

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЧИНИСТОГО ГРУНТА СО СВАЙНЫМ ФУНДАМЕНТОМ

A RESEARCH INTO INTERACTION BETWEEN HEAVING SOIL AND PILE FOUNDATION

О. А. ШУЛЯТЬЕВ, канд. техн. наук

В статье анализируются результаты многолетних исследований процессов промерзания и пучения грунта, а также перемещения одиночных свай различной длины от 6 до 12 м, свайных кустов и различных конструкций ростверков, находящихся в зоне промерзания. Рассматриваются процессы промерзания и изменения напряженно-деформированного состояния внутри куста свай и под ростверком. Даются рекомендации по расчёту и проектированию свайных фундаментов в пучинистых грунтах.

The article analyzes the results of long-term studies of the processes of freezing and soil heaving, as well as the movement of single piles of various lengths from 6 to 12 m and various structures of raft located in the freezing zone. The processes of freezing and changes in the stress – strain state under the raft are considered. Recommendations are given for the calculation and design of pile foundations in heaving soils.

Ключевые слова:

Пучение грунта, свайные фундаменты, экспериментальные исследования, ростверк в зоне промерзания

Key words:

Soil heaving, pile foundations, experimental studies, raft in the freezing zone

Введение

В течение пяти зимних сезонов проводились экспериментальные исследования процесса промерзания чрезмерно пучинистого грунта и его взаимодействия со свайным фундаментом, состоящим из куста свай [1, 2]. Исследования проходили на специально оборудованном полигоне на территории ПО «Азот» в г. Кемерово. В исследованиях, кроме автора, принимали участие сотрудники Кузбасского политехнического института (г. Кемерово): к.т.н. доцент Кузеванов В. В., старший научный сотрудник Кемеров В. Д., а также заведующий лабораторией 16 ВНИИОСП им. Н. М. Герсееванова Госстроя СССР Орлов В. И. Исследования выполнялись

в рамках научно-исследовательской работы по заданию Главкузбасстроя. Целью проведения исследований являлось определение минимальной длины свай, заделанной в грунт, чтобы её не выпучивало силами морозного пучения; требуемого армирования, чтобы сваю не разорвало в процессе промерзания грунта и возможность устройства ростверка в зоне промерзания.

Несмотря на то, что работа была выполнена 30 лет назад, она остается весьма ценной и сейчас. Ее ценность заключается в проведении уникальных многолетних экспериментальных исследований процессов, происходящих в массиве чрезмерно пучинистого грунта, в том числе при взаимодействии со сваями и ростверком. До настоящего времени проведение столь длительных и полномасштабных исследований не только в России, но и в мировой практике не известно. Вместе с тем, большинство из результатов исследований остались неопубликованными и нуждаются в дополнительном анализе с учетом современного состояния геотехники для повышения эффективности и надежности проектных решений свайных фундаментов на пучинистых грунтах.

Оборудование экспериментальной площадки

Для проведения исследований на экспериментальной площадке в первой половине ноября 1986 г. было забито 25 свай различной длины от 6 до 12 м (рис. 1). Часть свай длиной 12 м по оси Е (рис. 1) были объединены в три куста с расстоянием между осями свай для двух крайних кустов (фундаменты 1 и 3) – 3d, для центрального куста (фундамент 2) – 2d (рис. 1). Осенью 1988 года кусты свай были объединены ростверками на поверхности грунта. В начале 1989 года крайние ростверки и частично сваи были нагружены вертикальной нагрузкой 8 т из железобетонных блоков.

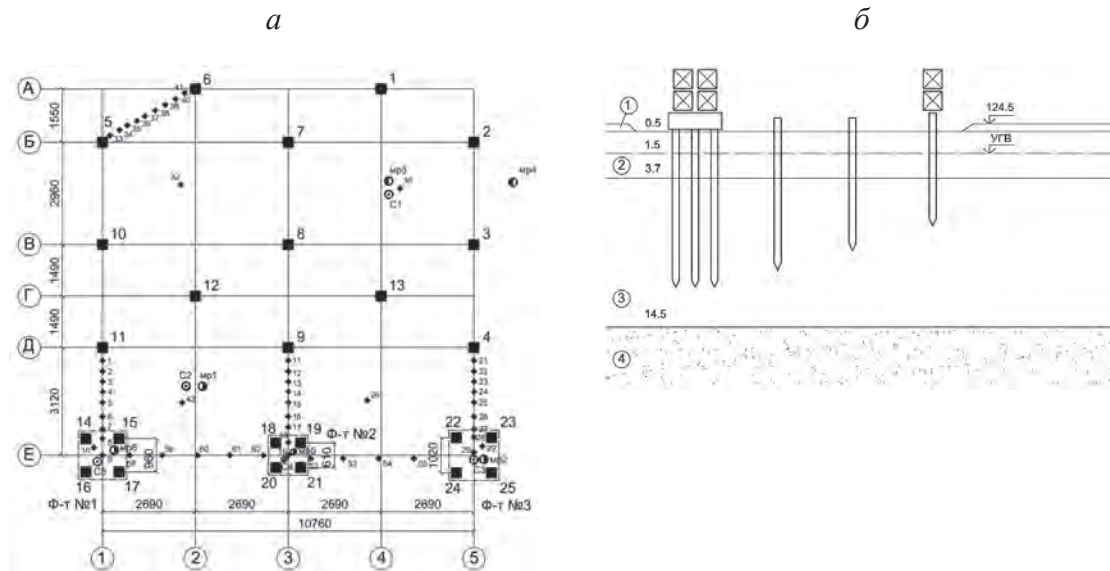


Рис. 1. Экспериментальная площадка в плане а и разрезе б:

C1 – C5 – скважины для измерения послойных деформаций грунта;

MR1 – MR6 – скважины размещения мерзлотометров; F1 – F3 – ростверки;

■ – призматические забивные сваи сечением 30х30 см: 1-4 – сваи длиной 6 м; 5,6 – 8 м; 7-9 – 10 м; 10-25 – 12 м; + – поверхностные марки

Экспериментальная площадка была оборудована поверхностными марками «+» и мерзлотомерами «MR», а также скважиной для измерения уровня подземных вод. Кроме этого, было установлено 5 скважин для измерения послойных деформаций грунта «С», в том числе 3 скважины внутри кустов свай (рис. 1).

Исследования выполнялись в течение 4-х зимних сезонов: с 1986–87 гг. по 1989–90 гг. В процессе исследований накоплен уникальный экспериментальный материал, часть которого представлена в настоящей статье.

Инженерно-геологические условия

В соответствии с проведенными инженерно-геологическими исследованиями экспериментальная площадка ниже насыпного грунта (1, рис. 1, б) сложена суглинком бурый высотой слоя 2,6 м (2) и суглинком серым высотой слоя более 10 м (3). Ниже залегает песок средней плотности от пылеватого до среднего. Физико-механические характеристики основных несущих слоёв представлены в таблице 1. Уровень подземных вод находится на глубине 1,0 м от поверхности земли.

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунта

№, ИГЭ	Вид грунта	W	W _p	W _L	I _p	I _L	γ, кН	E, МПа	C, МПа	φ, град
2	Суглинок бурый	0,26	0,20	0,36	0,16	0,38	19	10,0	0,050	22
3	Суглинок серый	0,28	—	—	0,11	0,31	19	9,5	0,035	21

Среднемесячная температура зимних сезонов, в течение которых проводились исследования, по данным кемеровской центральной гидрометеостанции (КЦГМ) с октября по апрель (месяцы, имеющие возможную отрицательную температуру) представлена в таблице 2.

Таблица 2

Значения среднемесячных температур в течение зимних сезонов с 1986 г. по 1989 г. в г. Кемерово

№ п/п	Зимний сезон	Месяц						
		октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель
1	1986-87	+1,5	-7,7	-16,4	-16,5	-13,8	-9,9	-0,8
2	1987-88	-	-14,6	-11,4	-17,7	-19,3	-7,9	+2,4
3	1988-89	-	-3,8	-9,6	-12,7	-13,8	-5,2	+1,1

Глубина промерзания грунта. Методика проведения исследований

Глубина промерзания грунта является одним из основных параметров, определяемых при проектировании фундаментов на пучинистых грунтах. Она определяет глубину заложения фундамента, силу и величину морозного пучения грунта. В процессе экспериментальных исследований изучалось влияние на глубину промерзания таких факторов как наличие снежного покрова, железобетонных свай и ростверка, а также утеплителя.

За глубину сезонного промерзания грунта в соответствии с ГОСТ 24847-81 (ГОСТ 24847-2017) принимается расстояние от поверхности промерзшего грунта до гра-

ницы твердо-мерзлого состояния. В связи с этим был принят способ определения глубины сезонного промерзания с помощью мерзлотомера Ратомского (МР) (трубочки с отверстиями, заполненными грунтом). Исследования, проведенные с использованием других мерзлотомеров, а именно мерзлотомера Данилина (МД) (трубочка со шлангом, заполненная водой) и опущенных в скважину «заленивленных» термометров, показали, что они завышают глубину промерзания. Это соответствует данным Киселева М. Ф. [3], согласно которым глубина промерзания, определенная по МД в зависимости от вида грунта, на 4–12 см превышает фактическую глубину промерзания.

Всего было установлено 6 мерзлотомеров (рис. 1). Два мерзлотомера установлены на расстоянии более 3-х м от свай (MR1 и MR3), три внутри кустов свай (MR2, MR5 и MR6) и один (MR4) под естественным снежным покровом. Контрольное определение глубины промерзания выполнялось путём откопки шурфов.

Результаты наблюдений

Исследования выполнялись в течение 4-х зимних сезонов с 1986 г. по 1990 г. (рис. 2-5). Начало промерзания происходило в конце октября–начале ноября, окончание – в конце марта–начале апреля. Полное оттаивание грунта наблюдалось с конца мая по начало июля.

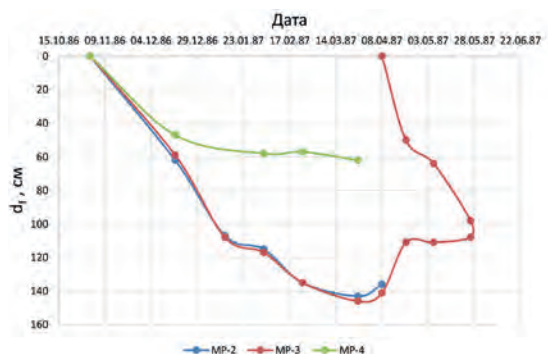


Рис. 2. Глубина промерзания грунта в 1986 – 1987 гг.

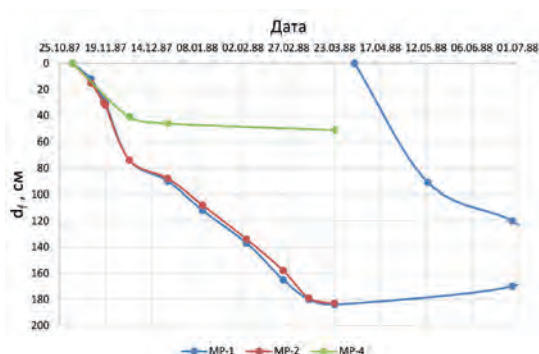


Рис. 3. Глубина промерзания грунта в 1987– 1988 гг.

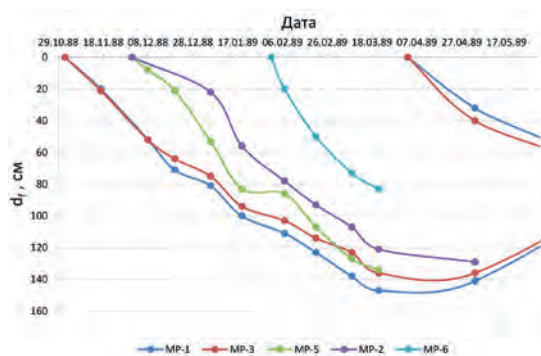


Рис. 4. Глубина промерзания грунта в 1988 – 1989 гг.

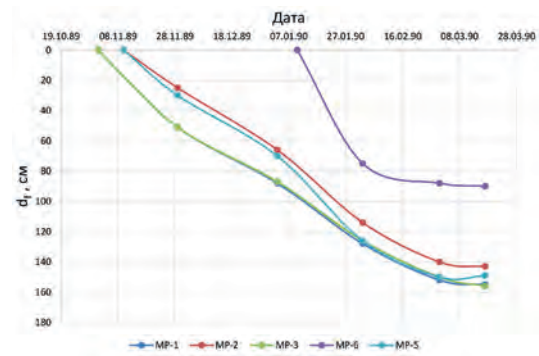


Рис. 5. Глубина промерзания грунта в 1989 – 1990 гг.

Изменение глубины промерзания за последние 30 лет

Нормативная глубина промерзания d_{fn} в соответствии с существующими нормативными документами (СП 22.13330.2016) определяется по формуле 1:

$$d_{fn} = d_0 \sqrt{M_t}, \quad (1)$$

где d_0 – величина, принимаемая для суглинков и глин 0,23 м;

M_t – сумма среднемесячных температур за зимний сезон.

За 30 лет сумма среднемесячных температур (M_t) уменьшилась с 73,6 (СНиП 2.01.01-82) до 64,4 (СП 131.13330.2012), т.е. на 15% (табл. 3), что в свою очередь привело к снижению нормативной глубины промерзания d_{fn} на 6%.

Таблица 3

Нормативная и экспериментально определённая максимальные глубины промерзания грунта на очищенной от снега поверхности в течение зимних сезонов с 1986 г. по 1989 г. в г. Кемерово

№ п/п	Зимний сезон	M_t	d_{fn} , см	d_f , см
1	1986-87	65,1	186	146
2	1987-88	70,9	194	183
3	1988-89	45,1	154	147
4	СП131.13330.2012;	64,4	185	-
5	СНиП 2.01.01-82	73,6	197	-
6	КЦГМ	69,4	192	-

В соответствии с наблюдениями КЦГМ значение M_t на 1989 г. составляло 69,4, т. е. фактическое изменение M_t за 30 лет составило около 7%, а изменение нормативной глубины промерзания d_{fn} произошло на 4%.

Если сравнивать фактическую глубину промерзания, определённую в процессе экспериментальных исследований в течение зимнего сезона 1987 – 1988 гг. (самого холодного сезона за 10 лет наблюдений), и нормативную, согласно СП 131.13330.2012, то они практически равны (соответственно 183 см и 185 см). Это говорит о том, что выводы по результатам проведенных исследований актуальны для г. Кемерово и в настоящее время.

Исследование влияния на глубину промерзания наличия снежного покрова

В результате исследований глубины промерзания было получено (рис. 2-5), что максимальная глубина промерзания на оголённой от снега поверхности составляет 140–160 см, исключение составляет сезон 1987–1988 годов, когда максимальная глубина промерзания составила 180 см. Максимальная глубина промерзания под снегом составила 40–60 см (мерзлотомер МР 4, рис. 2, 3), т. е. практически в 2,5...3 раза меньше.

Исследование влияния на глубину промерзания наличия железобетонных свай и ростверка

Для исследования теплового влияния свай на глубину сезонного промерзания были проведены параллельные определения глубины сезонного промерзания в непосредственной близости у свай (внутри куста свай МР2, МР5, МР6) и на расстоянии более 3-х метров

от свай (МР1 и МР3). В результате было получено, что в первые два сезона наблюдений (до устройства ростверков) глубина промерзания грунта внутри куста свай (МР2) и на расстоянии более 3-х метров (МР3) практически не отличались (рис. 2, 3).

После устройства ростверков и ограничения перемещения грунта вверх глубина промерзания под ростверком (МР2, рис. 4, 5) стала на 10...20 см меньше, чем глубина промерзания на очищенной от снега площадке (МР3), т. е. примерно на величину морозного пучения.

В том же случае, когда территория, прилегающая к сваям, не очищается от снега, влияние свай на глубину промерзания становится довольно заметным и может привести, как показали проведённые исследования, к её увеличению на 20% по сравнению с глубиной промерзания вне влияния свай. Это можно объяснить как более высокой теплопроводностью бетона свай чем снега, так и выдуванием снега вокруг свай.

Влияние утеплителя на глубину промерзания

Для снижения сил морозного пучения, под ростверком F1 (рис. 1) до его бетонирования был уложен слой пенопласта толщиной 25 см. В результате глубина промерзания уменьшилась на 30%, до 80...90 см, а начало промерзания сместилось на 2 месяца: промерзание начинается после 10 января (МР6, рис. 5, 6). При этом скорость промерзания более чем в 2 раза выше, чем при промерзании на открытой от снега поверхности и внутри куста свай. Это можно объяснить тем, что промерзание происходит не только сверху вниз, но и с боков, где грунт промерз на большую глубину. В данном случае пенопласт под ростверком предназначался для исключения нормальных сил морозного пучения, действующих на ростверках. При необходимости дополнительное сокращение глубины промерзания можно достичь путем увеличения площади утепления.

Исследование процесса морозного пучения грунта

Исследования морозного пучения выполнялись в течение описанных выше зимних сезонов по 41 марке, размещенной на поверхности грунта (рис. 1) [4].

Максимальные значения морозного пучения грунта h_{fmax} на поверхности, очищенной от снега, составили 144...230 мм при глубине промерзания $d_f = 1,46...1,84$ м (табл. 4). При этом относительная деформация морозного пучения $\varepsilon_{fh} = h_{fmax}/d_f$ составляет 0,099...0,133 при среднем значении за 5 сезонов 0,12, что характерно для чрезмерно пучинистого грунта.

Таблица 4

Максимальные значения морозного пучения h_{fmax}
на очищенной от снега поверхности грунта

№ п/п	Год	h_{fmax} , мм	d_f , м	ε_{fh}	
				сезон	среднее
1	1986-87	144	1,46	0,099	0,120
2	1987-88	230	1,84	0,125	
3	1988-89	196	1,47	0,133	
4	1989-90	193	1,56	0,124	
5	1990-91	197	1,69	0,117	

Пучение грунта происходило неравномерно. Явно прослеживалось влияние свай. Они, смерзаясь с грунтом, работают как анкеры, препятствующие его подъёму. Так, экспери-

ментальные исследования перемещения грунта внутри куста свай в 1987-1988 гг. выявили (рис. 6), что перемещения в кустах свай 1, 3 составили 80-120 мм (рис. 6, а); в кусте свай 2–40 мм (рис. 6, б), а максимальное перемещение поверхности грунта вне влияния свай (среднее значение максимального пучения грунта по маркам 32, 30, где отсутствовало влияние свай (рис.1), составило 240 мм (рис. 7, а и б; марка 32). То есть наличие свай снижает величину пучения от 2...3 до 6 раз при расстоянии между сваями соответственно 3d и 2d.

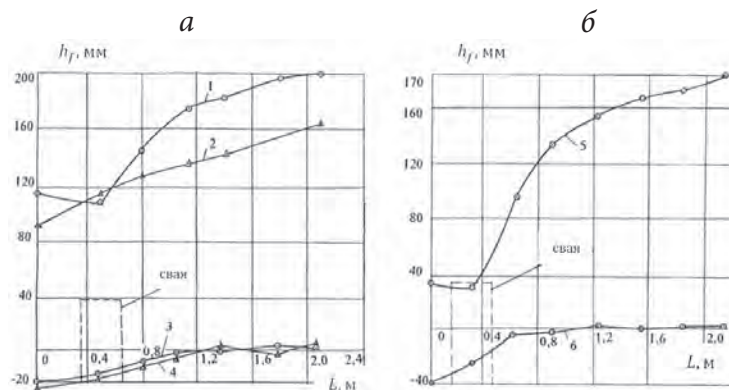


Рис. 6. Перемещения поверхности грунта внутри свайного поля в зимний сезон 1987-1988 гг. при расстоянии между сваями 3d (а): 1, 3 – соответственно максимальное пучение при промерзании и просадка после оттаивания грунта по оси 5 (марки 21-29); 2, 4 – то же по оси 1 (марки 1-9); и 2d (б): 5, 6 – то же по оси 3 (марки 11-19)

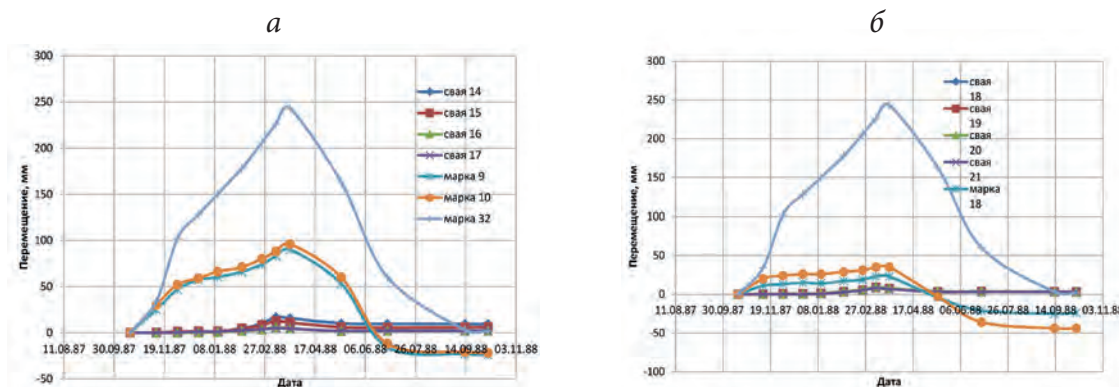


Рис. 7. Перемещение свай и грунта внутри куста свай в течение зимнего сезона 1987-1988 гг.: а – фундамент 1; б – фундамент 2 (рис. 1)

Если сравнить перемещение во времени свай и грунта внутри куста свай (рис. 7), то можно заметить следующее.

Перемещение свай носит упругий характер. При расстоянии между сваями 3d максимальное значение упругих перемещений составляет 17 мм (рис. 7, а), при 2d – 8 мм (рис. 7, б).

Грунт внутри куста свай имеет наибольшее перемещение на начальном этапе промерзания до 02.12.87 г. (марки 9, 10). Далее перемещение для свай с расстоянием 3d замедляется

(рис. 7, а; марки 9, 10), а для свай с расстоянием между ними $2d$ соответствует упругому перемещению свай (рис. 7, б; марки 18, 19).

После оттаивания наблюдалось обратное перемещение межсвайного грунта вниз, причём в первом случае (для куста свай с шагом $3d$) грунт переместился ниже начального положения на 20 мм (рис. 7, а), во втором случае (для куста свай с шагом $2d$) – на 40 мм (рис. 7, б). В дальнейшем происходило дополнительное ежегодное послойное перемещение грунта вниз за зимний сезон на 20–40 мм.

Данный эффект можно объяснить тем, что при замерзании грунта образуется жесткая плита мерзлого грунта (ПМГ) с модулем деформации более 100 МПа, заанкеренная в талый грунт сваями. Под ПМГ в результате подтягивания в зону промерзания (небольшой слой грунта на границе между ПМГ и талым грунтом) свободной воды из нижележащего талого слоя грунта и её замерзания происходит пучение грунта, что приводит к образованию расклинивающих сил морозного пучения, направленных перпендикулярно фронту промерзания. В результате происходит и соответствующее перемещение грунта. Поскольку внизу находится талый грунт, то перемещение в основном направлено вниз с уплотнением и выдавливанием грунта из-под подошвы фундамента.

Уплотнение нижележащего талого слоя в нашем случае (водонасыщенный глинистый грунт тугопластичной консистенции) будет определяться процессом фильтрационной консолидации, которому способствует отрицательное поровое давление, возникающее в результате действия всасывающих сил на границе промерзания.

Исследование процесса взаимодействия одиночных свай с промерзающим грунтом

Исследование процесса взаимодействия одиночных свай с промерзающим грунтом производилось для 25 призматических свай 30×30 см: 4 – сваи длиной 6 м; 2 – длиной 8 м; 2–10 м и 15 свай – 12 м. Причём 12 свай были объединены в 3 куста по 4 сваи (рис. 1).

Максимальное выпучивание свай произошло в зимний сезон 1987-1988 гг., имеющий наибольшую глубину промерзания (1,8 м) не только за время проведения исследований, но и за 10 лет, предшествующих им (согласно данным КЦГМ). В связи с этим был выполнен анализ результатов исследований для данного сезона как наихудшего.

Выпучивание свай (h_{fmax} , табл. 5) длиной 6 м и 8 м с заделкой в грунт на 5 м и 7 м произошло соответственно на 51...89 мм и 17...31 мм (рис. 8). После оттаивания остаточные деформации (h_{res} , табл. 5) составили 46...83 мм. Такие большие значения перемещений говорят о том, что они были сорваны силами морозного пучения.

Для отдельно стоящих свай длиной 10 и 12 м $h_{fmax} = 6...22$ мм, а остаточная часть деформаций незначительная

$h_{res} = 2...13$ мм (табл. 5, рис. 8). Ее можно объяснить растяжением тела свай и невозвратом его в начальное положение в связи с сопротивлением окружающего массива грунта.

Ранее выполненные исследования выпучивания свай в аналогичных грунтовых и климатических условиях подтвердили полученные результаты [5 – 7].

Таким образом, для климатических условий Кузбасса и аналогичных ему при строительстве на чрезмерно пучинистых грунтах, представленных глинистыми грунтами от текучепластичной до тугопластичной консистенции, выпучивание свай не произойдёт при их забивке в грунт на глубину 9 м. Причем это относится к забивным сваям всех сечений.

В случае если сваи будут находиться под снежным покровом, аналогичным зимнему сезону 1987-1988 гг. в г. Кемерово, то для анкеровки достаточно и пяти метров.

Таблица 5

Перемещения одиночных свай в зимний сезон 1987-1988 гг.

№, п/п	Тип сваи	Величина пучения h_p , мм	
		1987-1988 гг. ($d_f = 1,8\text{м}$)	
		h_{fmax}	h_{res}
1	C6-30	51...89	46...83
2	C8-30	17...31	12...25
3	C10-30	6...22	2...13
4	C12-30	16...19	10...11
5	C12-30*	4...6	1...4

* – Сваи в кусте

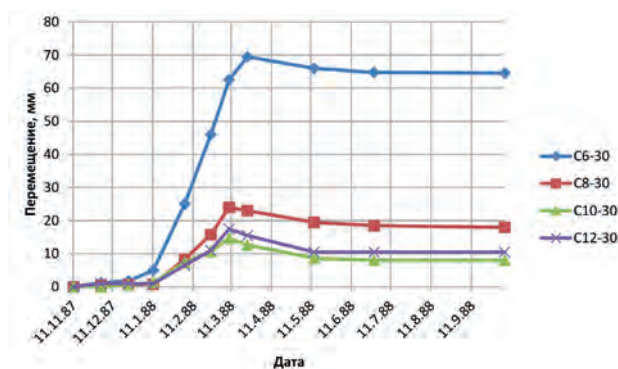


Рис. 8. Средние перемещения одиночных свай в зимний сезон 1987-1988 гг.

Последний вывод основан на анализе результатов наблюдений за перемещением свай C6-30, забитых в грунт на глубину 5 м (рис. 9), согласно которому их перемещение начало происходить в сезоне (1987-1988 гг.) при глубине промерзания более 0,9 м, что больше зафиксированной глубины промерзания под снегом за все периоды наблюдения. Результаты измерения промерзания грунта под снегом в наиболее холодный зимний сезон 1987-1988 гг., зафиксированные по мерзлотомеру МР4, представлены на рис. 3.

Кроме выпучивания силы морозного пучения могут привести и к разрыву свай в случае, если несущая способность сваи по боковой поверхности в талом грунте превышает силу, действующую на разрыв сваи $F_{\text{р}}$, определённую по формуле 2.

$$F_{\text{р}} = (\tau_{\text{п}} A_{\text{п}} - F) \gamma_n, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{п}}$ – удельная касательная сила морозного пучения; $A_{\text{п}}$ – площадь сечения сваи в зоне промерзания грунта; F – расчетная постоянная нагрузка, принимаемая по наиболее невыгодному сочетанию с коэффициентом 0,9; γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый 1,1.

Прикидочный расчет по формуле (2) показал, что тип армирования забивной сваи чаще всего применяемой серии 1.011.1 [8] поперечным сечением 30х30 см при проектировании

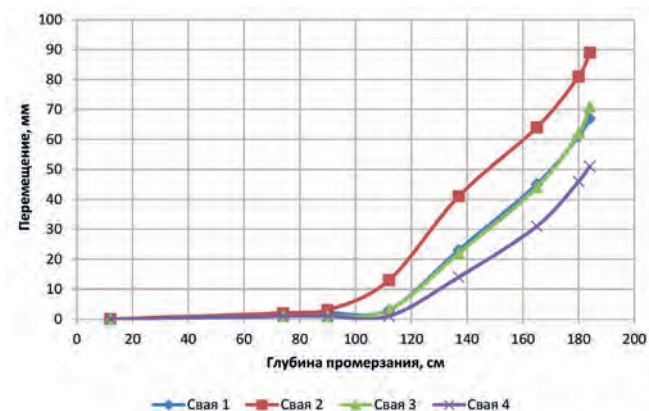


Рис. 9. Зависимости выпучивания свай h_f С6-30 от глубины промерзания грунта d_f в зимний сезон 1987-1988 гг.

для климатических условий г. Кемерово и чрезмерно пучинистых грунтах, исключающий разрыв свай, должен быть не менее 10, что соответствует 4 стержням диаметром 18 мм, выполненным из арматуры А400.

Здесь следует отметить, что формула (2) позволяет определить F_{fn} для одиночной сваи. В случае, если сваи работают в кусте или поле – необходимо учитывать кустовой эффект.

Исследование свай в составе куста показали, что они менее подвержены выпучиванию. Так, на экспериментальной площадке отдельно стоящие сваи (поз. 4, табл. 5) получили максимальные значения морозного пучения $h_{fmax} = 16-19$ мм, в то время как сваи в кусте имели $h_{fmax} = 4-6$ мм. Это можно объяснить как снижением сил морозного пучения в результате кустовой работы свай, рассмотренной более подробно ниже, так и увеличением сопротивления свай по боковой поверхности f в результате большего обжатия по сравнению с одиночными сваями талого грунта вертикальными силами в результате морозного пучения и соответствующим увеличением горизонтальных сил в талом грунте ниже глубины промерзания [9].

$$f = (\sigma_g + \Delta\sigma_g) \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (3)$$

где σ_g – горизонтальные напряжения в талом грунте до воздействия сил морозного пучения, $\Delta\sigma_g$ – увеличение горизонтальных напряжений σ_g в результате воздействия сил морозного пучения.

Таблица 6

Результаты определения величины выпучивания свай при глубине промерзания 138 см

№ сваи	Тип сваи	Величина выпучивания, мм	
		04.02.88 г.	09.03.89 г.
4	С6-30	14,0	2,4
5	С8-30	9,6	1,7
8	С10-30	10,1	1,7
10	С12-30	8,2	1,9

Кроме глубины промерзания выпучивание свай также зависит от касательных сил морозного пучения, которые, в свою очередь, зависят от температуры. Это подтверждается результатами, приведенными в таблице 3, где при одной и той же глубине промерзания, но при среднемесячных зимних температурах, различающихся в 1,5 раза (табл. 3, поз. 2 и 3), получены значения выпучивания свай, различающиеся до 5 раз.

Исследование взаимодействия свайных фундаментов с промерзающим грунтом при ростверке, расположенном в зоне промерзания

Как уже указывалось выше, на экспериментальном полигоне проводились также исследования взаимодействия с пучинистым грунтом ростверков, находящихся в зоне промерзания. Для этого все три куста свай (рис. 1) летом 1988 г. были объединены железобетонными ростверками высотой 0,6 м, расположенными на поверхности грунта. Конструкция ростверков была жестко соединена со сваями. Таким образом, было образовано 3 свайных кустовых фундаментов (далее фундамент). Все 3 фундамента имели свои особенности. Фундаменты 1 и 3 объединяли сваи с расстоянием между ними в осях $3d$. Под фундаментом 1 был уложен слой пенопласта толщиной 250 мм. В фундаменте 2 расстояние между сваями в осях составляло $2d$. Фундаменты 1 и 3 были дополнительно нагружены фундаментными блоками весом по 8 тонн.

В результате наблюдений за фундаментами было получено, что перемещения их незначительны (1,6...5,1 мм) и носят упругий характер (таблица 7). При этом перемещение свободной от снега поверхности составило 194...197 мм (рис. 4, 5).

Таблица 7

Перемещение свайных фундаментов и очищенной от снега поверхности грунта вне влияния свай

Объект исследования	1988-1989			1989-1990			1990-1991		
	d_f м	Перемещение, мм		d_f м	Перемещение, мм		d_f м	Перемещение, мм	
		h_{max}	$h_{\text{фост}}$		h_{max}	$h_{\text{фост}}$		h_{max}	$h_{\text{фост}}$
Фундамент №1 ($3d+\text{ППС}+8\text{т}$)	0,83	2	0	0,9	2	0	–	2	0
Фундамент №2 ($2d$)	1,34	3	0	1,43	4	0	–	5	1
Фундамент №3 ($3d+8\text{т}$)	1,47	3	1	1,56	5	1	–	10	5
Очищенная от снега поверхность грунта	1,47	196	–	1,54	194	–	1,69	197	–

Зафиксированные перемещения фундаментов не отличаются от перемещения свай до объединения их ростверком (табл.5, поз. 5). В обоих случаях они не превышают 10 мм и носят упругий характер. Это говорит о том, что вклад нормальных сил морозного пучения, действующих на ростверк, если и существует, то незначительный.

На рис. 10 представлены послойные деформации грунта, зафиксированные по кольцевым маркам в скважине 4, установленным на разных глубинах под ростверком.

Рассмотрим процессы, происходящие в грунте, на примере марки 3, расположенной на глубине 0,41 м от подошвы ростверка. В процессе промерзания грунта под подошвой ростверка в течение зимнего сезона 1988-1989 гг. до глубины расположения марки она переместилась вниз на 34 мм. В дальнейшем до наступления зимнего сезона 1989-1990 гг. она находилась на одном уровне. В процессе зимнего сезона 1989-1990 гг. она дополнительно

переместилась вниз ещё на 20 мм. Таким образом, её общее перемещение вниз составило 54 мм. Аналогичная картина прослеживается и по другим маркам.

Это экспериментально доказывает тот факт, что в результате ограничения перемещения вверх за счёт смерзания грунта со сваями происходит уплотнение и выдавливание грунта из-под ростверка. При этом под ним после оттаивания образуется пустота размером со спичечный коробок (рис. 11). Следовательно, наиболее опасным с точки зрения морозного пучения является первый сезон промерзания грунта под ростверком. В дальнейшем в результате образования пустоты между поверхностью ростверка и грунтом есть все основания полагать, что нормальные силы морозного пучения если и будут возникать, то будут меньше, чем в первый сезон.

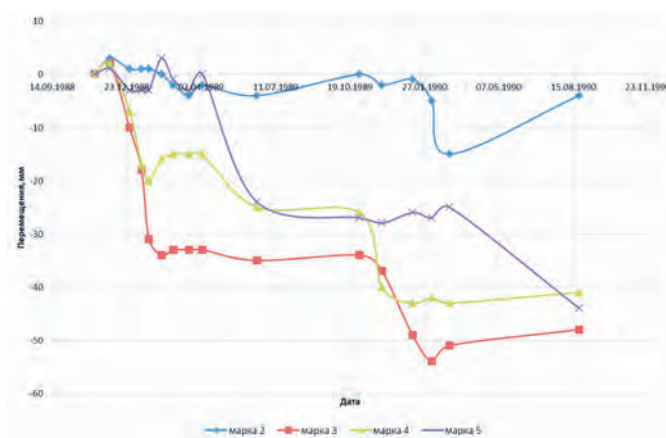


Рис. 10. Послейные деформации грунта в скважине 4 под фундаментом 2 (рис. 1).
Марка 2 расположена на глубине 0,15 м от поверхности земли; марка 3 – на глубине 0,41 м;
марка 4 – на глубине 0,90 м; марка 5 – на глубине 1,61 м

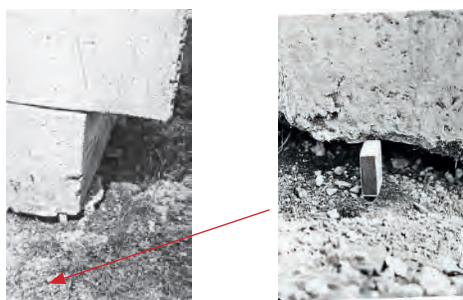


Рис. 11. Образование пустоты под ростверком F1 после оттаивания

Расчетная схема определения сил морозного пучения, действующих на фундамент

На основании проведенных исследований взаимодействия одиночных свай, свайных ку-стов и свайных фундаментов с ростверком в зоне промерзания расчетная схема воздействия удельных сил морозного пучения (σ_{fn}) на свайный фундамент может быть принята согласно рис. 12. Удельные силы морозного пучения приложены ко всей поверхности промерзаю-

щего массива грунта и зависят от возможности деформации грунта в зоне промерзания. В случае свайного фундамента при условии отсутствия его перемещения от действия силы морозного пучения (суммы всех удельных сил морозного пучения), а также незначительной сжимаемости слоя мерзлого грунта, возможность деформации мерзлого грунта в зоне промерзания будет определяться сжимаемостью талого грунта ниже глубины промерзания. В случае залегания ниже глубины промерзания водонасыщенного глинистого грунта, что характерно для пучинистого грунта, сжимаемость талого грунта будет определяться также процессом фильтрационной консолидации. Чем менее сжимаемый талый грунт, тем больше удельные силы морозного пучения.

Величина силы морозного пучения, действующей на фундамент, кроме σ_{fn} , определяется площадью ее воздействия, которая может быть определена из условия продавливания, как при расчете бетонных конструкций [3] или по аналогии с допущениями, применяемыми при определении условной площади фундамента при расчете осадки свай [11].

Силы морозного пучения воздействуют на фундамент в виде удельных нормальных сил (σ_{fn}) на ростверк и удельных касательных сил (τ_{fn}) на сваи. Нормальные силы σ_{fn} возникают на начальном этапе. Далее, после образования плиты из мерзлого слоя и смерзания её со сваями, сила морозного пучения передается на фундамент через τ_{fn} . Об этом свидетельствуют, с одной стороны, результаты мониторинга перемещения массива грунта внутри куста свай (рис. 7 а, б), согласно которым после начального кратковременного участка пучения грунта дальнейшее его перемещение вверх для куста с расположением свай с шагом $3d$ происходит незначительно, а при $2d$ – совпадает с упругими перемещениями свай. С другой стороны, об этом говорит отмеченное в разделе 6 отсутствие различий в перемещении свай в составе куста и свай в составе фундамента. Таким образом, в соответствии с проведенными исследованиями практически вся сила морозного пучения передается на свайный фундамент через удельные касательные силы τ_{fn} на поверхности свай.

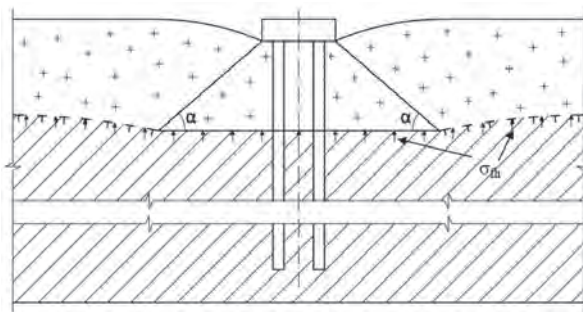


Рис. 12. Расчетная схема расчета устойчивости фундамента на действие сил морозного пучения для свайного фундамента с ростверком в зоне промерзания

К аналогичной схеме взаимодействия промерзающего грунта со свайным фундаментом на основе описанных выше натурных экспериментов и собственных, проведенных в лабораторных условиях, пришли в своих исследованиях В. И. Пусков и М. Я. Крицкий [10, 12], а также Р. Ш. Абжалимов [13-14].

Снижение силы морозного пучения, исходя из рассмотренной расчётной схемы (рис. 12), можно достичь путем уменьшения площади действия удельных сил морозного пучения,

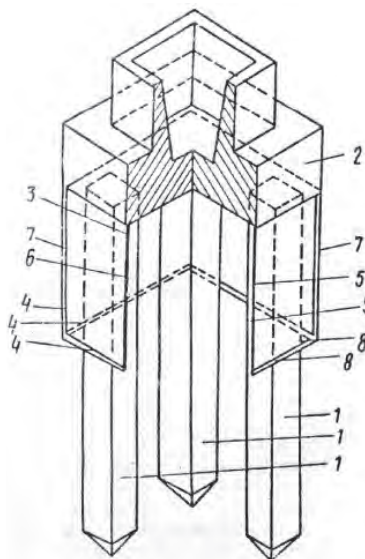


Рис. 13. Конструкция свайного фундамента с ростверком в зоне промерзания

например, путём уменьшения расстояния между сваями с $3d$ до $2d$, как это было выполнено на экспериментальной площадке. Нетрудно подсчитать, что при глубине промерзания $1,8$ м, в ростверке, расположенном на поверхности грунта, и продавливании под углом $\alpha = 45^\circ$ (рис. 12) площадь продавливания составит при $3d$: $A_{3d} = (3 \times 0,3 + 0,3)^2 = 1,44 \text{ м}^2$; при $2d$: $A_{2d} = (2 \times 0,3 + 0,3)^2 = 0,81 \text{ м}^2$. То есть при расстоянии между сваями $2d$ площадь воздействия удельных сил морозного пучения, а, следовательно, и силы морозного пучения, действующей на фундамент, по сравнению с фундаментом при расстоянии между сваями $3d$, будет в $1,8$ раза меньше.

Другим вариантом ограничения зоны воздействия удельных сил морозного пучения может быть устройство вокруг куста свай 1 и ростверка 2 противопучинистого экрана 3, состоящего из жесткого каркаса 4, 7 и 8 с натянутыми на него 2-мя слоями морозостойкого долговечного материала 5, между которыми находится незамерзающий смазочный состав (рис. 13) [15]. Каркас опускается в щель, выполненную вокруг ростверка с помощью буровой машины или тросом по технологии, описанной в [16].

Выводы и рекомендации

1. При взаимодействии свайных кустов с промерзающим грунтом создаётся кустовой эффект, влияющий на величину морозного пучения грунта и силы морозного пучения, действующие на сваи.

2. Практически вся сила морозного пучения передается на свайный фундамент через удельные касательные силы морозного пучения τ_{fn} на поверхности свай.

3. Расчет силы морозного пучения, действующей на сваи и свайный фундамент, рекомендуется выполнять путём совместного расчёта ПМГ и свайного фундамента. Для аналитических расчетов может быть определена призма продавливания ПМГ по аналогии с железобетоном и приложения удельных нормальных сил морозного пучения к её основанию согласно рис. 12.

4. Наиболее опасным с точки зрения морозного пучения является первый сезон промерзания грунта под ростверком. В дальнейшем в результате образования пустоты между поверхностью ростверка и грунтом есть все основания полагать, что нормальные силы морозного пучения если и будут возникать, то будут с каждым годом уменьшаться.

5. Снижение сил морозного пучения может быть осуществлено путем уменьшения площади основания призмы продавливания ПМГ за счет снижения глубины промерзания под ростверком путем укладки слоя утеплителя под ростверком, сокращения расстояния между сваями и соответственно размера ростверка или противопучинистого экрана (осадочного шва) в массиве грунта по контуру фундамента.

6. В результате проведенных исследований глубины промерзания грунта в условиях г. Кемерово выявлено, что максимальная глубина промерзания на оголённой от снега поверхности в $2,5 \dots 3$ раза больше, чем под снегом; устройство слоя утеплителя из пенополистерола толщиной 250 мм под ростверком снижает глубину промерзания грунта на 30% ,

а начало промерзания смещается на 2 месяца; наличие свай приводит к увеличению глубины промерзания под снегом на 20%.

7. Для климатических условий Кузбасса и аналогичных ему при строительстве на чрезмерно пучинистых грунтах, представленных глинистыми грунтами от текучепластичной до тугопластичной консистенции, выпучивание свай не произойдёт при их забивке в грунт на глубину 9 м. Причем это относится к забивным сваям всех сечений. В случае, если сваи будут находиться под снежным покровом, аналогичным зимнему сезону в г. Кемерово 1987-1988 гг., то для обеспечения отсутствия выпучивания свай достаточно забивки на глубину 5 метров.

8. Тип армирования, исключающий разрыв забивной сваи, чаще всего применяемой серии 1.011.1, поперечным сечением 30х30 см при проектировании для климатических условий г. Кемерово и чрезмерно пучинистых грунтах, должен быть не менее 10, что соответствует 4 стержням диаметром 18 мм, выполненным из арматуры А400.

Библиографический список

1. Шулятьев О.А., Кузеванов В.В., Кемеров В.Д. Применение на пучинистых грунтах свайных фундаментов с ростверком в зоне промерзания. //Основания, фундаменты и механика грунтов. 1991, № 2. – С. 6-8.

2. Kuzevanov V.V., Shulyatyev O.A. Experimental study on interection between piles or pile foundation and frost heaved soils // Proceedings of the fourteenth international conference on soil mechanics and foundation engineering. Hamburg, 1997 p. 1517-1521. All p. 2739.

3. Кисилев М.Ф. Экспериментальные исследования глубины промерзания и оттаивания грунтов для строительных целей/ Основания, фундаменты и подземные сооружения. Сб7 № 58, НИИОСП, М.; Стройиздат, 1969. – С. 100-124.

4. Шулятьев О.А., Кузеванов В.В., Кемеров В.Д. Исследования пучения грунта около-свайного пространства/ Фундаментостроение и механика слабых грунтов/ Межвузовский сборник трудов ЛИСИ, – Л., 1988. – С. 72-76.

5. Костерин Э.В., Гольцов В.М. Измерения касательных сил морозного пучения, действующих на забивные сваи/ Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1988.-№6. – С. 16-19.

6. Рекомендации по учёту и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов/ ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 72с.

7. Рекомендации по обеспечению устойчивости фундаментов в условиях морозного пучения грунтов на Урале. Свердловск .: 1974. – 56с.

8. Опарин А. А. Методические указания по проектированию свайных фундаментов в пучинистых грунтах. Новосибирск: СибЦНИИС, Минстрой России. 1972. -17 с.

9. Серия 1.011.1-10 Сваи забивные железобетонные. Выпуск 1, части 1, 2. Сваи цельные сплошного квадратного сечения с ненапрягаемой арматурой

10. Пусков В.И. Силовые воздействия морозного пучения грунтов на фундаменты сооружений и методы их расчёта/ Автореф. ... д-ра техн. наук: 05.23.02 – М., 1993, 35с.

11. Алексеев А.Г. Взаимодействие одиночной сваи с промерзающим пучинистым грунтом // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 48-52

12. Пусков В.И., Крицкий М.Я. К вопросу о влиянии свай в кусте на деформации и силы морозного пучения промерзающих грунтов/ Основания и фундаменты транспортных со-

оружений в условиях Сибири/ Межвузовский сборник трудов НИИЖТ. – Новосибирск, 1987. – С. 31-36.

13. *Абжалимов Р. Ш.* К определению распределения напряжений морозного пучения под фундаментами.// Инженерная геология, июнь 2/2009. – С. 12-17.

14. *Абжалимов Р.Ш.* Использование сезонно промерзающих пучинистых грунтов в качестве оснований для фундаментов малоэтажных зданий и подземных сооружений в инженерной практике. Монография/Р.Ш. Абжалимов. г. Омск.: Изд-во ООО «Омскбланкиздат», 2013. – 422с.

15. Свайный фундамент. А.с. 1698377. Авторы: О.А. Шулятьев, В.В. Кузеванов, В.Д. Кемеров. Бюл. № 46, 1991

16. Установка для выработки грунта из забоя. Патент на полезную модель № 52416. Авторы: Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Яковлев В.Н., Гордеев Д.В. Бюл. №9 – 2006.

Автор

Олег Александрович ШУЛЯТЬЕВ, канд. техн. наук, заместитель директора НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Oleg SHULYATYEV, Ph. D. (Engineering), Deputy technical Director of NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: niiosp35@yandex.ru