *Procedia Engineering*. 2016; 165:455-460. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.720. EDN WIJHUR.
12. Zertsalov M.G., Kazachenko S.A., Konyukhov D.S. Investigation of foundation pit excavation influence on adjacent buildings. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 6:77-86. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.6.77-86 (rus.).
13. Pachurin G.V., Filippov A.A., Shevchenko S.M. Organization of safe operation of lifting structures at a construction enterprise. *Current Issues of Technical Sciences in Modern Conditions : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2018; 73-77. EDN YRIXLC. (rus.).
14. Epov D.A. Use of safety devices and devices on lifting structures. *Bulletin of Modern Research*. 2021; 3-5(41):12-15. EDN LUJGBD. (rus.).
15. Yang T., Sun N., Chen H., Fang Y. Motion trajectory-based transportation control for 3-D boom cranes: Analysis, design, and experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019; 66(5):3636-3646. DOI: 10.1109/tie.2018.2853604. (rus.).

Received September 7, 2023.

Adopted in revised form on September 28, 2023.

Approved for publication on November 26, 2023.

BIONOTES: Nadezhda S. Nikitina — Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1138117, ORCID: 0000-0002-8309-8511; nsnikitina@mail.ru;

Nikolay K. Melnikov — master's student of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; k.wethepeople@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all of the authors made equivalent contributions to the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.*