

УДК 624.131.7

© А. Ж. Жусупбеков, д-р техн. наук, профессор
(Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан)

E-mail: astana-geostroi@mail.ru

© В. М. Улицкий, д-р техн. наук, профессор
(Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: npk-cgt@yandex.ru

© И. П. Дьяконов, канд. техн. наук, доцент

© М. В. Ершова, магистрант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: idjkanv@yandex.ru, clevermasha99@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-6-47-55

© A. Z. Zhussupbekov, Dr. Sci. Tech., Professor
(L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Astana, Kazakhstan)

E-mail: astana-geostroi@mail.ru

© V. M. Ulitsky, Dr. Sci. Tech., Professor
(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: npk-cgt@yandex.ru

© I. P. Dyakonov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© M. V. Ershova, undergraduate

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: idjkanv@yandex.ru, clevermasha99@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ И ЕЕ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВОГО МАССИВА

THE INFLUENCE OF THE FEATURES OF THE DESIGN SCHEME AND ITS INPUT PARAMETERS ON THE AMOUNT OF DEFORMATIONS OF THE SOIL MASS

Дан краткий обзор проблем определения напряженно-деформируемого состояния грунта. В ходе работы построена и проанализирована обобщенная расчетная схема нагружения грунта для г. Санкт-Петербурга с использованием численных моделей грунта (Mohr-Coulomb, HardeningSoil). При анализировании расчетной схемы использовались численные методы расчета, по итогам которых определено влияние геометрических размеров схемы и модели грунта на осадку. В качестве примера рассмотрена экскавация глубокого котлована в условиях плотной городской застройки с последующим анализом траектории напряжений грунта. Результаты данного исследования могут быть использованы при разработке дополнительных компонент в существующую методику определения напряженно-деформированного состояния грунта для повышения точности расчетов.

Ключевые слова: напряженно-деформируемое состояние основания, расчетная схема, граничные условия, траектория напряжения, грунтовый массив, модели грунта.

This article provides a brief overview of the problems of determining the stress-strain state of the soil. In the course of the work, a generalized computational scheme of loading in St. Petersburg was constructed and analyzed using numerical soil models (Mohr-Coulomb, Hardening Soil). When analyzing the design scheme, there were used numerical calculation methods, based on the results of which there was determined the impact of the geometric dimensions of the scheme and the soil model on the soil settlement. As an example, there is considered the excavation of a deep pit in conditions of dense urban development with subsequent analysis of the trajectory of soil stresses. The results of this study can be used in the development of additional components to the existing methodology for determining the stress-strain state of the soil to improve the accuracy of calculations.

Keywords: stress-strain state of the base, design scheme, boundary conditions, stress trajectory, soil mass, soil models.

Введение

Целью данной работы является обзор проблем оценки напряженно-деформируемого состояния грунта, приводящих к несоответствию геотехнических расчетов и данных мониторинга. Предполагается, что отличие результатов расчетов и материалов мониторинга во многом связано с допущениями и особенностями работы принятой расчетной схемы. В связи с этим рассмотрены и проанализированы некоторые дополнительные компоненты, используемые в методике моделирования напряженно-деформируемого состояния грунтового массива, в частности:

1. Построение расчетной схемы с выбором оптимальной модели грунта и с учетом факторов, влияющих на его напряженно-деформированное состояние.

2. Опробование модели для определения корректных размеров расчетной схемы.

3. Зонирование расчетной схемы по предполагаемым напряженным состояниям с построением ожидаемых траекторий напряжений. Предварительный расчет расчетной схемы с сопоставлением траекторий напряжений.

4. Составление технического задания для лаборатории с учетом выбранной модели грунта и полученных траекторий напряжений для уточнения входящих параметров. Пересчет расчетной схемы при получении данных от лаборатории.

Анализ существующих методов исследования

В данной статье рассматриваются аналитические и численные методы исследования. Для определения основополагающих факторов, влияющих на напряженное состояние грунта, была проанализирована зарубежная и отечественная литература.

Для определения влияния граничных условий на итоговый результат была смоделирована частная задача нагружения в ПК *Plaxis*. Условия моделируемой задачи представлены на рис. 1. При решении поставленной задачи рассматривалось влияние вертикального размера расчетной схемы H на величину осадки. Для сравнения поставленная задача решалась в моделях *Mohr-Coulomb*, *Hardening Soil* при вариантах ширины модели: $B = 3b$, $B = 5b$, $B = 10b$, где b — ширина фундамента.

Для определения характерных зон напряженных состояний была проанализирована обобщенная расчетная схема нагружения для г. Санкт-Петербурга, представленная на рис. 2. При построении обобщенной схемы была использована инженерно-геологическая колонка, характерная для центральной части Санкт-Петербурга [1–4]. В табл. 1 приведена расшифровка обозначений расчетной схемы. Основные физико-механические характеристики инженерно-геологических элементов представлены в табл. 2.

Обсуждение и результаты

По итогам анализа литературы можно сделать вывод, что грунт очень чувствителен к любому изменению в окружающей среде [5], однако есть три фактора, в большей степени влияющих на грунтовый массив: величина внешней нагрузки, история нагружения грунта, наличие поровой жидкости.

Величина внешней нагрузки влияет на деформационные и прочностные характеристики. История нагружения коренных пород Санкт-Петербурга тесно связана с понятием «переуплотнение» [6]. Переуплотненный грунт при нагрузке, превышающей историческую (максимальную за весь период времени), переходит в нормально уплотненное состояние, при котором прослеживается увеличение угла внутреннего трения j и снижение сцепления c (рис. 3).

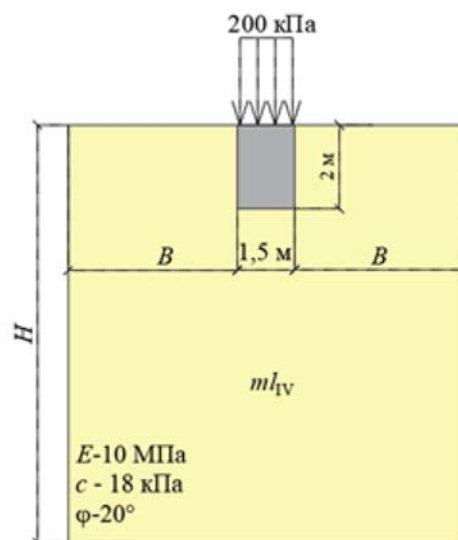


Рис. 1. Расчетная схема фундамента окружающей застройки

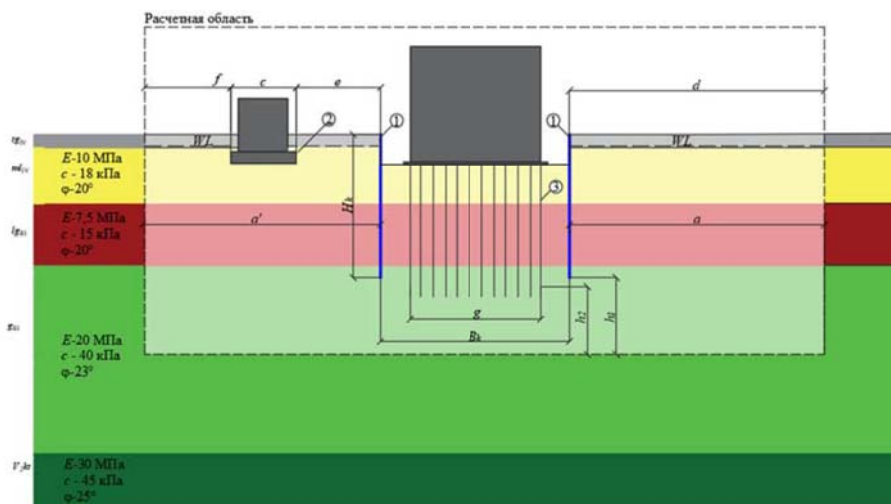


Рис. 2. Обобщенная расчетная схема для рассматриваемой задачи нагружения

Переуплотнение грунта также отображается на зависимости между вертикальными и горизонтальными напряжениями. Если на грунт в какой-то период времени действовала большая нагрузка, то при ее снятии вертикальные напряжения рассеиваются, а горизонтальные

из-за распора — нет, поэтому коэффициент бокового давления грунта для нормально уплотненных и переуплотненных грунтов отличается (рис. 4) [7].

Как было сказано ранее, важно учитывать наличие поровой жидкости в грунте. Значительное количество осадков в Санкт-Петербурге вызывает постоянное изменение уровня грунтовых вод, которые влияют на НДС грунтового массива [8]. Происходит это следующим образом: из-за того что уровень грунтовых вод в Санкт-Петербурге относительно высокий, часть внешней нагрузки непосредственно воспринимает поровая вода. Несмотря на то что нагружение грунта происходит длительное время, консолидации как таковой не происходит, что вызывает ряд проблем.

Во-первых, в техническом задании на лабораторные испытания обычно указывают консолидированно-дренированную схему, но для слабых грунтов Санкт-Петербурга данная схема не подходит. Консолидированно-дренированные испытания завышают прочностные характеристики. В результате мы получаем искаженные исходные механические параметры, которые в дальнейшем используем при расчетах, что недопустимо для слабых водонасыщенных грунтов Санкт-Петербурга.

Во-вторых, из-за того, что уровень грунтовых вод постоянно меняется, для упрощения задачи в программных комплексах задается постоянный уровень грунтовых вод, что приводит

Таблица 1

Расшифровка обозначений рассматриваемой расчетной схемы

Обозначение	Расшифровка обозначений расчетной схемы
1	Ограждение котлована
2	Фундамент окружающей застройки
3	Свайный фундамент строящегося здания
a, a'	Расстояние от ограждения котлована до границ расчетной модели
f	Расстояние от края фундамента окружающей застройки до границ расчетной схемы
c	Ширина фундамента окружающей застройки
e	Расстояние от края фундамента окружающей застройки до шпунтового ограждения
d	Расстояние от шпунтового ограждения до границ расчетной схемы
H_k	Глубина заложения шпунтового ограждения
B_k	Ширина котлована
g	Ширина свайного поля

Физико-механические характеристики инженерно-геологических элементов рассматриваемой расчетной схемы

Характерный тип грунта	Техногенный насыпной грунт	От песков до суглинков, иногда с включениями органики	Ленточные суглинки мягкопластичные	Валунные суглинки тугопластичные	Твердые глины
Характеристики грунта					
Естественная влажность, %	–	40	35	20	14
Коэффициент пористости	–	1,1	0,85	0,53	0,5
Удельный вес, кН/м ³	–	18	19	21	22
Число пластичности, %	–	9	11	9	15
Показатели консистенции	–	0,4	0,3	0,1	-0,2
Модуль деформации, МПа	10	10	7,5	20	30
Угол внутреннего трения, град	10	18	20	23	25
Удельное сцепление, кПа	10	20	15	40	45

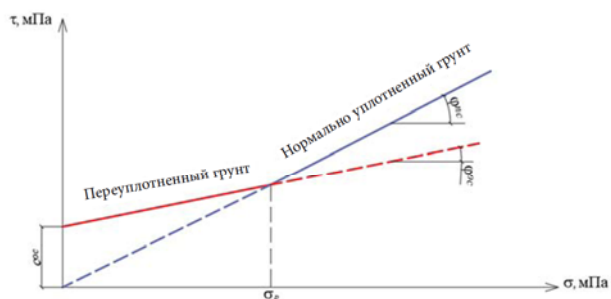


Рис. 3. Зависимость прочностных характеристик от состояния грунта

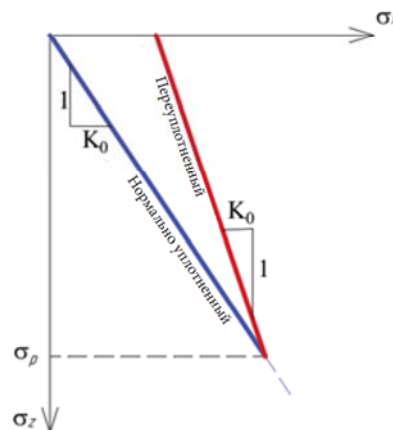


Рис. 4. График бокового давления грунта для нормально уплотненного и переуплотненного грунта

к созданию некорректной расчетной схемы. При повышении или понижении уровня воды изменяется удельный вес грунта и, соответственно, его напряженное состояние [9]. В этом случае рекомендуется моделировать наихудший вариант развития событий.

В-третьих, распространенной проблемой является неучет несовершенства противофильтровой завесы. При водонепроницаемых ограждающих конструкциях, заделанных в водонепроницаемый слой, возникают повышенное активное и пониженное пассивное давление на опорную стенку из-за возникновения фильтрационных сил, которые могут привести к гидравлическому разрушению водонасыщенного грунта [10].

После определения основных факторов, влияющих на НДС грунта, нужно грамотно отобразить расчетную схему решаемой задачи. На этом этапе нужно определить граничные условия, по-

скольку они сильно влияют на результат расчета. Для определения степени влияния размеров схемы на осадку здания была рассмотрена частная задача нагружения фундамента окружающей застройки.

По результатам расчетов были построены графики зависимости осадки от вертикального размера расчетной схемы (рис. 5, 6). Из графиков видно, что при увеличении вертикального размера схемы осадки увеличиваются. Это говорит о том, что если необоснованно выбирать геометрию расчетной схемы, то результаты полученных деформаций будут сильно различаться.

При построении расчетной схемы необходимо учитывать не только граничные условия зада-

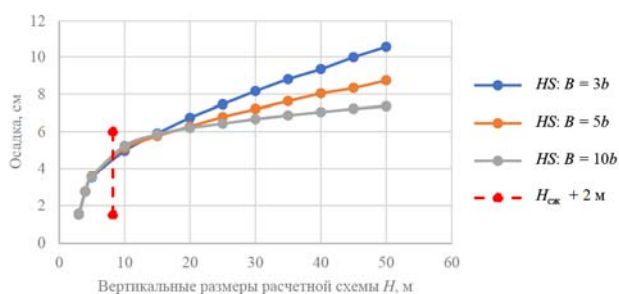


Рис. 5. Влияние размеров расчетной схемы на осадку в модели *Hardening Soil*

чи, но и принятую модель грунта, поскольку она, как видно из графиков, также влияет на получаемый результат.

В настоящее время наибольшую популярность обрели модели *Mohr-Coulomb*, *Hardening Soil*, *Hardening Soil Small*, *Soft Soil*, *Soft Soil Creep*. Выбор модели зависит от рассматриваемого грунта и типа решаемой задачи. Каждая модель требует определенных методов испытаний и обработки, которые должны отображаться в техническом задании для лаборатории [11–19].

После окончательного выбора модели и утверждения размеров схемы необходимо провести анализ траекторий напряжений грунта. Рассмотрим экскавацию глубокого котлована в условиях плотной городской застройки. На расчетной схеме можно выделить несколько участков с характерным напряженным состоянием, которые были получены численным расчетом в ПК *Plaxis*. На каждом участке НДС грунта меняется по определенной траектории напряжений (рис. 7). Схема лабораторных испытаний должна отображать траекторию напряжений грунта. Если это не учитывать, то в результате лабораторных испытаний можно получить либо зави-

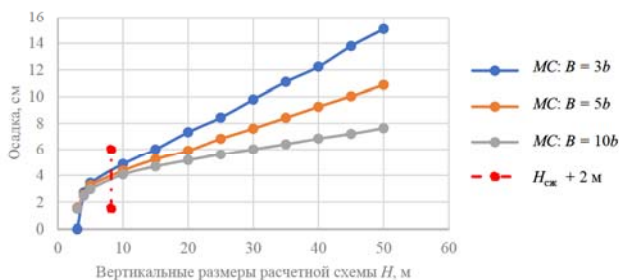


Рис. 6. Влияние размеров расчетной схемы на осадку в модели *Mohr-Coulomb*

шенные, либо заниженные характеристики [20]. При определении механических параметров грунта необходимо сначала вернуть его в начальное напряженное состояние, а затем нагружать его в соответствии с траекторией нагружения. В идеальном варианте при составлении технического задания для лаборатории необходимо прикладывать расчетную схему решаемой задачи с зонированием напряженных состояний и требуемых испытаний.

Проанализируем траектории напряжений грунта в зонах 1, 2, 3, 4, 5 схемы зонирования (см. рис. 7). Изначально существует окружающая застройка, которая давит на толщу рассматриваемого грунтового массива. Обозначим эту зону номером 2. Здесь действуют повышенные вертикальные и горизонтальные усилия. Причем чем ближе рассматриваемая точка к фундаменту, тем больше значения напряжений, поскольку с глубиной нагрузка от окружающей застройки затухает. Траектория напряжений в точке А отображает нагружение грунта окружающей застройкой. Формы ожидаемой и рассчитанной траекторий напряжений схожи (рис. 8).

При устройстве шпунтового ограждения появляется вторая зона напряженных состояний, обозначенная цифрой 3.

Рассмотрим ограждение, устанавливаемое методом статического вдавливания. При устройстве ограждения в точке В ожидается незначительное повышение вертикальных напряжений. При экскавации грунта в точке В прогнозируется значительное падение горизонтальных напряжений и незначительное — вертикальных (рис. 9).

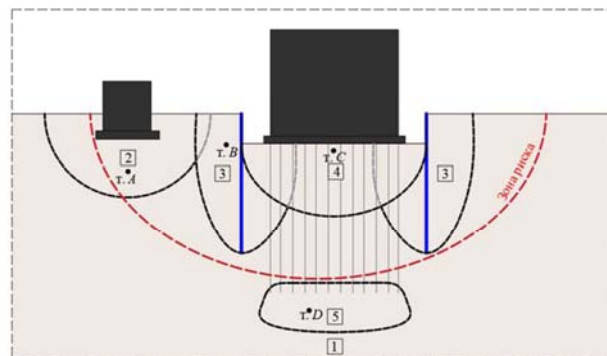


Рис. 7. Схема зонирования изменения напряженного состояния

На дне котлована в точке С из-за снятия грунтовой толщи ожидается снижение горизонтальных и вертикальных напряжений. При устройстве свай статическим вдавливанием в точке С ожидается увеличение горизонтальных напряжений. На рис. 10 видно, что при расчете задачи в ПК *Plaxis* не учитывается увеличение горизонтальных напряжений. Происходит это за счет того, что программа задает сваи как линейный объект, поэтому чтобы учесть уплотнение грунта, необходимо дополнительно задать величину сдвига грунта массива вокруг тела сваи. При возведении здания также в работу включается ростверк, напряжения в точке С должны увеличиться, однако на графике траектории напряжений, полученном в ходе расчета, этого не происходит. Кроме того, горизонтальные напряжения вокруг сваи также не соответствуют ожиданиям.

При возведении здания сваи включаются в работу. Поскольку в рассматриваемой задаче слабые грунты простираются на большую глубину, сваи практически не работают по боковой поверхности. Основная нагрузка передается через острие сваи, поэтому возникает зона 5 с повышенными вертикальными напряжениями (рис. 11).

Таким образом, в ПК *Plaxis* возникают определенные аномалии, связанные с недостаточным количеством входных данных. При предварительных расчетах рекомендуется строить аналитически ожидаемые траектории напряжений и сравнивать их с реально полученными.

По ожидаемой траектории напряжений необходимо составлять программу лабораторных испытаний на определение механических параметров (табл. 3). В программе испытаний обязательно нужно указывать нагрузку от веса здания,

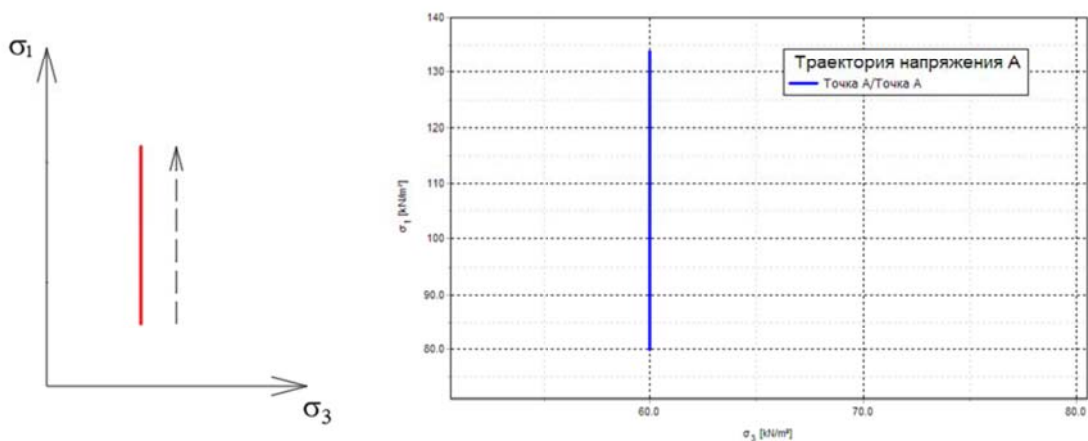


Рис. 8. Ожидаемая и рассчитанная траектории напряжений точки А

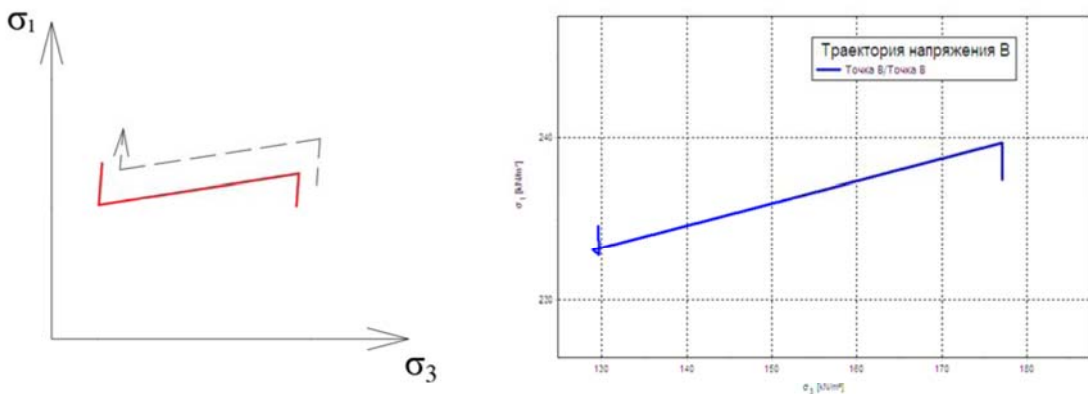


Рис. 9. Ожидаемая и рассчитанная траектории напряжений точки В

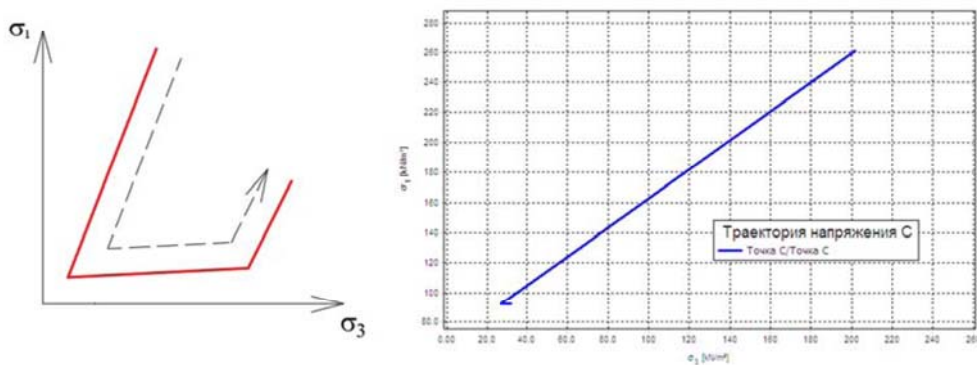


Рис. 10. Ожидаемая и рассчитанная траектории напряжений точки С

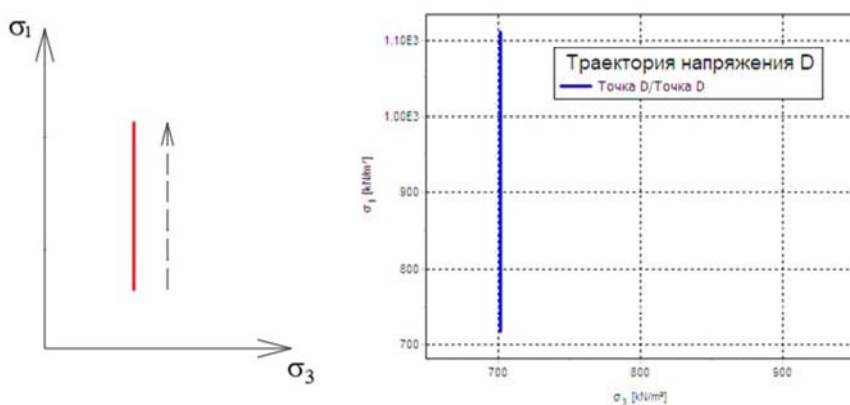


Рис. 11. Ожидаемая и рассчитанная траектории напряжений в точке D

Таблица 3

Программа лабораторных испытаний

Номер участка на схеме	Напряженное состояние	Рекомендуемая схема испытаний
1	$\sigma_1 \downarrow, \sigma_3 = \text{const}$	Компрессионные испытания Срезовые испытания
2	$\sigma_1 \downarrow, \sigma_3 \uparrow$	Трехосные испытания с разгрузкой
3	$\sigma_1, \sigma_3 = \text{const}$	Трехосные испытания с разгрузкой
4	$\sigma_1 \uparrow, \sigma_3 \downarrow$	Компрессионные испытания

поскольку это влияет на диапазон напряжений, в которых испытывается образец грунта.

Выводы

По результатам анализа сделаны следующие выводы:

1. На НДС грунта влияет множество факторов: величина прикладываемой нагрузки, история нагружения, наличие поровой жидкости и изменение уровня грунтовых вод. Эти факторы необходимо учитывать при геотехническом расчете.

2. Предложена расчетная схема глубокого котлована в условиях плотной городской застройки с зонированием по изменению НДС грунта. Каждому напряженному состоянию на определенном участке соответствует своя траектория напряжения, которая должна отображаться в техническом задании на лабораторные испытания и определять подход к испытанию грунта.

3. Определена зависимость осадки от геометрических размеров расчетной схемы и выбран-

ной модели грунта. Зона влияния строительства на окружающую застройку для слабых водонасыщенных грунтов Санкт-Петербурга в условиях рассматриваемой расчетной схемы не коррелирует с общепринятыми методами расчета.

4. Из-за неучета особенностей работы расчетной схемы существует риск получить существенные расхождения расчетной и фактической величины осадки фундаментов сооружений.

Библиографический список

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

2. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С., Конюшков В. В., Осокин А. И., Сапин Д. А. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах / под ред. Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2013. 247 с.

3. Мангушев Р. А., Сахаров И. И. Основания и фундаменты. М.: АСВ, 2019. 468 с.

4. Дашко Р. Э., Карпова Я. А. Проблемы инженерной геологии Приморского района Санкт-Петербурга в связи с перспективами освоения подземного пространства // Записки Горного института. 2013. Т. 206. С. 16–21.

5. Дашко Р. Э., Еремеева А. А. Инженерно-геологические особенности коренных глин Санкт-Петербурга как среды для размещения подземных сооружений / материалы междунар. симпозиума «Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий». Екатеринбург, 30 июля – 2 августа 2001 г. Екатеринбург: Аква-Пресс, 2001. Т. 1. 414 с.

6. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Сотников С. Н. Геотехника Санкт-Петербурга. Опыт строительства на слабых грунтах. М.: АСВ, 2018. 386 с.

7. Yan Wu, Haiping Ren, Zhongfang Yang. Effect of total nitrogen on the physical and mechanical properties and deformation characteristics of soil // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1676. No. 012043.

8. Мельников Р. В., Котова А. В. Отличие использования параметров OCR и POP на напряженное состояние и деформирование переуплотненного грунта // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 2 (33). С. 90–94.

9. Jáky J. The coefficient of earth pressure at rest // Journal for Society of Hungarian Architects and engineers. 1944. October. Pp. 355–358.

10. Дашко Р. Э., Александрова О. Ю., Котюков П. В., Шидловская А. В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие

городов и геотехническое строительство. 2011. № 13. С. 24–71.

11. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З. Напряженно-деформированное состояние массивов грунтов под воздействием гидрогеологических факторов // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 150–157.

12. 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.

13. Мацеля В. И., Сеелев И. Н., Леконцев А. В., Хафизов Р. Р., Панасенко Н. Н., Синельщиков А. В., Яковлев П. В. Сравнительный анализ параметров конечно-элементных моделей грунтов, полученных численными методами // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. 2017. № 1 (63). С. 23–31.

14. Болдырев Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: ПГУАС, 2008. 696 с.

15. Строчкова Л. А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // Известия Томского политехн. ун-та. 2008. Т. 313. № 1. С. 69–74.

16. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Упруго-вязкопластическая модель структурно-неустойчивого глинистого грунта // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2005. № 9. С. 221–228.

17. Шашкин А. Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 2. С. 1–32.

18. Шашкин А. Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. М.: Гео-маркетинг, 2014. 350 с.

19. Мирный А. Ю., Тер-Мартirosян А. З. Области применения современных механических моделей грунтов // Геотехника. 2017. № 1. С. 20–26.

20. Lu Li, Meng Zang, Rong-Tang Zhang, and Hai-Jun Lu. Deformation and strength characteristics of structured clay under different stress paths // Mathematical Problems in Engineering. 2022. Vol. 2022. No. 9266206. 16 p.

References

1. Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Technological settlement of buildings and structures in the influence zone of underground construction]. Moscow, ASV Publ., 2017, 160 p.

2. Mangushev R. A., Nikiforova N. S., Konyushkov V. V., Osokin A. I., Sapin D. A. *Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh* [Design and construction of underground structures in open pits]. Ed. by Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2013, 247 p.

3. Mangushev R. A., Sakharov I. I. *Osnovaniya i fundamenti* [Bases and foundations]. Moscow, ASV Publ., 2019, 468 p.
4. Dashko R. E., Karpova Ya. A. *Problemy inzhenernoy geologii Primorskogo rayona Sankt-Peterburga v svyazi s perspektivami osvoeniya podzemnogo prostranstva* [Problems of engineering geology of the Primorsky district of St. Petersburg in connection with the prospects for the development of underground space]. *Zapiski Gornogo instituta – Journal of Mining Institute*, 2013, vol. 206, pp. 16–21.
5. Dashko R. E., Ereemeeva A. A. *Inzhenerno-geologicheskie osobennosti korennykh glin Sankt-Peterburga kak sredy dlya razmeshcheniya podzemnykh sooruzheniy* [Engineering-geological features of indigenous clays of St. Petersburg as a medium for placing underground structures]. *Trudy mezhdunar. simpoziuma «Inzhenerno-geologicheskie problemy urbanizirovannykh territoriy»* [Proceedings of the International symposium “Engineering-geological problems of urbanized territories, July 30–August 2, 2001]. Ekaterinburg: Akva-Press Publ., 2001, vol. 1, 414 p.
6. Mangushev R. A., Osokin A. I., Sotnikov S. N. *Geotekhnika Sankt-Peterburga. Opyt stroitel'stva na slabyykh gruntakh* [Geoen지니어ing of St. Petersburg. Experience of construction on weak soils]. Moscow, ASV Publ., 2018, 386 p.
7. Yan Wu, Haiping Ren, Zhongfang Yang. Effect of total nitrogen on the physical and mechanical properties and deformation characteristics of soil. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1676, no. 012043.
8. Mel'nikov R. V., Kotova A. V. *Otlichie ispol'zovaniya parametrov OCR i POP na napryazhennoe sostoyanie i deformirovanie pereuplotnennogo grunta* [Differences in the use of OCR and POP parameters on the stress state and deformation of overconsolidated soil]. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN – Academic Bulletin of UralNIIproject RAASN*, 2017, no. 2 (33), pp. 90–94.
9. Jáky J. The coefficient of earth pressure at rest. *Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers*, 1944, October, pp. 355–358.
10. Dashko R. E., Aleksandrova O. Yu., Kotyukov P. V., Shidlovskaya A. V. *Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh usloviy Sankt-Peterburga* [Peculiarities of the engineering-geological conditions of Saint-Petersburg]. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Urban Development and Geotechnical Construction*, 2011, no. 13, pp. 24–71.
11. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie massivov gruntov pod vozdeystviem gidrogeologicheskikh faktorov* [The stress-strain state of soil mass under the influence of hydrogeological factors]. *Vestnik MGSU – MSCU Bulletin*, 2008, no. 2, pp. 150–157.
12. 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.
13. Matselya V. I., et al. *Sravnitel'nyy analiz parametrov konechno-elementnykh modeley gruntov, poluchennykh chislennymi metodami* [Comparative analysis of parameters of finite-element models of soils obtained by numerical methods]. *Vestnik Astrakhanskogo gos. tekhn. un-ta – Bulletin of the Astrakhan State Technical University*, 2017, no. 1 (63), pp. 23–31.
14. Boldyrev G. G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyanie voprosa* [Methods for determining the mechanical properties of soils. State of the matter]. Penza, PGUAS Publ., 2008, 696 p.
15. Strokova L. A. *Opredelenie parametrov dlya chislennogo modelirovaniya povedeniya gruntov* [Determination of parameters for numerical modeling of soil behavior]. *Izvestiya Tomskogo politekhn. un-ta – Proceedings of Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 313, no. 1, pp. 69–74.
16. Shashkin A. G., Shashkin K. G. *Uprugo-vyazko-plasticheskaya model' strukturno-neustoychivogo glinistogo grunta* [Elastic-viscoplastic model of structurally unstable clay soil]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Urban Reconstruction and Geotechnical Construction*, 2005, no. 9, pp. 221–228.
17. Shashkin A. G. *Vyazko-uprugo-plasticheskaya model' povedeniya glinistogo grunta* [Visco-elastic-plastic model of behavior of clayey soil]. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Urban Development and Geotechnical Construction*, 2011, no. 2, pp. 1–32.
18. Shashkin A. G. *Proektirovanie zdaniy i podzemnykh sooruzheniy v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Sankt-Peterburga* [Design of buildings and underground structures in complex engineering-geological conditions of Saint-Petersburg]. Moscow, Geomarketing Publ., 2014, 350 p.
19. Mirniy A. Yu., Ter-Martirosyan A. Z. *Oblasti primeneniya sovremennykh mekhanicheskikh modeley gruntov* [Scope of application of modern mechanical models of soils]. *Geotekhnika – Geoengineering*, 2017, no. 1, pp. 20–26.
20. Lu Li, Meng Zang, Rong-Tang Zhang, and Hai-Jun Lu. Deformation and strength characteristics of structured clay under different stress paths. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, vol. 2022, no. 9266206, 16 p.