

© Ю. М. Патракеева, старший преподаватель
© О. В. Копров, аспирант
(Северный (Арктический) федеральный университет
им. М. В. Ломоносова,
Архангельск, Россия)
E-mail: glebovaulia@yandex.ru, vorpok28@yandex.ru

© Yu. M. Patrakeeva, senior lecturer
© O. V. Koprov, post-graduate student
(Northern (Arctic) Federal University
named after M. V. Lomonosov,
Arkhangelsk, Russia)
E-mail: glebovaulia@yandex.ru, vorpok28@yandex.ru

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ОСАДКИ ИЛА В ОСНОВАНИИ ЖИЛОГО ДОМА С ДАННЫМИ МОНИТОРИНГА

COMPARISON OF THE ESTIMATED SOFT CLAY SETTLEMENT AT THE BASE OF A BUILDING WITH MONITORING DATA

Особенностью инженерно-геологических условий побережья Белого моря и островных территорий в дельте Северной Двины является присутствие многометровой толщи илов, покрытых слоем песков. Здесь для зданий в пять и менее этажей неоднократно предпринимались попытки применения «коротких» свай, острие которых не достигает кровли илов на 1...4 м. Такое конструктивное решение требует детального изучения деформационных характеристик илов и анализа накопленного опыта эксплуатации зданий. Представлены результаты численного моделирования одного из жилых домов Северодвинска в ПВК «PLAXIS 3D» и данные длительных высокоточных геодезических измерений осадки. Деформационные характеристики илов — индекс компрессии C_c и коэффициент вторичной консолидации C_α — для модели Soft Soil Creep (SSC) в программном комплексе PLAXIS 3D определялись по данным лабораторных испытаний и с помощью эмпирических зависимостей, ранее выявленных для территории города.

Ключевые слова: осадка, морские илы, численное моделирование, мониторинг.

A feature of the geotechnical conditions of the White Sea coast and island territories in the Northern Dvina Delta is the presence of multi-meter thickness of silts covered with a layer of sand. Here, for buildings of five or less floors, attempts were repeatedly made to use "short" piles, the tip of which does not reach the roof of silts by 1... 4 m. This engineering solution requires a research of the compressibility of characteristics of the marine soft clay and a settlement of geodetic control data analysis of buildings during the operational period. The results of numerical modeling of one of the residential buildings of Severodvinsk in PVK "PLAXIS 3D" and the data of long-term high-precision geodetic measurements of settlement are presented. The deformation characteristics of silts — compression index C_c and secondary consolidation coefficient C_α — for the Soft Soil Creep (SSC) model in the PLAXIS 3D software package were determined according to laboratory test data and using empirical relationships previously identified for the city territory.

Keywords: settlement, marine soft clay, numerical simulation, monitoring.

Введение

Основной проблемой при строительстве и эксплуатации зданий на побережье Белого моря и островных территориях в дельте Северной Двины является мощная (6 м и более) толща слабых водонасыщенных грунтов четвертичных отложений, в основном илов и заиленных пылеватых песков, покрытых 6–10-метровым слоем мелких и пылеватых

песков. Высокий уровень грунтовых вод также осложняет процесс производства работ по устройству подземной части зданий. Надежным основанием для свайных фундаментов многоэтажных зданий служат ледниковые морские отложения, кровля которых находится на глубине от 20 м и более.

Для зданий в пять и менее этажей неоднократно предпринимались попытки при-

менения так называемых «коротких» свай, располагающихся в верхних слоях песков, с острием, не достигающим кровли илов на 1...4 м. Такое конструктивное решение обосновывалось обычно допустимыми значениями осадок, найденными по методике СНиП 2.02.03–85 или СП 24.13330.2021, и, конечно, существенной экономией средств по сравнению со сваями длиной 20 м и более.

В 1970–1980-х годах в Северодвинске проводились исследования фундаментов с короткими сваями (С. В. Ледяев [1], В. Я. Хотя-

ков [2]). По данным В. Я. Хотякова, фактические осадки таких фундаментов превышали расчетные величины на 20–50 % [2]. Для оценки возможности дальнейшего применения коротких свай необходимо изучение деформационных характеристик илов и анализ накопленного опыта эксплуатации зданий.

Методы

Объект исследований — пятиэтажный жилой дом, расположенный в центральной части Северодвинска. Инженерно-геологические условия площадки строительства представлены на рис. 1. Характеристики

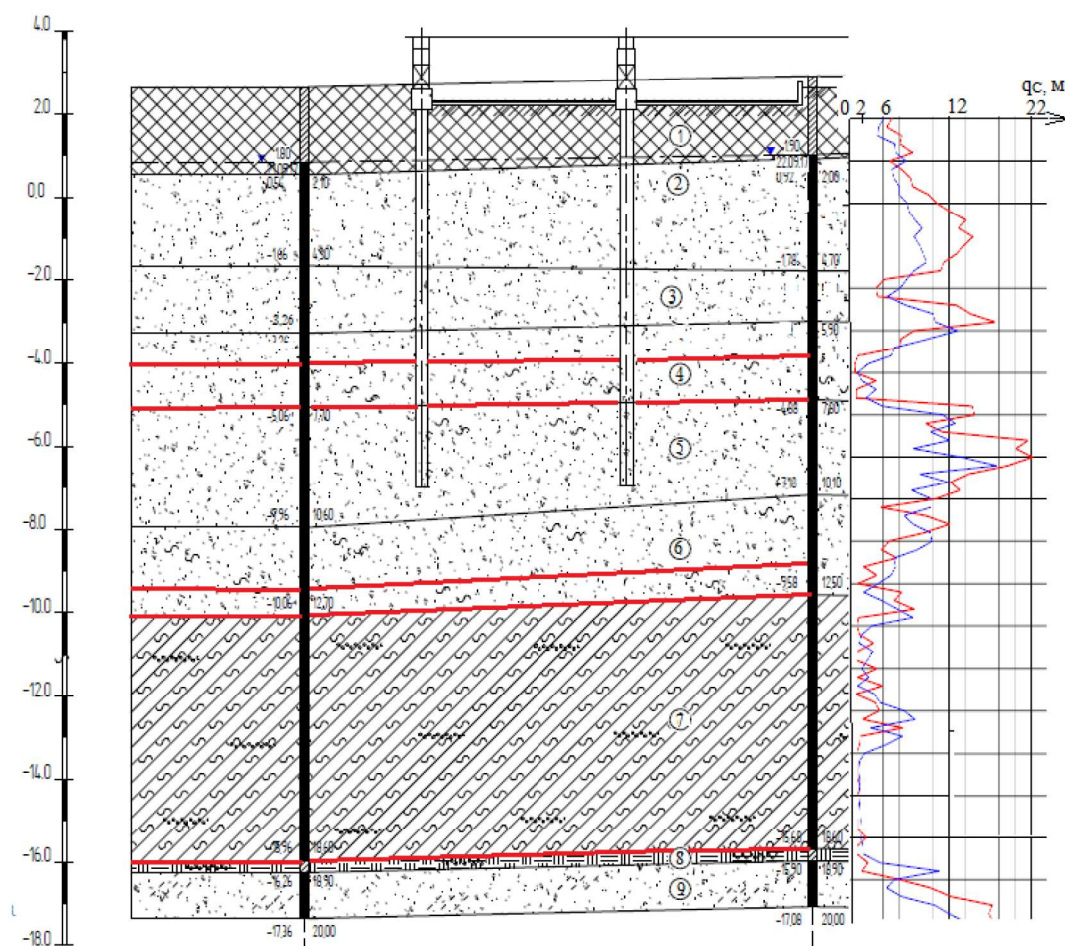


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез площадки строительства: 1 — насыпной грунт; 2 — песок мелкий средней плотности; 3 — песок мелкий плотный; 4 — песок пылеватый рыхлый заиленный; 5 — песок пылеватый плотный; 6 — песок пылеватый средней плотности с линзами и прослойками ила; 7 — ил суглинистый текучий с прослойками песка пылеватого; 8 — торф сильноразложившийся плотный с линзами песка; 9 — песок пылеватый плотный. Красной линией на разрезе выделены слои слабого грунта, влияющие на деформации основания. Результаты статического зондирования: красная линия на графике — сопротивление под конусом зонда (q_c), МПа; синяя линия на графике — сопротивление вдоль муфты трения (f_s), кПа

грунтов приведены в табл. 1. Начало строительства объекта — 2017 г., окончание — 2018 г. Размеры дома в плане 45,6×13,2 м. Здание бескаркасное с несущими продольными и поперечными кирпичными стенами. Фундамент свайный, сваи длиной 9 м. Стены подвала — из фундаментных блоков с монолитным армированным поясом высотой 400 мм. Перекрытия сборные.

Обследование показало наличие неравномерных деформаций основания с раскрытием трещин на 3–9 мм в кирпичной кладке наружных стен на половину высоты здания (рис. 2). Составлена карта выявленных дефектов кирпичной кладки (рис. 3).

На первом этапе исследований определялись деформационные характеристики илов. В ранее выполненных исследованиях [4, 5] нами была сформирована база характеристик грунтов Северодвинска, в которую внесены результаты изысканий, выполненных АрхангельскТИСИзом и другими организациями с 1970-х гг. по настоящее время, а также данные собственных лабораторных экс-

периментов, включая длительные компрессионные испытания. Следует отметить, что отбор образцов илов представляет сложную задачу с учетом их водонасыщенного состояния и глубины залегания, поэтому в отчетах по инженерным изысканиям за последние 7–9 лет результаты длительных компрессионных испытаний отсутствуют. Статистическая обработка сформированной нами базы данных позволила установить для илов значимые зависимости индекса компрессии C_c (рис. 4) и коэффициента вторичной консолидации C_α (рис. 5) от начального коэффициента пористости e_0 и природной влажности W . Выбор указанных деформационных характеристик грунтов вместо модуля деформации был обусловлен применением для расчета осадки основания модели Soft Soil Creep (SSC) в программном комплексе «PLAXIS 3D» [3, 6–8]. С использованием установленных нами регрессионных зависимостей были определены расчетные средние величины параметров сжимаемости ила для рассматриваемого участка строительства:

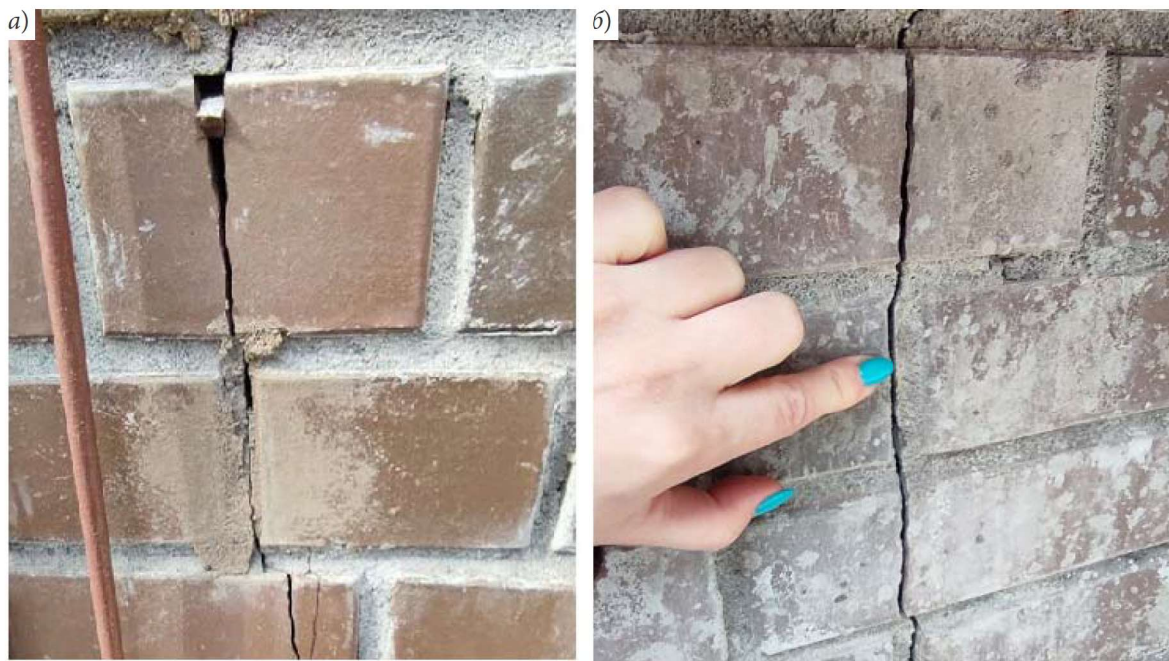


Рис. 2. Трещины в кирпичной кладке стен: а — в центральной части дома с раскрытием до 9 мм; б — под балконами первого этажа с раскрытием до 5 мм



Рис. 3. Схема деформации здания: карта дефектов — трещины в кирпичной кладке наружных стен с указанием раскрытия трещин по состоянию на декабрь 2025 г; красным маркером показано расположение осадочных марок на фасаде дома; зеленым маркером — деформации осадочных марок

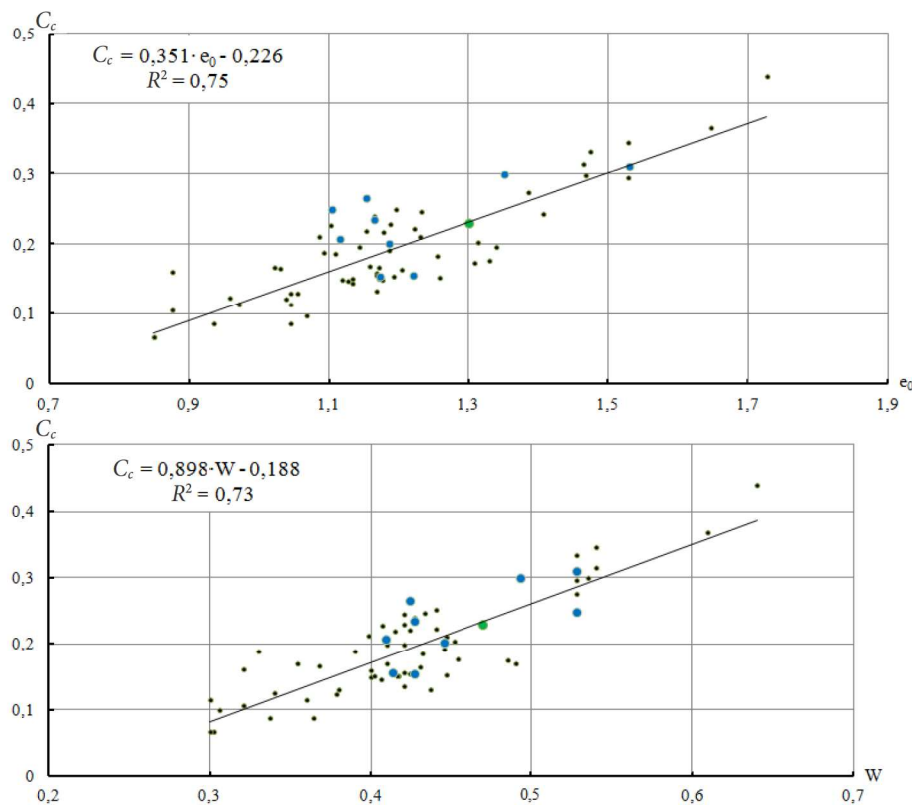


Рис. 4. Зависимости индекса компрессии илов от исходных значений коэффициента пористости и влажности илов: черным маркером показаны данные сформированной базы по Северодвинску; синим маркером — данные собственных лабораторных экспериментов; зеленым маркером — расчетные значения, полученные с помощью эмпирических зависимостей [4]

$C_c = 0,23$; $C_\alpha = 0,007$ — для диапазона влажности 40,0...55,2 % и начального коэффициента пористости 1,1...1,5 (обозначены зеленым маркером на рис. 4 и 5). Найденные расчетные средние величины были сопоставлены с данными собственных лабораторных испытаний на участке: $C_c = 0,17...0,30$ и $C_\alpha = 0,005...0,01$ (обозначены синим маркером на рис. 4 и 5). Как видим, применение в настоящем исследовании только эмпирических зависимостей деформационных характеристик илов дало бы вполне приемлемые результаты.

На рис. 5 показаны зависимости коэффициента вторичной консолидации илов от исходных значений коэффициента пористости и влажности илов: синим маркером — данные собственных лабораторных экспе-

риментов; зеленым маркером — расчетные значения, полученные с помощью эмпирических зависимостей [5].

На втором этапе исследований выполнялось численное моделирование в ПК PLAXIS 3D, позволяющее учесть особенности весьма сложных инженерно-геологических условий района строительства, а также произвести расчет деформации основания во времени [9–11].

В численном моделировании в предварительных расчетах и расчетах деформаций слоев грунта 1–6, 8, 9 (см. рис. 1) использовалась модель Мора–Кулона (МК). При расчете деформаций слабых сильнодеформируемых грунтов — илов (слой 7, см. рис. 1) — использована модель SSC, характеристики грунта приведены в табл. 2. Моделирование здания

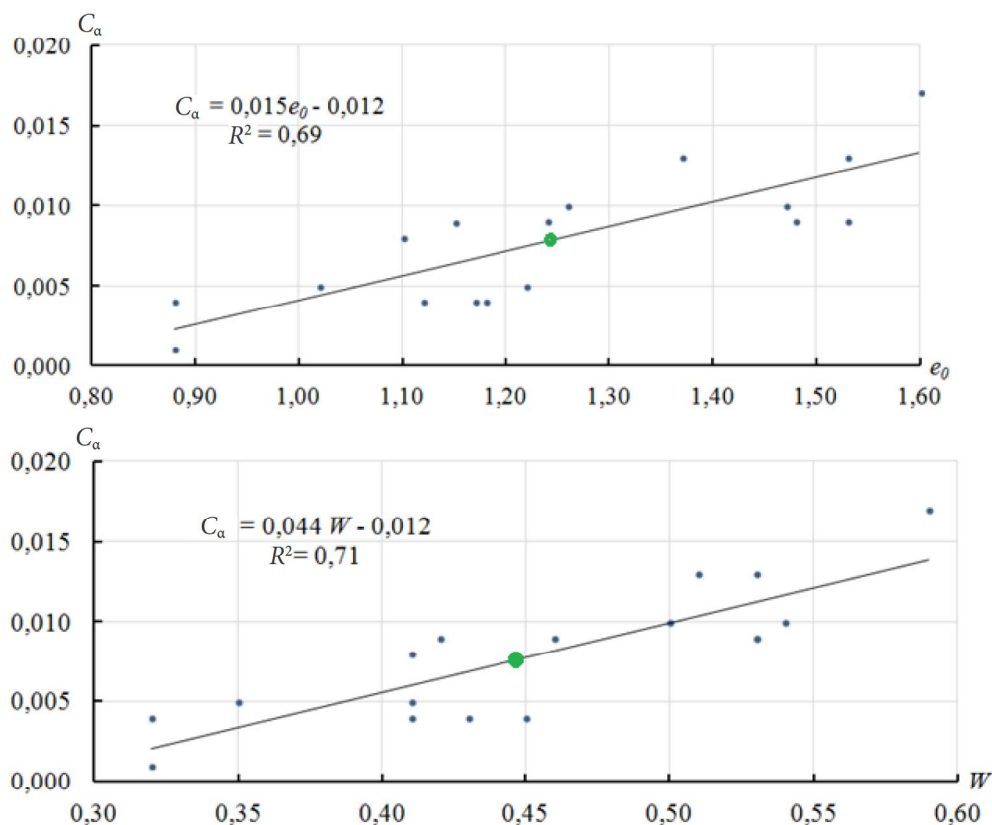


Рис. 5. Зависимости коэффициента вторичной консолидации илов от исходных значений коэффициента пористости и влажности илов: синим маркером показаны данные собственных лабораторных экспериментов; зеленым маркером — расчетные значения, полученные с помощью эмпирических зависимостей [5]

выполнялось с учетом конструктивных решений [12, 13]. Свайное поле создавалось с учетом особенностей расположения всех свай, включая сваи-дублиеры. Несущая способность свай составляла 574 кН, расчетная нагрузка на сваю 410 кН, количество свай 167 шт. Характеристики свай, используемые в модели, представлены на рис. 6.

Далее моделировались основные конструктивные элементы здания — ростверк, стены, перекрытия, кровля. Нагрузка на фундамент задавалась согласно фактическому графику производства работ на объекте. Первая стадия — разработка котлована, устройство свайного поля и ростверка. Вторая стадия — возведение конструкций до 3-го этажа здания. Третья стадия — монтаж конструкций 4-го, 5-го этажей и устройство

кровли. После чего разбивалась сетка конечных элементов модели и выполнялся расчет с учетом эксплуатационных нагрузок.

Третий этап исследований — натурные измерения фактических осадок жилого дома. Наличие таких данных дает возможность оценить точность прогноза и в случае необходимости откорректировать параметры грунта в численной модели и тем самым существенно повысить точность прогноза деформаций оснований [14–17].

Мониторинг начинался с анализа существующей высотной и плановой основы измерений [18, 19]. Затем была восстановлена геодезическая основа исполнительной съемки и выполнены измерения осадки фундамента в подвале дома в местах сопряжений несущих продольных и поперечных стен

Таблица 1

Основные характеристики грунтов, используемые в расчете по модели MC

Номер-идентификатор грунта		1	2	3	4	5	6	8	9
Drainage type		Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
γ_{unsat}	кН/м ³	16,7	19,0	20,2	17,3	20,6	20,6	10,2	1,9
γ_{sat}	кН/м ³	19,4	19,8	20,4	18,9	22,4	20,6	11,3	2,0
e_{init}		0,71	0,67	0,58	0,87	0,54	0,54	6,65	0,55
n_{init}		0,42	0,40	0,37	0,46	0,35	0,35	0,87	0,35
E'_{ref}	кН/м ²	17·10 ³	24·10 ³	41·10 ³	3·10 ³	48·10 ³	2·10 ³	3·10 ³	42·10 ³
$\nu(nu)$		0,30	0,32	0,32	0,32	0,40	0,40	0,30	0,30
c'_{ref}	кН/м ²	1,5	2	4	2	3	5	10	13
$\varphi'(\phi)$	°	24	32	36	26	28	33	10	17
$\psi(psi)$	°	0	2	6	0	0	3	0	0
Model									
Classification type		USDA	USDA	USDA	USDA	USDA	USDA	Standard	Standard
SWCC fitting method		V.Genuchten	V.Genuchten	V.Genuchten	V.Genuchten	V.Genuchten	V.Genuchten	V.Genuchten	V.Genuchten
Soil class (USDA)		Coarse	Coarse	Coarse	Coarse	Coarse	Coarse	Organic	Coarse
Permeabilities									
k_x	м/сут	5	1,5	1	0,5	2	1	1,27	0
k_y	м/сут	5	1,5	1	0,5	2	1	1,27	0
k_z	м/сут	5	1,5	1	0,5	2	1	1,27	0

Таблица 2

Основные характеристики илов, используемые в расчете по модели SSC

Номер-идентификатор грунта		7 — ил суглинистый текучий
Drainage type		Undrained A
γ_{unsat}	кН/м ³	16,7
γ_{sat}	кН/м ³	17,3
e_{init}		1,25
n_{init}		0,55
ν_{ur}		0,06
C_c		0,23
C_s		0,02
C_a		7,7 · 10 ⁻³
c'_{ref}	кН/м ²	10
$\varphi'(\phi)$	°	12
OCR		1
Model		
Classification type		USDA
SWCC fitting method		Van Genuchten
Soil class (USDA)		Silt
< 2 μ m	%	4,304
2...50 μ m	%	91,71
50 μ m — 2 mm	%	3,984
Permeabilities		
k_x	м/сут	1 · 10 ⁻⁴
k_y	м/сут	1 · 10 ⁻⁴
k_z	м/сут	1 · 10 ⁻⁴

(рис. 7, точки 100–114), а также по углам дома (см. рис. 7, марки М1–М6). Режим наблюдений — два цикла в год.

Применялось высокоточное геодезическое оборудование Trimble DINI 0.3 с инварными кодовыми рейками LD 13, LD 12. Камеральная обработка полевых материалов велась с использованием программ «Credo Нивелир», AutoCAD Civil 3D 2015, Credo_DAT 5.2, «Кредо расчет деформаций 2.0».

По итогам результатов измерений приведена схема деформаций жилого дома с указанием значений фактической осадки по состоянию на декабрь 2025 г. (см. рис. 3).

Результаты

Расчетная осадка основания за период от начала строительства объекта до декабря 2025 г. (3243 дня) в зависимости от расположения расчетной точки изменяется от 115 до 129 мм (рис. 8). Осадку основания после завершения строительства за период с января 2019 г. по декабрь 2025 г. составила 64 мм.

Фактическая осадка на этапе эксплуатации (2533 дня после окончания строитель-

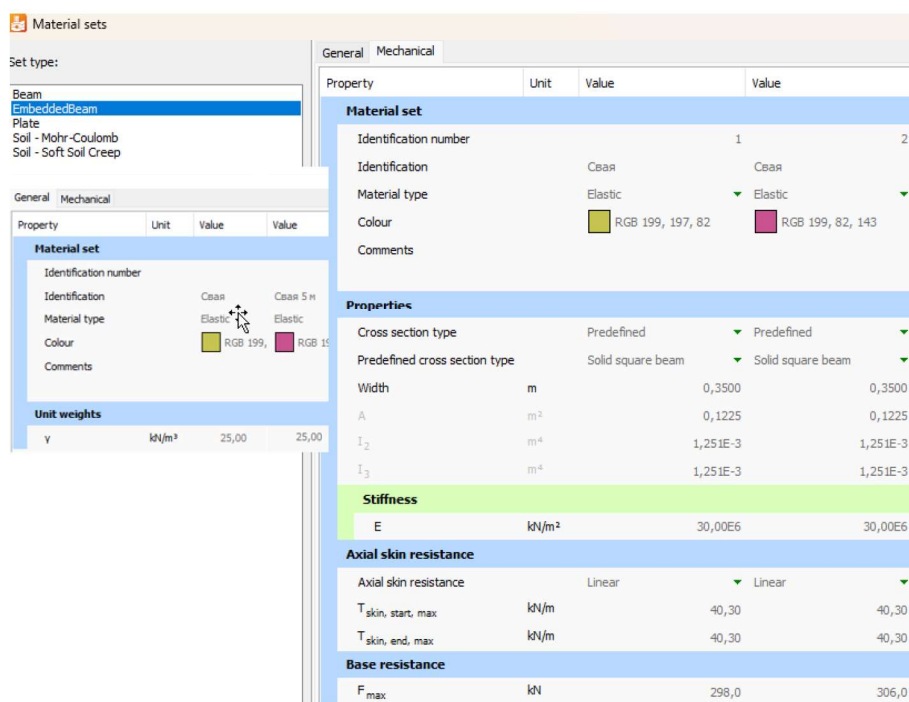


Рис. 6. Характеристики моделирования свайного поля

ства) составила 48...82 мм при среднем значении 70 мм (рис. 9).

Результаты натурных наблюдений и численного моделирования показали достаточно близкие значения осадки. Относительная разность осадок между точками наблюдения в половине случаев превышает предельное значение $(\Delta S/L)_u = 0,002$.

Обсуждение

Расчетные данные и результаты наблюдений за осадкой дома показали, что стабилизация осадки фундамента не достигнута по истечении семи лет после завершения строительства и далее будет только возрастать. Данные мониторинга позволяют выполнить прогноз осадки на заданное время эксплуатации дома: 10 лет — 55...90 мм, 20 лет — 90...105 мм. С учетом осадки после завершения строительства, равной 50...65 мм, суммарная осадка дома через 20 лет от начала строительства составит в среднем 155 мм. Сопоставление фактических и расчетных данных осадки для объекта наблюдений показало хорошую сходимость, что подтверж-

дает адекватность принятой расчетной модели и достоверность исходных данных, в частности параметров C_c и C_u , определенных на основе экспериментальных данных и локальных регрессионных зависимостей. Результаты мониторинга позволяют определить характер развития осадки во времени и внести корректировки в численные модели прогнозирования деформаций оснований, сложенных слабыми глинистыми грунтами четвертичных отложений. Дальнейшая верификация расчетных параметров по результатам обратного анализа данных мониторинга позволит повысить точность прогноза деформаций в рассматриваемых сложных геологических условиях и распространить их для других объектов.

Обзор исследований авторов, занимавшихся наблюдениями за деформациями зданий в схожих инженерно-геологических условиях, показал, что полученные нами результаты являются вполне типичными [20–22]. В частности, в качестве примера рассмотрим исследования L. Bjerrum [23].

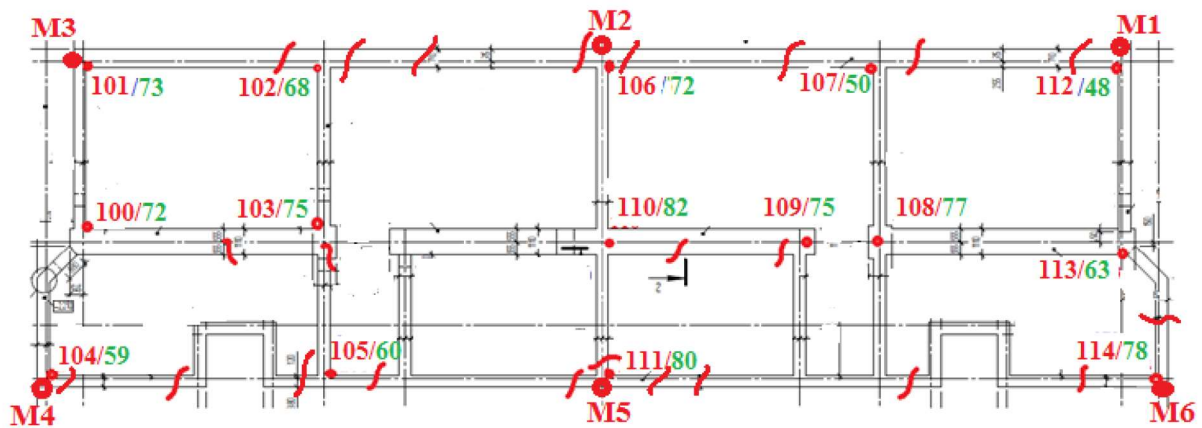


Рис. 7. Карта деформаций в подвале дома: трещины во внутренней версте кирпичной кладки стен с раскрытием до 7 мм; зеленым маркером обозначена величина осадки точек наблюдения

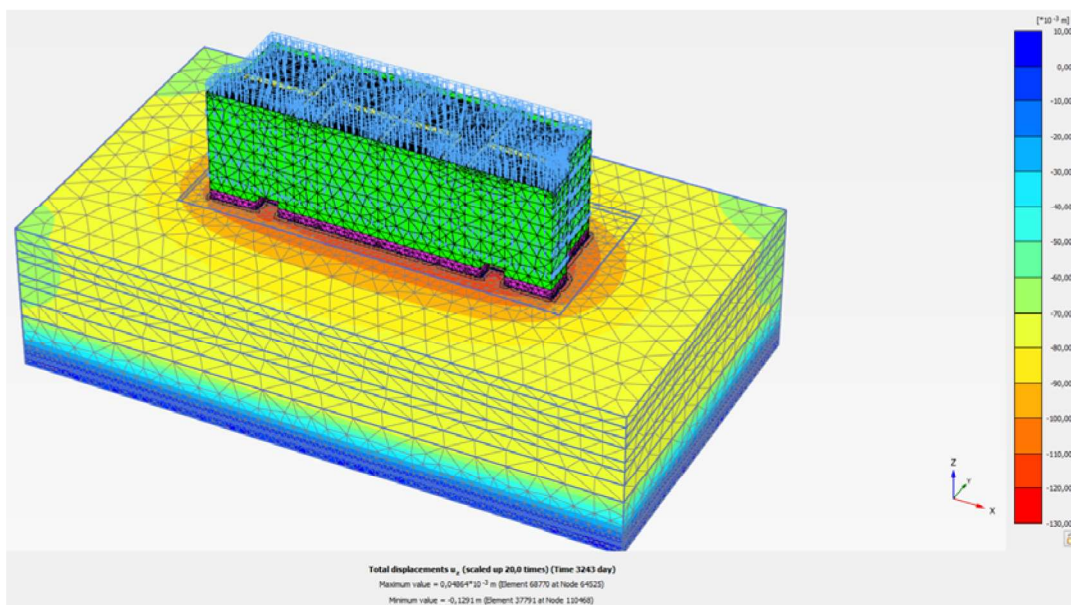


Рис. 8. Численная модель жилого дома

Сопоставимым с нашим объектом исследований является 4–5-этажное здание Norgebygget на свайном фундаменте, в основании присутствуют морские илы мощностью 6 м с влажностью 30...50 %, индексом компрессии $C_c = 0,2-0,4$, коэффициентом вторичной консолидации $C_\alpha = 0,006-0,012$. Приращение осадки за 10 лет эксплуатации после окончания строительства составило 118 мм. Анализ данных показал, что для зданий средней этажности, возведенных при наличии мор-

ских илов в основании, осадка превышает допустимые значения и продолжает нарастать в течение длительного времени.

Выводы

1. Расчетное значение осадки фундамента жилого дома в течение семи лет после окончания строительства составило 50...64 мм, фактическое значение по данным мониторинга — 48...82 мм. Прогнозное значение осадки в течение 20 лет эксплуатации дома — 90...105 мм. Суммарная осадка

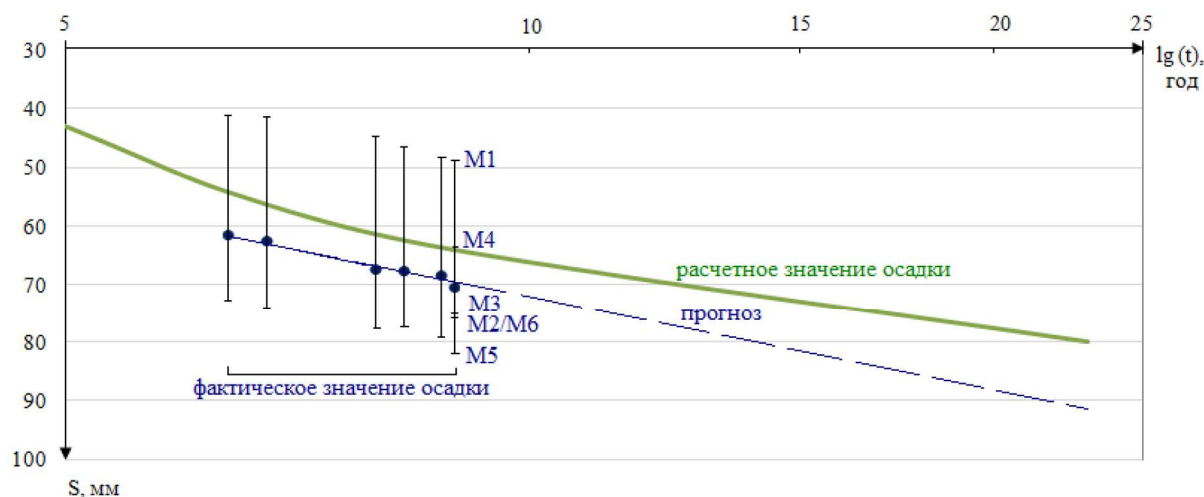


Рис. 9. График осадки здания после окончания строительства на этапе эксплуатации: сплошная зеленая линия — расчетное значение осадки; сплошная синяя линия — фактическое значение по результатам мониторинга; пунктирная синяя линия — прогнозное среднее значение

от начала строительства составит в среднем 155 мм.

2. Возможно определение деформационных характеристик илов с помощью эмпирических зависимостей, в частности индекса компрессии (C_c) и коэффициента вторичной консолидации (C_{α}), в соответствии с коэффициентом пористости и влажности с использованием сформированной базы данных.

Библиографический список

1. Ледяев С. В. Неоднородные грунтовые напластования с промежуточным слабым слоем как основания фундаментов мелкого заложения: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1992. 178 с.
2. Хотьков В. Я. Работа свай и ленточных свайных фундаментов в верхнем несущем слое слоистого основания: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1983. 217 с.
3. Васенин В. А., Астафьева Е. Д. Учет реологических свойств грунтов при расчете осадок зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 1 (1). С. 1–21.
4. Глебова (Патракеева) Ю. М., Невзоров А. Л. Регрессионный анализ индекса компрессии отложений ила на побережье Белого моря // Construction and Geotechnics. 2022. Т. 13, № 2. С. 18–33.
5. Глебова (Патракеева) Ю. М., Невзоров А. Л., Никитин А. В. Вторичная консолидация илов беломорского побережья Архангельской области // Известия вузов. Строительство. 2023. № 7 (775). С. 15–27.
6. Suneel M., Park L. K., Im J. C. Compressibility characteristics of Korean marine clay // Marine Georesources and Geotechnology. 2008. Vol. 26 (2). Pp. 111–127.
7. Yin Z. Z., Zhang H. B., Zhu J. G., Li G. W. Secondary consolidation of soft soils // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2003. Vol. 25 (5). Pp. 521–526.
8. Waterman D., Broere W. Practical application of the Soft Soil Creep model // Plaxis Bulletin. 2011. Vol. 15. Pp. 1–15.
9. Лучкин М. А. Учет развития деформаций основания во времени при совместном расчете системы основание–фундамент–здание // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2006. № 2 (7). С. 41–49.
10. Мангушев Р. А., Дьяконов И. П., Полунин В. М. Численные расчеты в геотехнической практике. (Опыт применения конечно-элементного программного комплекса «ПЛАКСИС»). 2-е изд., стер. М.: АСВ, 2023. 316 с. ISBN 978-5-4323-0443-8.
11. Ter-Martirosyan A. Z., Sidorov V. V., Ermoshina L. Yu. Determination and verification of parameters of the soft soil model with account for creep // Vestnik MGSU. 2018. Vol. 13. № 6 (117). Pp. 697–708.
12. Лушников В. В., Ярдяков А. С. Анализ расчетов осадок в нелинейной стадии работы грунта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2014. № 2. С. 44–55.
13. Лушников В. В., Кириллов В. М., Конюшков В. В. Адаптивное управление параметрами фундаментов и оснований // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 5 (76). С. 119–124.

14. Васенин В. А., Шашкин А. Г. Осадки зданий на слабых глинистых грунтах (на примере застройки Санкт-Петербурга) // Геотехника. 2018. Т. X, № 4. С. 32–45.

15. Григорьев Д. О., Максименко Л. А., Коробова О. А. Наблюдения за осадками фундаментов зданий и сооружений в эксплуатационный период // Известия вузов. Строительство и архитектура. 2024. № 8 (788). С. 144–152.

16. Новиков Ю. А., Краев А. Н. Геодезические наблюдения за осадками здания в рамках проведения геотехнического мониторинга // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2019. Т. 24, № 1. С. 28–41.

17. Травуш В. И., Шахрамян А. М., Колотовичев Ю. А., Шахворостов А. И., Десяткин М. А., Шулятьев О. А., Шулятьев С. О. «Лахта Центр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 4. С. 94–108.

18. Васенин В. А. Исследование городской нивелирной сети для оценки развития длительных осадок исторической застройки Санкт-Петербурга // Инженерные изыскания. 2013. № 4. С. 44–53.

19. Новиков Ю. А., Хорошилов В. С., Мальцева Т. В. Прогноз деформационного процесса по геодезическим наблюдениям на основе кинематической модели // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2025. Т. 30, № 2. С. 36–46.

20. Aguiar V. N., Andrade M. E. S., Martins I. S. M., Rémy J. P. P., Lima P. E. Compressibility and consolidation properties of Santos soft clay near Barnabé Island // Soils and Rocks. 2021. Vol. 44 (4). Pp. 1–18.

21. Miao L., Kavazanjian Jr. E. Secondary compression features of Jiangsu soft marine clay // Marine Georesources & Geotechnology. 2007. Vol. 25 (2). Pp. 129–144.

22. Faisal M. Marine soft clays of Santos, Brazil: Building settlements and geological history // Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2006, 12–16 September, Osaka, Japan. Pp. 405–408.

23. Bjerrum L. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to the settlements of buildings // Géotechnique. 1967. Vol. 17 (2). Pp. 83–118.

References

1. Ledyayev S. V. *Neodnorodnye gruntovye naplastovaniya s promezhutochnym slabym sloem kak osnovaniya fundamentov melkogo zalozeniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Heterogeneous soil strata with an

intermediate weak layer as the base of shallow foundations. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 1992, 178 p.

2. Khotyakov V. Ya. *Rabota svay i lentochnykh svaynykh fundamentov v verkhnem nesushchem sloe sloistogo osnovaniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Operation of piles and strip pile foundations in the upper bearing layer of the layered base. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1983, 217 p.

3. Vasenin V. A., Astaf'eva E. D. *Uchet reologicheskikh svoystv gruntov pri raschete osadok zdaniy* [Taking into account the rheological properties of soils when calculating the building settlement]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of Unique Buildings and Structures*, 2012, no. 1 (1), pp. 1–21.

4. Glebova (Patrakeeva) Yu. M., Nevzorov A. L. *Regressionniy analiz indeksa kompressii otlozheniy ila na poberezh'e Belogo morya* [Regression analysis of the compression index of silt deposits on the White Sea coast]. *Construction and Geotechnics – Construction and Geo-engineering*, 2022, vol. 13, no. 2, pp. 18–33.

5. Glebova (Patrakeeva) Yu. M., Nevzorov A. L., Nikitin A. V. *Vtorichnaya konsolidatsiya ilov belomorskogo poberezh'ya Arkhangel'skoy oblasti* [Secondary consolidation of silts of the White Sea coast of the Arkhangelsk region]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo – Bulletin of Universities. Construction*, 2023, no. 7 (775), pp. 15–27.

6. Suneel M., Park L. K., Im J. C. Compressibility characteristics of Korean marine clay. *Marine Geo-resources and Geo-technology*. 2008, vol. 26 (2), pp. 111–127.

7. Yin Z. Z., Zhang H. B., Zhu J. G., Li G. W. Secondary consolidation of soft soils. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, vol. 25 (5), pp. 521–526.

8. Waterman D., Broere W. Practical application of the Soft Soil Creep model. *Plaxis Bulletin*, 2011, vol. 15, pp. 1–15.

9. Luchkin M. A. *Uchet razvitiya deformatsiy osnovaniya vo vremeni pri sovместnom raschete sistemy osnovanie-fundament-zdanie* [Taking into account the development of foundation deformations in time when jointly calculating the foundation-foundation-building system]. *Izv. Peterburgskogo gos.un-ta putey soobshcheniya – Bulletin of Petersburg State University Railway Transportation*, 2006, no. 2 (7), pp. 41–49.

10. Mangushev R. A., D'yakonov I. P., Polunin V. M. *Chislennyye raschety v geotekhnicheskoy praktike. (Opyt primeneniya konechno-elementnogo programmnogo kompleksa «PLAKSIS»)* [Numerical calculations in geotechnical practice. (Experience of PLAXIS finite element software application)]. 2-nd ed., revised. Moscow, ASV Publ., 2023, 316 p. ISBN 978-5-4323-0443-8.

11. Ter-Martorosyan A. Z., Sidorov V. V., Ermoshina L. Yu. Determination and verification of

parameters of the soft soil model with account for creep. *Vestnik MGSU*, 2018, vol. 13, no 6 (117), pp. 697–708.

12. Lushnikov V. V., Yaryakov A. S. *Analiz raschetov osadok v nelineynoy stadii raboty grunta* [Analysis of settlement calculations in the nonlinear stage of soil operation]. *Vestnik Permskogo nats. issled. politekhn. un-ta. Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of Perm National Polytechnic University. Construction and Architecture*, 2014, no. 2, pp. 44–55.

13. Lushnikov V. V., Kirillov V. M., Konyushkov V. V. *Adaptivnoe upravlenie parametrami fundamentov i osnovaniy* [Adaptive control of foundation and base parameters]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 5 (76), pp. 119–124.

14. Vasenin V. A., Shashkin A. G. *Osadki zdaniy na slabykh glinistyykh gruntakh (na primere zastroyki Sankt-Peterburga)* [Settlement of buildings on weak clay soils (on the example of the development of St. Petersburg)]. *Geotekhnika – Geo-engineering*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 32–45.

15. Grigor'ev D. O., Maksimenko L. A., Korobova O. A. *Nablyudeniya za osadkami fundamentov zdaniy i sooruzheniy v ekspluatatsionnyy period* [Observations of settlement of foundations of buildings and structures during the operational period]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo i Arkhitektura – Bulletin of Universities. Construction and Architecture*, 2024, no. 8 (788), pp. 144–152.

16. Novikov Yu. A., Kraev A. N. *Geodezicheskie nablyudeniya za osadkami zdaniya v ramkakh provedeniya geotekhnicheskogo monitoringa* [Geodetic observations of building settlements as part of geotechnical monitoring]. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gos. un-ta geosistem i tekhnologiy) – Bulletin of SGUGiT (Siberian State University of Geo-systems and Technologies)*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 28–41.

17. Travush V. I., Shakhramyan'yan A. M., Kolotovichev Yu. A., Shakhvorostov A. I., Desyatkin M.

A., Shulyat'ev O. A., Shulyat'ev S. O. «*Lakhta Tsentra*»: *avtomatizirovanniy monitoring deformatsiy nesushchikh konstruktsey i osnovaniya* [«Lakhta Center»: automated monitoring of deformations of supporting structures and the base]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo – Academia. Architecture and Construction*, 2018, no. 4, pp. 94–108.

18. Vasenin V. A. *Issledovanie gorodskoy nivelirnoy seti dlya otsenki razvitiya dlitel'nykh osadok istoricheskoy zastroyki Sankt-Peterburga* [Study of the urban leveling network to assess the development of long-term sediments of historical buildings in St. Petersburg]. *Inzhenernye izyskaniya – Engineering Survey*, 2013, no. 4, pp. 44–53.

19. Novikov Yu. A., Khoroshilov V. S., Mal'tseva T. V. *Prognoz deformatsionnogo protsessa po geodezicheskim nablyudeniya na osnove kinematicheskoy modeli* [Forecasting of deformation process by geodetic observations based on kinematic model]. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gos. un-ta geosistem i tekhnologiy) – Bulletin of SGUGiT (Siberian State University of Geo-systems and Technologies)*, 2025, vol. 30, no. 2, pp. 36–46.

20. Aguiar V. N., Andrade M. E. S., Martins I. S. M., Rémy J. P. P., Lima P. E. Compressibility and consolidation properties of Santos soft clay near Barnabé Island. *Soils and Rocks*, 2021, vol. 44 (4), pp. 1–18.

21. Miao L., Kavazanjian Jr. E. Secondary compression features of Jiangsu soft marine clay. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2007, vol. 25 (2), pp. 129–144.

22. Faisal M. Marine soft clays of Santos, Brazil: Building settlements and geological history. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2006, 12–16 September, Osaka, Japan, pp. 405–408.

23. Bjerrum L. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to the settlements of buildings. *Géotechnique*, 1967, vol. 17 (2), pp. 83–118.