



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 4, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.04

УДК 624.159.2

ВЛИЯНИЕ УСТРОЙСТВА КОТЛОВАНА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ СТЕНКАМИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАССМАТРИВАЕМЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

А.З. Тер-Мартirosян¹, Р.Х. Черкесов², И.О. Исаев², В.С. Гришин²

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

²Мосинжпроект, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 21 сентября 2021
Принята: 29 октября 2021
Опубликована: 28 декабря 2021

Ключевые слова:

стена в грунте, глубокий котлован, открытый способ, геотехнический прогноз, оценка влияния, зона интенсивных деформаций, защитные мероприятия, пассивная защита, поперечные стенки, внутренние перегородки, метод конечных элементов, трехмерное моделирование.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время продолжается реализация крупнейших инфраструктурных проектов столицы. Развитие и модернизация городского транспорта сопровождается большим количеством глубоких открытых выработок, зачастую расположенных в сложившихся районах Москвы с развитой застройкой. Стандартные проектные решения не всегда способны обеспечить необходимую безопасность близстоящих зданий, поэтому в ряде случаев необходимы дополнительные меры. В данной работе рассмотрено строительство котлована монтажно-щитовой камеры с применением защитных мероприятий в виде дополнительных поперечных стен. Для оценки эффективности, сопоставления результатов и рассмотрения особенностей данного решения была проведена серия расчетов в пространственной и плоской постановке. В рамках двухмерной задачи была предложена методика учета данных мероприятий, показывающая близкие значения эффективности по отношению к 3D-модели. Также было рассмотрено влияния ползучести бетона путем использования начального модуля упругости E_b и модуля деформации $E_{b,t}$. По результатам расчетов пространственной схемы введение дополнительных стенок снизило горизонтальные перемещения ограждения на 29 %, дополнительные осадки фундаментов на 55 %, учет ползучести, в свою очередь, увеличил горизонтальные перемещения

© Тер-Мартirosян Армен Заенович – доктор технических наук, профессор, директор, e-mail: gic-mgsu@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8787-826X.

Черкесов Рустам Хасанович – генеральный директор, e-mail: Cherkesov.R@mosinzhprouekt.ru, ORCID: 0000-0001-8126-5622.

Исаев Илья Олегович – руководитель отдела оценки влияния и противоаварийных мероприятий, e-mail: IsaevIO@mosinzhprouekt.ru, ORCID: 0000-0002-9822-1455.

Гришин Владислав Сергеевич – главный специалист, e-mail: Grishin.VS@mosinzhprouekt.ru, ORCID: 0000-0002-1221-225X.

Armen Z. Ter-Martirosyan – Doctor of Science in Technics, Professor, Director, e-mail: gic-mgsu@mail.ru. ORCID: 0000-0001-8787-826X.

Rustam H. Cherkesov – general director, e-mail: IsaevIO@mosinzhprouekt.ru. ORCID: 0000-0002-9822-1455.

Ilya O. Isaev – head of the Impact Assessment and Emergency Response Department, e-mail: IsaevIO@mosinzhprouekt.ru. ORCID: 0000-0002-9822-1455.

Vladislav S. Grishin – senior specialist, e-mail: Grishin.VS@mosinzhprouekt.ru. ORCID: 0000-0002-1221-225X.

стены в грунте на 37 %, но снизил значение изгибающего момента на 30 %. Однако фактические значения дополнительных деформаций фундаментов все равно оказались меньше прогнозируемых. Таким образом, стоит отметить, что данный вид мероприятий является эффективным способом пассивной защиты окружающей застройки, реализуемый еще на этапе проектных решений, полноценный эффект которого четко отражается в результатах расчетов пространственных моделей и натурных данных мониторинга.

© ПНИПУ

THE IMPACT OF THE FOUNDATION PIT WITH ADDITIONAL TRANSVERSE WALLS ON THE SURROUNDING BUILDING AND THE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE MEASURES UNDER CONSIDERATION

A.Z. Ter-Martirosian¹, R.H. Cherkesov², I.O. Isaev², V.S. Grishin²

¹Moscow State (National Research) University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

²Mosinzhproekt, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 21 September 2021

Accepted: 29 October 2021

Published: 28 December 2021

Keywords:

slurry wall, deep excavation, open method, geotechnical forecast, impact assessment, zone of intense deformations, protective measures, passive protection, transverse walls, internal partitions, finite element method; three-dimensional modeling.

ABSTRACT

Currently, the implementation of the largest infrastructure projects of the capital continues. The development and modernization of urban transport is accompanied by a large number of deep open workings, often located in established areas of Moscow with developed buildings. Standard design solutions are not always able to provide the necessary safety of nearby buildings, so in some cases additional measures are needed. In this paper, the construction of a pit of an assembly-panel chamber with the use of protective measures in the form of additional transverse walls is considered. To evaluate the effectiveness, compare the results and consider the features of this solution, a series of calculations were carried out in spatial and flat formulation. Within the framework of a two-dimensional task, a methodology for accounting for these measures was proposed, showing close efficiency values in relation to the 3D model. The effects of concrete creep were also considered by using the initial modulus of elasticity E_b and the modulus of deformation $E_{b,T}$. According to the results of calculations of the spatial scheme, the introduction of additional walls reduced the horizontal movements of the fence by 29 %, additional precipitation of foundations by 55 %, creep accounting, in turn, increased the horizontal movements of the SVG by 37 %, but reduced the value of the bending moment by 30 %. However, the actual values of additional deformations of the foundations still turned out to be less than predicted. Thus, it is worth noting that this type of measures is an effective way of passive protection of the surrounding development, implemented at the stage of design decisions, the full effect of which is clearly reflected in the results of the calculation of spatial models and in-situ monitoring data.

© PNRPU

Введение

Формирование удобной и комфортной среды в крупных городах и мегаполисах сопровождается активным использованием подземного пространства. Развитие метрополитена, строительство и реконструкция объектов с развитой подземной частью, устройство новых и переоборудование старых инженерных сетей – решению всех этих задач сопутствуют большие объемы открытых выработок, устройство которых должно обеспечивать наименьшее воздействие на существующие здания и сооружения.

Отечественные и зарубежные коллеги имеют большой объем накопленного опыта в реализации проектов любой степени сложности. Множество объектов возведено в сложной инженерно-геологической и гидрогеологической ситуации, в условиях повышенной

плотности и близости окружающей застройки. Зачастую реализация этих проектов возможна только с применением различных видов защитных активных и пассивных мероприятий.

В стесненных городских условиях выемка грунта из котлованов осуществляется под защитой различных ограждающих конструкций с применением всевозможных распорных систем. Выбор конструктивного типа ограждения зависит от глубины котлована, близости существующей застройки и коммуникаций к месту работ, инженерно-геологических и гидрогеологических условий участка строительства.

В отечественной строительной практике устройства котлованов чаще всего применяются ограждение из труб с различной частотой погружения, шпунтовое ограждение котлована и «стена в грунте» траншейного типа [1]. Наиболее универсальным с точки зрения сопоставления технических показателей является третий из вышеупомянутых типов ограждения [2]. «Стена в грунте» имеет ряд преимуществ, связанных с минимизацией шума и вибрации при устройстве ограждающих конструкций, влиянием на окружающую застройку, высокой жесткостью и прочностью, возможностью применения в любых грунтовых и гидрогеологических условиях [2; 3], а также совмещением функции ограждения котлована с несущими конструкциями возводимого сооружения [3; 4].

Н.С. Никифоровой экспериментальным путем установлено [5], что при глубине открытых выработок более 10 м в сложных грунтовых условиях относительная величина горизонтальных перемещений ограждения котлованов может достигать 0,3–0,5 % от глубины котлована. Кроме того, авторы других работ зафиксировали, что, по результатам наблюдений, в слабых грунтах зона максимального горизонтального смещения располагается на участке 0,5–1,0 H_k от земной поверхности [6], а средняя величина горизонтальных смещений стены составляет 0,87 % от глубины котлована [7]. Данные значения перемещений могут привести не только к предельным деформациям зданий и сооружений, но и снижению эксплуатационной надежности самой ограждающей конструкции.

М.А. Безгоднов и С.В. Калошина [8] в процессе проектирования выяснили, что увеличение защемления ограждения от $1/6$ до $1,0 H_k$ снижает дополнительную осадку фундаментов на 60 %. Р.А. Мангушев и Д.А. Сапин в своей работе [9] с помощью метода конечных элементов определили, что увеличение величины заделки ограждения на длину более глубины котлована при любой его жесткости практически не приводит к снижению вертикальных перемещений массива грунта за пределами котлована, а увеличения толщины стены в разумных пределах иногда недостаточно для требуемой жесткости ограждения. Поэтому в отдельных случаях необходимо предусматривать разработку мероприятий по сохранности несущих конструкций зданий и сооружений, попадающих в зону интенсивных деформаций.

М.Г. Зерцалов и соавторы [10] провели исследование влияния нескольких факторов на дополнительную осадку здания и методом факторного анализа выяснили, что наибольшее воздействие оказывают расстояние от ограждения котлована до дома, глубина открытой выработки и модуль деформации массива грунта. Вместе с тем установлено, что на дополнительные перемещения соседней застройки также оказывают влияние технологические факторы, доля которых при устройстве траншейной «стены в грунте» может достигать 70 % [11], основными из них являются: расстояние между стеной и траншеей, размеры захватки, нагрузка под подошвой фундамента и плотность бентонитового раствора [12]. Согласно нормативной литературе (СП 248.1325800.2016) в наиболее распространенных условиях осадки от технологического воздействия при устройстве «стены в грунте» допус-

кается принимать как процент от прогнозируемых дополнительных деформаций, что для открытого способа работ составляет от 5 до 15 % в зависимости от грунтовых условий.

Интересным представляется исследование В.С. Поспехова [13], посвященное изучению углового эффекта котлована. Автором приводятся данные мониторинга, доказывающие влияние угловых зон, и рекомендуется трехмерная постановка задачи для возможности учета в геотехническом прогнозе вертикальной и горизонтальной жесткости конструкций ограждения. Наряду с этим тайваньскими учеными [16] подтверждено воздействие угловой зоны на перемещение ограждения, а также установлено, что длина этой зоны равняется ширине выемки.

Hsii-Sheng Hsieh и соавторы [17], рассматривая защитные мероприятия (введение контрфорсных участков, поперечных стен и цементацию дна котлована), также отмечают расхождение прогнозных и фактических деформация ограждения и связывают это с недоучетом трехмерного напряженного состояния.

Таким образом, оценка влияния строительства на окружающую застройку зависит от многих факторов и является актуальной и необходимой задачей, способной предотвратить потенциальные аварийные ситуации [14], связанные с многочисленными рисками, возникающими при проектировании и производстве строительно-монтажных работ [15].

Материалы и методы

В данной статье рассматривается строительство котлована монтажно-щитовой камеры открытым способом с применением защитных мероприятий в виде поперечных стен и влияние строительства на близрасположенное жилое здание.

Расчеты показали необходимость проектирования дополнительных мероприятий, поскольку прогнозные дополнительные деформации фундаментов здания превышали предельно допустимые значения.

Особенностью этого котлована стало устройство поперечных стен внутри сооружения для придания дополнительной жесткости системе ограждающих конструкций. По мере разработки грунта внутренние стены демонтируются с помощью алмазной фрезы. Такая технология должна обеспечить наименьшее влияние на объекты, попадающие в расчетную зону.

Размер котлована в плане $52,5 \times 25,6$ м, что является минимально достаточным для монтажа и старта тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК), используемого при строительстве данного участка. Глубина котлована составляет 19,9 м. Стены ограждения котлована заглублены на 19,0 м ниже отметки дна с заходом в слой глины, служащей водопором. Данное решение позволяет избежать притока грунтовых вод через дно котлована и отказаться от внешнего водопонижения, что, в свою очередь, ведет к уменьшению вероятности осадки поверхности территории, прилегающей к котловану.

Ограждающие конструкции котлована монтажной камеры «стена в грунте» траншейного типа толщиной 800 мм, из бетона класса В25. Совместно со стенами периметра котлована монтажно-щитовой камеры (МЩК) сооружаются две отсечные стенки без арматурных каркасов.

Стены котлована крепятся раскосами и расстрелами из металлических труб, через продольные пояса из пакетов двутавровых балок, по мере производства земляных работ. Количество ярусов крепления пять. Сечения распорного крепления представлены на рис. 1, 2. После разработки грунта до отметки дна котлована возводится железобетонный

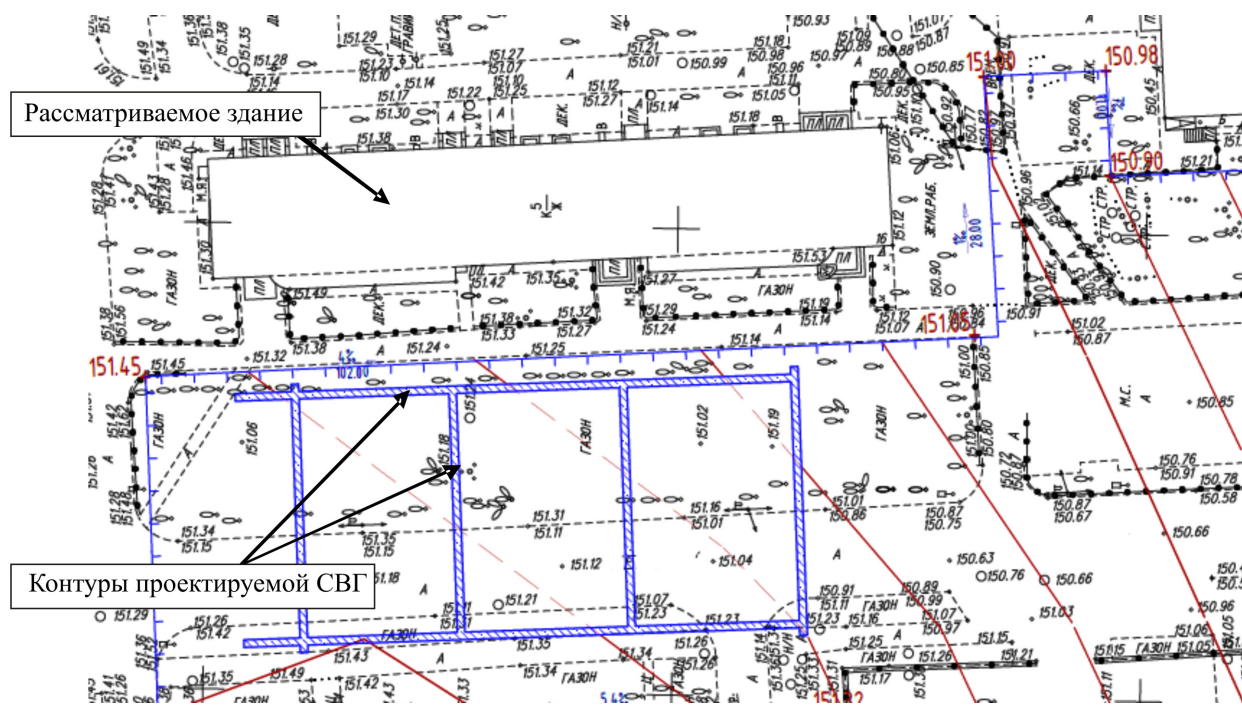
В непосредственной близости, на расстоянии 13 м, от открытой выработки находится пятиэтажный жилой дом с габаритными размерами 72,5 × 12,5 м, имеющий вытянутую прямоугольную конфигурацию в плане. Дом построен по проекту типовой серии I-511 в 1966 г.

Фундамент состоит из сплошных фундаментных блоков на фундаментной подушке, глубиной заложения 0,61 м от уровня чистого пола подвального этажа и 2,2 м от поверхности земли.

Здание имеет работоспособную II категорию технического состояния.

Массив грунта, вмещающий котлован, состоит из следующих грунтов в порядке залегания (механические характеристики представлены по основным ИГИ):

- ◆ 1-40 – техногенный грунт: песок средней крупности, с прослоями суглинка и супеси ($E = 13$ МПа, $\varphi = 30^\circ$; $c = 1$ кПа);
- ◆ 15-5-3-1 – песок коричневый, средней крупности, глинистый, плотный, малой и средней степени водонасыщения ($E = 39$ МПа, $\varphi = 36^\circ$; $c = 1$ кПа);
- ◆ 24-3-3 – суглинок коричневый, песчанистый, с линзами песка, с дресвой, гравием и щебнем, тугопластичный, прослоями – мягкопластичный ($E = 22$ МПа, $\varphi = 28^\circ$; $c = 45$ кПа);
- ◆ 25-5-5-1 – песок коричневатого-серый, пылеватый, глинистый, с глинистыми прослоями, плотный, водонасыщенный ($E = 28$ МПа, $\varphi = 32^\circ$; $c = 6$ кПа);
- ◆ 25-5-4-1 – песок мелкий, с глинистыми прослоями, средней плотности, водонасыщенный ($E = 40$ МПа, $\varphi = 35^\circ$; $c = 4$ кПа);
- ◆ 39-2-3 – глины пылеватые, с прослоями песка, тугопластичные ($E = 25$ МПа, $\varphi = 25^\circ$; $c = 47$ кПа);
- ◆ 41-2-2 – глины пылеватые, слюдяные, полутвёрдые ($E = 22$ МПа, $\varphi = 16^\circ$; $c = 90$ кПа).



В рамках данной статьи с целью определения эффективности и рассмотрения особенностей работы дополнительных поперечных стен, были смоделированы восемь расчетных схем. Рассматривались трехмерные схемы с учетом защитных мероприятий и без них, а также аналогичные двумерные схемы для возможности сравнения и оценки применимости трехмерной и двумерной постановки. Защитные мероприятия в 2D задаче учитывались путем увеличения жесткости в зоне пассивного отпора, для этого грунту на глубину дополнительных поперечных стен был назначен линейно-упругий материал со средневзвешенным значением модуля деформации грунта и бетона, значение которого составило 1804 МПа. Также, согласно указанию СП 63.13330.2018, были рассмотрены аналогичные расчетные схемы, но с учетом ползучести бетона. Ползучесть учитывалась путем снижения начального модуля упругости бетона согласно рекомендациям свода правил. Таким образом, для ограждения были приняты следующие значения: начальный модуль упругости $E_b = 30\ 000$ МПа и модуль деформации с учетом ползучести $E_{b,\tau} = 10\ 714$ МПа.

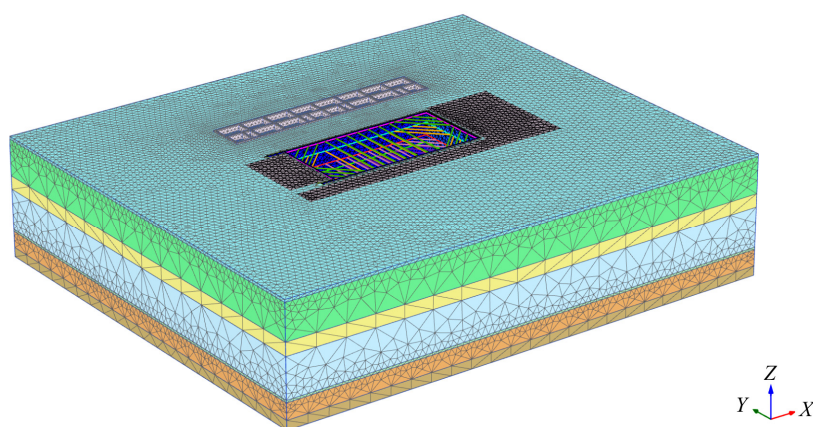


Рис. 4. Трехмерная расчетная схема
Fig. 4. Three-dimensional design scheme

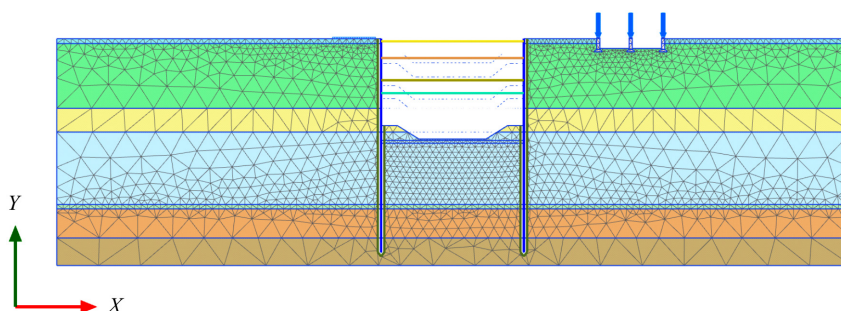


Рис. 5. Двумерная расчетная схема
Fig. 5. Two-dimensional design scheme

Следует отметить, что при рассмотрении геометрических характеристик системы ограждающих конструкций половины котлована (рис. 6) с усилением и без момент инерции I_v с учетом дополнительных стен возрастает в 1,66 раз с 924,7 до 1534,5 м⁴, что говорит о значительном повышении жесткости ограждения и эффективности данных мероприятий. Также, допуская работу «стены в грунте» в горизонтальной плоскости за счет обвязочной балки, распределительных поясов и сдвиговой жесткости шпонок между захватками, вве-

дённые дополнительные стенки будут являться дополнительными точками опоры, за счет чего пролет снижается в три раза, что также сказывается на системной жесткости котлована и перемещениях СВГ.

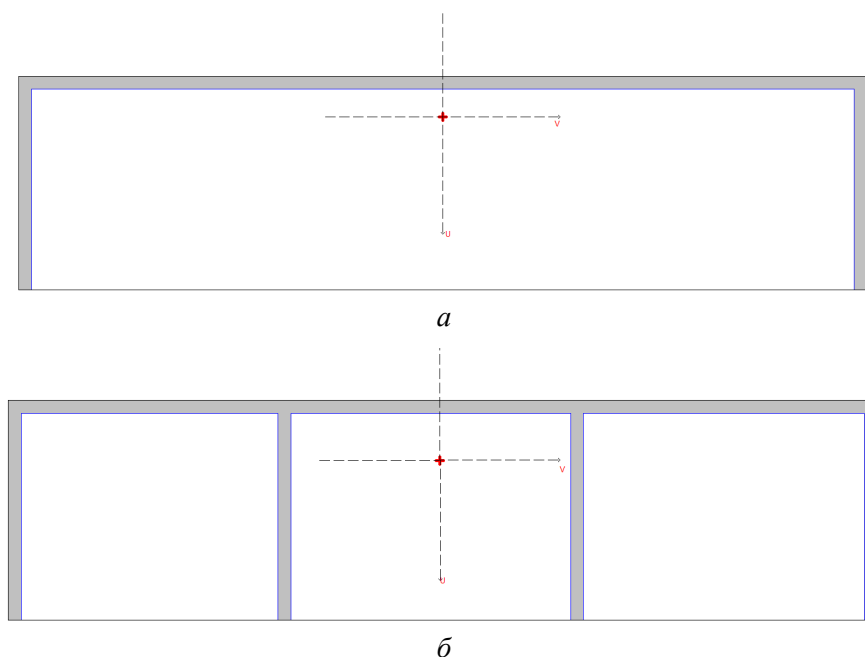


Рис. 6. Схема к определению момента инерции половины котлована:
 a – без поперечных стенок; b – с поперечными стенками

Fig. 6. Scheme for determining the moment of inertia of half of the pit:
 a – without transverse walls; b – with transverse walls

Моделирование расчетных схем производилось в программном комплексе PLAXIS [18] с использованием упругопластической модели грунта Hardening soil [19], для которой были выполнены и обработаны специальные лабораторные испытания. К преимуществам данной модели относятся: нелинейное поведение, зависимость жесткости от уровня напряжения, упрочнение при сдвиге и изотропном сжатии, возможность учета исторического напряженного состояния. Однако данная модель также не лишена недостатков, по опыту использования модель зависима от глубины расчетной области. Поэтому нижняя граница расчетной схемы была ограничена в соответствии с рекомендациями СП 249.1325800.2016.

Ограждающие конструкции котлована моделировались ортотропными, неспособными воспринимать изгибающий момент в горизонтальной плоскости, однако учитывалась сдвиговая жесткость в горизонтальном направлении (по конструктивным особенностям «стены в грунте»).

Расчетные схемы моделировались в соответствии со следующими основными этапами:

- определение напряженно-деформированного состояния грунтового массива с учетом существующего дома;
- выполнение работ по устройству ограждения «стена в грунте» и приложение равномерно распределённой нагрузки от техники и складирования материалов на бровку котлована. Обнуление деформаций;
- ярусная разработка грунта, устройство распорного крепления и демонтаж поперечных стен (в соответствующей схеме);
- бетонирование временного лотка и деактивация последнего яруса крепления.

Результаты

Таким образом, по результатам расчетов были определены дополнительные осадки фундаментов (рис. 7), деформации стен и возникающие изгибающие моменты. Результаты расчетов представлены в таблице.

Результаты расчетов

Results of calculation

Расчетная схема	Максимальное горизонтальное перемещение СВГ, мм	Глубина расположения точки максимального смещения в долях глубины котлована, H_k	Изгибающий момент в стене со стороны котлована на последней фазе, кНм	Осадка здания, мм					
				прогнозируемая	предельно допустимая	фактическая, по данным мониторинга			
3D	Без поперечных стенок, с модулем упругости E_b	52,9 (0,27 % H_k)	0,92	1582	22,7	30	3		
	С поперечными стенками, с модулем упругости E_b	36,5 (0,18 % H_k)	0,87	1452	10,1				
	Без поперечных стенок, с модулем деформации $E_{b,\tau}$	70,5 (0,36 % H_k)	0,92	1129	32,1				
	С поперечными стенками, с модулем деформации $E_{b,\tau}$	51,7 (0,26 % H_k)	0,87	998	14,7				
2D	С модулем упругости E_b	50,7 (0,26 % H_k)	0,92	1487	29,2			30	3
	С учетом поперечных стенок и модулем упругости E_b	28,4 (0,15 % H_k)	0,87	1146	15,2				
	С модулем деформации $E_{b,\tau}$	67,4 (0,34 % H_k)	0,91	867	38,4				
	С учетом поперечных стенок и модулем деформации $E_{b,\tau}$	37,9 (0,20 % H_k)	0,85	664	19,7				

Рассмотрев полученные показатели, можно сделать следующие выводы (значения в скобках соответствуют плоской задаче):

1. Введение поперечных стенок снизило дополнительные деформации фундаментов на 55 (48) %.

2. С учетом отсечных стен горизонтальные перемещения СВГ снизились на 29 (44) % и составили 0,18 (0,15) % H_k и 0,26 (0,20) % H_k для начального E_b и с учетом ползучести $E_{b,\tau}$ модулей соответственно.

3. Максимальные горизонтальные деформации отмечены на глубине 0,87 и 0,92 H_k для котлована с мероприятиями и без них соответственно.

4. Введение дополнительных стен снизило изгибающий момент в СВГ на 10 (23) %.

5. Использование модуля деформации с учетом ползучести $E_{b,\tau}$ увеличило горизонтальные перемещения в среднем на 37 (33) %, однако снизило изгибающий момент в СВГ на 30 (42) %.

6. Фактическая осадка составила 10 % относительно предельно допустимой, но расчетные значения составили 33,6 (50,1) % для E_b и 49 (65,7) % для $E_{b,\tau}$.

7. Предложенная методика учета дополнительных поперечных стенок в плоской постановке дает близкие значения эффективности данных мероприятий по отношению к трехмерной задаче. В то же время осадки фундаментов, рассчитанные в плоской постановке, несколько больше из-за недоучета пространственной жесткости.

8. 3D-модели без мероприятий дают хорошую сходимость в деформациях СВГ с 2D-схемами, равную порядка 95 %.

9. Прогнозируемая осадка превышает фактическую, даже без учета технологического воздействия.

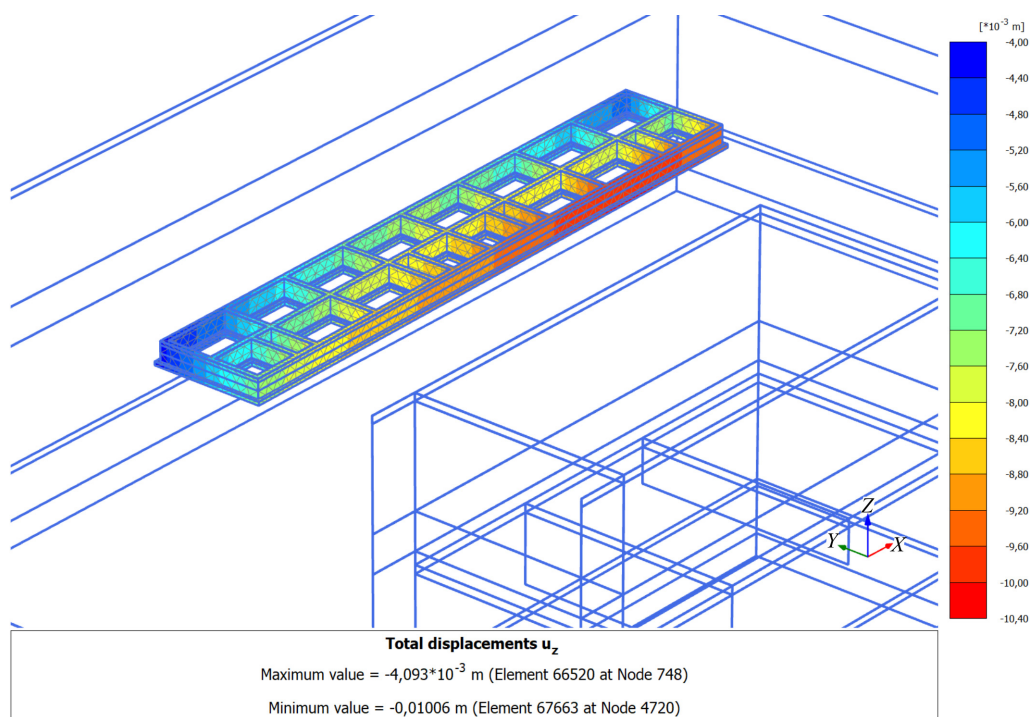


Рис. 7. Дополнительные вертикальные перемещения здания с учетом усиления
Fig. 7. Additional vertical movements of the building with reinforcement

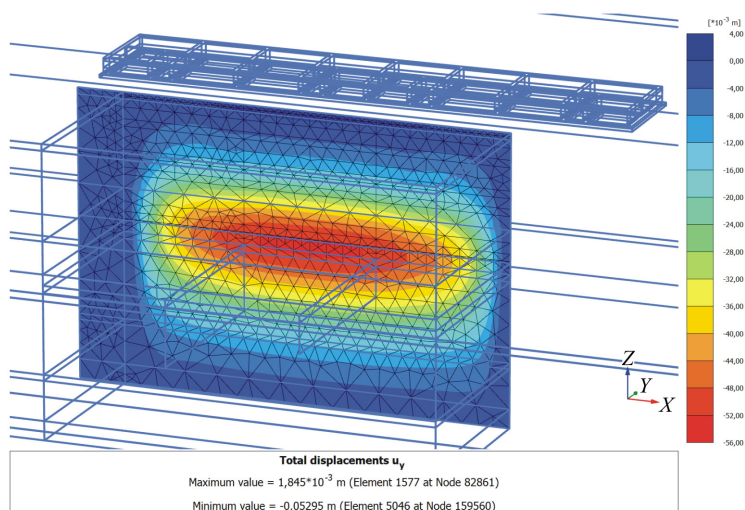
Обсуждение

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы:

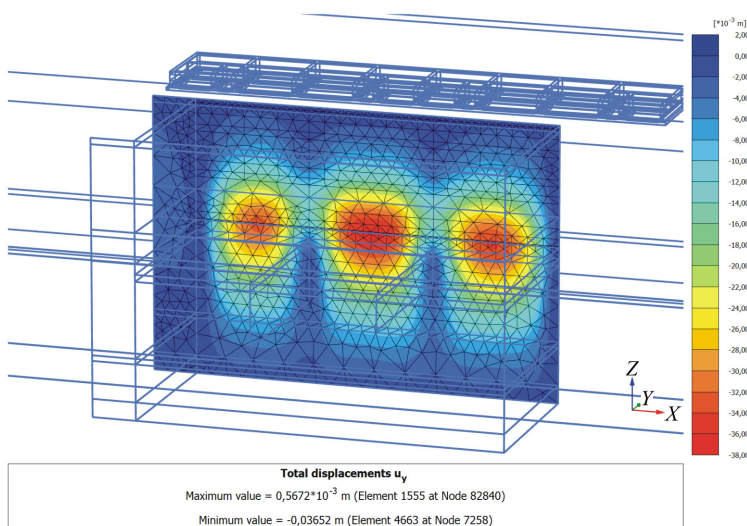
◆ Устройство дополнительных поперечных стен является эффективным, защитным мероприятием, позволяющим реализовать пассивную защиту еще на этапе проектирования.

◆ Наилучшая сходимость результатов отмечается в трехмерной модели с использованием начального модуля упругости бетона E_b , поэтому использование модуля деформации бетона с учетом ползучести требует дальнейшего изучения.

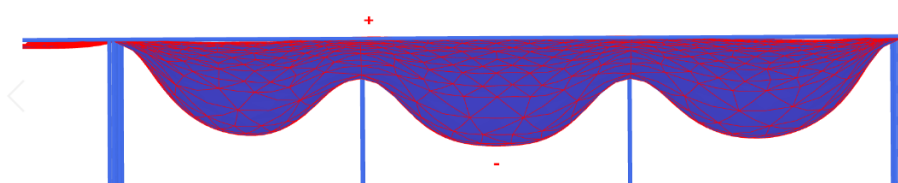
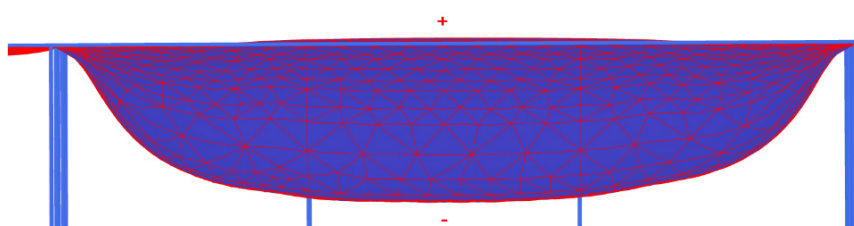
◆ Разница фактических и прогнозируемых дополнительных деформаций объясняется возможными несовершенствами расчётной схемы, результатов инженерно-геологических и инженерно-геотехнических изысканий, а также зависимостью используемой модели от глубины расчетной области. Вследствие совершенного типа «стены в грунте» глубина расчетной схемы не могла быть ограничена в полной мере. Поэтому для лучшей сходимости результатов возможно использование модели Hardening soil small с учетом жесткости при малых деформациях [20].



a



б



г

Рис. 8. Горизонтальные перемещения «стены в грунте»: *a* – без поперечных стенок; *б* – с поперечными стенками, *в* – дополнительные деформации без поперечных стенок; *г* – дополнительные деформации с поперечными стенками

Fig. 8. Horizontal movements of the «slurry wall»: *a* – without transverse walls, *б* – with transverse walls, *в* – additional deformations without transverse walls; *г* – additional deformations with transverse walls

♦ Характер горизонтальных перемещений ограждения говорит об участии горизонтальной жесткости в «системной» работе ограждения (рис. 8), поэтому полноценный и корректный учет углового эффекта и данных мероприятий возможен только с использованием трехмерных моделей.

♦ На основе анализа результатов трехмерных и двумерных расчетов подтверждена возможность расчета ограждающих конструкций котлованов с соотношением длины к ширине более 2/1 в рамках задачи плоской деформации, однако деформации окружающей застройки все равно несколько завышаются из-за недоучета пространственной жесткости.

♦ Полноценный учет проектных решений данной типа невозможен в рамках плоской задачи, однако предложенная методика позволяет быстро оценить эффективность данных мероприятий на этапе предварительных расчетов, и также может быть полезна проектным организациям, не имеющим соответствующего трехмерного программного обеспечения.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Знаменский В.В., Чунюк Д.Ю., Морозов Е.Б. Устройство ограждающих систем котлованов в стесненных городских условиях // Жилищное строительство. – 2012. – № 9. – С. 60–62.
2. Петрухин В.П., Колыбин И.В., Разводовский Д.Е. Ограждающие конструкции котлованов, методы строительства подземных и заглубленных сооружений // Российская архитектурно-строительная энциклопедия / Абрамчук В.П. и др. – 2008. – С. 212–219.
3. К вопросу исследования «стены в грунте» в качестве ограждающей и несущей конструкции зданий и сооружений / В.В. Конюшков, Н.Ю. Уразаева, В.М. Кириллов, Л.Н. Кондратьева // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 1 (66). – С. 68–74.
4. Осокин А.И., Денисова О.О., Шахтарина Т.Н. Технологическое обеспечение подземного строительства в условиях городской застройки // Жилищное строительство. – 2014. – № 3. – С. 16–24.
5. Никифорова Н.С. Корректировка метода расчета осадок зданий при подземном строительстве на основе экспериментальных исследований // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4–2. – С. 293–300.
6. Деменков П.А., Беляков Н.А., Очкуров В.И. Прогноз безопасности влияния строительства полузаглубленных подземных сооружений на окружающую среду // Известия ТулГУ. – 2017. – № 4. – С. 311–324.
7. Деменков П.А., Голдобина Л.А., Трушко О.В. Метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте» // Записки Горного института. – 2018. – Т. 233. – С. 480–486. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.480
8. Безгодков М.А., Калошина С.В. Оценка влияния устройства глубокого котлована на дополнительную осадку окружающей застройки // Вестник ПНИПУ. – 2012. – № 1.
9. Мангушев Р.А., Сапин Д.А. Учет жесткости конструкции «стена в грунте» на осадку соседних зданий // Жилищное строительство. – 2015. – № 9. – С. 3–7.

10. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А., Колюхов Д.С. Исследование влияния разработки котлована на окружающую застройку // Вестник МГСУ. – 2014. – № 6. – С. 77–86.
11. Сапин Д.А. Осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте» // Жилищное строительство. – 2015. – № 4. – С. 8–13.
12. Шулятьев О.А., Минаков Д.К. Технологические осадки при устройстве стены в грунте траншейного типа // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 41–50. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.05
13. Поспехов В.С. Исследование углового эффекта конструкции ограждения котлована // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 238–248.
14. Колыбин И.В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях // Развитие городов и геотехническое строительство. Труды международной конференции по геотехнике / под ред. В.М. Улицкого. – 2008. – С. 89–124.
15. Чунюк Д.Ю. Оценка и управление рисками при строительстве подземных сооружений открытым способом // Вестник МГСУ. – 2009. – № 3. – С. 120–123.
16. L.W. Wong, I.T. Pratama, C.R. Chou. Corner Effects on Wall Deflections in Deep Excavations // The HKIE Geotechnical Division 40th Annual Seminar. – 2020.
17. On the system stiffness of deep excavation in soft clay / Hsii-Sheng Hsieh, Yan-Hong Huang, Wei-Ting Hsu, and Louis Ge // Journal of GeoEngineering. – 2017. – Vol. 12, № 1. – P. 21–34.
18. Gouw Tjie-Liong. Common mistakes on the application of Plaxis 2D in analyzing excavation problems // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Vol. 9, № 21. – P. 8291–8311.
19. Schanz T., Vermeer P.A. and Bonnier P.G. The hardening soil model: formulation and verification // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. – 1999. – P. 281–296. DOI: 10.1201/9781315138206-27
20. Rafał F. Obrzud. On the use of the Hardening Soil Small Strain model in geotechnical practice // Numerics in geotechnics and structures. – 2010.

References

1. Znamenskiy V.V., Chunyaev D.Y., Morozov E.B. Arrangement of enclosing systems of foundation pits in cramped urban conditions. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2012, no. 9, pp. 60–62.
2. Petrukhin V.P., Kolybin I.V., Razvodovsky D.Y. Enclosing structures of pits, methods of construction of underground and buried structures. *Russian architectural and construction encyclopedia*. Eds. Abramchuk V.P. et al., 2008, pp. 212–219.
3. Konyushkov V.V., Urazaeva N.Y., Kirillov V.M., Kondratyeva L.N. To the question of the study of the “wall in the ground” as the enclosing and supporting structure of buildings and structures. *Bulletin of civil engineers*, 2018, no. 1 (66), pp. 68–74.
4. Osokin A.I., Denisova O.O., Shakhtarina T.N. Technological support of underground construction in urban development. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2014, no. 3, pp. 16–24.
5. Nikiforova N.S. Correction of the method for calculating the settlement of buildings in underground construction on the basis of experimental research. *Vestnik MGSU*, 2010, no. 4–2, pp. 293–300.

6. Demenkov P.A., Belyakov N.A., Ochkurov V.I. Forecast of the safety impact of construction of semi-buried underground structures on the environment. *Izvestiya TulGU*, 2017, no. 4, pp. 311–324.
7. Demenkov P.A., Goldobina L.A., Trushko O.V. Method for predicting the deformation of the earth's surface during the construction of pits in dense urban development using the “wall in the ground” method. *Zapiski Gornogo institute*, 2018, vol. 233, pp. 480–486. <https://doi.org/10.31897/PMI.2018.5.480>.
8. Bezgodov M.A., Kaloshina S.V. Assessment of the influence of the device of a deep pit on the additional draft of the surrounding buildings. *Vestnik PNRPU*, 2012, no. 1.
9. Mangushev R.A., Sapin D.A. Consideration of the stiffness of the structure “wall in the ground” for the draft of neighboring buildings. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2015, no. 9, pp. 3–7.
10. Zertsalov M.G., Kazachenko S.A., Konyukhov D.S. Investigation of the impact of excavation on the surrounding buildings. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 6, pp. 77–86.
11. Sapin D.A. Sediments of the foundations of neighboring buildings during the construction of a trench “wall in the ground”. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2015, no. 4, pp. 8–13.
12. Shulyat'ev O.A., Minakov D.K. Technological precipitation during the construction of a wall in a trench-type soil. *Bulletin of PNRPU. Construction and architecture*, 2017, vol. 8, iss. 3, pp. 41–50. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.3.05>.
13. Pospekhov V.S. Investigation of the angular effect of the construction of the pit fence // *Bulletin of PNRPU. Construction and architecture*, 2014, no. 2, pp. 238–248.
14. Kolybin I.V. Lessons from emergency situations during construction of pits in urban conditions. *Urban Development and Geotechnical Construction. Proceedings of the International Conference on Geotechnics*. Ed. V.M. Ulitsky. 2008, pp. 89–124.
15. Chunyuk D.Y. Assessment and management of risks in the construction of underground structures by open method. *Vestnik MGSU*, 2009, no. 3, pp. 120–123.
16. L.W. Wong, I.T. Pratama, C.R. Chou. Corner effects on wall deflections in deep excavations. *The HKIE Geotechnical Division 40th Annual Seminar*, 2020.
17. Hsii-Sheng Hsieh, Yan-Hong Huang, Wei-Ting Hsu, and Louis Ge. On the system stiffness of deep excavation in soft clay. *Journal of GeoEngineering*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 21–34.
18. Gouw Tjie-Liong. Common mistakes on the application of Plaxis 2D in analyzing excavation problems. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2014, vol. 9, no. 21, pp. 8291–8311.
19. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The hardening soil model: formulation and verification, *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, 1999, pp. 281–296. <https://doi.org/10.1201/9781315138206-27>.
20. Rafał F. Obrzud. On the use of the Hardening Soil Small Strain model in geotechnical practice. *Numerics in geotechnics and structures*, 2010.