

УДК 624.15

© А. И. Полищук, д-р техн. наук, профессор
© М. Б. Мариничев, д-р техн. наук, профессор
(Кубанский государственный аграрный
университет им. И. Т. Трубилина, Краснодар, Россия)
E-mail: ofpai@mail.ru, marinichev@list.ru
© Н. С. Никитина, канд. техн. наук, профессор
(Московский государственный строительный
университет, Москва, Россия)
E-mail: nsnikitina@mail.ru
© В. О. Бушueva, магистрант
(Кубанский государственный аграрный
университет им. И. Т. Трубилина, Краснодар, Россия)
E-mail: bushueva.vita@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-4-54-66

© А. И. Polischuk, Dr. Sci. Tech., Professor
© М. В. Marinichev, Dr. Sci. Tech., Professor
(Kuban State University named after I. T. Trubilin,
Krasnodar, Russia)
E-mail: ofpai@mail.ru, marinichev@list.ru
© N. S. Nikitina, PhD in Sci. Tech., Professor
(Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia)
E-mail: nsnikitina@mail.ru
© V. O. Bushueva, undergraduate
(Kuban State University named after
I. T. Trubilin, Krasnodar, Russia)
E-mail: bushueva.vita@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ИЗ ЗАБИВНЫХ СВАЙ В МАКРОПОРИСТЫХ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТАХ ДЛЯ МНОГОЭТАЖНЫХ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ

SUBSTANTIATION OF THE USE OF PILE FOUNDATIONS WITH DRIVEN PILES IN MACRO-POROUS SUBSIDING SOILS FOR MULTI-STOREY CIVIL BUILDINGS

Обосновывается метод проектирования свайных фундаментов из забивных железобетонных свай в макропористых просадочных грунтах второго типа по просадочности с учетом опирания нижних концов на несущие непросадочные слои основания для многоэтажных гражданских зданий. Анализируются грунтовые условия, включая данные о физических, деформационных, прочностных, просадочных характеристиках грунтов и методы их определения. Установлен тип грунтовых условий по просадочности, излагается метод выбора вида свай и их длины. Приводятся экспериментальные исследования несущей способности свай; численные исследования работы свай и оценка их несущей способности. Предложена методика калибровки расчетной модели взаимодействия свай с просадочным грунтом, а также алгоритм назначения параметров интерфейсов для моделирования их работы.

Ключевые слова: свайные фундаменты, просадочные грунты, результаты экспериментальных и численных исследований, методика калибровки, параметры интерфейсов.

For multi-storey civil buildings, there is substantiated the method of designing pile foundations from driven reinforced concrete piles in macro-porous subsiding soils of the second type in terms of subsidence, taking into account the support of the lower ends on the load-bearing non-subsiding layers of the foundation. Soil conditions are analyzed, including data on physical, deformation, strength, subsidence characteristics of soils and methods for their determination. The type of soil conditions for subsidence is established, the method of choosing the piles' kind and their length is outlined. Experimental studies of the bearing capacity of piles are given; including numerical studies of pile operation and assessment of their bearing capacity. A method for calibrating the calculation model of the interaction of piles with subsiding soil, as well as an algorithm for assigning interface parameters for modeling their operation are proposed.

Keywords: pile foundations, subsiding soils, results of experimental and numerical studies, calibration methodology, interface parameters.

Введение

На примере проектирования гражданских зданий в условиях юга России обосновываются методы расчета и конструирования свайных фундаментов из забивных

железобетонных свай в макропористых просадочных грунтах [1–5].

Инженерно-геологический разрез строительной площадки представлен следующими грунтами:

1. Почвенно-растительный слой мощностью 0,2–0,4 м.

2. Слой маловлажного, макропористого просадочного суглинка от полутвердой до твердой консистенции желтовато-коричневого цвета с включениями гипса и карбонатных солей (ИГЭ-1). Толщина слоя колеблется в пределах 9,6–11,8 м.

3. На глубине примерно 10,7 м от поверхности находится прослойка погребенной почвы, представленная суглинком твердым, полутвердым, просадочным темно-коричневого цвета с обильным включением солей мощностью 1,9–2,5 м (ИГЭ-2).

4. Ниже, на глубине примерно 11,5–14,3 м, залегает слой маловлажного, макропористого суглинка тугопластичного, желтовато-коричневого цвета, с включением карбонатных солей. Мощность этого слоя колеблется в пределах 6,9–7,7 м (ИГЭ-3).

5. На глубине 18,4–22,0 м от поверхности находится мелкий галечник с песчаным заполнителем (ИГЭ-4). Подземные воды до глубины 25 м не вскрыты.

Исследования свойств грунтов выполнялись в лабораторных и полевых условиях. Отбор грунтов производился из основания естественного сложения (маловлажного), а также после его предварительного замачивания (влажного) согласно ГОСТ 12071–2000. Здесь и далее в тексте под термином «маловлажные грунты» понимается макропористое основание природного сложения при его естественной влажности ($S_r \leq 0,5$); «влажные грунты» — макропористое основание после его предварительного увлажнения ($0,5 \leq S_r \leq 0,8$).

Физические свойства грунтов исследовались согласно действующим нормативным документам (ГОСТ 5180–2015, ГОСТ 20522–2012) и рекомендациям технической литературы [6, 7]. При анализе результатов исследований свойств макропористых просадочных грунтов опытной площадки было установлено, что до глубины 15 м изменение

их плотности и влажности в пределах каждого инженерно-геологического элемента (ИГЭ-1, ИГЭ-2) незначительное и не превышает 3–5 %. Следовательно, грунтовое основание можно считать практически однородным (табл. 1).

Деформационные характеристики макропористых грунтов (ИГЭ-1, ИГЭ-2 и др.) на начальном этапе исследований определялись в лабораторных условиях с использованием компрессионных приборов в соответствии с требованиями нормативных документов и стандартов: ГОСТ 12248.4–2020, СП 22.13330.2016, ГОСТ 23161–2012. Максимальное давление на образцы грунта не превышало 250–350 кПа. Всего было проанализировано около 30 компрессионных испытаний для маловлажных и влажных макропористых просадочных грунтов (табл. 2). Анализ полученных результатов свидетельствует, что значения характеристик модуля общей деформации грунтов E существенно зависят от влажности, пористости, величины прикладываемого давления и структурной прочности грунтов [2, 6, 8, 9].

Прочностные характеристики грунтов φ и c определялись методом одноплоскостного среза по ГОСТ 12248.1–2020. В опытах использовалась схема быстрого сдвига в условиях незавершенной консолидации без предварительного уплотнения образцов грунта.

Было установлено, что характеристики удельного сцепления c для маловлажных грунтов примерно в три раза больше, чем для влажных грунтов. Характеристика угла внутреннего трения φ при этом изменяется незначительно. Для маловлажных грунтов характеристика угла внутреннего трения φ на 1–2 ° больше, чем у влажных грунтов (табл. 3) [7, 8].

Характеристики просадочности — относительная просадочность ε_{sl} и начальное просадочное давление p_{sl} — определялись в лабораторных условиях согласно требованиям ГОСТ 23161–2012. Значения относи-

Таблица 1

Физические характеристики лёссовых просадочных грунтов опытной площадки

Грунты основания, инженерно-геологические элементы (ИГЭ)	Мощность слоя, м	Плотность ρ , г/см ³	Плотность скелета ρ_d , г/см ³	Естественная влажность W , %	Плотность частиц ρ_s , г/см ³	Коэффициент пористости e , доли ед.	Коэффициент водонасыщения S_r , доли ед.	Влажность на границе текучести W_p , %	Влажность на границе раскатывания W_r , %	Число пластичности J_p , %	Показатель текучести I_L , доли ед.
Суглинок гумусированный, макропористый ИГЭ-1	10,4	$\frac{1,59}{1,79}$	$\frac{1,41}{1,44}$	$\frac{12,5}{23,6}$	2,73	$\frac{0,94}{0,90}$	$\frac{0,36}{0,720}$	$\frac{0,94}{0,90}$	17,7	9,0	$\frac{< 0}{0,66}$
Суглинок темно-коричневый (прослойка), ИГЭ-2	1,9–2,5	$\frac{1,70}{1,81}$	$\frac{1,49}{1,48}$	$\frac{14,2}{22,0}$	2,72	$\frac{0,82}{0,83}$	$\frac{0,47}{0,72}$	27,1	16,9	10,2	$\frac{< 0}{0,51}$
Суглинок желтовато-коричневый, ИГЭ-3	6,9–7,7	1,75	1,45	21,0	2,71	0,87	0,65	27,0	17,0	10,0	0,4
Мелкий галечник, ИГЭ-4	Более 5,0	–	–	–	2,68	0,65	–	–	–	–	–

Примечание. В числителе — характеристики грунтов естественной влажности (маловлажных), в знаменателе — предварительно увлажненных (влажных) грунтов.

тельной просадочности устанавливались по методу «двух кривых» при испытаниях образцов-близнецов в компрессионных приборах с учетом действующего на них давления от собственного веса грунта и давления, передаваемого подошвой фундамента на рассматриваемой глубине.

Значение параметра начального просадочного давления p_{sp} согласно требованиям

нормативных документов принималось равным давлению на образец грунта, при котором относительная просадочность ϵ_{sl} составляла 0,01 (табл. 4) [4, 6, 7].

Было установлено, что в пределах глубины до 12–13 м от поверхности основания залегает толща макропористого просадочного грунта (два слоя суглинка: ИГЭ-1 и ИГЭ-2), просадка которого от действия собственного

Таблица 2

Данные о результатах компрессионных испытаний лёссовых просадочных грунтов

Инженерно-геологические элементы	Интервал давления на образец, кПа	Значения модуля общей деформации E лёссовых грунтов, МПа	
		маловлажных	влажных
ИГЭ-1	100...140	7,1	1,6
	140...200	11,4	1,0
	200...250	14,2	1,3
ИГЭ-2	100...140	7,7	11,1
	140...200	12,4	10,9
	200...250	15,4	14,0
ИГЭ-3	100...140	7,8	–
	140...200	12,5	–
	200...250	15,6	–
ИГЭ-4	–	25	–

Таблица 3

Данные о результатах лабораторных испытаний характеристик прочности макропористых просадочных грунтов

Инженерно-геологические элементы	Прочностные характеристики грунтов c и φ	Значения характеристики прочности лёссовых просадочных грунтов c , кПа; φ , град.	
		маловлажных	влажных
ИГЭ-1	c	42	10
	φ	24	22
ИГЭ-2	c	38	14
	φ	23	21
ИГЭ-3	c	25	–
	φ	22	–
ИГЭ-4	c	–	–
	φ	–	–

веса при замачивании составляет более 5 см (фактически 23,7 см). Следовательно, грунтовые условия рассматриваемой площадки относятся ко **второму типу по просадочности**.

Материалы и методы

Для рассматриваемых зданий, которые предполагалось построить на свайных фундаментах, **приняты железобетонные призматические сваи** заводского изготовления длиной 10 м с поперечным сечением 300 × 300 мм, погружаемые в грунт в готовом

виде с отметки поверхности дна котлована [2, 4, 6, 9]. Поскольку основание рассматриваемой строительной площадки сложено преимущественно макропористыми твердыми суглинками, то для погружения свай в такие грунты следовало предусмотреть устройство **лидерных скважин**, площадь поперечного сечения которых должна быть на 15–20 % меньше площади сечения призматических свай. Глубину лидерных скважин было рекомендовано устроить до отме-

Таблица 4

Результаты исследований относительной просадочности ϵ_{sp} при давлении на образцы

Грунты основания	Расчетная мощность ИГЭ, м	Мощность элементарного слоя h_p , м	Отметка отбора образцов от поверхности земли, м	Относительная просадочность ϵ_{sp} доли ед., при давлении p , кПа						Начальное просадочное давление P_{sp} , кПа
				20	60	100	140	200	250	
Суглинок твердый, гумусированный, макропористый, ИГЭ-1	10,4	2,7	–2,7	0,000	0,013	0,027	0,034	0,052	0,056	65
		2,7	–5,4	0,000	0,011	0,024	0,030	0,046	0,050	65
		2,7	–8,1	0,000	0,010	0,021	0,027	0,040	0,045	–
		2,6	–10,7	0,000	–	–	0,025	–	0,042	–
Суглинок твердый, полутвердый, темно-коричневый, ИГЭ-2	2,2	0,7	–11,4	0,000	0,010	0,013	0,017	0,021	0,023	–
		0,7	–12,1	0,000	0,011	0,012	0,015	0,019	0,021	–
		0,8	–12,9	0,000	0,011	0,012	–	0,015	0,013	–
Суглинок тугопластичный, желтовато-коричневый, ИГЭ-3	7,3	1,8	–14,7	–	–	0,008	0,010	0,010	0,010	–
		1,8	–16,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	–
		1,8	–18,3	–	–	–	–	–	–	–
		1,9	–20,2	–	–	–	–	–	–	–

ток примерно 11,1–11,9 м от поверхности основания. В пределах этой глубины залегает преимущественно ИГЭ-1 и частично ИГЭ-2 (первые два слоя от поверхности основания). Несущим слоем для призматических свай заводского изготовления было рекомендовано принять суглинок тугопластичный ИГЭ-3. Глубина погружения нижнего конца свай в несущий слой должны составлять не менее 1,0 м (см. табл. 1).

Далее рассмотрим экспериментальные и численные исследования несущей способности забивных железобетонных свай в просадочных грунтах. Несущая способность рассматриваемых натурных свай вначале определялась **экспериментально** по результатам полевых испытаний статической вдавливающей нагрузкой. Статические испытания свай проводились на маловлажных и влажных макропористых просадочных грунтах в соответствии с требованиями нормативных документов России (ГОСТ 30672–2019, ГОСТ 5686–2020, СП.24.13330.2021 и др.) и другой технической литературы [2, 6, 10].

Согласно п. 7.3.5 СП 22.13330.2016, за несущую способность свай (частное значение предельного сопротивления) F_u принималась вдавливающая нагрузка, под воздействием которой испытываемая свая получала осадку $S = \xi S_{u,mt}$ (ξ — коэффициент, равный 0,2 в случае, когда испытание свай производилось при условной стабилизации, равной 0,1 мм за 1 ч, если под ее нижним концом залегали песчаные грунты и глинистые твердой консистенции; $S_{u,mt}$ — предельное значение средней осадки фундамента проектируемого здания, устанавливаемое по указаниям проектной организации). В рассматриваемом случае значение $S_{u,mt}$ принималось равным 12 см (СП 22.13330.2016). Исходя из вышеизложенной формулы, осадка S , соответствующая несущей способности (предельному сопротивлению) свай F_u при естественной влажности, составила $S = 0,2 \cdot 12 = 2,4$ см

(24 мм). Результаты экспериментальных исследований были обобщены в виде графиков, показывающих зависимость осадки свай от внешней нагрузки.

Для оценки работы железобетонных свай заводского изготовления в макропористых просадочных грунтах второго типа по просадочности авторами на следующем этапе проводились **численные исследования** с использованием программного комплекса *Midas Fea NX*. При этом выявлялось влияние замачивания грунтов основания (например, аварийного) на несущую способность и осадки свай, а также на развитие неравномерных деформаций свайных фундаментов.

Для моделирования нагружения (работы) грунтов в основании использовалась модель упрочняющегося грунта при малых деформациях (HS small) [21], которая учитывает зависимость деформируемости (параметры E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} , G_0^{ref} , ν , m) и прочности грунта (параметры ϕ , c) от напряжений и перемещений, а также его переуплотнение (OCR , POP) в ходе исторического нагружения, что позволяет более точно выявить его нелинейную деформируемость при внешнем нагружении. Рассматриваемая модель обеспечивает корректное описание процессов взаимодействия свай с грунтом, а также действие циклического нагружения и развития порового давления в недренированных условиях, что важно для сложных инженерных задач. Для материала свай применялась линейно-упругая модель с соответствующими жесткостными и прочностными характеристиками. Замачивание просадочного грунта учитывалось при моделировании понижением его прочностных и деформационных характеристик на основании результатов проведенных полевых и лабораторных исследований (см. табл. 2, 3).

Объемное моделирование тела одиночных свай и свай в составе фундаментов зданий позволяет корректно рассмотреть их работу в грунте. На рис. 1 представлена модель

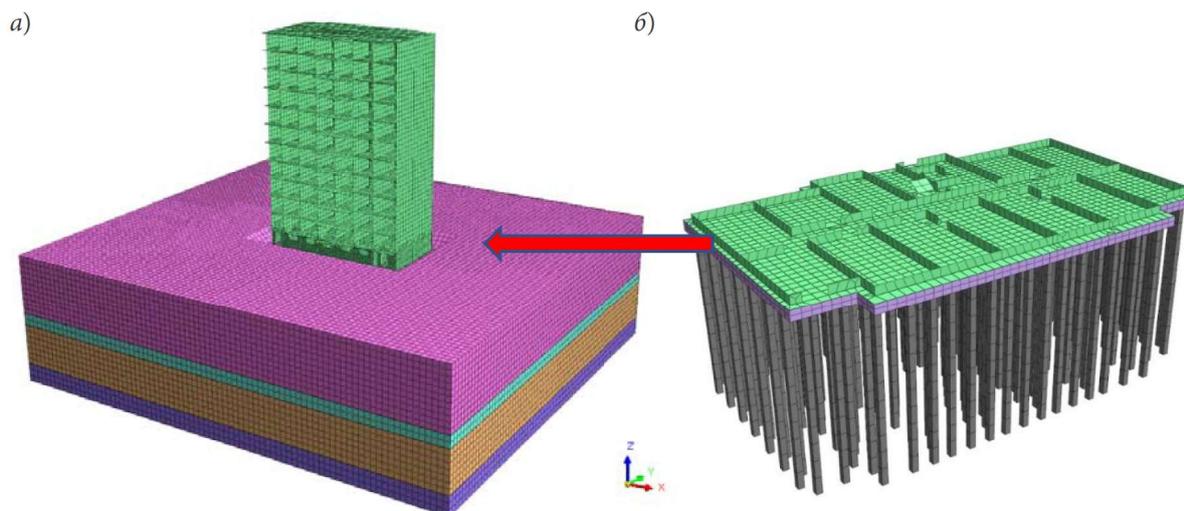


Рис. 1. Система «основание–фундамент–сооружение» с учетом измененных характеристик просадочных грунтов вследствие их замачивания (а); выделение исследуемого свайного фундамента (б)

свайно-плитного фундамента, в которой работа свай и окружающего грунта реализована при помощи заданных параметров интерфейсов. Интерфейсы, моделирующие взаимодействие свай с грунтом (рис. 2), могут быть описаны упругими, нелинейно-упругими зависимостями, а также функцией трения Кулона [12–15]. Эта функция трения основана на законе Кулона (1785 г.) для грунтов, который предполагает, что сила трения на интерфейсе пропорциональна коэффициенту трения и нормальному (сжимающему) давлению, действующему перпендикулярно к интерфейсу (рис. 3).

Рассматриваемая модель грунта (HS small) широко используется в реальном проектировании для имитации трещин или разломов в горных породах, а также для описания взаимодействия конструктивных элементов с грунтом (например, взаимодействие свай с грунтом, подпорной стены с грунтом, обшивки тоннеля с грунтом и т. д.).

Таким образом, фактическое моделирование работы элементов свайно-плитных фундаментов объемными конечными элементами с интерфейсами можно считать эталонным, так как учитывается площадной эффект при прогнозировании контактов, а

также распределение напряжений по сечению сваи. Однако следует заметить, что при моделировании просадки основания вокруг свай должны быть учтены его особенности, связанные с изменением свойств грунта вследствие замачивания [17, 18].

В геотехнической практике строительства зданий (сооружений) для учета эффекта трения грунта по боковой поверхности свай в просадочных грунтах используются различные подходы. Например, в исследованиях Grigorian (1997 г.) предложено применять понижающий коэффициент 0,7–0,8 к начальному углу внутреннего трения грунта для учета снижения прочностных характеристик основания при замачивании [19].

Назначение параметров интерфейсов при работе с программой *Midas GTS NX* и др. может быть проведено автоматически или при помощи известных математических выражений. Для этого необходимо определить виртуальную толщину интерфейса (t_v) и коэффициент снижения прочности (R), а также значения жесткостей и нелинейных свойств смежных элементов (характеристики K_n , K_p , C_{int} , φ_{int}). Для упрощения процедуры назначения параметров интерфейсов используются

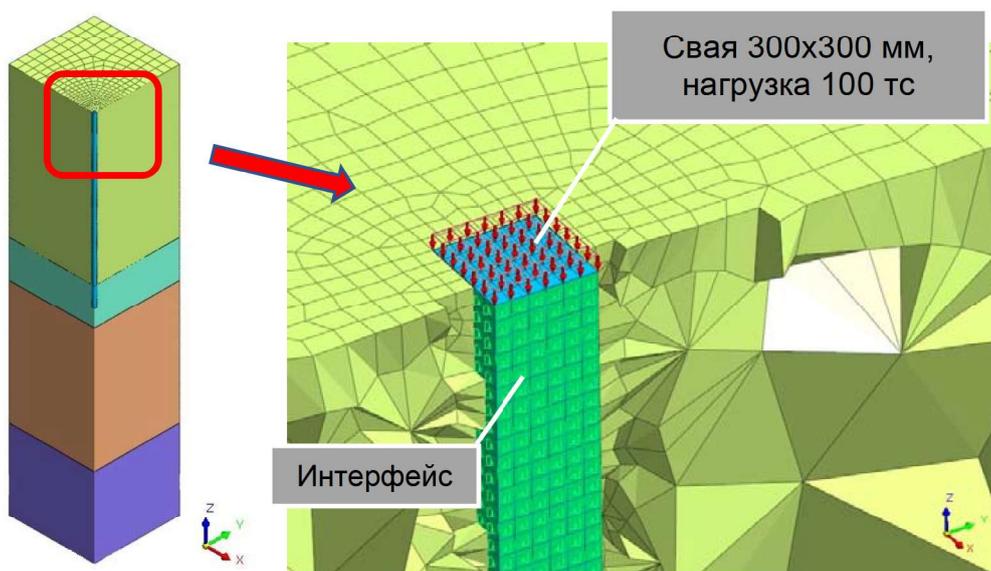


Рис. 2. Расчетная модель для свай сечением 300 × 300 мм, длиной 10 м из объемных элементов в заданных инженерно-геологических условиях

встроенные алгоритмы в конечно-элементные программные комплексы [11]. При этом могут рассматриваться следующие общие зависимости:

$$K_n = E_{oed,i} / t_v, \quad (1)$$

где K_n — нормальная жесткость интерфейса (жесткость при сжатии), определяемая как отношение одометрического модуля деформации интерфейса ($E_{oed,i}$) к виртуальной толщине (t_v);

$$K_t = G_i / t_v, \quad (2)$$

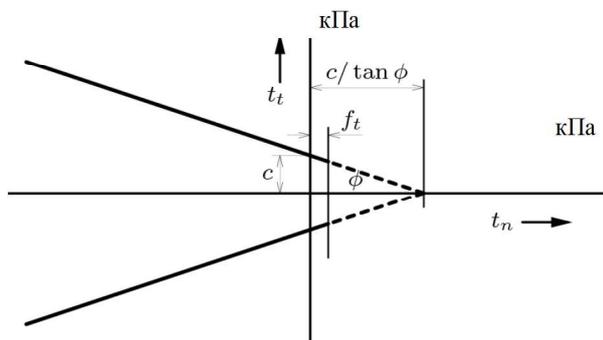


Рис. 3. Функция кулоновского трения: t_n — нормальное напряжение, кПа; t_t — касательное напряжение, кПа; φ — угол внутреннего трения, град; c — удельное сцепление, кПа; f_t — предельное растягивающее напряжение, кПа; $c/\tan \varphi$ — теоретическая прочность грунта на растяжение, кПа, при $t_n = 0$

где K_t — касательная жесткость интерфейса (жесткость при сдвиге), рассчитываемая как отношение модуля сдвига интерфейса (G_i) к виртуальной толщине (t_v);

$$C_i = RC_{soil}, \quad (3)$$

где C_i — сцепление интерфейса, определяемое как произведение коэффициента снижения прочности (R) на сцепление грунта (C_{soil});

$$\varphi_i = \arctg(R \cdot \tg(\varphi_{soil})), \quad (4)$$

где φ_i — угол внутреннего трения интерфейса, вычисляемый через арктангенс произведения коэффициента снижения прочности (R) и тангенса угла внутреннего трения грунта (φ_{soil}).

Здесь, в условиях (1) и (2):

$$E_{oed,i} = 2G_i(1 - \nu_i) / (1 - 2\nu_i), \quad (5)$$

где ν_i — коэффициент Пуассона грунта, равный 0,45, используемый при моделировании интерфейса; t_v — виртуальная толщина (обычно имеет значение в диапазоне 0,01–0,1, чем больше разница между жесткостями сооружения и основания, тем меньше значение данной величины);

$$G_i = RG_{soil}; \quad (6)$$

$$G_{soil} = E / 2(1 + \nu_{soil}), \quad (7)$$

где R — коэффициент снижения прочности.

Ориентировочно коэффициенты снижения прочности (R) для различных материалов свай и грунтов основания могут приниматься по СП 22.13330.2016 или по результатам соответствующих научных исследований [12]. Они также зависят от типа, вида и разновидности грунта и материала сваи. Например, для песчаных грунтов и железобетонных свай рекомендуется использовать значения $R = 0,8-1,0$ [17, 20]. В зарубежной практике, согласно исследованиям Noor et al. (2013), применяются аналогичные диапазоны значений: $R = 0,6-0,9$ [17].

При этом применение забивных свай, учитывая их специфику погружения, позволяет обойтись без снижения значений параметра R (по крайней мере на начальном этапе расчетов). При погружении забивные сваи значительно уплотняют грунт основания, что приводит к улучшению его физических и деформационных характеристик. Эти закономерности исследованы в работе Б. В. Бахолдина [16], что позволило сделать вывод о формировании под пятой сваи так называемого ядра, интенсивно утрамбовывающего слой грунта при ее погружении в основание. Особенно заметное уплотнение основания наблюдается при погружении забивной сваи в песчаных грунтах; в глинистых грунтах изменения их физических и деформационных характеристик являются также существенными.

Следует отметить, что угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта могут быть уменьшены с учетом коэффициента снижения прочности R . Могут также изменяться и значения угла дилатансии грунта. Для интерфейсного угла дилатансии обычно используются те же значения, что и для грунта при моделировании работы свай без снижения прочности (то есть при параметре $R = 1$). Если же учитывается снижение прочности, обычно вводят значение $D_{int} = 0$ для описания жесткого тела (искусственное ограничение пластических деформаций

в зоне контакта сваи и грунта, чтобы избежать неустойчивости или чрезмерного проскальзывания при численном расчете).

При замачивании просадочных грунтов их прочностные характеристики обычно снижаются, что приводит к развитию отрицательного трения по боковой поверхности свай. Это явление описано в работе Noor et al. (2013), где предложена методика оценки отрицательного трения по боковой поверхности свай на основе изменения объемной деформации грунта [17].

Учитывая подход Noor et al. (2013), в исследованиях авторов настоящей работы для модели свай (см. рис. 2) при использовании вышеприведенных формул (1)–(7) получены результаты, представленные в табл. 5.

Использование свойств интерфейсов и их снижение при замачивании просадочных грунтов является доступным способом описания работы сваи в таких условиях методом конечных элементов. Параметры грунтов и интерфейсов, указанные в табл. 5, используются при проведении расчетов для обоснования работы свай в просадочных грунтах, а также для калибровки расчетной модели при выполнении численных исследований [18].

Результаты и обсуждение

Калибровка расчетной модели — важный этап численных исследований, который позволяет достичь высокой точности прогнозирования работы забивных железобетонных свай в макропористых просадочных грунтах. Она представляет собой процесс итерационного подбора параметров численной модели таким образом, чтобы ее результаты соответствовали экспериментальным данным, натурным наблюдениям или эталонным решениям. Цель калибровки — повысить точность прогноза работы рассматриваемой системы. Результаты испытаний, установленные при моделировании нагружения забивных железобетонных свай в маловлажных и влажных просадочных грунтах, представлены графиками (рис. 4,

Таблица параметров грунтов и интерфейсов для ПК *MIDAS FEA NX*

№ слоя грунта	ИГЭ-1		ИГЭ-2		ИГЭ-3
Исходные данные					
Параметры грунта (интерфейса)	Маловлажные	Влажные	Маловлажные	Влажные	Маловлажные
E , кН/м ²	7100	1600	12 400	10 900	15 600
ν , доли ед.	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
$E_{осад}$, кН/м ²	12 558	2830	21 931	19 278	27 591
G , кН/м ²	2591	584	4526	3978	5693
G_p , кН/м ²	2591	584	4526	3978	5693
$E_{осад,i}$, кН/м ²	28 504	6423	49 781	43 759	62 628
c , кН/м ²	42	10	38	14	25
φ_{soil} , град.	24	22	23	21	22
<i>Dilatancy soil</i> , град.	0	0	0	0	0
Расчетные значения интерфейсов на контакте «свая–грунт»					
K_n , кН/м ³	285 036	64 234	497 810	437 591	626 277
K_p , кН/м ³	25 912	5839	45 255	39 781	56 934
c_{int} , кН/м ²	42	10	38	14	25
<i>Dilatancy int</i> , град.	0	0	0	0	0
φ_{int} , град.	24	22	23	21	22

график № 5). Выявлено, что в маловлажных и влажных (увлажненных замачиванием) лёссовых просадочных грунтах осадки свай, зафиксированные при полевых испытаниях, значительно меньше по сравнению с осадками, полученными при численном моделировании.

Во влажных просадочных грунтах наблюдалась следующая тенденция. В ходе натурных испытаний при передаче внешней нагрузки на сваю в 100 тс ее осадка составила 5,5 мм; при этом в ходе численного моделирования осадка сваи при той же нагрузке в 100 тс во влажном грунте составила 12,5 мм (см. рис. 4). Для маловлажных грунтов в ходе натурных испытаний при внешней нагрузке на сваю в 140 тс ее осадка составила 4,5 мм, а в случае численного моделирования при нагрузке в 140 тс осадка сваи составила 15,0 мм. Оба случая выявили существенное расхождение в значениях прогнозных рас-

четных осадок свай по сравнению с фактическими, что требует выработки соответствующего подхода при обосновании технических решений свайных фундаментов.

Таким образом, несущая способность свай, принятая по результатам только численных исследований, может оказаться существенно недооцененной и привести к пропорциональному перерасходу материалов для устройства фундаментов. В подтверждение вышесказанного следует отметить, что по результатам полевых статических испытаний, проведенных на рассматриваемой площадке, за несущую способность сваи на влажных (увлажненных замачиванием) макропористых грунтах была принята нагрузка, равная 100 тс. Характер полученного графика № 5 (см. рис. 4) свидетельствует о том, что действительная несущая способность сваи составляет бóльшую величину, но не была установлена в связи с ограничением макси-

мальной нагрузки в использованной системе испытаний. В то же время за несущую способность сваи по результатам численного моделирования (при 24 мм осадки) после калибровки модели может быть принято значение в 145 тс.

Ввиду идеализированных условий численного моделирования, а также дискретности решаемой задачи, составленной для одиночной сваи, зависимость осадки от внешней нагрузки после первой итерации, как правило, имеет расхождение с натурным графиком и не позволяет принимать исходные параметры для моделирования больше-размерной свайной группы. Применяемый принцип итерационного уточнения прочностных характеристик на контакте свай с грунтом продолжается до тех пор, пока форма ветвей нагрузки–разгрузки не приблизится к экспериментальным данным. Идеальная сходимость достигается с большим трудом, поскольку натурный график вбирает и отображает совокупность нелинейных процессов, описание которых невозможно при помощи упрощенных моделей, подразу-

мевающих неразрывную связь свай с грунтом в течение нагружения [11].

Наглядным подтверждением вышеизложенного служат графики зависимости осадки сваи от внешней нагрузки для итерационно уточняемых характеристик интерфейсов (рис. 4, графики № 1–4). Графики демонстрируют процесс калибровки расчетной модели через итерационное уточнение прочностных характеристик контакта «свая–грунт»: каждая итерация соответствует корректировке параметров интерфейса (коэффициента снижения прочности R). В конечном итоге достигнута приемлемая сходимость результатов, которая позволяет применять синтезированный график № 4 при описании работы сваи в грунте при проведении конечно-элементных расчетов всей системы. Обязательным условием является учет изменяющихся характеристик грунтов основания при проявлении просадочных свойств для грунтов второго типа по просадочности.

В итоге после проведения расчетов с учетом верифицированных параметров получены деформации системы, которые пока-

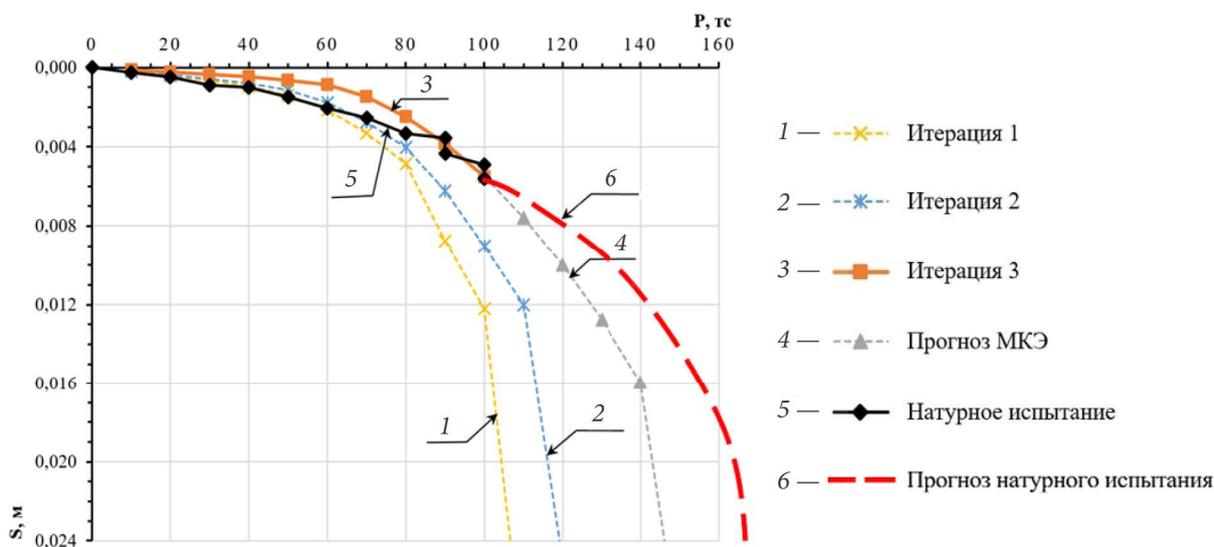


Рис. 4. Последовательное приближение графика «нагрузка–осадка» к фактической зависимости, полученной в результате натуральных испытаний одиночной сваи 300 × 300 мм длиной 10 м на строительной площадке из влажных макропористых просадочных грунтов: 1 — итерация с $R = 0,67$; 2 — итерация с $R = 0,85$; 3 — итерация с $R = 1,0$; 4 — прогноз с $R = 1,0$; 5 — натурное испытание сваи; 6 — прогноз натуральных испытаний сваи при сохранении зависимости нагрузка–осадка

зывают высокую сходимость с результатами геотехнического мониторинга и могут быть использованы для составления прогноза осадок одиночных свай на макропористых просадочных грунтах второго типа по просадочности с учетом их возможного замачивания.

Выводы

1. Разработанная методика калибровки расчетной модели системы и определения параметров свайных интерфейсов позволяет достоверно прогнозировать работу забивных железобетонных свай в макропористых просадочных грунтах, в том числе с учетом их возможного замачивания. Полученные результаты показывают высокую сходимость с экспериментальными данными, что подтверждает эффективность использования модели упрочняющегося грунта HS small для рассматриваемых условий.

2. Анализ грунтовых условий планируемого строительства многоэтажных гражданских зданий, правила выбора конструктивного решения забивных железобетонных свай, а также особенности проведения конечно-элементных расчетов позволяют обосновать основные этапы проектирования свайных фундаментов на макропористых просадочных грунтах второго типа по просадочности с учетом возможного замачивания сжимаемой толщи основания. Важным этапом рассмотренного подхода является предложенная методика калибровки расчетной схемы с включением просадочного грунта и алгоритм назначения параметров интерфейсов для моделирования работы свай в рассматриваемых грунтовых условиях строительства.

Библиографический список

1. Крутов В. И., Ковалев А. С., Ковалев В. А. Проектирование и устройство оснований и фундаментов на просадочных грунтах. М.: АСВ, 2013. 544 с.
2. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. 3-е изд., доп. и перераб. / под общ. ред. В. А. Ильичева и Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2023. 1084 с.
3. Абелев Ю. М., Абелев М. Ю. Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1979. 271 с.
4. Полищук А. И., Мариничев М. Б. Основания и фундаменты, подземные сооружения / под ред. А. И. Полищука. 3-е изд., перераб. и доп. М.: АСВ, 2023. 558 с.
5. Мангушев Р. А., Усманов Р. А. Основания и фундаменты. Решение практических задач. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2018. 172 с.
6. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Усманов Р. А. Устройство и реконструкция оснований и фундаментов на структурно-неустойчивых грунтах / под ред. Р. А. Мангушева. СПб.: Лань, 2018. 456 с.
7. Ильичев В. А. и др. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2014. 728 с.
8. Абелев М. Ю., Абелева А. М., Аверин И. В., Чунюк Д. Ю. Особенности строительства на лёссовых просадочных при замачивании грунтах. М.: АСВ, 2023. 144 с.
9. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Конюшков В. В., Дьяконов И. П., Ланько С. В. Проектирование оснований, фундаментов и подземных сооружений / под ред. Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2021. 623 с.
10. Marinichev M. B., Nikitina N. S., Polishchuk A. I. Development of methods for designing pile foundations for multi-storey civil buildings constructed on macroporous subsidence soils // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20 (3). Pp. 206–217. DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-3-206-217.
11. Мариничев М. Б. Фундаменты многоэтажных и высотных зданий в особых условиях Юга России: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2023. 355 с.
12. Kakoli S. T. N. Negative skin friction induced on piles in collapsible soils due to inundation: A Ph.D. Thesis. Montreal, Canada, 2011. 193 p.
13. Vandana R. Laboratory simulation and finite element analysis of irrigation-induced settlements of built environment overlying collapsible soil strata in United Arab Emirates: A Ph.D. Thesis. London, 2019.
14. Wehnert M., Vermeer P. A. Numerical analyses of load tests on bored piles // Numerical methods in geomechanics – NUMOG IX. Ottawa, Canada, 25–27 August, 2004. Pp. 505–511.
15. Dijkstra J., Broere W., van Tol A. F. Numerical investigation into stress and strain development around a displacement pile in sand // Proceedings of the

6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. 2006. Pp. 595–600.

16. Бахолдин Б. В. Экспериментальные и теоретические исследования процесса взаимодействия грунта с забивными сваями и создание на их основе практических методов расчета свай: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1986. 472 с.

17. Noor S. T., Hanna A., Mashhour I. M. Numerical modeling of piles in collapsible soil subjected to inundation // *International Journal of Geomechanics*. 2013. Vol. 13 (5). Pp. 514–526.

18. Никитина Н. С., Полищук А. И., Мариничев М. Б., Ипатов Д. О. Развитие этапов проектирования свайных фундаментов на просадочных грунтах для многоэтажных жилых зданий // *Современные методы проектирования подземного строительства и реконструкции оснований и фундаментов (GFAC 2024): сб. тез. Национальной (всерос.) науч.-техн. конф. с междунар. участием, посв. 90-летию кафедры геотехники (механики грунтов, оснований и фундаментов, инженерной геологии)*. Санкт-Петербург, 23–25 октября 2024 г. СПб.: СПбГАСУ, 2024. С. 91–92.

19. Grigorian A. A. Pile foundations for buildings and structures in collapsible soils. Brookfield, VT: A.A. Balkema Publishers, 1997. 158 p.

20. Алмакаева А. С. Осадка свайных фундаментов с учётом особенностей формирования напряженно-деформированного состояния на их контакте с грунтовым массивом: дис. ... канд. техн. наук. М., 2024. 237 с.

21. Тер-Мартirosян А. З., Мирный А. Ю., Сидоров В. В., Соболев Е. С. Определение параметров модели Hardening Soil по результатам лабораторных испытаний // *Общероссийская конф. молодых ученых, научных работников и специалистов «Геотехника. Теория и практика»: межвуз. темат. сб. тр.* Санкт-Петербург, 1–3 февраля 2013 г. СПб.: СПбГАСУ, 2013. С. 141–146.

References

1. Krutov V. I., Kovalev A. S., Kovalev V. A. *Proektirovanie i ustroystvo osnovaniy i fundamentov na prosadochnykh gruntakh* [Design and construction of bases and foundations on subsiding soils]. Moscow, ASV, 2013, 544 p.

2. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [Directory of geo-engineering specialist. Bases, foundations and underground structures]. 3-rd ed., revised. Ed. by Il'ichev V. A. and Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2023, 1084 p.

3. Abelev Yu. M., Abelev M. Yu. *Osnovy proektirovaniya i stroitel'stva na prosadochnykh makroporistykh gruntakh*

[Fundamentals of design and construction on collapsible macro-porous soils]. 3-rd ed., revised. Moscow, Stroyizdat, 1979, 271 p.

4. Polishchuk A. I., Marinichev M. B. *Osnovaniya i fundamenty, podzemnye sooruzheniya* [Bases and foundations, underground structures]. Ed. by Polishchuk A. I. 3-rd ed., revised. Moscow, ASV Publ., 2023, 558 p.

5. Mangushev R. A., Usmanov R. A. *Osnovaniya i fundamenty. Reshenie prakticheskikh zadach* [Bases and foundations. Solving practical problems]. 2-nd ed. St. Petersburg, Lan', 2018, 172 p.

6. Mangushev R. A., Osokin A. I., Usmanov R. A. *Ustroystvo i rekonstruktsiya osnovaniy i fundamentov na strukturno-neustoychivyykh gruntakh* [Construction and reconstruction of bases and foundations on structurally unstable soils]. Ed. by Mangushev R. A. St. Petersburg, Lan', 2018. 456 p.

7. Il'ichev V. A., et al. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [Directory of geo-engineering specialist. Bases, foundations and underground structures]. Ed. by Il'ichev V. A., Mangushev R. A. Moscow, ASV, 2014, 728 p.

8. Abelev M. Yu., Abeleva A. M., Averin I. V., Chunyuk D. Yu. *Osobennosti stroitel'stva na lyossovykh prosadochnykh pri zamachivanii gruntakh* [Features of construction on loess subsidence during soaking soils]. Moscow, ASV Publ., 2023, 144 p.

9. Mangushev R. A., Osokin A. I., Konyushkov V. V., D'yakov I. P., Lan'ko S. V. *Proektirovanie osnovaniy, fundamentov i podzemnykh sooruzheniy* [Design of bases, foundations and underground structures]. Ed. by Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2021, 623 p.

10. Marinichev M. B., Nikitina N. S., Polishchuk A. I. Development of methods for designing pile foundations for multi-storey civil buildings constructed on macroporous subsidence soils. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024, vol. 20 (3), pp. 206–217. DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-3-206-217.

11. Marinichev M. B. *Fundamenty mnogoetazhnykh i vysotnykh zdaniy v osobykh usloviyakh Yuga Rossii. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Foundations of multi-storey and high-rise buildings in special conditions of the South of Russia. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2023, 355 p.

12. Kakoli S. T. N. *Negative skin friction induced on piles in collapsible soils due to inundation*. A Ph.D. Thesis. Montreal, Canada, 2011, 193 p.

13. Vandana R. *Laboratory simulation and finite element analysis of irrigation-induced settlements of built environment overlying collapsible soil strata in United Arab Emirates*. A Ph.D. Thesis. London, 2019.

14. Wehnert M., Vermeer P. A. Numerical analyses of load tests on bored piles. *Numerical methods in geo-mechanics–NUMOG IX*. Ottawa, Canada, 25–27 August, 2004, pp. 505–511.

15. Dijkstra J., Broere W., van Tol A. F. Numerical investigation into stress and strain development around a displacement pile in sand. *Proceedings of the 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 2006, pp. 595–600.

16. Bakholdin B. V. *Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya protsessa vzaimodeystviya grunta s zabivnymi svayami i sozdanie na ikh osnove prakticheskikh metodov rascheta svay*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Experimental and theoretical studies of the process of interaction of soil with driven piles and the creation of practical methods for calculating piles on their basis. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1986, 472 p.

17. Noor S. T., Hanna A., Mashhour I. M. Numerical modeling of piles in collapsible soil subjected to inundation. *International Journal of Geomechanics*, 2013, vol. 13 (5), pp. 514–526.

18. Nikitina N. S., Polishchuk A. I., Marinichev M. B., Ipatova D. O. *Razvitie etapov proektirovaniya svaynykh fundamentov na prosadochnykh gruntakh dlya mnogoetazhnykh zhilykh zdaniy* [Development of the stages of designing pile foundations on subsiding soils for multi-storey residential buildings]. *Sovremennye metody proektirovaniya, podzemnogo stroitel'stva i rekonstruktsii osnovaniy i fundamentov (GFAC 2024)*. *Trudy Natsional'noy (vseros.) nauch.-tekhn.konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashchennoy 90-letiyu kafedry geotekhniki (mekhaniki gruntov, osnovaniy i fundamentov, inzhenernoy*

geologii) Sankt-Peterburg, 23–25 oktyabrya 2024 g. [Modern methods of design, underground construction and reconstruction of bases and foundations (GFAC 2024). Proceedings of the National (All-Russian) scientific-technical conf. with international participation, dedicated to the 90-th anniversary of the Department of Geo-engineering (mechanics of soils, bases and foundations, engineering geology), St. Petersburg, October 23–25, 2024]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2024, pp. 91–92.

19. Grigorian A. A. *Pile foundations for buildings and structures in collapsible soils*. Brookfield, VT: A. A. Balkema Publishers, 1997, 158 p.

20. Almakaeva A. S. *Osadka svaynykh fundamentov s uchytom osobennostey formirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na ikh kontakte s gruntovym massivom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Settlement of pile foundations, taking into account the features of the formation of a stress-strain state on their contact with the soil massif. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2024, 237 p.

21. Ter-Martirosyan A. Z., Mirniy A. Yu., Sidorov V. V., Sobolev E. S. *Opredelenie parametrov modeli HardeningSoil po rezul'tatam laboratornykh ispytaniy* [Determination of HardeningSoil model parameters based on laboratory test results]. *Obshcherossiyskaya konf. molodykh uchenykh, nauchnykh rabotnikov i spetsialistov «Geotekhnika. Teoriya i praktika»*. *Trudy mezhvuzovsk. konf. Sankt-Peterburg, 1–3 fevralya 2013 g.* [All-Russian conf. of young scientists, scientists and specialists “Geo-engineering. Theory and practice”. Proceedings of the inter-university conf., St. Petersburg, February 1–3, 2013]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2013, pp. 141–146.