

УДК 624.1

© М. С. Дружинин, аспирант  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: dms95@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-3-84-98

© M. S. Druzhinin, post-graduate student  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering,  
St. Petersburg, Russia)  
E-mail: dms95@mail.ru

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОГРУЖЕНИЯ ЗАВОДСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙ НА ОСНОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ЗАСТРОЙКИ

### ANALYSIS OF THE IMPACT OF SUBMERSION OF FACTORY REINFORCED CONCRETE PILES ON THE FOUNDATIONS OF THE ADJACENT DEVELOPMENT

В качестве фундаментов проектируемых сооружений широко используются заводские сваи, погружаемые ударным методом или методом статического вдавливания. Приведены результаты исследования по соблюдению нормативных требований при забивке свай и их влиянию на окружающую застройку. Определено значительное влияние массового вдавливания свай в условиях водонасыщенных глинистых грунтов на соседние сооружения. Выявлено отсутствие в нормативных документах обоснованных рекомендаций по производству работ и расчетных методик по прогнозу и исключению технологического воздействия от погружения свай методом статического вдавливания. Сделан вывод, что необходимы дальнейшие исследования процессов, происходящих в окружающем массиве при внедрении тела свай, а также разработка соответствующих рекомендаций к производству работ по устройству вдавливаемых свай и расчетных методик по прогнозу их влияния на существующую застройку.

*Ключевые слова:* забивные сваи, сваи вдавливания, метод статического вдавливания, технологические осадки, технологическое влияние, дополнительные осадки, колебания грунта, динамическое воздействие, вытеснение грунта, выпор грунта.

Prefabricated piles driven by impact or static pressing method are widely used as foundations for designed structures. The results of a study on compliance with regulatory requirements when driving piles and their impact on the surrounding development are presented. Significant impact of massive pile driving under conditions of water-saturated clay soils on adjacent structures has been determined. It is revealed that there are no substantiated recommendations for the performance of work and calculation methods for the forecast and exclusion of technological impact from pile driving by the method of static pressing in regulatory documents. It is concluded that further studies of the processes taking place in the surrounding massif during the introduction of the pile body are necessary, as well as the development of appropriate recommendations for the implementation of work on the construction of embedded piles and calculation methods to predict their impact on existing buildings.

*Keywords:* driven piles, pressed piles, static pressing method, technological settlements, technological impact, additional settlements, ground vibrations, dynamic impact, soil displacement, soil heave.

#### Введение

В практике устройства свайных фундаментов широко применяются железобетонные сваи заводского изготовления, погружа-

емые ударным методом или вдавливанием. Выбор технологии определяется совокупностью факторов, одним из которых является близость соседних зданий и сооружений.

Целью статьи является анализ воздействия ударного и статического методов погружения свай на напряженно-деформированное состояние окружающего массива грунта и основания существующей застройки в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга.

Актуальность исследования обусловлена широким применением забивных и вдавливаемых свай, а также необходимостью расширения существующих рекомендаций к производству работ и разработки дополнительных методик по оценке их влияния на безопасность соседних сооружений.

### **1. Анализ погружения заводских железобетонных свай ударным методом в условиях существующей застройки**

Ударный метод погружения впервые применялся для деревянных свай. Со временем технология развивалась от примитивных ручных копров, которые требовали значительных физических усилий, до более совершенных механических устройств. Настоящим прорывом стало изобретение парового копра в XIX веке, который значительно ускорил и упростил процесс погружения свай. В начале XX века на смену паровым копрам пришли более мощные и эффективные дизельные копры, а позже — гидравлические, которые и сегодня широко используются в строительстве благодаря своей надежности и высокой производительности.

Несмотря на общеизвестные преимущества данного способа погружения, вибрационное воздействие на основания окружающих зданий и сооружений существенно снижает возможность его применения в условиях плотной городской застройки [1–5].

Так, в случае залегания под подошвой фундаментов окружающей застройки рыхлых песков забивка свай вызовет их уплотнение, что, в свою очередь, может привести к осадке существующих конструкций. Если в основании соседних зданий залегают водонасыщенные песчаные или слабые водо-

насыщенные глинистые грунты, то динамическое воздействие способствует потере их структурной связности и может вызвать переход грунтов в более подвижное (текущее) состояние, близкое к состоянию золя. В результате возникают неконтролируемые неравномерные осадочные деформации, способные также привести к повреждению наземных конструкций и ухудшению эксплуатационных характеристик сооружений. Следует отметить, что данные грунты широко распространены в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга.

Разработанная В. А. Васениным вязкоупруго-пластическая динамическая модель, учитывающая особенности слабых глинистых грунтов, позволяет воспроизводить поведение оснований при вибрационных воздействиях [6]. Однако данная модель отсутствует в современных программных комплексах, что значительно ограничивает ее широкое применение и возможность сопоставления результатов численных расчетов с натурными наблюдениями.

В работе М. М. Калюжнюка и В. К. Рудя [7] рассматриваются процессы образования и распространения волн в грунтовом массиве, механизм их влияния на сооружения и методы оценки возможности повреждения их конструкций при ударном погружении свай. Результаты их ранних исследований нашли отражение в нормативных требованиях к условиям погружения забивных свай.

В соответствии с СП 24.13330.2021 при производстве работ по забивке свай вблизи существующей застройки безопасным расстоянием для погружения является не менее 25 м до ближайших сооружений и 35 м до памятников архитектуры. Если фактическое расстояние меньше указанных значений, безопасные расстояния следует определять с учетом условия, при котором скорость вертикальных колебаний фундамента  $V$  (см/с) на расстоянии  $r$  от погружаемой сваи не превышала бы предельно допустимого значения

по СП 24.13330.2021 для данного сооружения. Параметры колебаний при погружении свай с использованием молотов определяются на основе данных виброизмерений, проведенных при погружении пробных свай.

Схожие требования предъявляют действующие ВСН 490–87, в соответствии с которыми забивку свай без дополнительного обоснования допускается осуществлять при выполнении работ на расстоянии более 25–30 м от существующей застройки в зависимости от их конструкции. Если данное условие не выполнено, то допустимое расстояние предлагается назначить в соответствии с условием

$$\alpha_{\phi} < [\alpha], \quad (1)$$

где  $\alpha_{\phi}$  — ускорение вертикальных колебаний фундамента на расстоянии  $r$  до погружаемой сваи,  $\text{м/с}^2$ ;  $[\alpha]$  — допустимое ускорение вертикальных колебаний фундамента, при котором не происходят дополнительные деформации оснований, принимается по ВСН 490–87,  $\text{м/с}^2$ .

В большинстве случаев в условиях Санкт-Петербурга предельное допустимое ускорение колебаний для зданий окружающей застройки в соответствии с ВСН 490–87 составляет  $0,15 \text{ м/с}^2$ .

В ТСН 50-302–2004 допускается, что выполнение условия (1) исключает возникновение дополнительных деформаций оснований. Так, если воздействие оказывается на исторический или архитектурный памятник, то динамическое воздействие не должно превышать фоновых значений, а для остальных сооружений допустимое ускорение вертикальных колебаний фундамента принимается в зависимости от их конструктивной схемы и категории технического состояния и находится в пределах  $0,15–1,5 \text{ м/с}^2$ .

Таким образом, можно заключить, что забивка свай вблизи существующих сооружений требует либо соблюдения минимального расстояния от зоны производства работ до конструкций, либо обеспечения

уровня динамических воздействий в заданных пределах. Однако, как показывает практика производства строительных работ, оказывающих вибрационное воздействие в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга, выполнение данных условий не гарантирует отсутствие их влияния на основания окружающей застройки. Так, в работах [8–10] описаны случаи недопустимых деформаций зданий соседней застройки при вибропогружении или виброизвлечении шпунтовых свай, несмотря на то, что уровни динамических воздействий не превышали нормативных.

Целью дальнейших исследований является разработка методики прогнозирования влияния процесса забивки свай на основания соседних сооружений, а также уточнение безопасных параметров производства работ для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга.

## 2. Опыт наблюдения за зданиями соседней застройки при забивке свай

На опытной площадке строительства № 1 в г. Кронштадте выполнялось возведение многоквартирного жилого комплекса. В зону влияния попадало три нежилых одноэтажных бесподвальных здания. У всех сооружений бескаркасная конструктивная схема — с несущими продольными и поперечными стенами. Фундаменты выполнены ленточными бутовыми на естественном основании глубиной заложения  $1,5–2,3$  м и шириной подошвы  $0,68–0,84$  м. По результатам обследования для всех зданий принята работоспособная категория технического состояния.

Фундаментом ближайшего строящегося жилого корпуса служит свайное основание, состоящее из рядов составных заводских железобетонных свай сечением  $350 \times 350$  мм, погружаемых методом забивки на глубину до 10 м. Минимальное расстояние от погружаемых свай до существующих сооружений составляет не менее 29 м. Схема расположения объектов представлена на рис. 1.

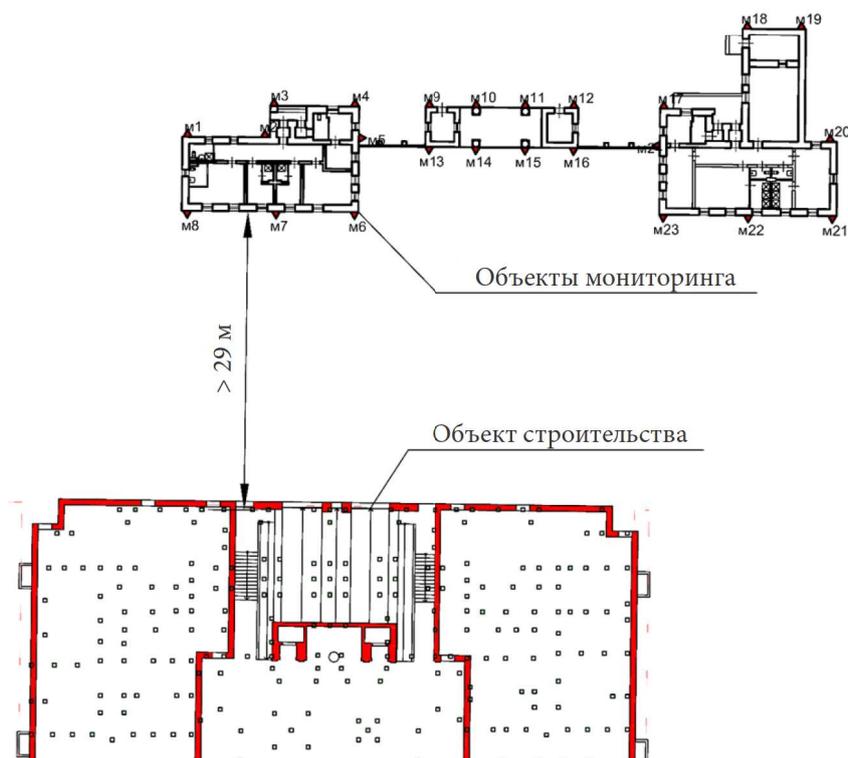


Рис. 1. Ситуационная схема объектов строительства и мониторинга

По результатам инженерно-геологических изысканий в основании фундаментов окружающей застройки залегают пылеватые водонасыщенные пески, супеси и тиксотропные суглинки, насыщенные водой. Данные основания крайне чувствительны к вибрационным воздействиям, в связи с чем требуется особая предосторожность при строительных работах с возможным динамическим влиянием, чтобы не допустить реструктурирования грунтов. Инженерно-геологические условия площадки строительства на глубину до 15 м приведены в табл. 1.

В процессе строительства производились работы по геотехническому мониторингу, которые включали геодезические наблюдения за осадками зданий, визуальный контроль раскрытия трещин несущих надземных конструкций по установленным маякам, а также их вибромониторинг.

Особое внимание было уделено процессу погружения свай ударным методом. Несмо-

тря на теоретически допустимое расстояние от зоны производства работ до ближайших конструкций, производился контроль измерений ускорений вертикальных колебаний фундаментов существующих сооружений.

Точки наблюдения за динамическим уровнем не только относились к конструкциям зданий окружающей застройки, но и располагались на разной удаленности от погружаемых свай. По результатам проведенных работ был построен график зависимости зафиксированного виброускорения от расстояния (рис. 2).

По данным вибромониторинга максимальное ускорение колебаний фундаментов окружающей застройки при забивке свай составило  $0,031 \text{ м/с}^2$ , что незначительно превышает фоновые значения, равные  $0,024 \text{ м/с}^2$ . При этом данный показатель существенно ниже наиболее строгого допустимого уровня воздействий  $0,15 \text{ м/с}^2$  согласно ТСН 50-302-2004 и ВСН 490-87. Анализ построенной

Таблица 1

Параметры грунтов опытной площадки № 1

Номер ИГЭ	Геологический индекс	$h$ , м	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$e$	$IL$	$\varphi$ , °	$c$ , кПа	$E$ , МПа
2. Пески пылеватые, плотные	$m, l IV$	0,9–1,4	2,06	0,550	–	34	6	28
2а. Пески пылеватые, средней плотности	$m, l IV$	0,3–3,0	1,97	0,700	–	28	3	12
3. Супеси пластичные, слоистые, тиксотропные	$lg III$	0,5–3,4	2,02	0,650	0,67	20	18	8
4. Суглинки текучепластичные, слоистые, тиксотропные	$lg III$	0,8–2,9	1,89	0,936	0,90	9	10	6
5. Супеси пластичные, с гравием и галькой 10 %	$g III$	0,3–1,8	2,26	0,327	0,63	13	17	9
6. Супеси твердые, с гравием и галькой 10–15 %	$g III$	0,5–7,7	2,32	0,264	–0,30	27	78	18
7. Суглинки твердые, с гравием и галькой 10–15 %	$g III$	1,0–3,7	2,23	0,383	–0,23	21	48	16

Вид работ	Расстояние от погружаемой сваи, м	Максимальное значение ускорение вертикальных колебаний фундамента, м/с <sup>2</sup>
Фоновые уровни	33	0.0237
Погружение сваи	33	0.0309
Погружение сваи	29.5	0.0544
Погружение сваи	24	0.0379
Погружение сваи	18.5	0.0466
Погружение сваи	4.3	0.208
Погружение сваи	3	0.309

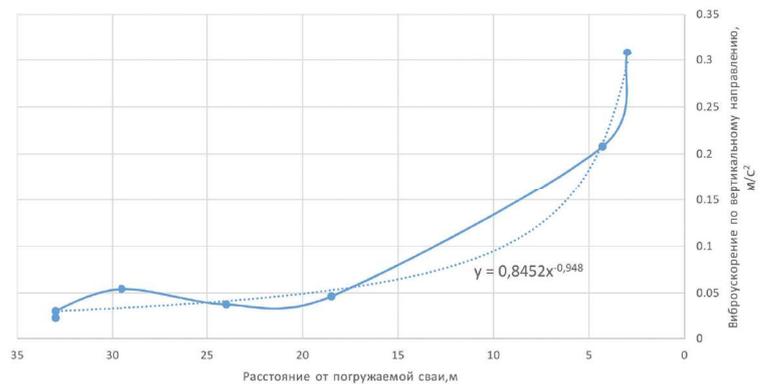


Рис. 2. График изменения уровня виброускорения при забивке свай в зависимости от расстояния

кривой (см. рис. 2) показал, что значительное вибрационное воздействие наблюдалось на расстоянии менее 10 м от зоны производства работ.

Несмотря на это, по результатам геодезических измерений у конструкций окружающей застройки были зафиксированы осадки до 2 мм практически по всем наблюдаемым маркам (рис. 3). Раскрытие существующих трещин или образование новых не зафиксировано.

Отсутствие какого-либо дополнительного техногенного воздействия в период проведения работ по погружению свай в непосред-

ственной близости от окружающей застройки подтверждает, что наблюдаемые осадки связаны именно с процессом забивки.

### 3. Анализ погружения заводских железобетонных свай методом статического вдавливания в условиях существующей застройки

Впервые в нашей стране технология статического вдавливания свай начала применяться в 1950-х годах и успешно зарекомендовала себя в слабых грунтах. С тех пор сваевдавливательные установки были значительно усовершенствованы, и данный метод погружения заводских свай нашел широкое применение

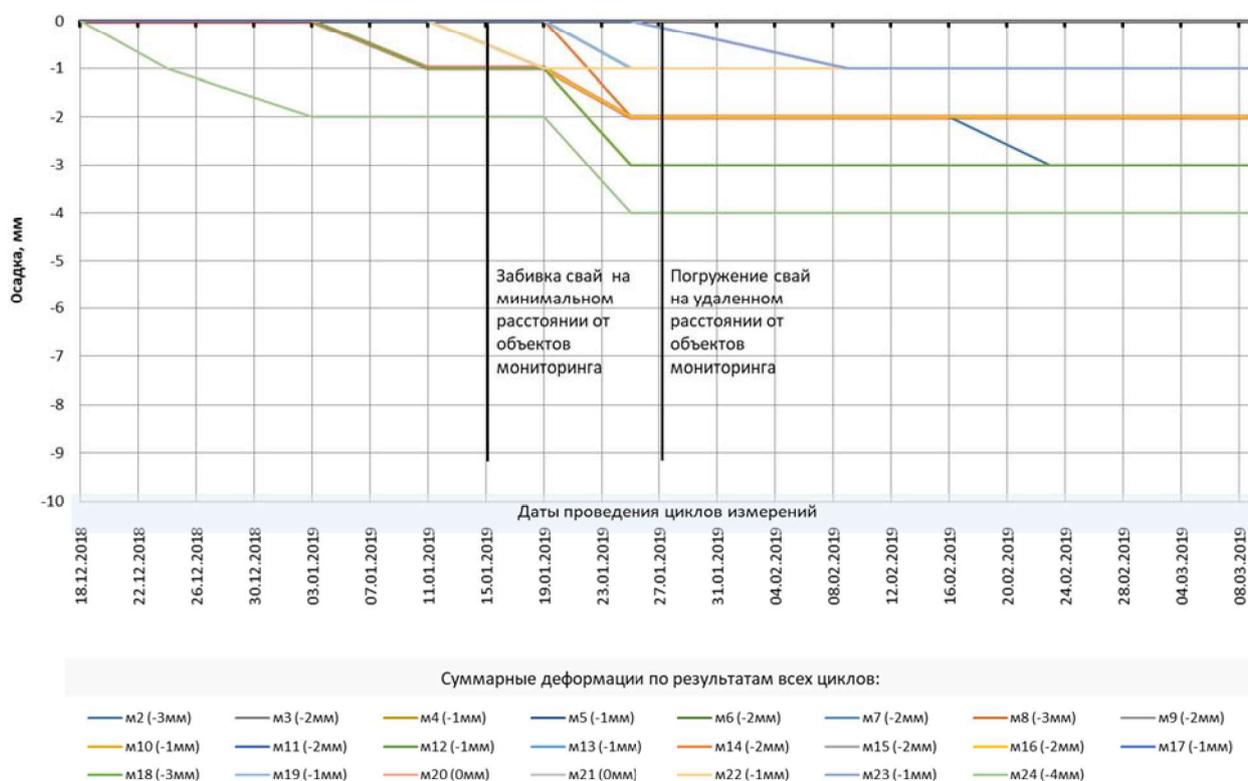


Рис. 3. График осадок зданий по результатам наблюдений

на территории Санкт-Петербурга в условиях сформировавшейся городской среды [2].

Обусловлено это тем, что технология имеет значительные преимущества, относящиеся к забивным сваям, а также отличается следующими факторами: технологической возможностью проведения работ в условиях плотной городской застройки; отсутствием динамического и шумового воздействия; большой точностью погружения; возможностью непрерывного контроля и регулировки усилия вдавливания [2, 11–13]. К недостаткам данного метода относятся более низкая производительность и высокая стоимость работ по сравнению с забивными сваями; сложность транспортировки сваевдавляющих установок ввиду их габаритов и требуемой массы.

Несмотря на разную технологию погружения, процессы деформирования и уплотнения окружающего грунтового массива при забивке и вдавливании свай в целом протекают одинаково [14].

В начале погружения сваи сечением  $d_c$  до некоторой глубины (1–2 м) наблюдается выпор грунта на поверхность [15], т. е. выдавливание грунта из-под острия в стороны и по направлению вверх. В случае плоского торца сваи данный процесс происходит после формирования под ним конуса из уплотненного грунта. С увеличением глубины развивается внутренний выпор (преимущественно в боковые стороны), что приводит к образованию вокруг сваи пластической зоны. Некоторый объем грунта, примыкающий к этой зоне, переходит в упругое состояние. Границы упругопластической области определяются физико-механическими характеристиками. Грунт, находящийся в непосредственной близости к боковой поверхности сваи (на расстоянии до  $0,5d_c$ ), смещается вниз вместе с ней, формируя на поверхности воронку глубиной от 10 до 20 см [16].

Исследования [17] показали, что зоны деформации грунта в горизонтальном

направлении распространяются на расстояние  $6-7d_c$  для одиночной сваи и  $10-11d_c$  для свай, расположенных в один ряд. В вертикальном направлении, на уровне острия, зона уплотнения распространяется на глубину  $3-3,5d_c$  и  $4-5d_c$  для каждого из случаев соответственно. Области деформации вокруг забивных и вдавливаемых свай показаны на рис. 4.

В водонасыщенных глинистых грунтах вода, вытесняемая из пор, не успевает полностью отфильтроваться в стороны за время погружения сваи, в связи с чем возникает избыточное гидростатическое давление в околосвайном пространстве [18–21] и по боковой поверхности образуется «водяная рубашка» [12], которая уменьшает усилие, необходимое для погружения. Возникновение избыточного порового давления при внедрении одиночной сваи фиксировалось на расстоянии до  $15-16d_c$  [17], и есть основания

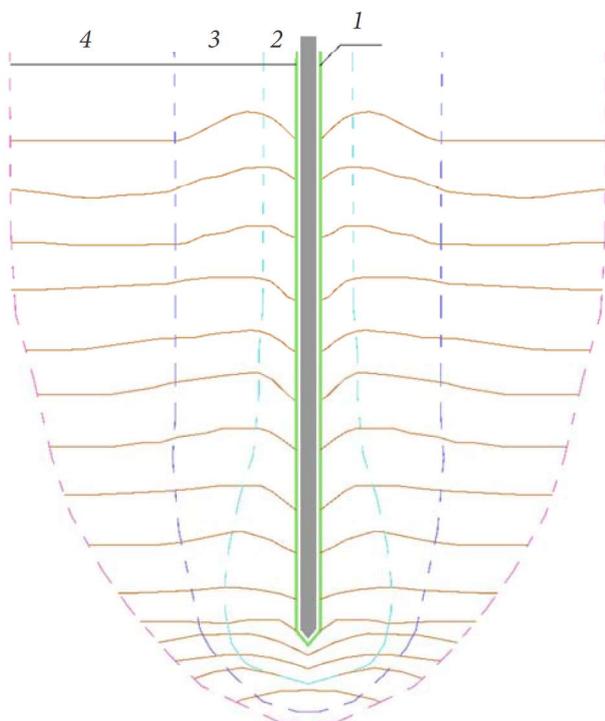


Рис. 4. Зоны деформации грунта вокруг забивных и вдавливаемых свай: 1 — зона уплотненной оболочки вокруг сваи; 2 — зона уплотнения; 3 — зона разуплотнения; 4 — зона упругих деформаций

полагать, что в случае погружения ряда или поля свай данная величина может быть значительно больше.

Экспериментальные исследования показали, что сопротивление при погружении сваи возрастает с увеличением скорости её погружения из-за вязкости грунта [22]. Таким образом, при заданной скорости внедрения свая должна преодолеть не только предельное статическое сопротивление грунта, но и дополнительное вязкое сопротивление [23], что влияет на необходимое усилие для заглубления сваи.

По результатам наблюдений [12, 24–26] устройство свай вдавливания в водонасыщенных глинистых грунтах может привести к значительному первоначальному подъему окружающей застройки с последующими неконтролируемыми и неравномерными осадочными деформациями, превышающими изначальную величину подъема. При этом до сих пор нет достоверного и однозначного обоснования данного процесса.

Так, по мнению ряда исследователей [15, 25], при неконтролируемом погружении свай вдавливания из объема вытесняемого грунта образуется волна выпора в направлении фронта производства работ, в связи с чем происходит подъем грунтового массива. Анализ работ [17, 24, 27–32] позволяет выдвинуть гипотезу о том, что рассматриваемое явление вызвано не только вытеснением объема грунта, но и практически мгновенным возникновением избыточного порового давления в процессе погружения, что обуславливает сначала подъем основания, а далее, по окончании работ, фильтрационную консолидацию, которая характеризуется постепенным увеличением эффективных напряжений и соответственно развитием осадки основания. Для всех зафиксированных случаев общим является тот факт, что данные процессы наблюдаются только при погружении в условиях водонасыщенных глинистых грунтов.

Подъем грунтового основания и как следствие сооружений окружающей застройки может распространяться на значительные расстояния от зоны производства работ и по некоторым исследованиям достигать  $20-30d_c$  [26]. При этом в современных отечественных нормативных документах не регламентированы требования к производству работ по погружению свай вдавливания для исключения негативного влияния на окружающую застройку [33].

В СП 45.13330.2017 и СП 381.1325800.2018 упоминается о возможности устройства лидерных скважин или предварительного рыхления, направленных на облегчение погружения свай в определенных грунтовых условиях. Данные меры также значительно снижают вероятность возникновения подъема грунтового основания, но научного обоснования их применения нет. К тому же существенно увеличивается стоимость и продолжительность строительных работ [34], а также снижается несущая способность свай.

В РТМ 36.44.12.2-90 «Проектирование и устройство фундаментов из свай, погружаемых способом вдавливания» рекомендуется минимальное расстояние от ближайшей вдавливаемой сваи до существующего фундамента в свету:

$$L_{\min} = (4 \div 5,5)d_c. \quad (2)$$

С учетом номенклатуры выпускаемых призматических свай квадратного сечения данное расстояние изменяется от 1,2 м до 2,2 м, что значительно меньше тех расстояний, на которых наблюдался фактический подъем окружающей застройки.

На практике для исключения деформаций существующих сооружений рекомендуется [33, 35]:

- 1) предварительное рыхление без выемки грунта в местах погружения свай;
- 2) производство работ в направлении от соседней застройки;
- 3) работы по вдавливанию осуществлять в местах, где уже выполнены конструк-

ции ограждения котлована, если последнее предусмотрено проектом;

- 4) устройство свай рядом с ранее изготовленной через некоторое время.

Очевиден тот факт, что требуются дальнейшие экспериментальные исследования с целью установления истинных причин и механизма изменения напряженно-деформированного состояния грунта при устройстве свай вдавливания для возможности прогнозирования, нормативного регулирования и обеспечения сохранности существующих сооружений.

Данные изыскания могут иметь значение не только для свай, погружаемых методом статического вдавливания, но и для буронабивных свай, изготавливаемых с вытеснением грунта по технологии Fundex, так как при их устройстве наблюдались схожие явления, а размеры зоны влияния достигали до двух длин свай [36-40].

#### 4. Опыт мониторинга при вдавливании свай

В зоне влияния строительных работ по возведению многоквартирного жилого комплекса (площадка № 2) оказалось жилое шестиэтажное здание с подвалом и чердаком. Конструктивная схема здания — стеновая, с продольными и поперечными несущими стенами. Фундамент — ленточный бутовый на естественном основании глубиной заложения 2,2–2,5 м и шириной подошвы 1,1–1,4 м. Фундаментом строящегося здания служит свайное основание, состоящее из рядов составных железобетонных свай сечением 400×400 мм, длиной 15 м и 19 м, погружаемых методом вдавливания с применением стальных додавливателей. Минимальное расстояние от погружаемых свай до существующих сооружений составляет не менее 3,9 м. Схема расположения объектов представлена на рис. 5.

Участок строительства расположен в Санкт-Петербурге вблизи набережной р. Невы. По результатам инженерно-геоло-

гических изысканий распространена значительная толща насыпных грунтов с максимальной глубиной до 7,5 м, под которыми на глубину до 16,5 м залегают слабые водонасыщенные тиксотропные суглинки. Уровень грунтовых вод расположен на отметках 1,0–1,5 м от поверхности рельефа.

Коэффициент фильтрации глинистых грунтов находится в пределах 0,05–0,005 м/сут, что характеризует их как весьма слабопроницаемые. Инженерно-геологические

условия площадки строительства на глубину до 16,5 м сведены в табл. 2.

Для всего периода строительства был предусмотрен геотехнический мониторинг, который включал контроль технического состояния зданий соседней застройки, конструкций ограждения котлована, окружающего грунтового массива (уровень грунтовых вод и геодезические измерения по грунтовым маркам) и самого возводимого здания.

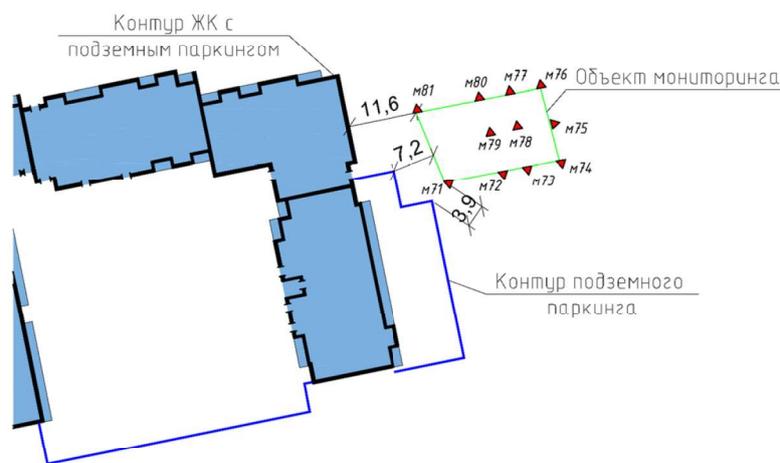


Рис. 5. Ситуационная схема объектов строительства и мониторинга

Таблица 2

Параметры грунтов опытной площадки № 2

Номер ИГЭ	Геологический индекс	$h$ , м	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$e$	$IL$	$\varphi$ , °	$c$ , кПа	$E$ , МПа
1. Насыпные грунты (пески)	$t IV$	1,3–7,5	–	–	–	–	–	–
2. Пески пылеватые средней плотности с растительными остатками серые	$m, l IV$	0,5–6,4	1,95	0,650	–	30	4	18
3. Супеси пылеватые пластичные с растительными остатками серые	$m, l IV$		1,62	1,486	0,54	10	5	4
4. Суглинки легкие пылеватые мягкопластичные с растительными остатками с примесью торфа серые	$m, l IV$		2,00	0,705	0,68	19	23	10
5. Торф среднеразложившийся серый водонасыщенный	$m, l IV$		–	–	–	–	–	1
6. Суглинки тяжелые пылеватые текучепластичные ленточные серовато-коричневые	$lg III$		0,9–8,9	1,90	0,875	0,89	16	16
7. Суглинки легкие пылеватые мягкопластичные слоистые серовато-коричневые	$lg III$	2,11		0,553	0,60	22	34	10

Сваи вдавливания устраивались без предварительного рыхления грунта, а также был нарушен рекомендуемый порядок работ и погружение осуществлялось по направлению в сторону рассматриваемого объекта мониторинга.

По результатам геодезических наблюдений был зафиксирован стремительный и неравномерный подъём шестиэтажного кирпичного здания, который достиг значений 20–23 мм по ближайшим маркам. После окончания работ по погружению свай в течение трех месяцев наблюдалось продолжительное развитие осадки, значения кото-

рой за указанный период по большинству контролируемых марок превысили величину первоначального подъёма на 10–30 % (рис. 6).

Дальнейшее развитие деформаций нельзя напрямую связать с технологическим влиянием от вдавливания свай, так как начались работы по экскавации котлована.

### Результаты мониторинга и их обсуждение

По результатам проведенных наблюдений на строительной площадке № 1 можно сделать вывод о том, что даже незначительное динамическое воздействие на слабые глинистые тиксотропные грунты и водонасыщен-

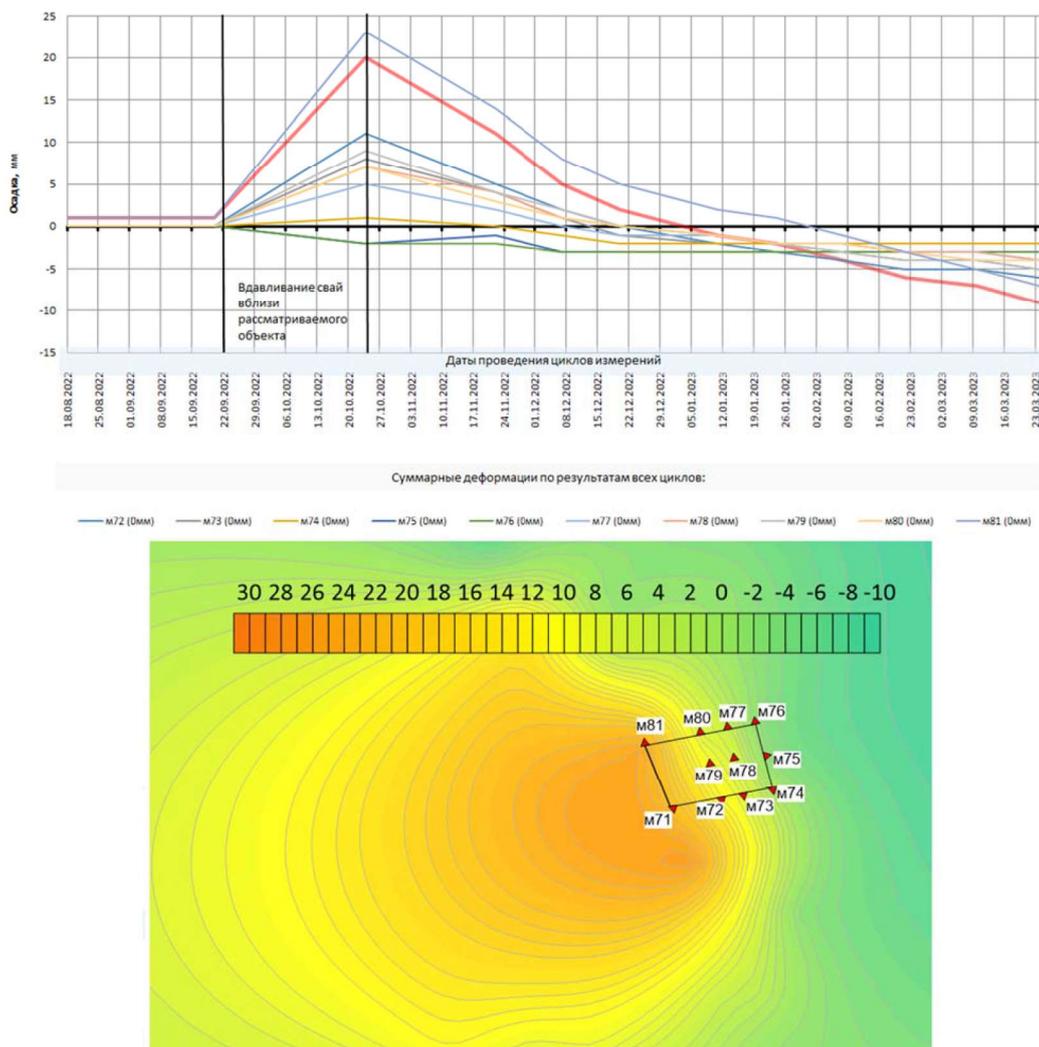


Рис. 6. График осадок и изолинии осадок по результатам геодезических наблюдений

ные пески способно вызвать изменение их напряженно-деформированного состояния и стать причиной осадки конструкций окружающих сооружений. Соблюдение требований современных норм (минимальное расстояние от зоны производства работ и уровень вибрационного воздействия) в определенных грунтовых условиях не исключает влияния на основания существующих сооружений.

Для рассматриваемых объектов мониторинга зафиксированные деформации не являются критичными и не повлияли на их техническое состояние, однако для исторических памятников или конструкций в аварийном состоянии они могли иметь более серьезные последствия.

На основании данных, полученных в ходе наблюдений на строительной площадке № 2, можно сделать вывод, что неконтролируемое погружение свай методом статического вдавливания в инженерно-геологических условиях, характеризующихся наличием слабых водонасыщенных глинистых грунтов, может привести к значительному развитию деформаций окружающей застройки. В связи с этим данный процесс требует повышенного внимания при организации производства работ, а также проведения предупреждающих мероприятий.

Характер протекания процесса косвенно свидетельствует о влиянии возникшего избыточного порового давления и его дальнейшем рассеивании, сопровождаемом увеличением эффективных напряжений. Для подтверждения этой гипотезы необходимы прямые измерения с использованием датчиков порового давления или статического зондирования грунтов СРТu.

### **Выводы**

1. Современные нормативные документы не регламентируют требования, обеспечивающие безопасное погружение железобетонных заводских свай методом статического вдавливания в условиях городской среды. Возможность применения ударного метода

регламентируется либо расстоянием от зоны производства работ, либо уровнем динамического воздействия на фундаменты соседних сооружений.

2. По результатам натурных наблюдений при погружении забивных свай зафиксировано развитие осадок зданий окружающей застройки, несмотря на то, что уровни вибрации не превышали допустимые значения, а работы производились на расстоянии, разрешенном существующими нормами.

Очевидно, следует обосновать значение регламентируемых параметров, позволяющих выполнять работы по погружению свай ударным методом в условиях существующей застройки, а также разработать методики прогноза влияния на окружающие сооружения.

3. Несмотря на то, что при погружении заводских железобетонных свай методом статического вдавливания отсутствуют динамические воздействия, в инженерно-геологических условиях, характеризующихся водонасыщенными слабофильтрующими глинистыми грунтами, возможно возникновение первоначального подъема окружающего массива грунта и соседних сооружений с последующим развитием осадки. Вероятно, это вызвано не только выпором грунта в стороны, но и резким возникновением избыточного порового давления с его последующим рассеиванием и ростом эффективных напряжений в скелете грунта. Для подтверждения данной гипотезы требуются дополнительные натурные и численные исследования.

Также необходимо разработать и закрепить в нормативной документации соответствующие рекомендации и требования к производству работ по устройству свай вдавливания, а также расчетные методики прогноза влияния на окружающую застройку.

### **Библиографический список**

1. Шарина (Павлова) С. В. Методы погружения свай. Курган: Курганская гос. сельскохозяйств. академия им. Т. С. Мальцева, 2018. С. 47–51.

2. Мангушев Р. А., Осокин А. И. Геотехника Санкт-Петербурга. М.: АСВ, 2010. 259 с.
3. Черепанов Б. М., Батракова Ю. С. Устройство фундаментов на забивных сваях в условиях плотной городской застройки // Ползуновский альманах. 2022. № 1. С. 193–196.
4. Massarsch K. R., Fellenius B. H. Engineering assessment of ground vibrations caused by impact pile driving // Geotech. Eng. J. SEAGS AGSSEA. 2015. Т. 46, № 2. Рр. 54–63.
5. Colaço A., Ferreira M., Alves Costa P. Empirical, Experimental and Numerical Prediction of Ground-Borne Vibrations Induced by Impact Pile Driving // Vibration. 2022. Т. 5. Рр. 80–95.
6. Васенин В. А. Расчетная оценка параметров колебаний грунта при погружении свай: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГАСУ, 2002. 167 с.
7. Калюжнюк М. М., Рудь В. К. Сваебойные работы при реконструкции: Влияние колебаний на здания и сооружения. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. 159 с.
8. Мангушев Р. А. и др. Деформации виброползучести водонасыщенных грунтов в процессе высокочастотного динамического воздействия // Жилищное Строительство. 2022. № 3. С. 45–56.
9. Полунин В. М. Прогноз дополнительных деформаций зданий и сооружений в процессе высокочастотного вибрирования шпунтовых свай // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2 (91). С. 74–82.
10. Полунин В. М. и др. Развитие технологических осадок фундаментов зданий в процессе высокочастотного виброизвлечения свай // Жилищное строительство. 2024. № 5. С. 3–12.
11. Гайдо А. Н. Исследование технологических параметров вдавливания свай // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 4 (33). С. 129–137.
12. Омельченко П. Н., Суходуб А. В., Винников Ю. Л. Несущая способность вдавленных призматических свай в водонасыщенных глинистых грунтах // Механика и технологии. 2016. № 3 (53). С. 99–107.
13. Ющубе С. В., Сулима В. А., Тарасов А. А. Экспериментальные исследования взаимодействия свай с водонасыщенным глинистым грунтом при их погружении вдавливанием // Вестник Томского гос. арх-строит. ун-та. 2016. № 3 (56). С. 179–185.
14. Бахолдин Б. В. Экспериментальные и теоретические исследования процесса взаимодействия грунта с забивными сваями и создание на их основе практических методов расчет свай: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.02. М.: Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений имени Н. М. Герсеванова, 1986. 463 с.
15. Середюк И. П. Исследование процессов, происходящих в глинистых грунтах при погружении свай: дис. ... канд. техн. наук. Л.: Ленинградский инженерно-строительный институт, 1977. 212 с.
16. Савинов А. В. Применение свай, погружаемых вдавливанием, при реконструкции исторической застройки городов: дис. ... д-ра техн. наук. Саратов: Саратовский гос. тех. университет, 2008. 507 с.
17. Бартоломей А. А. Основы расчета ленточных свайных фундаментов по предельно допустимым осадкам. М.: Стройиздат, 1982. 223 с.
18. Бахолдин Б. В., Бессмертный А. В., Ястребов П. И. Исследование природы увеличения несущей способности свай, погруженных в глинистые грунты // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 2. С. 18–21.
19. Mayne P. W., Burns S. E. Pore Pressure Dissipation Behavior Surrounding Driven Piles and Cone Penetrometers // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 1999. Рр. 17–23.
20. Pestana J., Hunt C., Bray J. Soil Deformation and Excess Pore Pressure Field around a Closed-Ended Pile // J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 2002. Т. 128. Рр. 1–12.
21. Yang Y. и др. Laboratory Model Test and Analysis of Excess Pore Water Pressure Dissipation of Pile Driven by Tapered - Perforated Tubular Pipe Pile // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2021. Т. 692. Рр. 1–8.
22. Бахолдин Б. В., Перлей Е. М., Светинский Е. В. Исследование процесса погружения свай вдавливанием // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1997. № 3. С. 25–27.
23. Тер-Мартirosян З. Г., Королев М. В., Конаш В. М. Взаимодействие задавливаемой сваи с однородным и неоднородным основанием с учетом нелинейных и реологических свойств грунтов // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 63–80.
24. Маслов А. Е., Мугинова Д. В. Напряженно-деформированное состояние грунта при массовом устройстве свай вытеснения // Оригинальные исследования. 2022. Т. 12, № 4. С. 329–345.
25. Перлей Е. М. и др. Натурные исследования влияния вдавливания свай на массив грунта и ранее погруженные сваи // Труды V Междунар. конф. по проблемам свайного фундаментостроения. 1996. Т. 1. С. 127–130.
26. Улицкий В. М., Шашкин А. Г. Геотехническое обоснование сложных технологий реконструкции и нового строительства // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1997. № 3. С. 3–8.
27. Бахолдин Б. В., Большаков Н. М. Исследование напряженного состояния глинистых грунтов при погружении свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1973. № 5. С. 7–9.

28. Смолин Ю. П., Караулов А. М., Востриков К. В. Решение задачи об определении осадки водонасыщенного анизотропного грунта, уплотняемого в условиях компрессии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 6 (702). С. 113–121.

29. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Соболев Е. С. Напряженно-деформированное состояние грунтового массива при погружении свай в лидирующую скважину // Жилищное строительство. 2014. № 10. С. 51–55.

30. Arafianto A., Rahardjo P. Prediction of Excess Pore Pressure Due to Pile Driving Based on CPTu // 20<sup>th</sup> SEAGC – 3<sup>rd</sup> AGSSEA Conference in conjunction with 22nd Annual Indonesian National Conference on Geotechnical Engineering (SEAGC 2018). 2018. Pp. 607–610.

31. Jackson A. и др. PORE PRESSURE EFFECTS IN SAND AND SILT DURING PILE JACKING // Proceedings of the BGA International Conference on Foundations. Dundee, Scotland: IHS BRE Press, 2008.

32. Yonghong W. и др. Field Test of Excess Pore Water Pressure at Pile–Soil Interface Caused by PHC Pipe Pile Penetration Based on Silicon Piezoresistive Sensor // Sens. Nondestruct. Test. Eval. 2020. T. 20. Pp. 1–13.

33. Гайдо А. Н. Методика разработки проектов производства работ на устройство свайных фундаментов в условиях городской застройки // Инженерный вестник Дона. 2023. № 10 (106). С. 399–414.

34. Гайдо А. Н. Пути совершенствования технологических решений устройства свайных фундаментов жилых зданий в условиях городской застройки // Жилищное строительство. 2015. № 9. С. 12–15.

35. Гайдо А. Н. Особенности разработки проектов производства работ по устройству свайных фундаментов в стесненных условиях городской застройки // Вестник Пермского национального исследовательского политехн. ун-та. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8, № 4. С. 74–85.

36. Шашкин А. Г., Шацкий А. А. Влияние буронабивных свай замещения на деформации водонасыщенных глинистых грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 12. С. 15–22.

37. Мангушев Р. А. и др. Эффект воздействия изготовления свай «Фундекс» на ранее выполненные конструкции // Жилищное строительство. 2021. № 9. С. 28–35.

38. Мангушев Р. А., Дьяконов И. П., Кондратьева Л. Н. Границы практического применения свай «Фундекс» в условиях слабых грунтов // Жилищное строительство. 2017. № 9. С. 3–8.

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

40. Мангушев Р. А. Буронабивные сваи «Фундекс»: Достоинства и недостатки // Вестник Волгоградского гос. архит.-строит. ун-та. Сер. Строительство и архитектура. 2013. № 31-2 (50). С. 264–271.

## References

1. Sharina (Pavlova) S. V. *Metody pogruzheniya svay* [Pile driving methods]. Kurgan: Kurganskaya gos. sel'skokhoz. akademiya im. T. S. Mal'tseva Publ., 2018, pp. 47–51.

2. Mangushev R. A., Osokin A. I. *Geotekhnika Sankt-Peterburga* [Geotechnics of St. Petersburg]. Moscow, ASV Publ., 2010, 259 p.

3. Cherepanov B. M., Batrakova Yu. S. *Ustroystvo fundamentov na zabivnykh svayakh vusloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki* [Arrangement of foundations on driven piles under conditions of dense urban development]. *Polzunovskiy al'manakh – Polzunovskiy almanac*, 2022, no. 1, pp. 193–196.

4. Massarsch K. R., Fellenius B. H. Engineering assessment of ground vibrations caused by impact pile driving. *Geotech. Eng. J. SEAGS AGSSEA*, 2015, vol. 46, no. 2, pp. 54–63.

5. Colaço A., Ferreira M., Alves Costa P. Empirical, Experimental and Numerical Prediction of Ground-Borne Vibrations Induced by Impact Pile Driving. *Vibration*, 2022, vol. 5, pp. 80–95.

6. Vasenin V. A. *Raschetnaya otsenka parametrov kolebaniy grunta pri pogruzhenii svay*. Diss. kand. tekhn. nauk [Calculation of soil vibration parameters during pile driving. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2002, 167 p.

7. Kalyuzhnyuk M. M., Rud' V. K. *Svaeboynye raboty pri rekonstruktsii: Vliyanie kolebaniy na zdaniya i sooruzheniya* [Pile-driving works during reconstruction: Impact of fluctuations on buildings and structures]. Leningrad, Stroyizdat, Leningr. Publ., 1989, 159 p.

8. Mangushev R. A., et al. *Deformatsii vibropolzuchesti vodonasyschennykh gruntov v protsesse vysokochastotnogo dinamicheskogo vozdeystviya* [Vibro-creep deformations of water-saturated soils during high-frequency dynamic impact]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo – Housing Construction*, 2022, no. 3, pp. 45–56.

9. Polunin V. M. *Prognoz dopolnitel'nykh deformatsiy zdaniy i sooruzheniy v protsesse vysokochastotnogo vibrirvaniya shpuntovykh svay* [Forecast of additional deformations of buildings and structures during high-frequency vibration of sheet piles]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 2 (91), pp. 74–82.

10. Polunin V. M., et al. *Razvitie tekhnologicheskikh osadok fundamentov zdaniy v protsesse vysokochastotnogo*

*vibroizvlecheniya svay* [Development of technological settlements of building foundations during high-frequency vibration removal of piles]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo – Housing Construction*, 2024, no. 5, pp. 3–12.

11. Gaydo A. N. *Issledovanie tekhnologicheskikh parametrov vdavlivaniya svay* [Study of pile driving process parameters]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2012, no. 4 (33), pp. 129–137.

12. Omel'chenko P. N., Sukhodub A. V., Vinnikov Yu. L. *Nesushchaya sposobnost' vdavlenykh prizmaticheskikh svay v vodonasyshchennykh glinistykh gruntakh* [Bearing capacity of depressed prismatic piles in water-saturated clay soils]. *Mekhanika i tekhnologii – Mechanics and Technology*, 2016, no. 3 (53), pp. 99–107.

13. Yushchube S. V., Sulima V. A., Tarasov A. A. *Eksperimental'nye issledovaniya vzaimodeystviya svay s vodonasyshchennym glinistym gruntom pri ikh pogruzhenii vdavlivaniem* [Experimental studies of interaction of piles with water-saturated clay soil during their immersion by indentation]. *Vestnik Tomskogo gos.arkh.-stroit.un-ta – Bulletin of Tomsk State Arch.-Constr.Un.*, 2016, no. 3 (56), pp. 179–185.

14. Bakhholdin B. V. *Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya protsessa vzaimodeystviya grunta s zabivnymi svayami i sozdanie na ikh osnove prakticheskikh metodov raschet 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, Nauchno-issledovatel'skiy institut osnovaniy ipodzemnykh sooruzheniy imeni N. M. Gersevanova Publ., 1986, 463 p.

15. Seredyuk I. P. *Issledovanie protsessov, proiskhodyashchikh v glinistykh gruntakh pri pogruzhenii svay*. Diss. kand. tekhn. nauk [Study of processes occurring in clay soils during pile immersion. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, Ministerstvo vysshego i srednego spetsial'nogo obrazovaniya RSFSR, Leningradskiy inzhenerno-stroitel'niy institut Publ., 1977, 212 p.

16. Savinov A. V. *Primeneniye svay, pogruzhayemykh vdavlivaniem, pri rekonstruktsii istoricheskoy zastroyki gorodov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [The use of piles immersed in indentation during the reconstruction of historical urban development. Dr. Sci. Tech. diss.]. Saratov, Saratovskiy gosudarstvenniy tekhnicheskii universitet Publ., 2008, 507 p.

17. Bartolomey A. A. *Osnovy rascheta lentochnykh svaynykh fundamentov po predel'no dopustimym osadkam* [Bases for Calculating Strip Pile Foundations by Maximum Permissible Settlement]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 223 p.

18. Bakhholdin B. V., Bessmertnyy A. V., Yastrebov P. I. *Issledovanie prirody uvelicheniya nesushchey sposobnosti*

*svay, pogruzhennykh v glinistye grunty* [Study of the nature of increasing the bearing capacity of piles immersed in clay soils]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2017, no. 2, pp. 18–21.

19. Mayne P. W., Burns S. E. Pore Pressure Dissipation Behavior Surrounding Driven Piles and Cone Penetrometers. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1999, pp. 17–23.

20. Pestana J., Hunt C., Bray J. Soil Deformation and Excess Pore Pressure Field around a Closed-Ended Pile. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 2002, vol. 128, pp. 1–12.

21. Yang Y., et al. Laboratory Model Test and Analysis of Excess Pore Water Pressure Dissipation of Pile Driven by Tapered - Perforated Tubular Pipe Pile. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 692, pp. 1–8.

22. Bakhholdin B. V., Perley E. M., Svetinskiy E. V. *Issledovanie protsessa pogruzheniya svay vdavlivaniem* [Investigation of the pile driving process by pressing]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 1997, no. 3, pp. 25–27.

23. Ter-Martirosyan Z. G., Korolev M. V., Konash V. M. *Vzaimodeystvie zadavlivayemoy svai sodnorodnymi neodnorodnym osnovaniem suchetom nelineynykh i reologicheskikh svoystv gruntov* [Interaction of crushed pile with heterogeneous base considering nonlinear and reological properties of soils]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2008, no. 2, pp. 63–80.

24. Maslov A. E., Muginova D. V. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye grunta pri massovom ustroystve svay vytesneniya* [Stress-strain state of soil during mass arrangement of displacement piles]. *Original'nye issledovaniya – Original studies*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 329–345.

25. Perley E. M., et al. *Naturnye issledovaniya vliyaniya vdavlivaniya svay na massiv grunta i ranee pogruzhennye svai* [Field studies of the impact of pile driving on the soil mass and previously submerged piles]. *Trudy V Mezhdunar. konf. po problemam svaynogo fundamentostroeniya* [Proceedings of the V International Conf. on pile foundation construction problems], 1996, vol. 1, pp. 127–130.

26. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G. *Geotekhnicheskoe obosnovaniye slozhnykh tekhnologiy rekonstruktsii i novogo stroitel'stva* [Geotechnical substantiation of complex technologies of reconstruction and new construction]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 1997, no. 3, pp. 3–8.

27. Bakhholdin B. V., Bol'shakov N. M. *Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya glinistykh gruntov pri pogruzhenii svay* [Study of the stressed state of clay soils during pile immersion]. *Osnovaniya, fundamenty*

*i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 1973, no. 5, pp. 7–9.

28. Smolin Yu. P., Karaulov A. M., Vostrikov K. V. *Reshenie zadachi ob opredelenii osadki vodonasyshchennogo anizotropnogo grunta, uplotnyaemogo v usloviyakh kompressii* [Solving the problem of determining the settlement of water-saturated anisotropic soil compacted under compression conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo – Bulletin of higher educational institutions. Construction*, 2017, no. 6 (702), pp. 113–121.

29. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Sobolev E. S. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye gruntovogo massiva pri pogruzhenii svai v lidiruyushchuyu skvazhinu* [Stress-strain state of the soil mass when the pile is immersed in the leading well]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo – Housing Construction*, 2014, no. 10, pp. 51–55.

30. Arafianto A., Rahardjo P. *Pile Driving Based on CPTu. 20<sup>th</sup> SEAGC – 3<sup>rd</sup> AGSSEA Conference in conjunction with 22nd Annual Indonesian National Conference on Geotechnical Engineering (SEAGC 2018)*, 2018, pp. 607–610.

31. Jackson A., et al. *Pore pressure effects in sand and silt during pile jacking. Proceedings of the BGA International Conference on Foundations*, Dundee, Scotland, IHS BRE Press, 2008.

32. Yonghong W., et al. *Field Test of Excess Pore Water Pressure at Pile–Soil Interface Caused by PHC Pipe Pile Penetration Based on Silicon Piezoresistive Sensor. Sens. Nondestruct. Test. Eval.*, 2020, vol. 20, pp. 1–13.

33. Gaydo A. N. *Metodika razrabotki proektov proizvodstva rabot na ustroystvu svaynykh fundamentov v usloviyakh gorodskoy zastroyki* [Methodology for Development of Work Execution Plans for Installation of Pile Foundations in Urban Development]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Bulletin of Don*, 2023, no. 10 (106), pp. 399–414.

34. Gaydo A. N. *Puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh resheniy ustroystva svaynykh fundamentov zhilykh zdaniy v usloviyakh gorodskoy zastroyki* [Ways to improve technological solutions for the

arrangement of pile foundations of residential buildings in urban development]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo – Housing Construction*, 2015, no. 9, pp. 12–15.

35. Gaydo A. N. *Osobennosti razrabotki proektov proizvodstva rabot po ustroystvu svaynykh fundamentov vstesnennykh usloviyakh gorodskoy zastroyki* [Peculiarities of development of work execution plans for arrangement of pile foundations in the wall conditions of urban development]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhn.un-ta. Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of the Perm National Research Polytechnic. Construction and Architecture*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 74–85.

36. Shashkin A. G., Shatskiy A. A. *Vliyaniye buronabivnykh svay zameshcheniya na deformatsii vodonasyshchennykh glinistykh gruntov* [Influence of bored replacement piles on deformations of water-saturated clay soils]. *Promyshlennoe igrazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Construction*, 2017, no. 12, pp. 15–22.

37. Mangushev R. A., et al. *Effekt vozdeystviya izgotovleniya svay «Fundeks» na ranee vypolnennyye konstruksii* [Effect of “Fundex” piles manufacturing on previous structures]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2021, no. 9, pp. 28–35.

38. Mangushev R. A., D'yakonov I. P., Kondrat'eva L. N. *Granitsy prakticheskogo primeneniya svay «Fundeks» v usloviyakh slabyykh gruntov* [Boundaries of practical application of Fundex piles in conditions of weak soils]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2017, no. 9, pp. 3–8.

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

40. Mangushev R. A. *Buronabivnyye svai «Fundeks». Dostoinstva i nedostatki* [Bored piles “Fundex.” Advantages and disadvantages]. *Vestnik Volgogradskogo gos.arkhit.-stroit.un-ta. Ser. Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of the Volgograd State Architectural-Construction Institute. Ser. Construction and Architecture*, 2013, no. 31-2 (50), pp. 264–271.