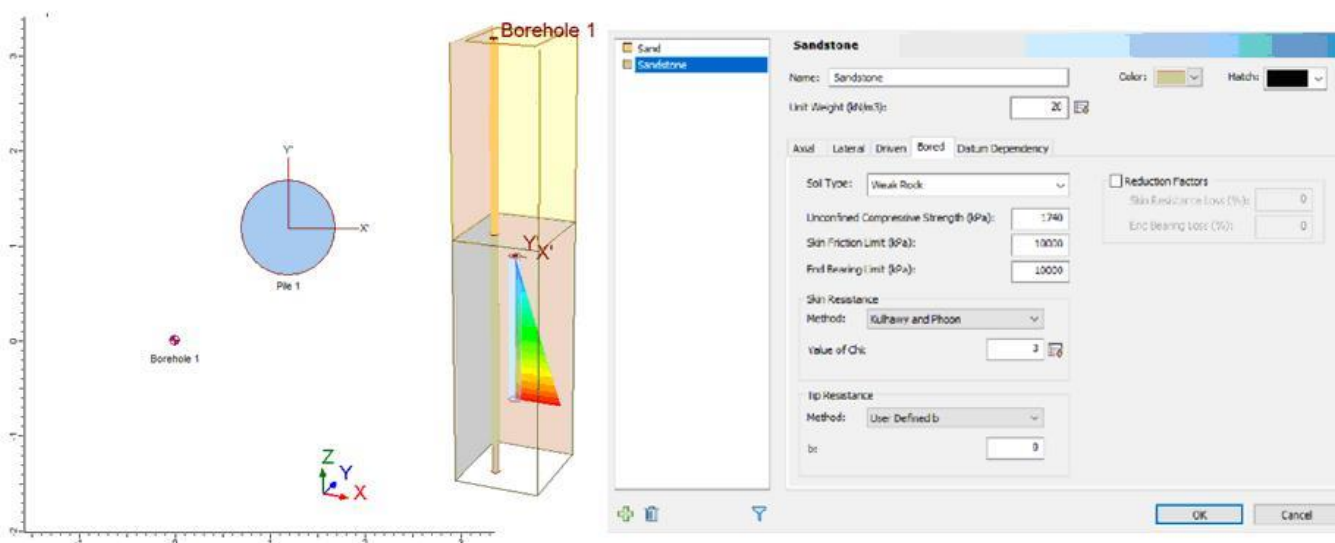


## Сравнение кривых «нагрузка – осадка» на основе испытаний сваи методом Остерберга и результаты анализа ее поведения



Компания Rocscience, основанная в 1996 году, является одним из мировых лидеров по разработке, усовершенствованию и распространению 2D и 3D программного обеспечения для инженеров-строителей, горных инженеров и инженеров-геологов (это прежде всего программные комплексы Rocscience, RSPile и др.). На сайте данной компании недавно появилась интересная статья ее сотрудника доктора наук Ахмеда Аль-Муфти «Сравнение кривых “нагрузка – осадка” на основе испытаний сваи методом Остерберга и результатов анализа ее поведения с помощью кривых “абсолютное смещение – мобилизованное трение по боковой поверхности”» Предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод данной работы.



**АХМЕД АЛЬ-МУФТИ (AHMED AL-MUFTY)**  
Компания Rocscience

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА ГЕОИНФО**  
info@geoinfo.ru

**ООО «СОВРЕМЕННЫЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ADVANCED SURVEY TECHNOLOGIES) – ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПРЕДСТАВИТЕЛЬ ROCSCIENCE В РОССИИ**  
info@geoast.pro

## Введение

Испытания буронабивных свай на двунаправленную осевую сжимающую нагрузку проводят с помощью силовой ячейки Остерберга (О-ячейки), то есть предварительно откалиброванного погружного (встроенного в арматурный каркас свай) гидравлического домкрата. При этом по длине сваи обычно устанавливаются все необходимые датчики для измерения напряжений и деформаций (смещений). По измеренным напряжениям и смещениям при различных нагрузках можно легко оценить поведение сваи в ответ на нагрузку, а также ее несущую способность.

В этой статье демонстрируется, как графики зависимости мобилизованного трения по боковой поверхности сваи от абсолютных смещений (кривые « $T - z$ »), построенные на основе результатов испытаний методом Остерберга, могут быть использованы для определения ожидаемой осадки рабочих свай. Данные, полученные при традиционных испытаниях с приложением статической вдавливающей нагрузки на оголовки сваи (TLT) с использованием итогов испытаний с помощью О-ячейки, сравниваются с осадками, оцененными в 3D программном комплексе RSPile (разработанном компанией Rocscience) с применением кривых « $T - z$ », построенных на основе интерпретации результатов выполненных тестов.

В данном исследовании интерпретируются и используются результаты реальных испытаний свай, заглубленной в песчаник, методом Остерберга. Предельное сопротивление грунта под нижним концом сваи не учитывалось, а О-ячейка была установлена в середине длины сваи. Кривая « $T - z$ » для песчаника будет выбрана из полученных результатов измерений и применена при анализе поведения сваи при осевой нагрузке в программе RSPile. При необходимости можно использовать подходящие коэффициенты (множители) для корректировки применяемой кривой, чтобы подготовить полученные результаты для анализа рабочих свай.

## Слои грунта

Рассматриваемая площадка сложена сверху песком средней плотности, перекрывающим слой очень слабого песчаника. Высотная отметка поверхности земли составляет плюс 3 м. Количество ударов при стандартных динамических пенетрационных испытаниях (SPT) по 19 скважинам показало, что самая глубокая возможная высотная отметка подошвы слоя песка составляет минус 12 м. Средний показатель нарушенности скальных пород RQD составил 65%. Зависимость предела прочности при одноосном сжатии (UCS) скальной породы от глубины показана на рисунке 1 (его среднее значение составило 1,74 МПа). С помощью этих величин можно рассчитать предельное трение по боковой поверхности сваи с использованием режима Bored в программе RSPile. Используемые методы показали следующие результаты.

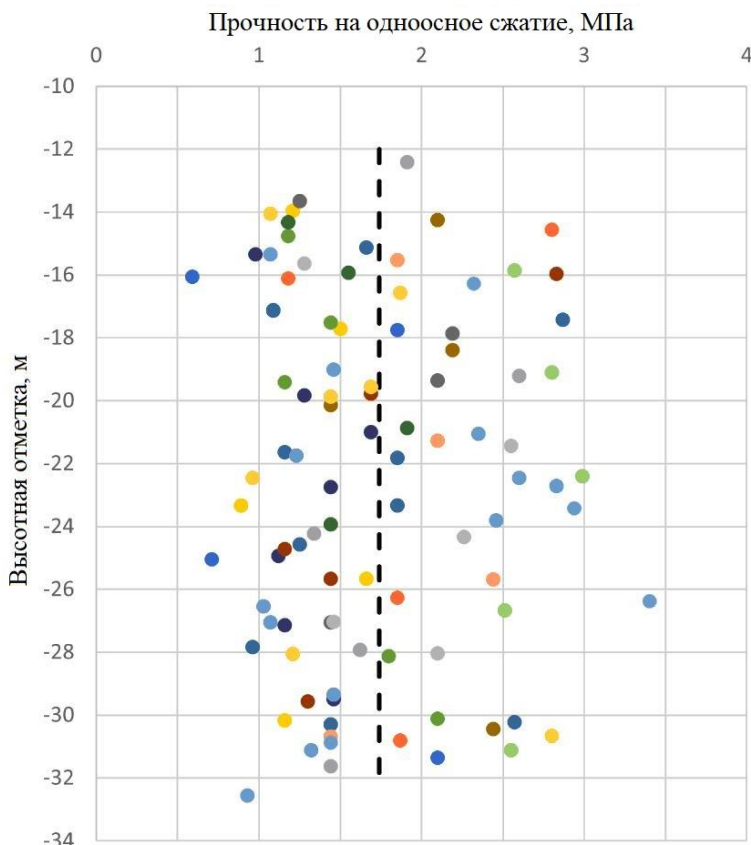


Рис. 1. Распределение прочности на одноосное сжатие песчаника по глубине

Метод Уильямса и Пеллса (Williams – Pells) дал предельное сопротивление грунта по боковой поверхности сваи 504 кПа, в то время как метод Кульхави и Фуна (Kulhawy – Phoon) дал 295; 589 и 885 кПа для значений  $c$ , равных соответственно 1; 2 и 3 согласно руководству по теории RSPile [4] (что означает коэффициент  $c$ , автор не пояснил в своей статье ни разу. – *Ред.*). Смоделированная свая имела диаметр 1 м, длину 12 м и была заделана в песчаник, имеющий указанные выше свойства. Прочность соответствующего бетонного цилиндра составила 40 МПа. Читатель может легко смоделировать грунты и сваю, чтобы получить эти результаты (рис. 2).

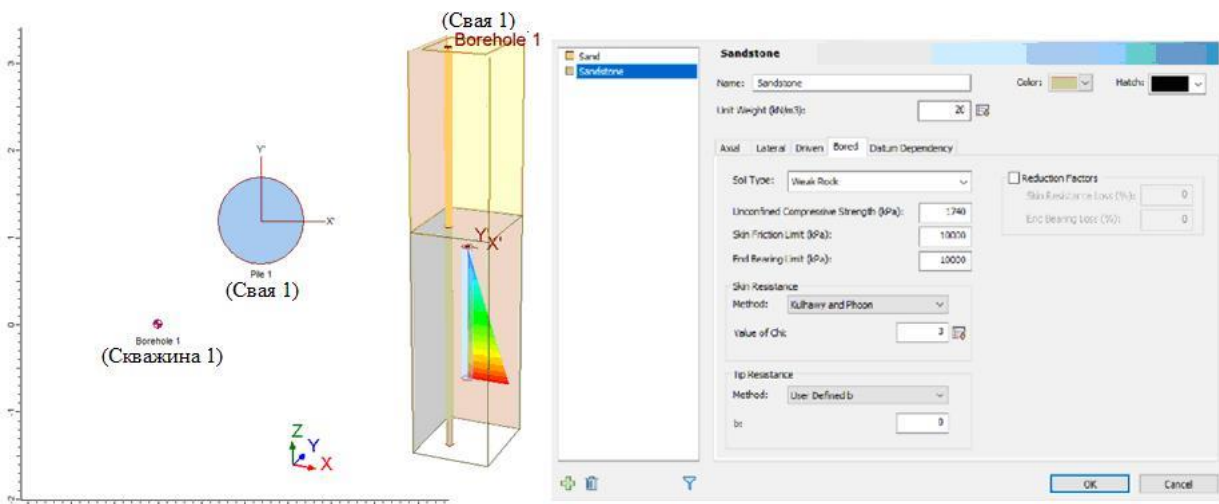
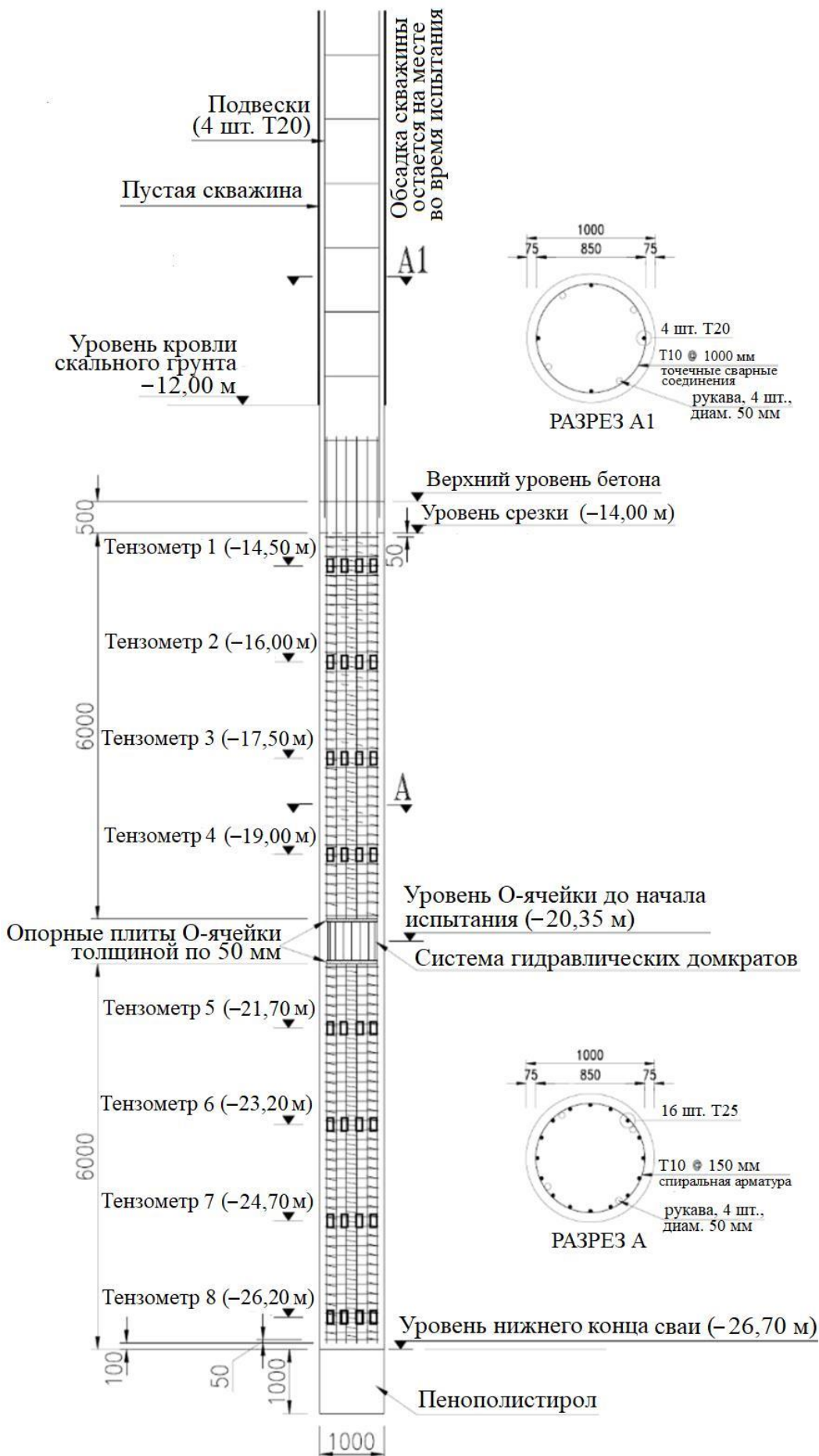


Рис. 2. Модель сваи, заделанной в песчаник, полученная в программе RSPile в режиме Bored

### **Более детальная информация об испытанной свае**

Как уже отмечалось выше, 12-метровая свая разделена О-ячейкой посередине (рис. 3). Длина верхней и нижней относительно ячейки частей – по 6 м. Предполагается, что для верхней части не должно быть сопротивления от нагрузки сверху, так как скважина выше сваи является пустой, а сопротивления грунта под нижним торцом не будет, потому что он имеет башмак из пенополистирола.

Верхняя и нижняя относительно ячейки части сваи оборудованы тензометрическими датчиками на показанных на рисунке 3 уровнях, при этом оголовок сваи, верхняя и нижняя опорные плиты О-ячейки оборудованы контрольными датчиками для измерения смещений в этих точках. Когда начинается испытание, к обеим частям сваи прикладывается одинаковая нагрузка от системы гидравлических домкратов ячейки, которая толкает верхнюю часть сваи вверх, а нижнюю – вниз.



**Рис. 3.** Детали устройства испытанной сваи

Как уже отмечалось, исходная длина сваи составляет 12 м, и предполагается, что она выдерживает нагрузку 6 000 кН. Следовательно, нагрузка от системы домкратов О-ячейки, представляющая проектную, будет составлять 3 000 кН в каждом направлении. Испытание будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнуто предельное сопротивление по боковой поверхности сваи при выходе из строя одной из ее частей (относительно ячейки) или обеих частей (если они выйдут из строя одновременно). Из-за чрезмерного бетонирования сверху можно ожидать, что нижняя часть выйдет из строя первой, что и произошло в ходе испытания. Уровень бетона в оголовке сваи можно было точно не контролировать. В любом случае, сегменты сваи, расположенные ближе к О-ячейке, будут иметь почти такое же сопротивление по боковой поверхности.

Диаметр сваи составляет 1 м, и она армирована стальными стержнями диаметром 16–25 мм, имеющими модуль упругости 200 ГПа, в то время как модуль упругости бетона оценивается на основе прочности цилиндра величиной около 31 ГПа, что приводит к отношению модулей упругости арматуры и бетона  $n$ , равному 6,45. При таком соотношении эквивалентный модуль упругости композитного сечения сваи может быть рассчитан по следующей формуле:

$$E_p = E_c (1 - \rho + n\rho),$$

где  $\rho$  – коэффициент армирования  $A_s/A_g$ .

Следовательно, вышеуказанный модуль равен 32 690 МПа.

Максимальное среднее напряжение, допустимое во время испытания, должно удерживать сваю в пределах упругой области. Максимальная нагрузка, приложенная во время испытания, составила около 13 000 кН, что эквивалентно среднему напряжению 16,56 МПа (около 40% прочности бетона во время испытания). Этот показатель все же высок, и можно ожидать некоторой нелинейности поведения бетона при максимальной испытательной нагрузке.

### **Результаты испытаний с помощью ячейки Остерберга и кривая «нагрузка – осадка» для традиционных испытаний с приложением статической вдавливающей нагрузки на оголовки сваи**

Проводились испытания пробных свай статической нагрузкой в соответствии с инструкцией по устройству и испытаниям свай и подпорных стенок [3]. Процедура тестирования с помощью О-ячейки теперь является стандартизированной (по ASTM D8169-2018 [2]). В таблице 1 перечислены значения микродеформаций (деформаций\*10<sup>6</sup>), зарегистрированные тензодатчиками в соответствии с этапами нагружения системой домкратов и высотными отметками. Деформации на уровнях верхней и нижней опорных плит О-ячейки были рассчитаны на основе приложенной нагрузки и эквивалентного модуля упругости для композитного сечения, указанного выше.

**Таблица 1.** Результаты измерения деформаций во время испытаний сваи



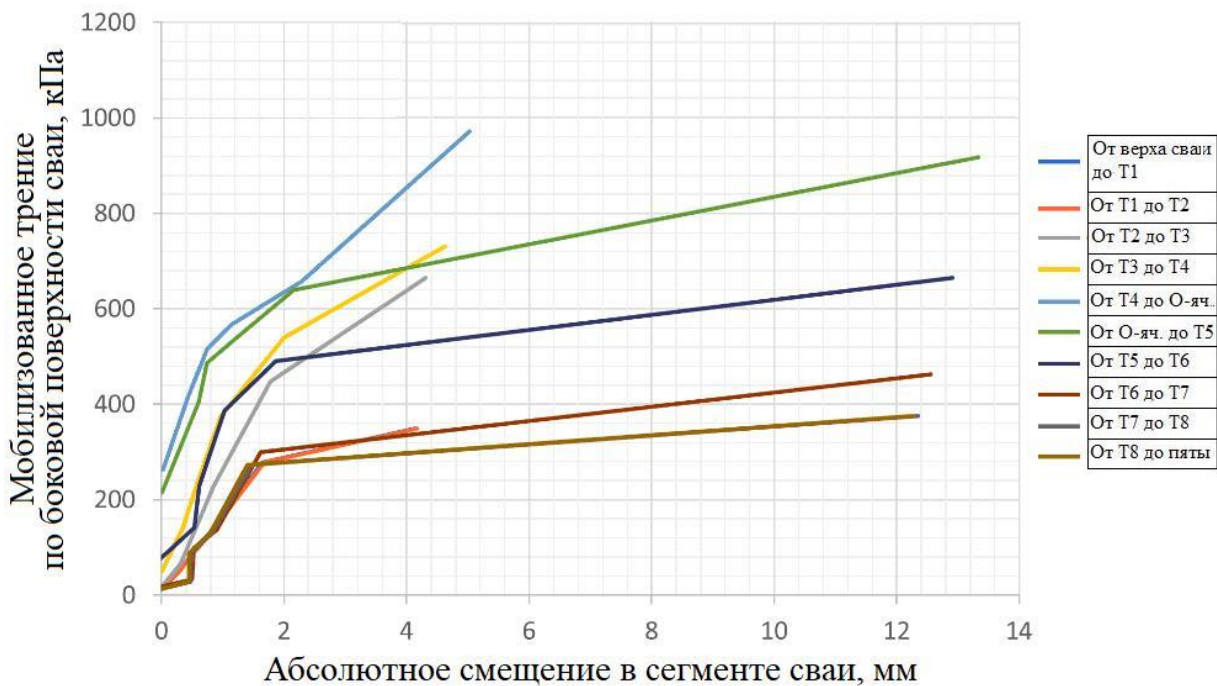
Тензо-датчик №	Высотн. отметка	Исходн. нагрузка	3000 кН	6000 кН	9000 кН	12000 кН	18000 кН	25500 кН
		Нагр. от домкр.	1500 кН	3000 кН	4500 кН	6000 кН	9000 кН	12750 кН
		0%	50%	100%	150%	200%	300%	425%
1	-14,5	0	1	2	3	5	10	16
2	-16,0	0	3	11	19	29	61	80
3	-17,5	0	6	23	44	71	143	202
4	-19,0	0	15	49	90	140	242	336
Верх О-яч.	-20,0	0	58	116	175	233	350	496
Низ О-яч.	-20,7	0	58	116	175	233	350	496
5	-21,7	0	23	50	95	145	245	345
6	-23,2	0	9	24	53	74	155	223
7	-24,7	0	6	18	35	49	100	138
8	-26,2	0	4	13	19	25	50	69

В таблице 2 представлены зарегистрированные смещения оголовка сваи и на уровне О-ячейки по стадиям нагружения.

Таблица 2. Смещения при испытаниях в конце каждого этапа нагружения (этапы разгрузки не показаны)

Нагрузка	На оголовок сваи	На верх О-ячейки	На низ О-ячейки
кН	мм	мм	мм
0	0	0	0
1500	0,03	0,05	0,03
3000	0,2	0,46	0,65
4500	0,35	0,81	0,81
6000	0,62	1,24	1,3
9000	1,01	2,44	2,31
12750	1,98	5,24	13,54

Имея величины деформаций, указанные в таблице 1, легко вычислить трение по боковой поверхности для каждого сегмента сваи, мобилизованное на каждом этапе нагружения. Значения этого трения перечислены в таблице 3 и показаны в виде графика на рисунке 4 (в зависимости от абсолютного смещения, которое, в свою очередь, рассчитано на основе смещений, приведенных в таблице 2, и разницы деформаций).



**Рис. 4.** Графики зависимости мобилизованного трения по боковой поверхности от абсолютных смещений для разных сегментов сваи (кривые «Т – з») Обратите внимание, что графики для сегментов между уровнями тензометров (Т) 1 и 2, 7 и 8 (см. рис. 3) нельзя различить, поскольку они попадают под графики для верхнего и нижнего концов сваи соответственно

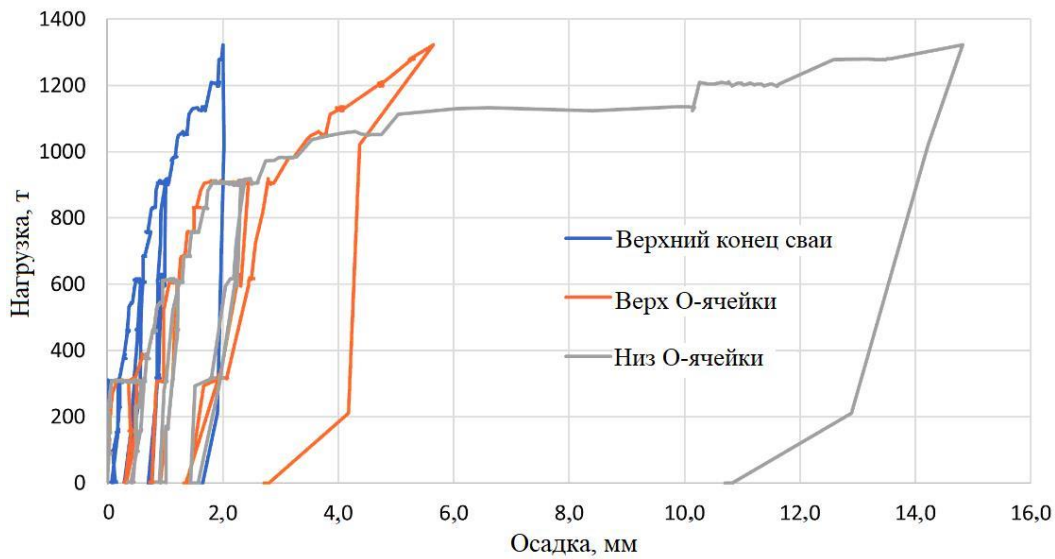
**Таблица 3.** Удельное сопротивление по боковой поверхности сваи, мобилизованное на каждом этапе нагружения

Сегмент сваи	3000 кН	6000 кН	9000 кН	12000 кН	18000 кН	25500 кН
	50%	100%	150%	200%	300%	425%
От верха сваи до Т1	11	49	87	131	278	349
От Т1 до Т2	11	49	87	131	278	349
От Т2 до Т3	16	65	136	229	447	665
От Т3 до Т4	49	142	251	376	539	730
От Т4 до О-яч.	263	411	516	567	657	972
От О-яч. до Т5	214	405	486	537	639	918
От Т5 до Т6	76	142	229	387	490	665
От Т6 до Т7	16	33	98	136	300	463
От Т7 до Т8	11	27	87	131	272	376
От Т8 до пяты	11	27	87	131	272	376

**Примечание:** Т – уровень тензометра (с соответствующим номером, см. рис. 3).

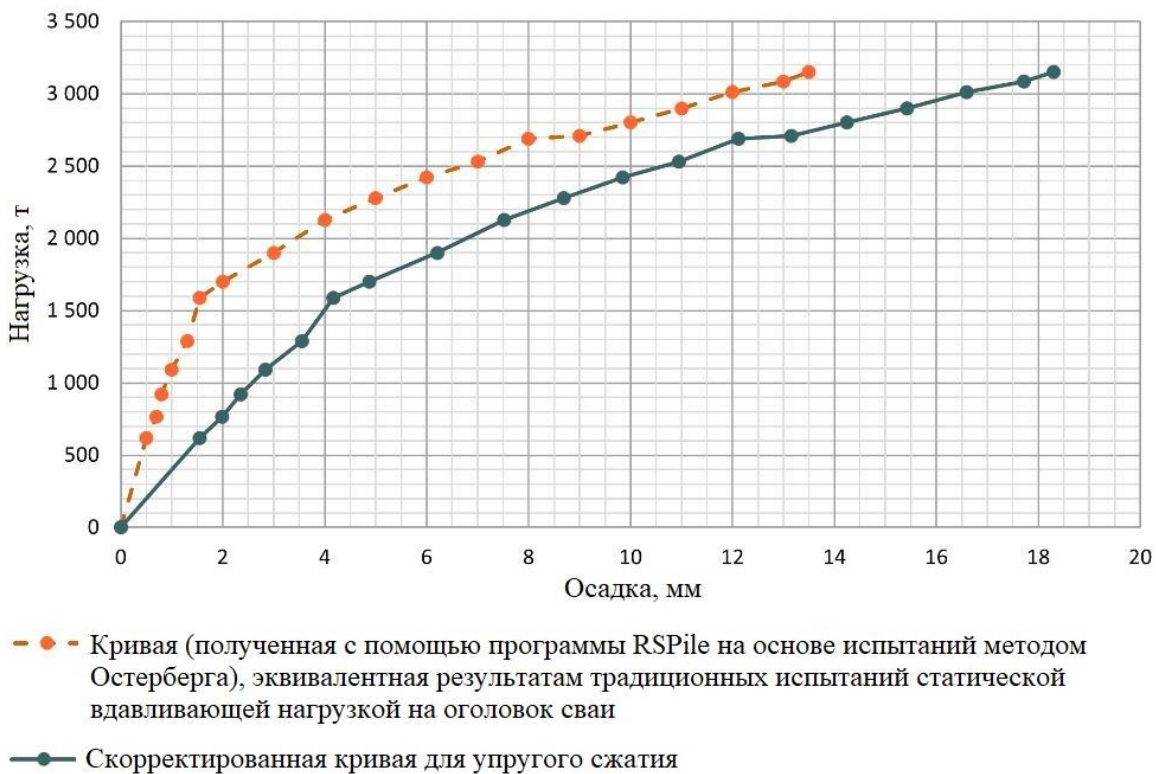
Смещения верхнего конца сваи, а также верха и низа О-ячейки показаны в зависимости от нагрузки от системы домкратов на рисунке 5. Эти графики очень интересны, и они ясно показывают, насколько идентично вели себя верхняя и нижняя относительно О-ячейки части сваи до тех пор, пока нагрузка не достигла 10 160 кН, после чего нижняя часть вышла из строя и претерпела чрезмерную осадку при очень небольшом увеличении нагрузки.





**Рис. 5.** Смещения сваи, измеренные методом Остерберга

Кривая осадок 12-метровой сваи строилась методом, предложенным изобретателем этого типа испытаний Джорджем Остербергом. Читатель, если его интересуют подробности, может обратиться к соответствующей публикации Остерберга 1995 года [1]. Окончательный график показан на рисунке 6.



**Рис. 6.** Графики, полученные в программе RSPile (на основе испытаний методом Остерберга), для оценки зависимости осадки от нагрузки при традиционных испытаниях с приложением статической вдавливающей нагрузки на оголовки сваи

## Выбор подходящей кривой зависимости мобилизованного трения по боковой поверхности сваи в песчанике от абсолютных смещений (« $T - z$ ») по результатам испытаний методом Остерберга

Найти подходящую кривую зависимости мобилизованного трения по боковой поверхности сваи от абсолютных смещений « $T - z$ ») с целью использования для конкретного проекта – непростая задача. Требуется множество оценок и рассуждений, понимание взаимодействий сваи с дисперсным или скальным грунтом, условий испытаний, наличие местного опыта и, наконец, необходимо проверить адекватность полученной кривой путем сравнения ее с данными полевых испытаний. На приведенном выше рисунке 4 имеется несколько кривых « $T - z$ ».

При испытаниях методом Остерберга значения трения по боковой поверхности сваи рядом с О-ячейкой обычно очень высоки и не отражают среднее поведение дисперсного или скального грунта. Инженер может усреднить результаты для того или иного сегмента сваи с другим сегментом ниже или выше О-ячейки. Другой способ решения – вручную построить усредненную кривую, отражающую весь набор доступных графиков. Если свая не дает отказа, то трение по ее боковой поверхности, очевидно, будет приближаться к одной кривой, но если она выходит из строя и проходит через предельное сопротивление по боковой поверхности, то кривые для зоны повреждения могут отходить друг от друга, поскольку нагрузка от более слабых зон передается зонам, в которых все еще есть более прочные части. Это можно увидеть на рисунке 4, где все кривые сначала близки друг к другу, но начинают отклоняться друг от друга по мере развития нарушений в нижней относительно О-ячейки части сваи, в то время как кривые для верхней части все еще проходят рядом.

Автор настоящей статьи обычно предпочитает использовать построенную вручную усредненную кривую и проверять ее выбор в компьютерной программе RSPile. В этом исследовании будет принят график, похожий по форме на кривые для нижней относительно О-ячейки части сваи и характеризующийся предельным трением по боковой поверхности, близким к рассчитанному в режиме Bored программы RSPile. Он будет испытан на общее поведение и при необходимости скорректирован. Максимальное трение по боковой поверхности, рассчитанное методом Кульхави и Фуна (Kulhawy – Phoon), хотя и менее консервативно, но, похоже, ближе к реальности при значениях  $c$  от 2 до 3 (что означает коэффициент  $c$ , автор не пояснил в своей статье ни разу. – *Ред.*). Кажется вполне разумной величина предельного трения по боковой поверхности 650 кПа. Следовательно, кривые для нижней относительно О-ячейки части сваи могут быть усреднены около кривой для сегмента между тензометрами 5 и 6, где мобилизованное трение по боковой поверхности достигает примерно 650 кПа на протяжении 10 мм (1% диаметра) и находится в диапазоне залегания песчаника, рассчитанном ранее. Кривая, которая будет использоваться и проверяться, может быть определена с помощью некоторых точек, выбранных из этого графика, и представлена в виде таблицы в готовой форме для применения к выбранной пользователем кривой « $T - z$ » в программе RSPile (из таблицы 4). Эти значения должны быть введены в программу RSPile, как показано на рисунке 7. Данная программа требует армирования сечения сваи, а также прочности бетона.

**Таблица 4. Начальный график зависимости мобилизованного трения по боковой поверхности сваи от абсолютных смещений (« $T - z$ »), принятый для анализа в программе RSPile**

Смещение		Трение по боковой поверх. $f_s$	$f_s / f_{s\text{предельн}}$
мм	м		
0	0	0	0
1	0,001	400	0,62
2	0,002	500	0,77
4	0,004	530	0,82
6	0,006	560	0,86
8	0,008	600	0,92
10	0,01	620	0,95
12	0,012	650	1,00

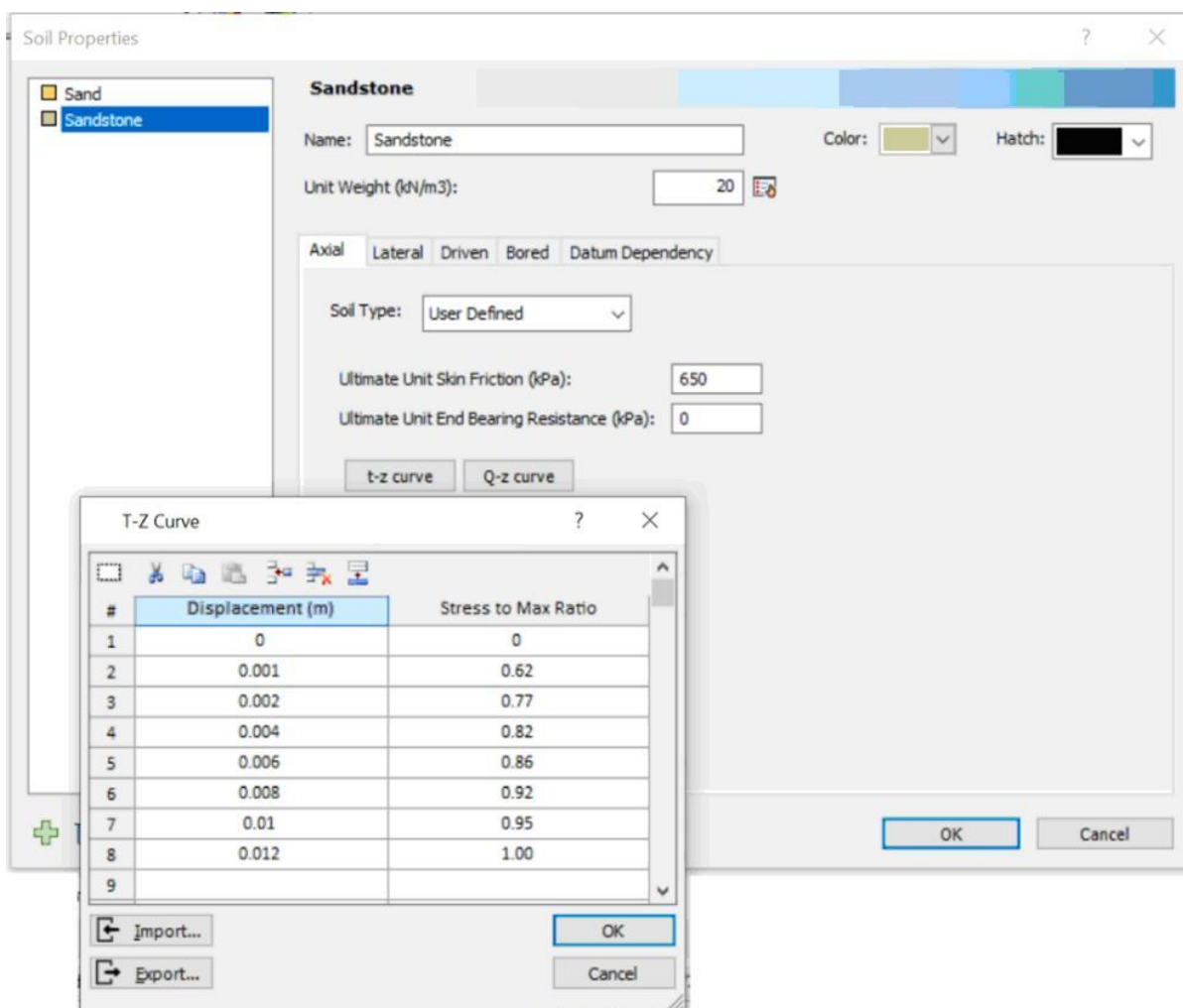
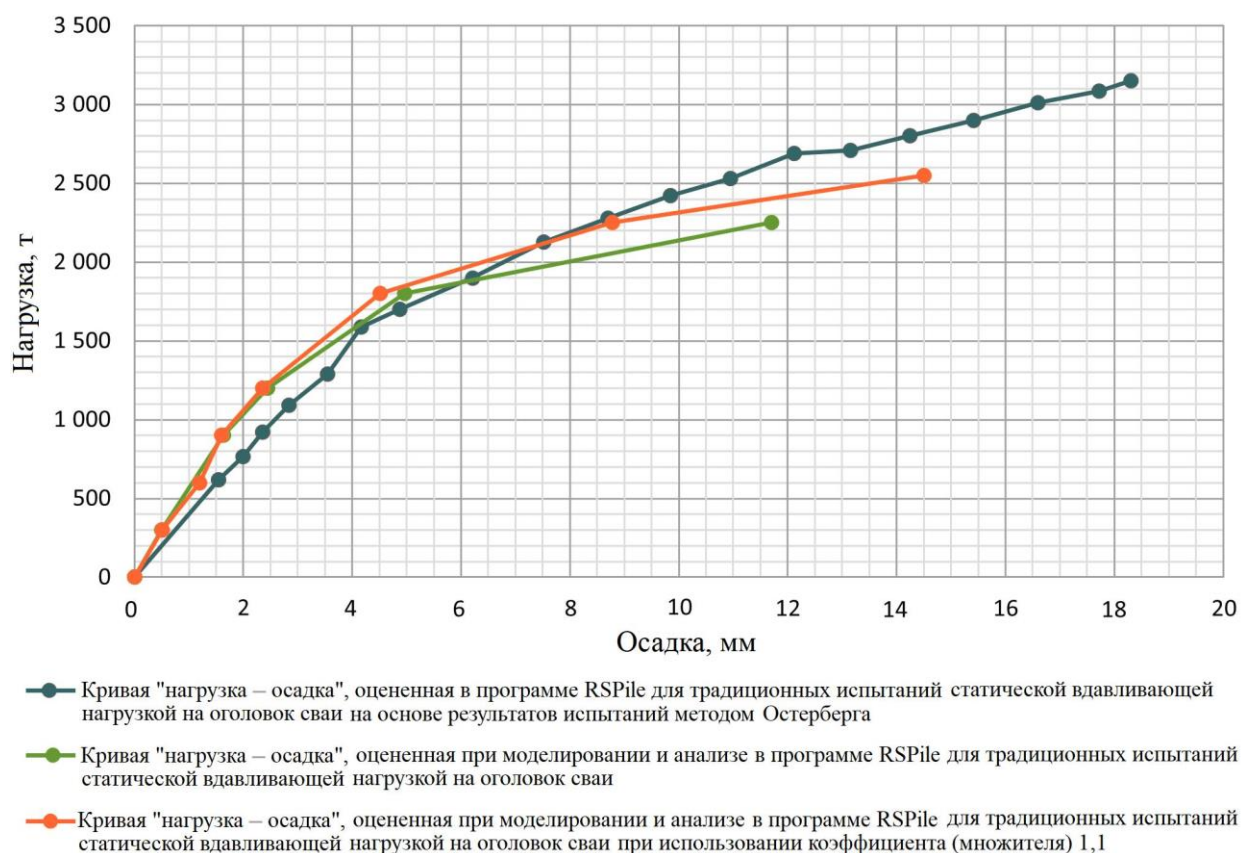


Рис. 7. Свойства грунта (песчаника) для вкладки Axial в программе RSPile

## Результаты работы в программе RSPile и их обсуждение

После создания модели в программе RSPile к свае прикладывают нагрузку в соответствии с этапами, приведенными в таблицах выше. Для каждой нагрузки необходимо виртуальное испытание и запись полученной в результате осадки. Пользователь может копировать свою столько раз, сколько захочет, распределять нагрузки по этим сваям и нагружать их одновременно.

В любом случае, результаты работы в программе с кривой « $T - z$ », заданной в соответствии с таблицей 4, показаны в графическом виде на рисунке 8. Результаты в программе не сходились при более высоких нагрузках при заданной точности 0,0001. Для изменения формы и протяженности результирующей кривой «нагрузка – осадка» может использоваться коэффициент (множитель), который добавляется в диалоговом окне Edit Pile («Редактировать сваю»). Результат такой процедуры тоже показан на рисунке 8 (с коэффициентом 1,1, примененным как к смещению, так и к приведенному мобилизованному трению по боковой поверхности сваи  $f_s / f_s$  предельн.). Для смещения и нагрузки могут использоваться разные коэффициенты, а также их можно изменять в зависимости от глубины.



**Рис. 8.** Сравнение кривых «нагрузка – осадка», оцененных в программе RSPile для традиционных испытаний статической вдавливающей нагрузкой на оголовок сваи разными способами

Из рисунка 8 видно, что программа RSPile является эффективным инструментом для получения выбранной протестированной кривой « $T - z$ », на основе чего эта программа будет готова для анализа поведения любой сваи любого диаметра, любой длины и под любой нагрузкой в этом же самом песчанике.

*(Отметим, что в конце статьи на сайте предлагается попробовать бесплатно поработать в течение 15 дней с пробной версией программы RSPile. – Ред.).*

**Источник для адаптированного перевода**

Al-Mufty A. Comparison of load-settlement curves from an O-Cell test with pile analysis using T-z curves // Rocscience. June 15, 2021. URL: [rocscience.com/about/news-events/comparison-of-load-settlement-curves-from-an-o-cell-test-with-pile-analysis-using-t-z-curves](https://rocscience.com/about/news-events/comparison-of-load-settlement-curves-from-an-o-cell-test-with-pile-analysis-using-t-z-curves).

**Список литературы, на которую ссылается автор переведенной статьи**

1. Osterberg J.O. The Osterberg cell for load testing drilled shafts & driven piles. Federal Highway Administration, 1995. Publication № FHWA-SA-94-035.
2. ASTM D8169/D8169M. Standard test methods for deep foundations under bi-directional static axial compressive load. ASTM International, 2018.
3. ICE specifications for piling and embedded retaining walls (2nd ed.). UK: Thomas Telford, 2007.
4. RSPile theory manuals. URL: [rocscience.com/help/rspile/rspile/documentation/theory.htm](https://rocscience.com/help/rspile/rspile/documentation/theory.htm).