

УДК 69:001.89.,624.15

Г.Н. Мещеряков,
"Инженерный Центр Трансзвук", г. Одесса

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШПУНТОВЫХ СВАЙ, ПОГРУЖАЕМЫХ ВДАВЛИВАНИЕМ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена специфика работы замковых соединений шпунтовых стенок при использовании свай корытного профиля. Проведены полномасштабные исследования процессов вдавливания стальных шпунтовых свай на экспериментальной площадке с применением гидравлической сваевдавливательной машины и модульной координатной системы МКС. Получены данные о распределении сил трения в замках шпунтовых свай.

Ключевые слова: шпунтовая свая, замковое соединение, полномасштабное моделирование, погружение свай вдавливанием, сваевдавливательная машина

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения оптимальных параметров технической эксплуатации защитных и ограждающих гидротехнических сооружений, а также экономичных методов их реконструкции и ремонта необходимо максимально точно учитывать жесткостные характеристики основных несущих конструктивных элементов сооружения. Данное соображение имеет существенное значение при использовании в составе инженерных сооружений гибких шпунтовых стенок корытного профиля (сечения типа "Ларсен"), в частности, при определении их момента инерции и момента сопротивления (Рис. 1).

Основная особенность шпунтовых стенок корытного профиля заключается в том, что их замковые соединения расположены в зоне нейтральной оси стенки. Таким образом, усилия и деформации в замках таких шпунтовых свай играют важную роль в поведении свай и в формировании реальных значений упомянутых геометрических параметров сечения стенки.

При полной передаче усилий от свай к свае через замки стенка из шпунтовых свай работает как

PU 32

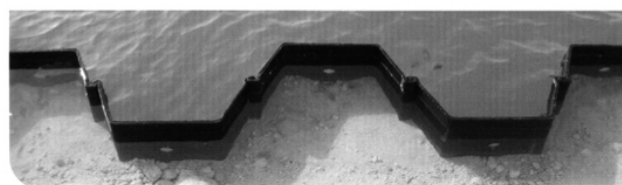
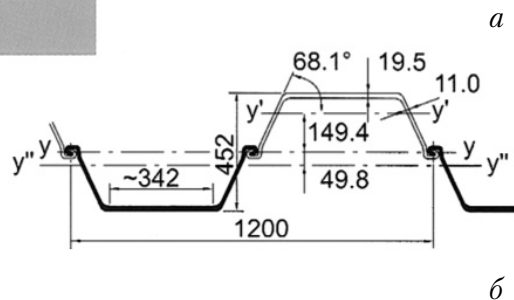


Рис. 1. Шпунтовая стенка из свай типа PU 32

а — схема; б — план погруженных свай

сплошная конструкция (геометрические параметры сечения могут приниматься по значениям, указанным в каталоге, предоставляемым производителями). При полном проскальзывании свай в замках (нулевое трение) каждая шпунтовая свая работает как одиночная, при этом момент инерции и момент сопротивления шпунтовой стенки минимальны. В действительности силы трения в замках имеют некоторое промежуточное (между нулевым и полным трением) значение. Это предопределяет и некоторые промежуточные значения (между минимальным для работы одиночных свай и максимальным для сплошной стенки) рассматриваемых геометрических параметров, на величину которых оказывают влияние такие основные факторы, как свойства грунтов, в которые погружают сваи, метод и технология погружения. Механические свойства грунтов влияют на силы трения в замковых соединениях шпунтовых свай и передачу продольных усилий от свай к свае.

Одним из наиболее приемлемых методов изучения взаимодействия замковых соединений шпунтовых свай с грунтовой средой при устройстве и эксплуатации шпунтовых стенок является метод вдавливания свай, позволяющий ступенчато варьировать прилагаемую внешнюю нагрузку в заданных интервалах, скорость и направление приложения нагрузки, а также избежать негативных динамических эффектов, сопровождающих процессы забивки свай.

Следует отметить, что упомянутые разные стадии работы сооружения характеризуются различ-

ными интервалами нагрузок и перемещений шпунтовых свай. Так, для стадии технической эксплуатации взаимные смещения свай вдоль замковых соединений могут составлять от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Для этапов строительства, реконструкции или ремонта шпунтовых стенок такие смещения могут быть выше на порядок.

Таким образом, полномасштабное физическое моделирование в реальном масштабе сил и перемещений целесообразно для оценки поведения свай при возведении (реконструкции) сооружений. Для изучения особенностей стадии эксплуатации рассматриваемых конструкций полезными оказываются более точные лабораторные опыты для ограниченных интервалов усилий и деформаций исследуемых элементов.

1 ПОЛНОМАСШТАБНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Цель и задачи экспериментов

В связи с вышеизложенным были проведены комплексные экспериментальные исследования. Они включали как полномасштабные натурные опыты, так и лабораторные эксперименты с реальными замковыми соединениями шпунтовых свай в разнообразных грунтовых условиях. В статье рассмотрены результаты полномасштабных экспериментальных исследований на строительной площадке.

Цель исследований состояла в определении особенностей взаимодействия замковых соединений стальных шпунтовых свай корытного профиля с грунтовой средой. В частности, при погружении свай статическим вдавливанием определялись зависимости типа "нагрузка — перемещение" в широком интервале усилий. Полученные зависимости могут быть использованы для разработки достоверной модели взаимодействия элементов системы "шпунтовая стенка — грунтовая среда", а также повышения эффективности численного моделирования и проектирования воднотранспортных сооружений для стадий их возведения, эксплуатации, реконструкции и ремонта.

Ранее полномасштабное физическое моделирование (ввиду значительных технологических, материальных и методологических трудностей) для

решения поставленных задач не проводилось. В связи с этим приведенные в данной публикации данные представляются интересными, полезными и уникальными.

1.2. Многофункциональный экспериментальный стенд

Полномасштабное исследование и моделирование процессов вдавливания — извлечения стальных шпунтовых свай было основано на применении модульной координатной системы (МКС). Система МКС — концептуальное строительное оборудование, предназначенное для погружения строительных элементов методом вдавливания (Рис. 2). Основные преимущества системы: непрерывный мониторинг усилия вдавливания каждой погружаемой сваи в реальном времени и пространственных координатах, а также высокоточная система позиционирования.

Система МКС применяется при устройстве свайных фундаментов гражданских и промышленных зданий, шпунтовых оградительных сооружений, укреплении котлованов, стабилизации склонов. Система содержит в своей конструкции гидравлическую сваевдавливающую либо шпунто-

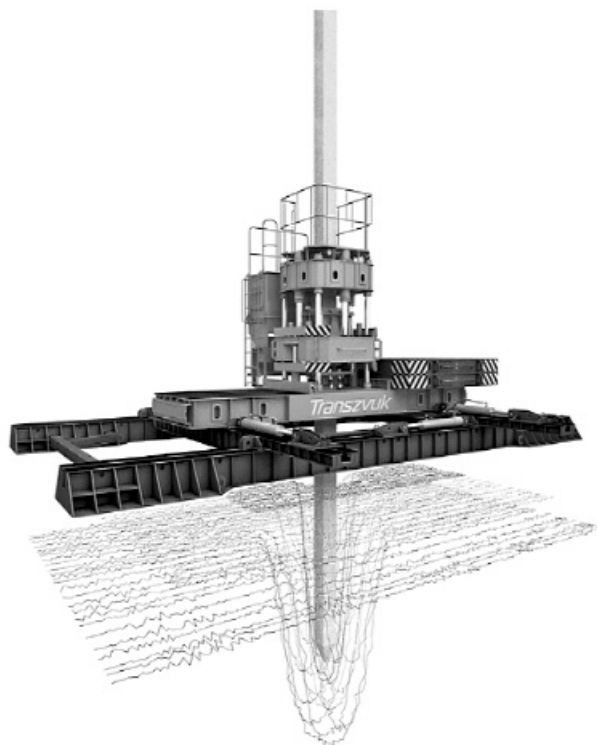


Рис. 2. Полномасштабная цифровая модель МКС

Таблица 2. Основные технические характеристики МКС

Автоматическое перемещение	двухкоординатное
Скорость перемещения	2,5 м/мин
Макс. усилие вдавливания	2 500 кН (250 тс)
Скорость вдавливания	1,5 - 3,5 м/мин
Макс. габарит шпунтовой сваи	500 мм
Производительность	40 свай в смену
Точность позиционирования	±10 мм

вочную машину [1, 2]. Модульная концепция системы обеспечивает высокоточное двухкоординатное перемещение сваевдавливательной машины в рабочей зоне модуля, а также по строительной площадке (при максимальной загрузке анкерными грузами) без необходимости переанкеровки и демонтажа/монтажа машины.

Сваевдавливательная машина, входящая в состав системы (рисунок. 2) предназначена для вдавли-

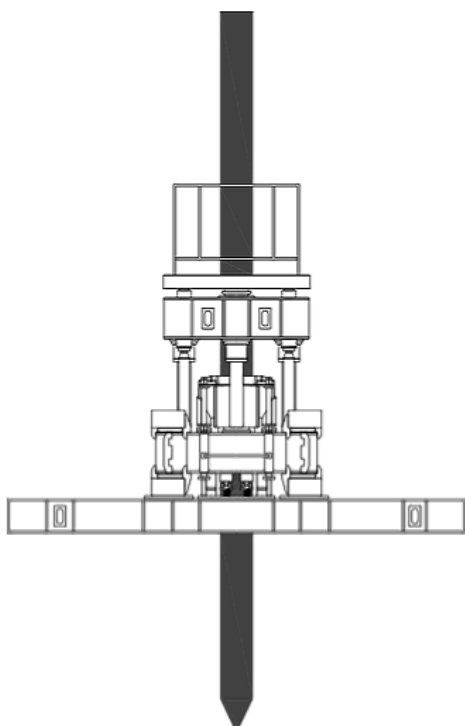


Рис. 3. Конструктивная схема сваевдавливательной машины модели СО-450

1 — вдавливаемая свая, 2 — система бокового клинового захвата, 3 — вдавливающая головка, 4 — верхнее ограждение, 5 — гидроцилиндры, 6 — грузовая рама

вания и извлечения железобетонных свай, труб и шпунтов габаритом не более 500 мм, при разных их длинах, с усилием вдавливания более 2000 кН. В конструкции машины реализован принцип бокового клинового захвата строительного элемента и его пошагового погружения в автоматическом и ручном режимах (Рис. 3).

Оборудование работает бесшумно, не оказывая динамического и вибрационного воздействия на грунт основания и соответствует самым высоким требованиям экологической безопасности. Сваевдавливательная машина используется в качестве стенда для проведения контрольного испытания свай, так как позволяет реализовать непрерывный мониторинг режимов погружения каждой сваи. Машина способна ступенчато по заданной программе передавать усилие на испытываемую сваю до 2000 кН. Перемещение сваи под нагрузкой фиксируется относительно неподвижной реперной системы. Данные мониторинга, подтвержденные результатами контрольных испытаний, позволяют гарантировать несущую способность каждой погружаемой сваи.

Сваевдавливательная машина в смонтированном виде представляет собой конструкцию, содержащую грузовую раму, станину с направляющими колоннами, вдавливающий и зажимной механизмы, гидроцилиндры рабочего и обратного хода, а также средства управления. Вдавливающий механизм машины представляет собой головку с размещенным в её центральной части центрирующим и зажимным механизмом, который в отличие от прототипов не только зажимает сваю, но и передаёт ей вдавливающее усилие не с торца, а через боковую поверхность. Вдавливающая головка машины выполнена из конструктивных элементов, каждый из которых кинематически связан с механизмом зажима и имеет возможность образования единой жесткой подвижной системы, обеспечивающую эффективную фиксацию и цикличное погружение строительного элемента в грунт независимо от его конфигурации и длины. Нагрузка от рабочих гидроцилиндров сосредоточена вдоль оси, проходящей через центр давления клиновых элементов, и совпадает с ней, а площадь зажимной губки рассчитана так, чтобы обеспечить условия, при которых боковое удельное давление на сваю всегда меньше удельной нагрузки на неё в поперечном сечении.

1.3. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования по полному физическому моделированию силового взаимодействия шпунтовых свай в замковых соединениях при их вдавливании и извлечении, а также соответствующие лабораторные опыты проводились Одесским национальным морским университетом (кафедра "Морские и речные порты, водные пути и их техническая эксплуатация") совместно с компанией "Инженерный Центр Трансзвук" при содействии и научном сопровождении Международной Ассоциации по вдавливанию свай (International Press-In Association) и компании Гикен (Япония).

Исследования проводились на экспериментальном полигоне ИЦ "Трансзвук" вблизи побережья Одесского залива в июле 2009 г.

В качестве экспериментального стенда (рисунок 3) для моделирования процессов вдавливания и извлечения свайных элементов применялась гидравлическая сваевдавляющая машина СО-450 и модульная координатная система МКС.

Исследованиям были подвергнуты стальные шпунтовые сваи корытного профиля типа PU 32 (производство Арселор Миттал) с замковыми соединениями типа Ларсен (рисунки 5, 6).

В экспериментах использовались два свайных элемента (усеченные вдоль замковых соединений шпунтовые сваи упомянутого типа) с шириной полки 150 мм (рис. 5, 6). Один из элементов имел длину 10 м, другой — 5 м

1.4. Особенности проведения экспериментов

Более длинный свайный элемент рассматривался как базовый (фиксированный). Короткий же элемент погружался (вдавливался) в грунт и извлекался из грунта вдоль базового (замок в замок) и считался подвижным.

Благодаря предварительной подготовке (выравниванию) поверхностей замков сопротивление при взаимных перемещениях свайных элементов возникало только вследствие трения между грунтом и поверхностью замков и сопротивления грунта по концу подвижного свайного элемента.

Натурные опыты на экспериментальной площадке проводились с грунтами двух типов:

Тип 1. Естественное (существующее на площадке) грунтовое основание (глубина слоя более



Рис. 4. Многофункциональный экспериментальный стенд



Рис. 5. Замок шпунтовой сваи после ее извлечения



Рис. 6. Подвижный свайный элемент (справа), вдавливаемый и извлекаемый через замковое соединение фиксированного элемента

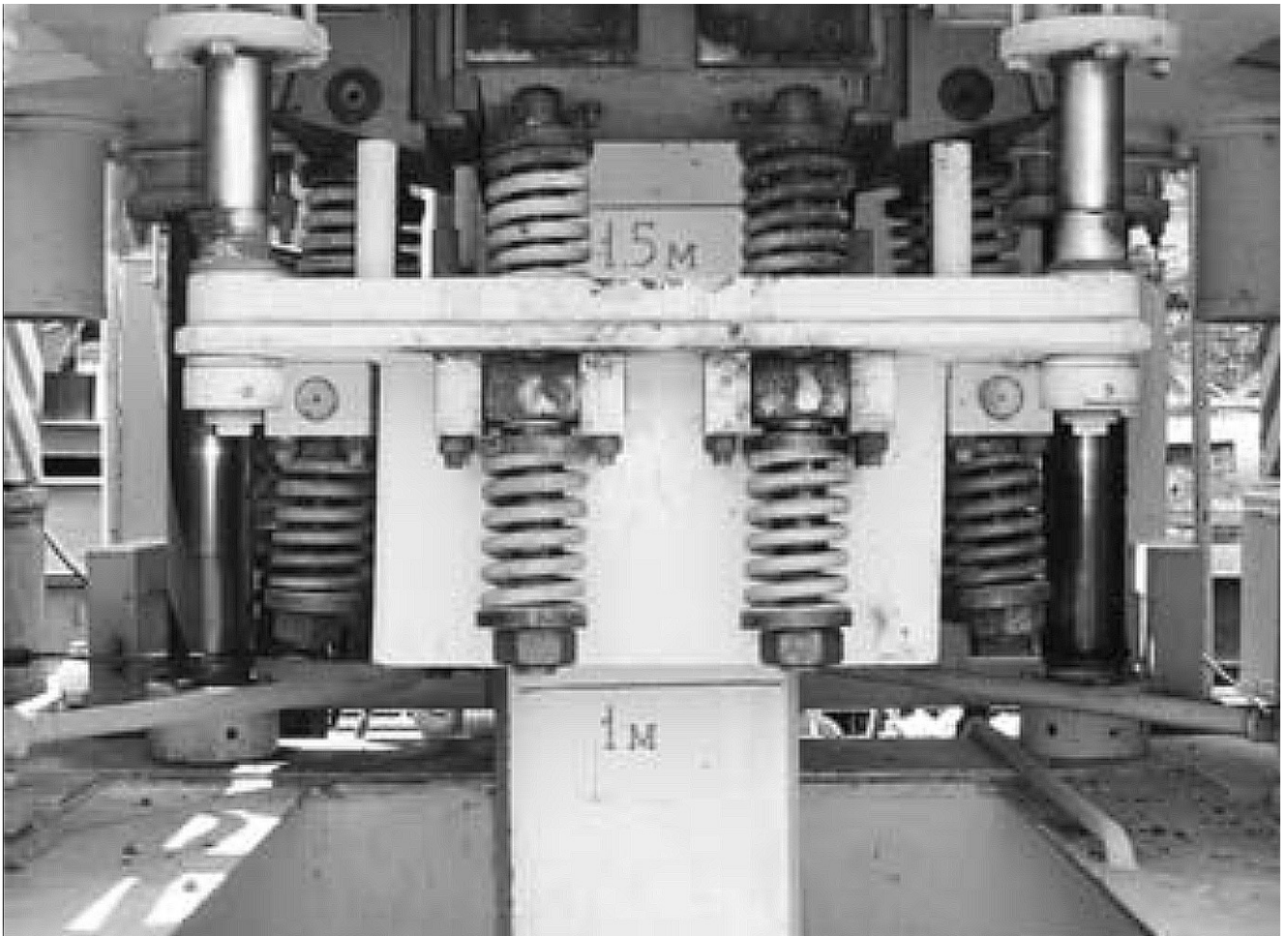


Рис. 7. Передача усилия в голове свайного элемента

10 м) — в основном насыпной/намывной грунт со следующими основными параметрами: плотность $11,0 \text{ кН/м}^3$, угол внутреннего трения 40° , сцепление отсутствует. Грунтовые воды присутствуют на глубине 1,85 м.

Тип 2. Модифицированный тип 1 путем замены верхнего слоя естественного грунта (на глубину от поверхности основания до уровня грунтовых вод) мелким песком со следующими основными параметрами: плотность $17,6 \text{ кН/м}^3$, угол внутреннего трения 34° , сцепление отсутствует. Плановые размеры такой песчаной колонны составляли 2500 мм х 2000 мм, а ее глубина 1850 мм; при этом ось замкового соединения базового свайного элемента совпадала с продольной осью песчаной колонны.

В процессе натурных полномасштабных экспериментов с элементами шпунтовых свай (при их вдавливании и извлечении) выполнялись измерения для построения зависимостей "продольная нагрузка — осевое перемещение". Были выполнены две серии опытов: по одной серии по вдавлива-

нию/извлечению шпунтовых свай "замок в замок" с каждым из двух упомянутых типов грунта (каждая серия состояла из трех аналогичных экспериментов).

Каждый эксперимент включал следующие этапы:

- * этап 1 — вдавливание базового элемента и его фиксация в грунтовом основании;

- * этап 2 — вдавливание подвижного элемента "замок в замок" вдоль базового элемента на максимально возможную глубину;

- * этап 3 — извлечение подвижного элемента "замок в замок" вдоль базового элемента;

- * этап 4 — извлечение базового элемента.

Второй эксперимент выполнялся в двух вариантах:

- * вариант 1 — песчаный грунт в замковых соединениях был той же плотности, что и окружающий сваи песчаный грунт

- * вариант 2 — песчаный грунт в замковых сое-

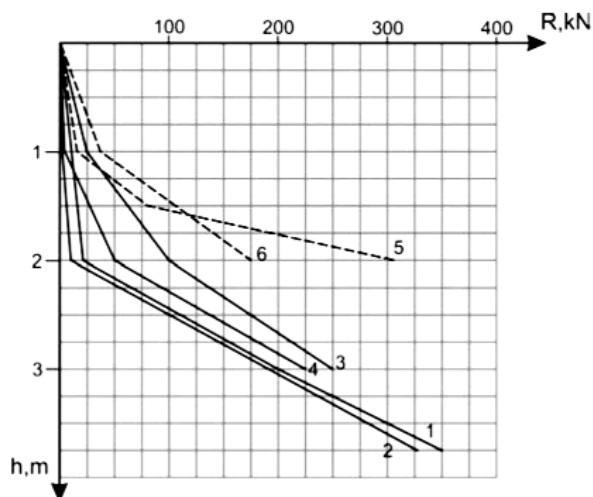


Рис. 8. Интенсивность сил трения (r , kN/m) в замковом соединении при погружении подвижной сваи в различных грунтовых условиях

- 1 — первая серия опытов;
- 2 — вторая серия опытов (вариант 1);
- 3 — вторая серия опытов (вариант 2)

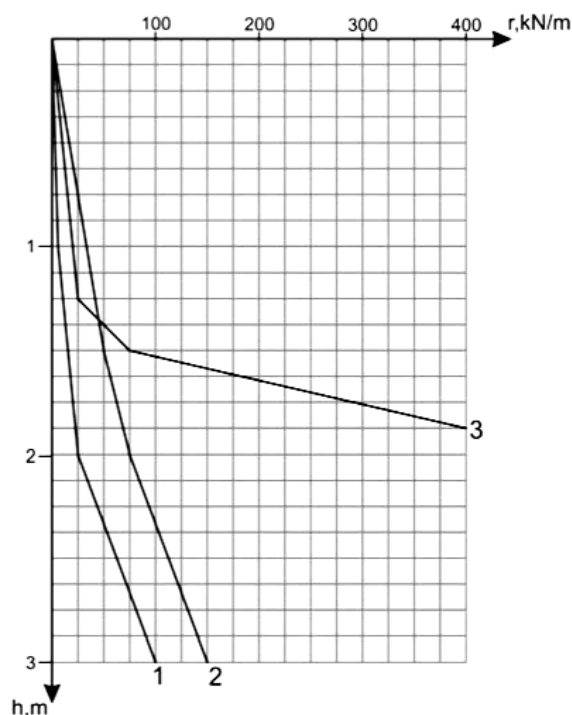


Рис. 9. Сила сопротивления (R , kN) погружению подвижной сваи в различных грунтовых условиях

- 1 — общее сопротивление при первой серии опытов;
- 2 — сила сопротивления за счет трения в замке при первой серии опытов;
- 3 — то же при второй серии опытов (вариант 1);
- 4 — то же при второй серии опытов (вариант 1);
- 5 — то же при второй серии опытов (вариант 2);
- 6 — то же при второй серии опытов (вариант 2).

динениях был повышенной плотности благодаря намыву в замки песчаной пульпы.

В ходе экспериментов определялись следующие параметры:

1) компоненты сопротивления грунта погружению и извлечению шпунтовых свай для грунта типа 1

* сопротивление по боковой поверхности сваи (силы трения);

* сопротивление под концом сваи (реакция грунта вдавливанию сваи);

* сопротивление в замках свай (при обоих направлениях относительных перемещений свай);

2) то же для грунта типа 2 (вариант 1);

3) то же для грунта типа 2 (вариант 2);

На рис. 8 и 9 приведены графики, относящиеся к наиболее интересному для предмета данной публикации параметру — сопротивлению грунта в замковых соединениях шпунтовых свай.

1.5. Выводы по результатам экспериментов

Из результатов проведенных полномасштабных натурных опытов можно сделать следующие основные выводы:

* силы трения в замковых соединениях шпунтовых свай корытного профиля играют существенную роль во взаимодействии элементов системы "свая — грунт", достигая 60-90% общего сопротивления вдавливанию сваи в грунт; вклад сил трения в суммарную величину сопротивления возрастает с увеличением глубины погружения шпунта (указанный количественный интервал определен для свай и грунта, использованных в натурных экспериментах);

* результирующая сила трения и ее интенсивность нелинейно возрастают по мере вдавливания одной сваи относительно другой "замок в замок"; характер такой нелинейной зависимости может

быть описан гиперболической функцией;

* замена верхнего слоя первоначального (естественного) грунта основания выше уровня грунтовых вод мелким песком вызвала значительный рост сопротивления грунта погружению свай вдоль замка (до 2,5 раза), главным образом, благодаря развитию сил трения;

* дополнительное уплотнение песка в замковом соединении базового (фиксированного) элемента гидравлическим методом перед погружением "замок в замок" подвижного элемента вызвало резкий рост сопротивления грунта вдавливаю свай.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили получить новую информацию об особенностях взаимодействия стальных шпунтовых свай корытного профиля с грунтовой средой, в частности, об условиях развития сил трения в замковых соединениях свай при их вдавливании в грунтовое основание. Методика выполнения экспериментов с применением реального сваевдавляющего строительного оборудования позволила определить основные параметры сопротивления грунта вдавливанию шпунтовой сваи, а также влияние вида грунтов и их физических характеристик на исследуемые процессы.

Измеренные в ходе лабораторных экспериментов параметры системы "шпунтовые сваи — грунтовая среда" позволяют для сравнительно небольших интервалов (по сравнению с ранее рассмотренными натурными опытами) приложенной вдавливающей силы определить взаимные перемещения шпунтовых элементов. Выявлено подобие графиков зависимости "сила сопротивления — смещение сваи", полученных в лабораторных и натурных экспериментах. Это подтверждает возможность использования опытных графиков для создания математической модели исследуемой системы в широком диапазоне нагрузок и перемещений для описания особенностей влияния сил трения на работу замковых соединений шпунтовых свай.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент України № 93343 на винахід, "Система для вдавливания паль" Мещеряков Г. Н., Вакулин Н. А., Заявка № а 2005 10148 от 28.10.2005, Дата публікації 10.05.2007, Бюл. №3, 2011р.
2. Патент Российской Федерации на полезную модель, №59646, "Система для вдавливания свай" Мещеряков Г. Н., Вакулин Н. А., Приоритет 30.01.2006 г. Бюл. изобр. № 36, 2006 г.
3. Meshcheriakov N.G., Meshcheriakov G.N., Vakulin A.A., Vakulin N.A. 2008. Piling and testing equipment. *Proceedings of the 8th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*. 245-248 Lisbon. IOS Press. Pp. 44 — 56.
4. Doubrovsky M.P., Poizner M.B., Meshcheriakov G.N. 2009. Improvement of monitoring, design and constructing of piled structures located at the base of soil slopes. *The Academia & Practice of Geotechnical Engineering. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Alexandria, Egypt. Pp. 2609-2612.

АНОТАЦІЯ

Розглянута специфіка роботи замкових з'єднань шпунтових стін при використанні паль коритного профілю. Проведено повномасштабні експерименти на будівельному майданчику з використанням технології вдавлення паль. Отримані дані щодо розподілу сил тертя у замках шпунтових паль.

Ключові слова: шпунтова паля, замкове з'єднання, повномасштабне моделювання, занурення паль вдавлюванням, палевдавлювальна машина.

ANNOTATION

Peculiarities of interlocks of sheet piling walls made of U-profile piles are considered. Full-scale experiments at the construction site by press-in method were provided. There were obtained results on friction forces distribution in the sheet piles interlocks.

Keywords: tongue-and-groove pile, castle connection, full-scale modeling, immersion of piles by cave-in.