

УДК 624.131

Р.А. МАНГУШЕВ, д-р техн. наук (npk-cgt@yandex.ru), Д.А. САПИН, инженер (Dmitry-spbgasu@yandex.ru)  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
(190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4)

## Определение и обоснование параметров безопасного устройства траншейной стены в грунте в плотной застройке

*Приводятся результаты работы по определению и обоснованию параметров стены в грунте, служащей ограждением котлована под трехэтажный подземный паркинг, позволяющие сохранить дополнительные осадки зданий соседней застройки в пределах, допустимых действующими нормами. При этом оценивались как осадки, вызванные разработкой котлована, так и технологические осадки, вызванные процессом устройства траншейной стены в грунте. На основе вариантных расчетов разработаны практические рекомендации по проектированию и расчету ограждений глубоких котлованов, разрабатываемых с использованием метода «top-down» в условиях плотной существующей застройки и инженерно-геологических условий центральной части Санкт-Петербурга, характеризующихся мощной толщей сильно деформируемых озерно-ледниковых грунтов.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, «стена в грунте», дополнительная осадка соседней застройки, технологическая осадка, глубокий котлован, «top-down», расчет ограждения котлована.

R.A. MANGUSHEV, Doctor of Sciences (Engineering) (npk-cgt@yandex.ru), D.A. SAPIN, Engineer (Dmitry-spbgasu@yandex.ru)  
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2-nd Krasnoarmeiskaya Street, 190005 St. Petersburg, Russian Federation)

### Determination and Substantiation of Parameters of Safe Arrangement of a Trench Slurry Wall in Dense Building Development

Results of the work for determining and substantiating parameters of a slurry wall operating as an excavation wall under the three-storey underground parking, which make it possible to maintain additional precipitations of buildings of the neighboring development to the extent permitted under applicable regulations, are presented. In this case, both precipitations caused by excavation of pit and technological precipitations caused by the process of construction of the trench slurry wall are evaluated. On the basis of variants calculations, practical recommendations for the design and calculation of deep excavation walls excavated with the use of the "top-down" method under conditions of the existing dense development and under engineering-geological conditions of the central part of St. Petersburg, which is characterized by the thick mass of highly deformable lake-glacial soils, have been developed.

**Keywords:** numerical simulation, slurry wall, additional precipitation of neighboring development, technological precipitation, deep excavation, "top-down", calculation of excavation wall.

Современные требования технических норм по обеспечению необходимого количества парковочных мест в жилых и административных зданиях, а также высотные регламенты, действующие в ряде мегаполисов, стимулируют устройство развитого подземного пространства под новыми или реконструируемыми сооружениями, расположенными в стесненных условиях центральной части городов [1].

Известно, что дополнительные вертикальные перемещения фундаментов существующих зданий при устройстве вблизи них новых подземных объемов зависят от горизонтальных деформаций ограждений котлованов [2, 3], которые в свою очередь пропорциональны изгибной жесткости ограждения. Ограждение котлованов, выполняемое по технологии траншейной «стены в грунте», обладает гораздо большей жесткостью по сравнению с другими типами ограждений, что позволяет выполнять глубокие котлованы в сложных инженерно-геологических условиях, характерных для центральной части Санкт-Петербурга, в непосредственной близости от зданий существующей застройки.

Технология траншейной «стены в грунте» заключается в том, что ограждения котлована возводятся в узких (0,4–1,2 м) и глубоких (иногда более 50 м) траншеях, вертикальные стенки которых удерживаются от обрушения давле-



Рис. 1. Инженерно-геологическое районирование Санкт-Петербурга по Л.Г. Заварзину. Разрезы по районам представлены на рис. 2

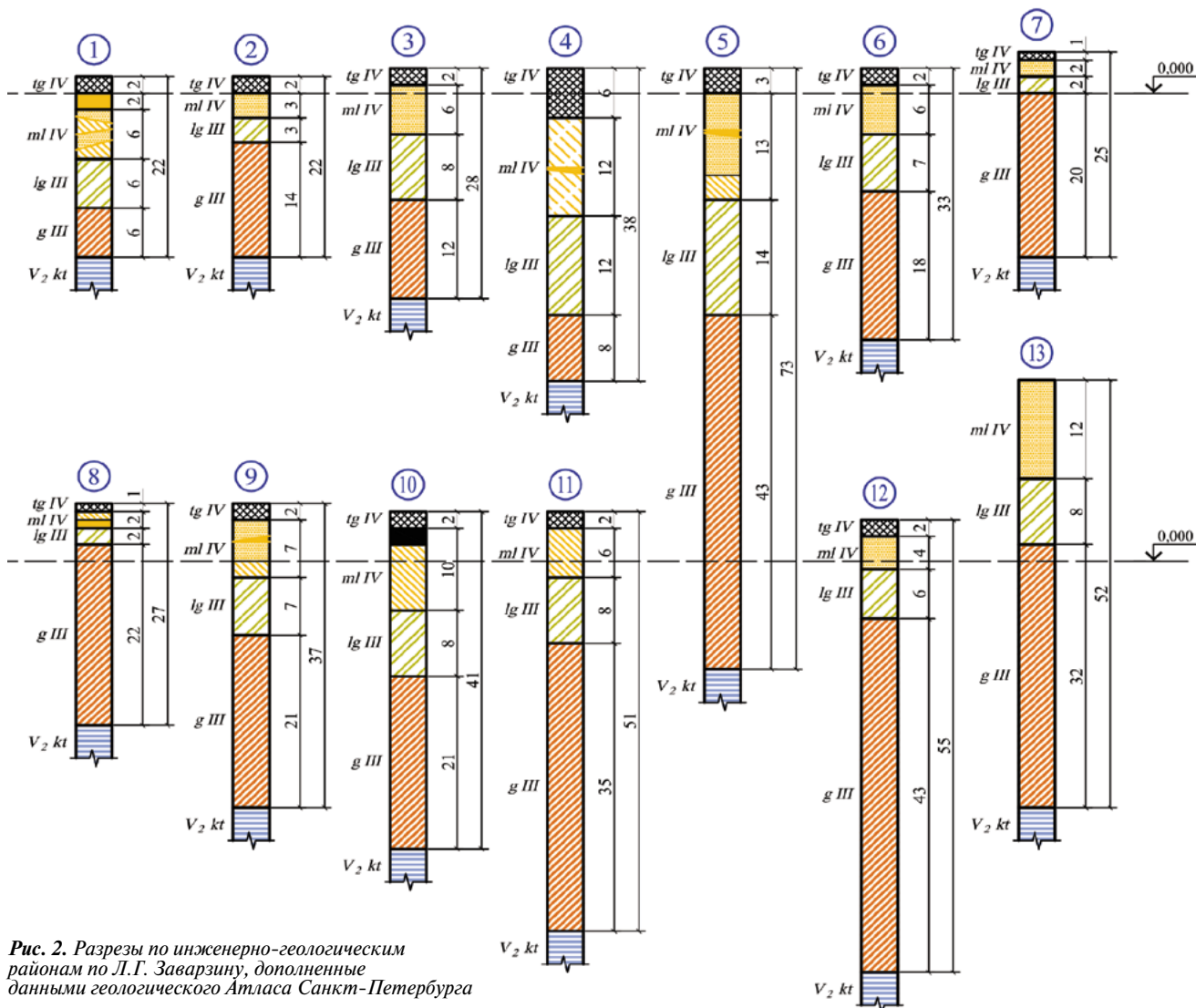


Рис. 2. Разрезы по инженерно-геологическим районам по Л.Г. Заварзину, дополненные данными геологического Атласа Санкт-Петербурга

нием глинистого раствора. При бетонировании глинистый раствор вытесняется за счет меньшей, чем у бетона, плотности. Устройство стены в грунте происходит отдельными захватками по 2–6 п. м траншеи [4, 5].

#### Разработка расчетной модели.

Численный анализ выполнен на основании вариантных расчетов в пространственной постановке в программном

комплексе PLAXIS 3D для решения трехмерных геотехнических задач.

Для создания конечно-элементной модели были использованы следующие исходные данные: инженерно-геологическое строение площадки; параметры соседней застройки; параметры нового здания.

Геологическое строение площадки для решения поставленной задачи было принято по данным исследований

Осредненные характеристики грунтов Санкт-Петербурга

Индекс	$V_{kt}$	$g_{III}$	$lg_{III}$	$ml_{IV}$
Характерный тип грунта	Твердые глины	Валунные суглинки тугопластичные	Ленточные мягкопластичные суглинки	От песков до суглинков, иногда с включениями органики
Естественная влажность, %	14	20	35	40
Объемная масса, кН/м³	22	21	19	18
Коэффициент пористости	0.5	0.53	0.85	1.08
Число пластичности	15	9	11	9
Показатель консистенции	-0.2	0.1	0.3	0.4
Модуль деформации, МПа	30	20	7.5	10
Угол внутреннего трения, град.	25	23	20	18
Удельное сцепление, кПа	45	40	15	20

Таблица 1



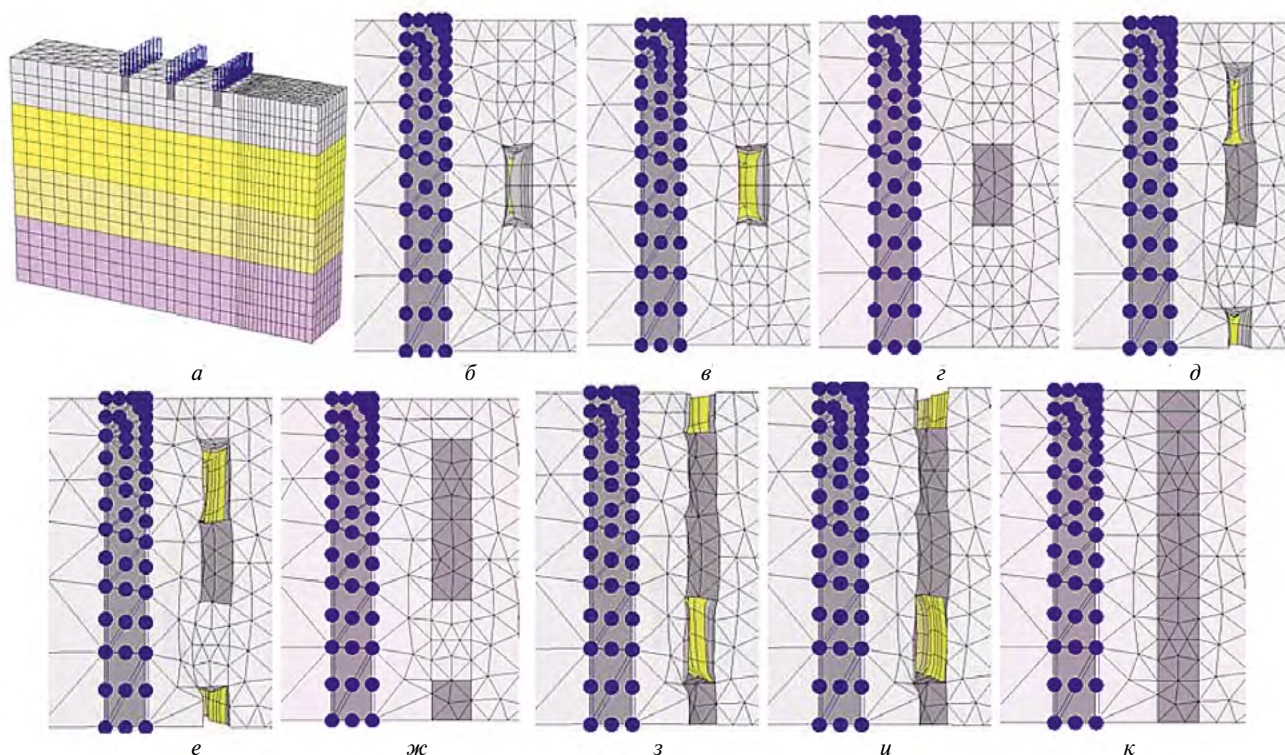


Рис. 3. Стадии расчета в PLAXIS 3D: а — моделирование существующего здания; б — к — устройство стены в грунте отдельными захватками

Л.Г. Заварзина (рис. 1, [6, 7]), инженерно-геологическое строение районов было дополнено данными геологического атласа Санкт-Петербурга (рис. 2 [8]). Осредненные характеристики грунтов приняты по данным В.М. Фурсы (табл. 1) [9].

Параметры зданий соседней застройки приняты на основании многочисленных натурных обследований, выполненных сотрудниками кафедры геотехники СПбГАСУ (ЛИСИ) в различные годы. Большинство исторических зданий построены бескаркасными с тремя несущими продольными стенами; глубина заложения фундаментов обычно составляет около 2–3 м; ширина фундаментов 1–2 м; пролеты здания 5–6 м; нагрузка на обрез фундаментов составляет в среднем 200–250 кПа [10].

#### Параметры нового здания.

Для решения поставленной задачи были заданы параметры нового здания. Практически все новые здания, строящиеся в настоящее время в центральной части города, устраиваются на свайных фундаментах. При этом опорным слоем для свай служат коренные породы, а с учетом того, что вес здания примерно равен весу вынутого из котлована грунта, можно принять, что осадка нового здания будет близка к нулю, что подтверждается опытом строительства в центральной части города и данными мониторинга.

Для устройства подземного трехуровневого пространства необходимо было устройство котлована, глубина которого составляет 10,5 м, метод устройства «сверху — вниз» с устройством трех уровней распорных железобетонных перекрытий на отметках: ноль; 3,6 м; –6,9 м и фундаментной плиты на отметке –10,5 м.

Глубина стены в грунте при моделировании принималась таким образом, чтобы выполнялось требование норм о заделке в водоупорный слой с целью производства экскавации грунта без применения мероприятий по водопонижению.

Надежным водоупором в Санкт-Петербурге являются только коренные протерозойские отложения, представленные вендскими и кембрийскими глинами твердой консистенции. Таким образом, средние глубины «стены в грунте» в центральной части города составляют порядка 30 м.

#### Оценка технологической осадки зданий соседней застройки.

Под термином «технологическая осадка» будем подразумевать дополнительную осадку существующих зданий, расположенных вблизи строящегося, и полученную в период устройства ограждения котлована методом траншейной стены в грунте.

Осадку зданий соседней застройки во время устройства «стены в грунте» может быть вызвана сторонними факто-

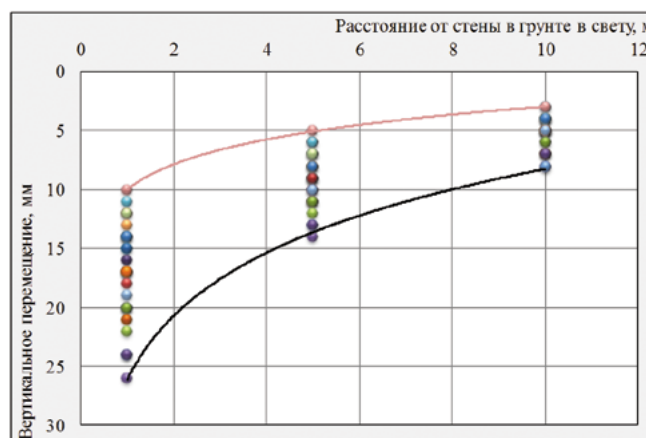


Рис. 4. Рассчитанные осадки крайних фундаментов зданий при устройстве вблизи них траншейной «стены в грунте» центральных районов Санкт-Петербурга

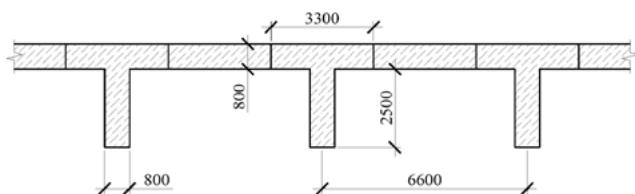


Рис. 5. Стена в грунте с контрфорсами

рами, связанными с ошибками при строительстве или с грубыми нарушениями технологии устройства траншейной стены в грунте (снижение плотности глинистого раствора, перебор грунта, проходка валунов, чрезмерное динамическое воздействие на тиксотропные грунты), – такие ситуации для данной задачи не рассматривались.

Методика численного моделирования осадки зданий, вызванной устройством траншейной стены в грунте, заключается в поэтапном моделировании в пространственной постановке технологических операций по ее устройству – откопки траншеи под защитой бентонитового раствора с последующим заполнением траншеи литой бетонной смесью и ее дальнейшим затвердеванием. При этом было предложено производить моделирование ограждения,

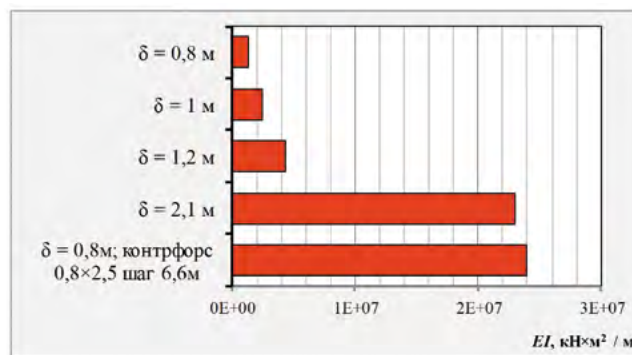


Рис. 6. Приведенные изгибные жесткости на 1 м ограждения

выполняемого по технологии «стена в грунте», не традиционными – пластинчатыми, а с помощью объемных элементов [11]. Для моделирования грунтового массива использовалась модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil Model [12]).

Моделирование глинистого раствора и литого бетона выполнено путем назначения соответствующего давления на стенки захватки траншеи, возрастающего с глубиной по гидростатическому закону. В данной задаче принята плотность для глинистого раствора 11 кН/м³, а для литого бетона – 22 кН/м³. Затвердевший бетон моделировался линейно-упругим материалом.

Этапы устройства ограждения и разработки котлована приведены на рис. 3. При этом для оценки технологической осадки рассматривались промежуточные результаты, полученные на стадии (к) рис. 3.

В рассмотренной задаче было изучено влияние следующих факторов: длина захватки траншейной «стены в грунте»; ширина захватки; плотность глинистого раствора; расстояние от фундамента здания до «стены в грунте» в свету.

Численное моделирование производилось для двух различных геологических районов центра Санкт-Петербурга, выделенных по методике Л.Г. Заварзина (3 и 6).

В каждом расчетном случае изменялся один параметр при постоянстве остальных; таким образом, для каждого из двух геологических районов было выполнено по  $3^4 = 81$  расчету.

Как следует из результатов вариантных численных расчетов (табл. 2, рис. 4), различия, вызванные разницей геологических условий в пределах центральной части города, незначительны. Можно предположить, что это вызвано примерно одинаковым уровнем кровли коренных пород, и распространить полученные результаты на районы, где эта отметка примерно та же.

Таким образом, в зависимости от расстояния до ограждения, плотности глинистого раствора, длины и ширины захваток траншеи осадки, вызванные устройством траншейной стены в грунте, составляют от 3 до 26 мм.

#### Оценка осадки соседних зданий, вызванной откопкой котлована.

В рамках данной задачи рассматривались четыре типа ограждения котлована: стена в грунте толщиной 0,8 м; стена в грунте толщиной 1 м; стена в грунте

Таблица 2

Рассчитанные осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной «стены в грунте» для двух районов по Л.Г. Заварзину, расположенных в центральной части Санкт-Петербурга

№	Параметры захватки		$\gamma_{гр}$ , р-ра, кН/м³	Расстояние до здания в свету, м			Расстояние до здания в свету, м		
				1	5	10	1	5	10
	b <sub>захв</sub> , м	l <sub>захв</sub> , м		3-й район			6-й район		
1	1,2	3,3	12,5	18	10	5	18	9	6
2			11,7	22	12	7	22	12	7
3			11	26	14	8	25	14	8
4		2,6	12,5	15	8	4	15	8	4
5			11,7	17	9	5	17	9	5
6			11	20	11	7	20	10	6
7		2	12,5	12	6	4	12	6	4
8			11,7	14	8	5	14	8	5
9			11	16	10	5	16	9	5
10	1	3,3	12,5	17	9	5	18	9	5
11			11,7	21	11	7	21	11	7
12			11	24	14	8	25	13	8
13		2,6	12,5	14	7	4	14	7	4
14			11,7	17	9	5	17	9	5
15			11	20	11	6	20	10	6
16		2	12,5	11	6	3	11	6	3
17			11,7	13	7	4	13	7	4
18			11	15	9	5	15	8	5
19	0,8	3,3	12,5	17	9	5	17	8	5
20			11,7	20	11	6	20	10	7
21			11	24	13	7	24	12	8
22		2,6	12,5	14	7	4	14	7	4
23			11,7	17	8	5	17	8	4
24			11	19	10	5	19	10	6
25		2	12,5	10	5	3	10	5	3
26			11,7	12	7	4	12	7	4
27			11	14	8	4	14	8	4



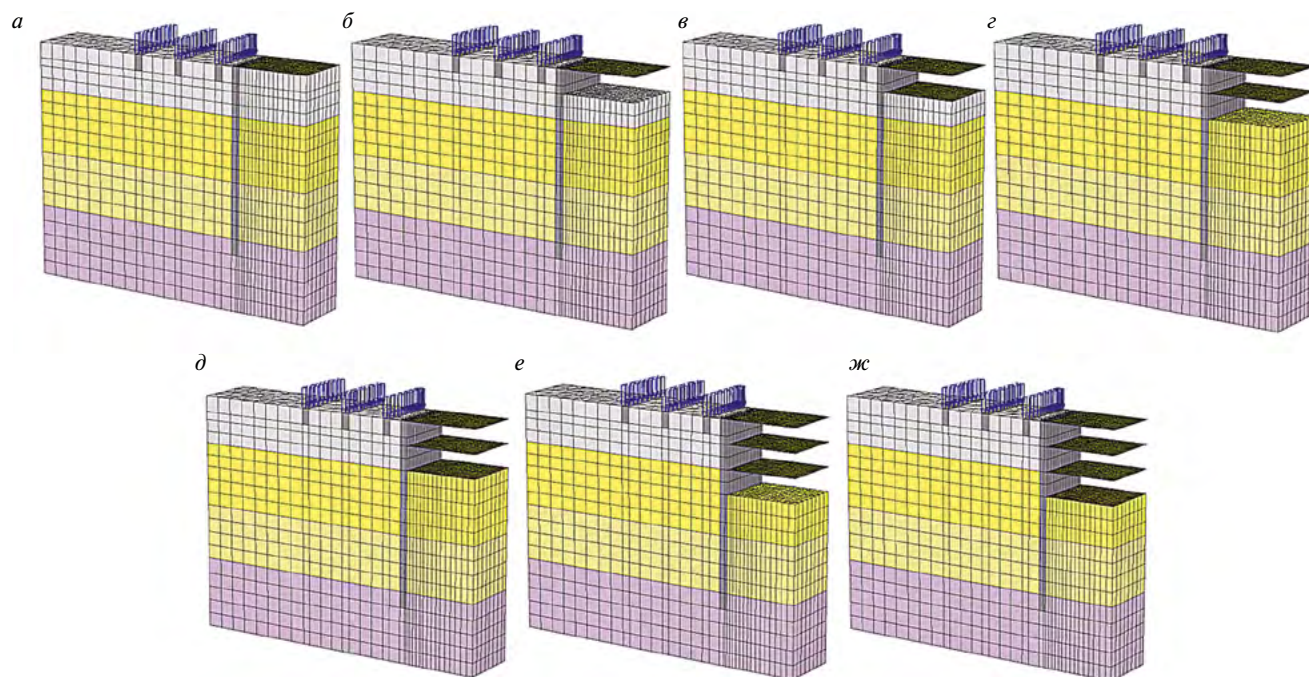


Рис. 7. Стадии расчета в PLAXIS 3D: а, в, д – устройство плит перекрытия соответственно 1-го, 2-го и 3-го подземных этажей; б, г, е – откопка соответственно 1-го, 2-го, 3-го уровней; ж – устройство фундаментной плиты

толщиной 1,2 м; стена в грунте толщиной 0,8 м с контрфорсами 0,8×2,5, расположенными с шагом 6,6 м (рис. 3).

Основным параметром ограждения котлована, определяющим его горизонтальные деформации и, как следствие, вертикальные перемещения соседней застройки, является его изгибная жесткость ( $EI$ ). На графике (рис. 6) представлено сравнение приведенных жесткостей рассматриваемых типов ограждения на метр длины в плане. Для сравнения рассчитана жесткость стены в грунте толщиной 2,1 м.

Определение осадок здания, вызванных откопкой котлована, произведено по классической методике моделирования ограждений котлованов. Задача решалась в программном комплексе PLAXIS 3D, для моделирования грунтового массива использовалась модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil Model). Расчет производился в 8 стадий, приведенных на рис. 7. Моделировались загруженные ленточные фундаменты существующей застройки, поочередно устраиваемые перекрытия и разработка грунта до отметки следующего перекрытия и т. д.

Результаты расчета дополнительной осадки существующей застройки, вызванной откопкой котлована, представлены в табл. 3 и сведены в график зависимости дополнительной осадки соседней застройки от изгибной жесткости ограждения (рис. 8).

Результаты расчета дополнительной осадки существующей застройки показывают, что в зависимости от жесткости ограждения осадка ближайшего здания будет составлять 13–28 мм.

Зависимость дополнительной осадки от изгибной жесткости ограждения котлована удовлетворительно описывается формулами степенной или логарифмической зависимости, представленными на рис. 8.

#### Основные выводы.

По результатам численного моделирования устройства стены в грунте при различных расчетных схемах можно сделать следующие выводы.

Ограждения котлованов, выполняемые по технологии траншейной стены в грунте, имеют большую жесткость, значительно превышающую шпунтовые ограждения. Именно поэтому стена в грунте в условиях слабых грунтов центральной части Санкт-Петербурга является практически безальтернативным вариантом при котлованах глубже 10 м [13].

Величина расчетной технологической осадки зданий при устройстве вблизи них траншейной стены в грунте в зависимости от расстояния до ограждения, плотности глинистого раствора, длины и ширины захваток траншеи может достигать до 26 мм в центральной части Санкт-Петербурга.

Таблица 3

Влияние жесткости ограждения на дополнительную осадку соседней застройки

Раскрепление	Жесткость	$EI$ , кН/м <sup>2</sup> /м	Доп. осадка, мм
Плиты перекрытий $\delta=0,3$ м в 4 уровнях	Стена: $\delta=0,8$ м; зуб 0,8×2,5 Шаг 6,6 м	2,4E+07	13
	Стена: $\delta=1,2$ м	4,3E+06	19
	Стена: $\delta=1$ м	2,5E+06	22
	Стена: $\delta=0,8$ м	1,3E+06	28

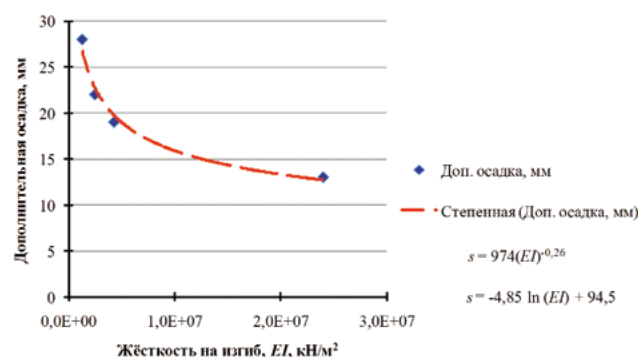


Рис. 8. Влияние жесткости ограждения на дополнительную осадку соседней застройки при фиксированной длине ограждения

Величина дополнительной осадки здания, вызванная откопкой котлована с ограждением, выполняемых по технологии траншейной стены в грунте, в зависимости от жесткости ограждения может достигать 28 мм.

В Санкт-Петербурге действующими территориальными нормами дополнительная осадка существующих исторических зданий ограничивается величинами 20–30 мм. Таким образом, для соблюдения этого условия уже на стадии проекта необходимо учитывать значительную долю технологических осадок и при необходимости корректировать либо технологические параметры (длина захваток и плотность глинистого раствора), либо менять конфигурацию подземного пространства, увеличивая расстояние между выполняемой конструкцией стены в грунте и фундаментами существующих зданий и сооружений.

#### Список литературы

- Осокин А.И., Денисова О.О., Шахтарина Т.Н. Технологическое обеспечение подземного строительства в условиях городской застройки // *Жилищное строительство*. 2014. № 3. С. 16–24.
- Moormann Ch., Moormann H.R. A study of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on worldwide experiences // Proc. the 3rd Int. Symp. (IS-Toulouse 2002) «Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground», 4th Session Deep Excavation: Design and Analysis. Toulouse, France, 23–25 October, 2002, pp. 477–482.
- Peck R.B. Deep excavation and tunnelling in soft ground. State of the art report // Proc 7th Int Conf SMFE. Mexico City, 1969, pp. 147–150.
- Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Конюшков В.В., Осокин А.И. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах. М.: АСВ, 2013. 256 с.
- Справочник геотехника: Основания, фундаменты и подземные сооружения: Справочник / Под общей редакцией В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева. М.: АСВ, 2014. 756 с.
- Заварзин Л.Г. Разработка методики инженерно-геологического картирования применительно к Ленинграду: Отчет по научн.-исслед. госбюджетной теме (Н-13)/18 / ЛИСИ. Л., 1975.
- Морарескул Н.Н., Заварзин Л.Г. Опыт типизации оснований и фундаментов в районах массовой застройки: Научное издание. Л.: ЛДНТП, 1984. 32 с.
- Геологический атлас Санкт-Петербурга, СПб.: Комильфо, 2009. 57 с.
- Отчет по составлению обобщенной карты инженерно-геологического районирования территории Ленинграда и Лесопарковой зоны (для подземного строительства): Шифр 378–78(33). Л.: Трест ГРИИ, 1978.
- Мангушев Р.А., Осокин А.И. Геотехника Санкт-Петербурга: Монография. М.: АСВ, 2010. 264 с.
- Мангушев Р.А., Веселов А.А., Конюшков В.В., Сапин Д.А. Численное моделирование технологической осадки соседних зданий при устройстве траншейной «стены в грунте» // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. № 5 (34). С. 87–98.
- Фадеев А.Б. Параметры модели упрочняющегося грунта программы «Plaxis» // Численные методы расчетов в практической геотехнике: Сборник статей международной научно-технической конференции СПбГАСУ. 2012. С. 13–20.
- Шашкин А.Г., Богов С.Г. Аprobация технологии «стена в грунте» в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 11. С. 20–22.

#### References

- Osokin A.I., Denisova O.O., Shakhtarina T.N. Technology support of underground construction under conditions of urban development. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 3, pp. 16–24. (In Russian).
- Moormann Ch., Moormann H.R. A study of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on worldwide experiences. Proc. the 3rd Int. Symp. (IS-Toulouse 2002) «Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground», 4th Session Deep Excavation: Design and Analysis. Toulouse, France, 23–25 October, 2002, pp. 477–482.
- Peck R.B. Deep excavation and tunnelling in soft ground. State of the art report. Proc 7th Int Conf SMFE. Mexico City, 1969, pp. 147–150.
- Mangushev R.A., Nikiforova N.S., Konyushkov V.V., Osokin A.I. Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh [Designing and the device of underground constructions in open ditches]. Moscow: ASV, 2013. 256 p.
- Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenti i podzemnye sooruzheniya. [Reference book geotechnics. Bases, bases and underground constructions]. Pod redacsiye Ilyichev V.A., Mangushev R. A. Moscow: ASV, 2014. 756 p.
- Zavarzin L.G. Razrabotka metodiki inzhenerno-geologicheskogo kartirovaniya primenitel'no k Leningradu [Development of a technique of engineering-geological mapping in relation to Leningrad]. Report on a scientific to the state budget subject (H-13)/18 / LISI. Leningrad, 1975.
- Morareskul N.N., Zavarzin L.G. Opyt tipizatsii osnovanii i fundamentov v raionakh massovoi zastroiки [Experience of typification of the bases and bases in areas of mass building]. Leningrad: LDNTP, 1984. 32 p.
- Geologicheskii atlas Sankt-Peterburga [Geological atlas of St. Petersburg]. St. Petersburg: Commeilfo, 2009. 57 p.
- Otchet po sostavleniyu obobshchennoi karty inzhenerno-geologicheskogo raionirovaniya territorii Leningrada i Lesoparkovoi zony (dlya podzemnogo stroitel'stva) [The report on creation of the generalized card of engineering-geological division into districts of the territory of Leningrad and the Green space (for underground construction): Code 378–78(33)]. Leningrad: GRII trust, 1978.
- Mangushev R.A., Osokin A.I. Geotekhnika Sankt-Peterburga [Geotechnology of St. Petersburg]. Moscow: ASV, 2010. 264 p.
- Mangushev R.A., Veselov A.A., Konyushkov V.V., Sapin D.A. Numerical simulation of adjoining developments technology settlement in process of trench slurry wall construction. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012. No. 5 (34), pp. 87–98. (In Russian).
- Fadeyev A.B. Parameters of model of the strengthened soil of the Plaxis program. Numerical methods of calculations in practical geotechnics: collection of articles of the international scientific and technical conference. 2012, pp.13–20.
- Shashkin A.G., Bogov S.G. Approbation of diaphragm wall technology under geological engineering conditions of St. Petersburg. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012. No. 11, pp. 20–22. (In Russian).