

УДК 624.131.531.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ, ПОГРУЖЕННЫХ В ГЛИНИСТЫЕ ГРУНТЫ

*Выполнен анализ причин увеличения несущей способности свай после погружения их забивкой. Показано, что главной причиной роста их сопротивления в неводонасыщенных грунтах является капиллярная усадка, возникающая в результате их уплотнения при забивке и последующего набухания в условиях открытой для атмосферной влаги грунтовой системы. В водонасыщенных грунтах причиной увеличения несущей способности свай является воздушно-газовая составляющая, возникающая при мгновенном уплотнении из-за высокой вязкости газированной воды при ее фильтрации в условиях закрытой системы. Учет установленных закономерностей позволяет разработать надежные методы расчета несущей способности свай во времени.*

### **БАХОЛДИН БОРИС ВАСИЛЬЕВИЧ**

Доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории свайных фундаментов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО "НИЦ "Строительство" (Москва, Россия).

### **БЕССМЕРТНЫЙ АРКАДИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

Инженер лаборатории свайных фундаментов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО "НИЦ "Строительство" (Москва, Россия).

### **ЯСТРЕБОВ ПЕТР ИВАНОВИЧ**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории свайных фундаментов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО "НИЦ "Строительство" (Москва, Россия).

### **Основные направления деятельности:**

- экспериментальные исследования, проектирование и экспертиза фундаментов в сложных инженерно-геологических и производственных условиях, в том числе при реконструкции и реставрации зданий; разработка строительных норм и государственных стандартов. Автор более 230 опубликованных работ.

- исследование работы свайных фундаментов.

- проектирование и устройство оснований, фундаментов и конструкций в грунтах, научно-техническое и нормативное обеспечение. Автор около 30 опубликованных работ.

## **Введение**

Известно, что несущая способность свай с течением времени после их забивки возрастает. Однако, имеющиеся методы прогнозирования увеличения несущей способности свай после забивки не обладают достаточной надежностью.

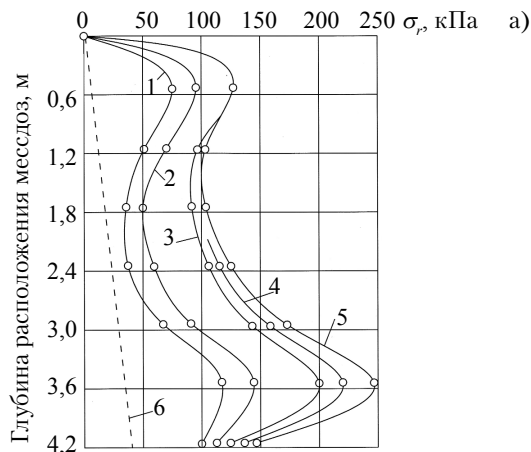
Существует несколько объяснений увеличения несущей способности свай с течением времени.

1. Попытка объяснить это явление тиксотропными свойствами грунтов. Физической причиной процесса разупрочнения тиксотропных грунтов при механическом воздействии и упрочнении после его снятия принято считать реверсивный переход геля грунта в золь и обратно. Однако, процесс перехода геля в золь, как известно, является кратковременным, измеряемым минутами и гораздо реже часами. Поэтому тиксотропией нельзя объяснить наблюдаемое на практике увеличение несущей способности свай в течение длительного времени.

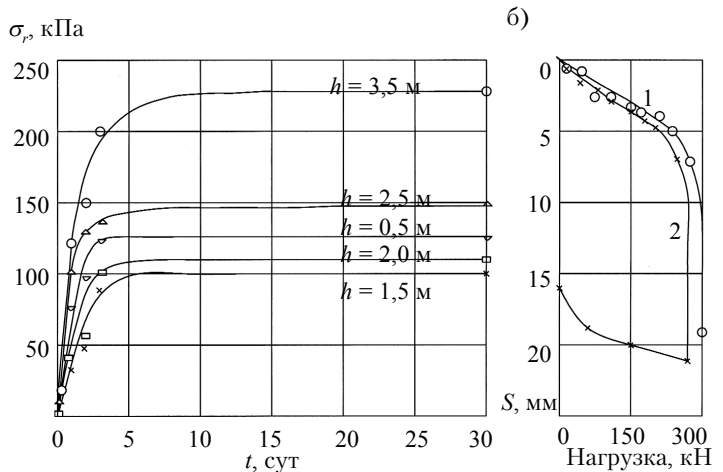
2. Предложение Сиды и Ризы [2] о возможности непосредственного применения теории консолидации для объяснения увеличения несущей способности свай во времени. Они обратили внимание при экспериментах на возникновение избыточного порового давления в грунте после погружения в него свай. Их опыты имеют важное значение для понимания причин увеличения несущей способности свай в процессе их "отдыха" после забивки. Однако разработанные ими предложения содержат существенный недостаток, так как было принято, что часть нагрузки воспринимается водой, а часть - скелетом грунта, сжимающимся под действием нагрузки. Это недостаточно четко отражает физический смысл явления, так как скелет грунта сразу после погружения свай оказывается практически полностью и окончательно обжатым внедренной в него сваей.

## **Экспериментальные исследования**

В связи с этим, лаборатория свайных фундаментов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова продолжает выполнять исследования [1, 2], которые позволяют более четко сформулировать причины,



**Рис. 1.** Распределение нормальных напряжений на боковой поверхности сваи по глубине после ее погружения в неводонасыщенные глинистые грунты:  
 1 - через 1 сут; 2...5 - соответственно через 2, 3, 5 и 10 сут; 6 - бытовое давление грунта



**Рис. 2.** Зависимости:  
 а - нормальных напряжений  $\sigma_r$  на боковой поверхности сваи с течением времени  $t$  на разных глубинах  $h$ ; б - осадка сваи от вертикальных нагрузок  $P$

вызывающие увеличение несущей способности свай в течение их "отдыха" после забивки, в дополнение к опубликованным в [4] подробным материалам о сопротивлении свай в водонасыщенных глинистых грунтах.

Экспериментальные исследования причин увеличения несущей способности свай, забитых в глинистые неводонасыщенные грунты, проводились на экспериментальной площадке в Рязани; характеристики грунтов: удельный вес – 18...21 кН/м<sup>3</sup>, естественная влажность – 12,1...23,8%, степень влажности – 0,58...0,72, коэффициент пористости – 0,5...0,65, верхний предел пластичности – 18,6...25,0, нижний предел пластичности – 17...18,6, показатель текучести – 0,25...0,30. Было погружено две тензометрические сваи и две сваи-штампа. Длина всех свай была равна 5 м, сечение – 30×30 см.

В процессе забивки и в течение двух месяцев после забивки с месдоз тензометрических свай снимались показания нормальных напряжений на боковой поверхности сваи.

Неожиданной на первый взгляд особенностью процесса погружения тензометрических свай в неводонасыщенные грунты явилось почти полное отсутствие каких-либо нормальных напряжений на их боковой поверхности в первый момент после прекращения забивки. С течением времени, при отдыхе свай, указанные нормальные напряжения стали появляться и возрастать.

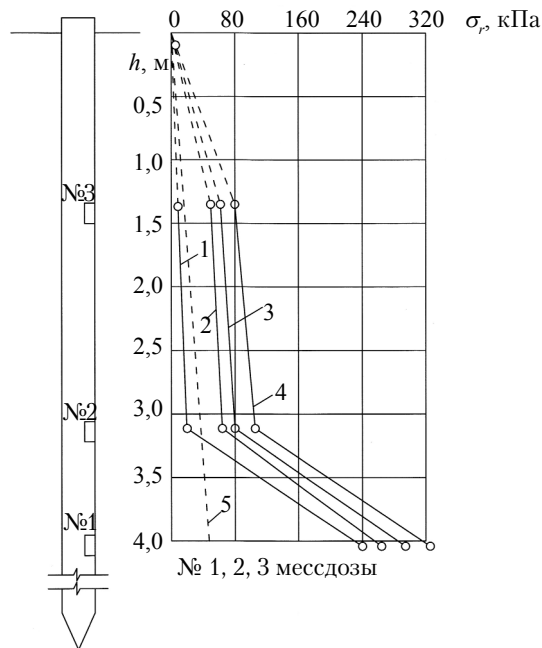
На рис. 1 показано распределение нормальных напряжений на боковой поверхности одной из тензометрических свай в разные моменты времени, прошедшего с момента ее погружения.

Изменение нормальных напряжений на боковой поверхности сваи  $\sigma_r$  во времени для различных ее точек (рис. 2,а) показывает, что интенсивный рост этих напряжений наблюдался преимущественно в первые трое суток после погружения сваи. На десятые сутки напряжения практически полностью стабилизировались и оставались неизменными в течение двух месяцев наблюдений.

Это подтверждено также результатами статических испытаний свай-штампов, забитых рядом с тензометрическими сваями, о чем свидетельствуют кривые зависимости осадки боковой поверхности свай-штампов, испытанных на третьи (кривая 1) и десятые сутки (кривая 2) после забивки свай (рис. 2,б).

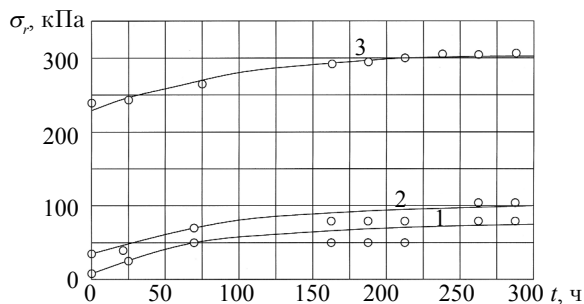
Для более четкого выявления физических причин, определяющих изменение несущей способности свай в процессе их "отдыха", были проведены дополнительные опыты по исследованию процесса изменения напряженного состояния грунта на боковой поверхности сваи в случае полного и неполного водонасыщения.

На экспериментальной площадке залегали суглинки (удельный вес – 19 кН/м<sup>3</sup>, естественная влажность – 20...23%, предел текучести – 27%, предел раскатывания – 15%, степень влажности до глубины 3,5 м – менее 0,75, ниже – 0,9, коэффициент пористости – 0,41...0,42, показатель текучести – 0,4...0,7). Были погружены четыре опытные сплошные железобетонные сваи с поперечным сечением 30×30 см, в том числе одна тензометрическая длиной 6 м.



**Рис. 3.** Напряжения вдоль боковой поверхности сваи, забитой в грунты с изменяющейся по глубине степенью водонасыщения:

1 - сразу после забивки; 2...4 - через 72; 168; 268 ч соответственно; 5 - бытовое давление грунта



**Рис. 4.** Эпюры зависимости бокового давления грунта на поверхности сваи от времени:

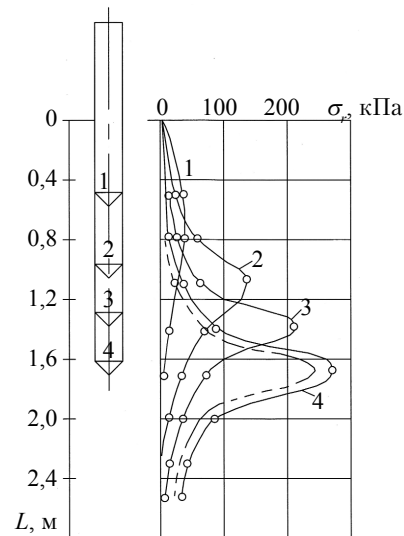
1...3 - на глубине 1,5; 3,25; 4,15 м соответственно

быть незначительными, даже существенно меньшими бытового давления на рассматриваемой глубине.

Это явление своеобразного временного исчезновения давления в грунте на глубине, где в процессе погружения сваи за счет бокового выпора наблюдалось развитие чрезвычайно высоких давлений, может быть легко объяснимо, если учесть особенности набухания грунтов после снятия с них нагрузок.

При снятии давления с глинистого грунта, например, в компрессионном приборе, в первый момент времени либо никаких перемещений поверхности грунта не наблюдается, либо величины этих перемещений оказываются незначительными, что свидетельствует о том, что после снятия внешнего воздействия давление на поверхности грунта в первый момент времени отсутствует или оказывается сравнительно малым. При погружении сваи происходит аналогичное явление. Свая внедряется в грунт, уплотненный ранее острием сваи, и ее боковая поверхность остается неподвижной. В дальнейшем за счет набухания грунта давление на поверхность, ограничивающую грунт от перемещения, возрастает [3]. Эту особенность хорошо иллюстрирует рис. 5, согласно которому напряжения на боковой поверхности сваи в процессе погружения формируются последовательно только в уровне прохождения остря.

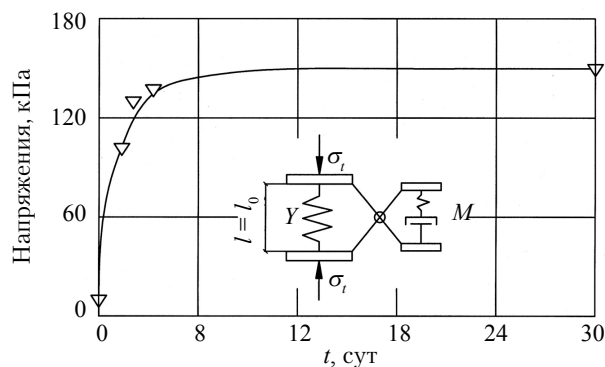
На рис. 6 приведена зависимость сил набухания на боковой поверхности сваи от времени, построенная применительно к условиям опытов. В расчете принято  $\sigma = 150$  кПа,  $\sigma_{\text{экс.}} = 140$  кПа и



**Рис. 5.** Изменение нормальных напряжений на боковой поверхности сваи в процессе ее погружения в неводонасыщенные грунты на глубине 0,55 (1); 1,0 (2); 1,3 (3) и 1,65(4) м соответственно

Распределение напряжений на боковой поверхности сваи по глубине (рис. 3) для грунтов с различным водонасыщением свидетельствует о том, что физические причины, определяющие напряжения на боковой поверхности сваи в глинистых грунтах при частичном заполнении его пор водой и в водонасыщенных глинистых грунтах, различны. Графики изменения этих напряжений в зависимости от времени, прошедшего с момента забивки сваи показаны на рис. 4.

Результаты исследования напряженного состояния грунта на участках боковой поверхности свай, погруженных в неводонасыщенные глинистые грунты, расположенные выше уровня грунтовых вод, свидетельствуют о том, что нормальные давления такого грунта на боковую поверхность свай при ее погружении могут



**Рис. 6.** Механическая модель, показывающая процесс изменения давления грунта по боковой поверхности сваи:

$\Delta$  - экспериментальные точки

$\tau = 1,5$  сут. Сопоставление расчетного графика с экспериментальными данными свидетельствует о достаточно хорошем их совпадении.

Набухание грунта при разгрузке по Б.В. Дерягину [5] происходит за счет явления "расклинивания" твердых частиц грунта водой их диффузных слоев, а также воздействия капиллярных сил.

Выбор расчетных параметров при использовании предложенной модели рекомендуется производить в соответствии с положениями, разработанными Ю.К. Зарецким [6].

### Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что в процессе забивки сваи водонасыщенный глинистый грунт вытесняется в стороны под воздействием больших, но кратковременных усилий. За весьма короткий промежуток времени грунт уплотняется. В результате пористость его уменьшается, но заключенная в порах вода, в том числе газонасыщенная, отфильтровываться не успевает. Это приводит к объемному сжатию скелета грунта, а также защемленных в нем пузырьков воздуха или газа и, как следствие, к повышению давления в поровой воде. Возникшая разность в напорах поровой воды вблизи сваи и на некотором расстоянии от нее вызывает фильтрацию грунтовой воды, а следовательно, и объемные фильтрационные силы гидродинамического давления. Гидродинамическое давление прямо противоположно давлению, передаваемому скелетом грунта на боковую поверхность сваи. Поэтому сопротивление сил трения на боковой поверхности сваи оказывается пониженным вплоть до окончания процесса релаксации избыточного порового давления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seed H. V. and Reese L.C. Pressure distribution along friction piles // Proc. Amer. Soc. civ Eng. - 1955. - Vol. 55.
2. Бахолдин Б.В., Труфанова Е.В. Сопротивление свай горизонтальным нагрузкам // "ОФМГ". - 2010. - № 6. - С. 8-13.
3. Труфанова Е.В., Ястребов П.И. Экспериментальные исследования пластичности грунта // Вестник "НИЦ "Строительство". - 2014. - С. 143-153.
4. Бахолдин Б.В., Большаков Н.М. Исследование напряженного состояния глинистых грунтов при погружении свай // "ОФМГ". - 1973. - № 5.
5. Дерягин Б.В., Кроткова Н.А. Адгезия. Исследования в области клеящего действия. - М.: АН СССР, 1949.
6. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. - М.: Стройиздат, 1988. - 349 с.