

УДК 624.13

UDC 624.13

**ИССЛЕДОВАНИЕ НА МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ  
ОСАДКИ БУРОНАБИВНОЙ СВАИ****THE FILLING PILE SETTLEMENT PROCESS  
INVESTIGATION**

Ляшенко Павел Алексеевич  
к.т.н., профессор

Liashenko Pavel Alekseevich  
Dr.Sci.Tech., professor

Шмидт Олег Александрович  
студент инженерно-строительного факультета

Shmidt Oleg Aleksandrovich  
student of the Engineering and building faculty

Гохаев Денис Валерьевич  
студент инженерно-строительного факультета  
*Кубанский государственный аграрный университет,  
Краснодар, Россия*

Gokhaev Denis Valerievich  
student of the Engineering and building faculty  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Объектом исследования являются буронабивные сваи и их совместная работа с грунтом. Исследования совместная работа буронабивной сваи и околосвайного грунта в ходе нагружения модели сваи линейно возрастающей во времени нагрузкой. Опыт проводился на модели буронабивной сваи на установке АКП-6НМ. В результате проведения опыта предложена гипотеза поведения околосвайного грунта в процессе нагружения буронабивной сваи

The filling piles and their joint work with soil are the objects of research. The joint working of filling piles and soil has been researched with the constant rate of loading (CRL) and the continuous measuring of deformations of physical model. The experiment was realized at the physical model of filling pile in soil with the apparatus АКП-6НМ. The hypothesis of mechanical working of near-pile soil was proposed as the result of the experiment

Ключевые слова: БУРОНАБИВНЫЕ СВАИ, ДЕ-  
ФОРМАЦИИ ГРУНТА, СТАТИЧЕСКОЕ  
НАГРУЖЕНИЕ СВАЙ, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Keywords: FILLING PILES, SOIL DEFOR-  
MATIONS, STATIC LOADING OF PILES, MOD-  
ELLING

## **Введение**

«Нагрузка на сваю передается окружающему ее грунту через сопротивление трению на контакте с боковой ее поверхностью и через нижний конец сваи. Распределение общего продольного усилия между упомянутыми реакциями зависит от соотношения плотности и сжимаемости грунтов в основании сваи и примыкающих к ней сбоку.

Сопротивление трению между сваячей сваем и грунтом вовлекает последний в совместную со сваем работу. При этом в некоторой зоне окружающего грунта возникают касательные и нормальные напряжения, происходят уплотнения его, по мере загрузки сваи при вертикальных смещениях свая-грунт. Очертания границ интенсивно деформируемой зоны вокруг одиночной сваи зависят от свойств грунта, длины сваи, способов погружения и других воздействий и могут принимать сложную криво-

линейную форму. Условно форму такой зоны принимают в виде конуса с углом образующей, равным  $\varphi/4$  ( $\varphi$ - угол внутреннего трения грунта), и шаровидной сферы под основанием сваи (Рисунок 1).

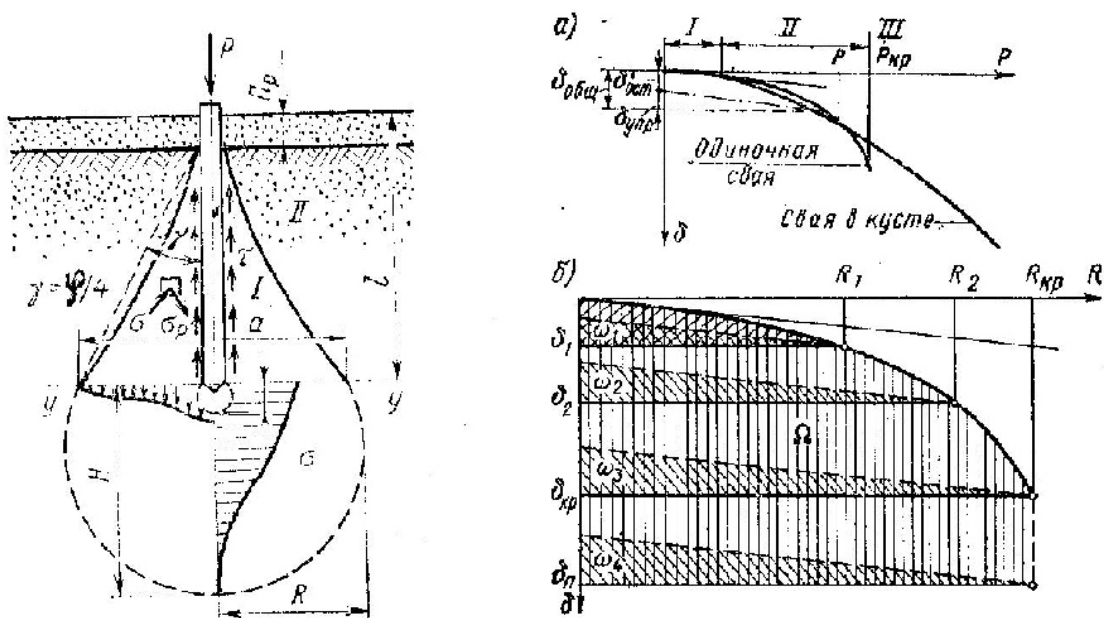


Рисунок 1 – Схема вовлечения грунта вокруг сваи (слева), графики  $\delta=f(P)$  и  $R=f(\delta)$  по [1]

Таким образом, на подстилающие дисперсные грунты в основании сваи нагрузка передается через ее заостренный конец, а также через грунты интенсивно уплотняемой зоны. Интенсивность давления различна и зависит от плотности грунтов, локальных сдвигов сваи по грунту и других воздействий. Диаметр такой зоны грунта принимают в пределах  $\alpha=2\text{tg}\varphi/4+d$  ( $l$  – длина сваи в пределах уплотняемой зоны грунта;  $d$  – размер сечения сваи).

Степень вовлечения окружающего сваю грунта в работу, как и сама возможность такого вовлечения, прежде всего, зависит от интенсивности сопротивлений трению на контакте со сваем, в свою очередь зависящей от нормальных давлений грунта на ее грани, в общем случае увеличивающихся с глубиной. В верхних слоях грунта (до 2 – 3 м), где давление грун-

та на сваю и сопротивление трению невелики, грунт обычно не вовлекается в совместную работу.

При увеличении нагрузки на сваю до предельной в уплотненном грунте, под ее острием возникают области сдвигов и, как следствие, увеличивается осадка. При этом сопротивление трению грунта по телу сваи достигают предельного значения и, как результат, происходит срыв сваи относительно грунта («прокалывание» грунта). Срыв сваи относительно грунта и соответствующую ему нагрузку принято считать пределом несущей способности одиночной сваи по грунту.

Зависимость осадки одиночной сваи от вертикальной нагрузки выражается кривой  $\delta=f(P)$  (Рисунок 1а). Обычно наблюдается резко выраженная нелинейная закономерность нарастания осадки на всех этапах загрузки сваи. При частичной разгрузке сваи её положение восстанавливается частично, на величину упругого перемещения. Остаточная часть перемещений обычно превышает упругую (Рисунок 1б). Это означает, что происходят упругие и необратимые деформации окружающего грунта, так как он является намного менее жёстким, чем свая. После срыва сваи кривая  $\delta=f(P)$  может асимптотически приближаться к вертикали, или на этом участке отклоняться от нее на небольшой угол. Площадь  $\omega_1$  характеризует упругую энергию сваи на различных этапах загрузки» [1].

На начальном этапе нагружения сваи происходит искривление грунтовых слоёв, увлекаемых вниз трением грунта по боковой поверхности сваи [2]. «При осадке сваи наблюдается процесс переформирования напряжённого состояния грунта вокруг сваи, в том числе, в результате дискретных сдвигов и последовательной разгрузки областей, находящихся в предельном равновесии» [2]. Там же, «вокруг обычно применяемых на практике железобетонных свай образуется грунтовая рубашка, перемещающаяся со сваем при её погружении».

Вскрытие натуральных свай показало [2], что в грунте, примыкающем к свае, возникают косые трещины сдвига и отрыва, идущие под острым углом к оси сваи. Правда, в предложенной авторами [3] расчётной модели сопротивления сваи это наблюдение не учтено.

Процесс переформирования напряжённого состояния грунта вокруг сваи описан авторами [2] в общем виде, как для сплошной среды, без учёта «дискретных сдвигов и последовательной разгрузки областей, находящихся в предельном равновесии».

Можно предположить, что сдвиги грунта и трещины отрыва, возникающие при осадке сваи, существенно влияют на сопротивление окосвайного грунта.

## **1 Испытание модели буронабивной сваи**

Целью настоящей работы является исследование развития осадки модели буронабивной сваи при воздействии на нее линейно возрастающей во времени статической нагрузки. При этом ставились следующие задачи:

- 1) получить экспериментально непрерывную запись осадки модели сваи при воздействии на нее линейно возрастающей во времени статической нагрузки;
- 2) измерить деформации грунта на поверхности керна и в 2-х точках ниже поверхности;
- 3) изучить распределение деформации грунта вокруг сваи и под её нижним концом.

### **1.1 Подготовка эксперимента**

Эксперимент проводился в стальном разъёмном лотке цилиндрической формы с природным грунтом нарушенной структуры.

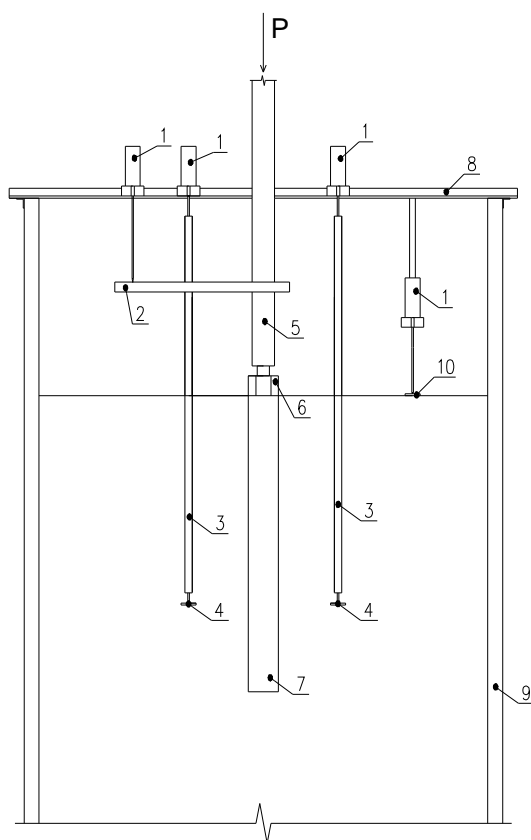


Рисунок 2 - Схема опыта: 1-фотоэлектронный датчик перемещения, 2-струбцина на штоке, 3-трубка, 4-наконечник датчика с площадкой, 5-шток, 6-оголовок сваи, 7-модель буронабивной сваи, 8-траверса, 9-цилиндрический лоток, 10-площадка на поверхности грунта.

Грунтовый керн диаметром 260 мм и высотой 40 см заформован из пылеватого суглинка нарушенной структуры. Грунт укладывался в лоток послойно, слоями по 50 мм по высоте, с уплотнением каждого слоя ручной трамбовкой. Уплотнённые слои покрывались сверху тонким равномерным слоем молотого гипса. Заформованный керн выдерживался под давлением 30 кПа в течение суток.

Модель сваи была отлита из армированного песчано-цементного раствора в скважине, устроенной по вертикальной оси цилиндрического

лотка. Диаметр модели 2 см, длина 16 см. При отливке модели изготовлен оголовки сваи, выступающий над поверхностью керна на 2 см. Твердение раствора набивной модели сваи происходило в течение трех дней.

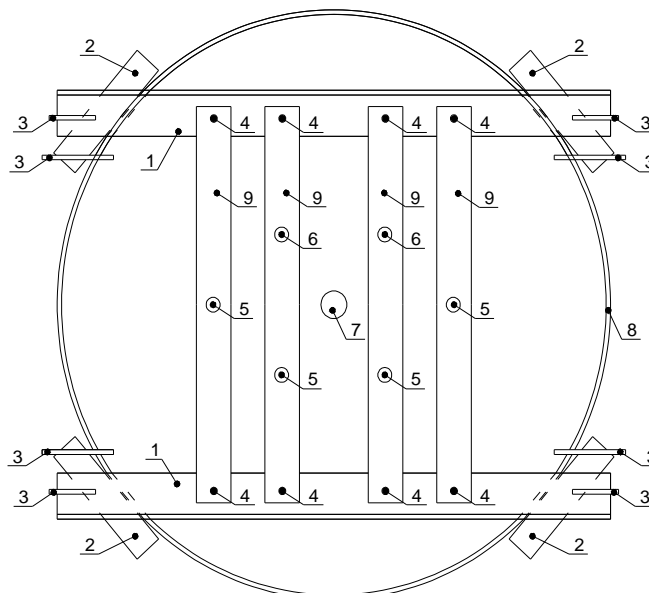


Рисунок 3 -Схема крепления датчиков с помощью системы траверс.

1-траверса – уголок, 2-уголок для крепления траверс к керну, 3-струбины, 4-крепление планок(9) к траверсам с помощью болтов, 5-отверстия для крепления датчиков ФЭП, 6-отверстия для крепления глубинных установок, 7-модель сваи, 8-стенка керна, 9-планки для установки датчиков.

Датчики перемещений подключены кабелями к блокам управления. К одному блоку управления подключён механизм нагружения, включающий два спаренных рычага с противовесами, по которым перемещаются гири. Гири подвешены к муфтам на рычагах и передвигаются по ним путём вращения приводных валов с П-образной резьбой. Вращение валов осуществляется двумя двигателями, включающимися по заданной программе с блока управления.

Все датчики перемещений жестко прикреплены к анкерам с помощью системы траверс (Рисунок3). Угловые траверсы крепятся к стенкам

лотка с помощью дополнительных уголков и струбцин. На траверсах закреплены планки из оргстекла толщиной 10 мм с помощью болтов. В планках высверлены вертикальные отверстия для помещения датчиков и горизонтальные для их закрепления болтами.

## 1.2 Моделирование работы сваи в грунте

Модель сваи представляет собой железобетонный стержень, размеры которого меньше реальных свай длиной 5-6 м, примерно, в 50 раз. Измеренные на модели перемещения грунта и сваи отражают деформации реальных свай, согласно условий механического подобия [4]:

$$\frac{s}{l} = idem, \quad (1.1)$$

где  $s$  - осадка сваи,  $l$  - длина сваи.

Основание сваи моделируется керном натурального грунта. Грунт имеет нарушенную структуру, но уложен с уплотнением и близок по плотности и деформируемости к натуральному грунту. Поэтому будем считать, что механические характеристики грунта – модуль деформации  $E_o$  и коэффициент Пуассона  $m$  модели близки к значениям этих характеристик грунта в основании натуральной сваи, т. е.

$$E_o^{(m)} = E_o^{(n)}, \quad (1.2)$$

$$m_o^{(m)} = m_o^{(n)}, \quad (1.3)$$

где индексы  $m$  относятся к модели, индексы  $n$  – к натуральной свае.

Тогда условие механического подобия сил сопротивления сваи и модели запишется в виде [4]:

$$\frac{P}{l^2} = idem, \quad (1.4)$$

где  $P$  – вдавливающая сила, или сопротивление сваи нагрузке.

Условие подобия относительных деформаций грунта  $e$  имеет вид [4]:

$$e = idem. (1.5)$$

Формулы (1.1)-(1.5) позволяют оценить сопротивление сваи и деформации основания в пределах линейной деформируемости грунта основания. Механическое подобие за пределами линейности может быть оценено только качественно. Строгое обоснование подобия при заметных разрушениях грунта вокруг сваи требует детального экспериментального исследования.

### 1.3 Испытание модели сваи

На сваю через шток, соединенный с прибором АКП-6НМ, передается вдавливающая сила, изменяющаяся по заданной программе. Один из датчиков (1), соединенный через трубку на штоке (2) со сваем, фиксирует осадку сваи (Рисунок 3). Глубинные датчики (1), расположенные с двух сторон относительно сваи фиксируют деформации околосвайной области грунта на глубине. Датчик (1) на поверхности грунта фиксирует осадку поверхности. Все датчики фиксируют осадку в каждый момент времени испытания в процессе нагружения сваи в электронной памяти блоков управления датчиками.

Конечное значение нагрузки 1700 Н и время нагружения 7200 с заданы в программе. Значения перемещений, зафиксированных датчиками, были записаны в электронной памяти блоков управления с шагом 0,005 мм и после опыта переписаны в ноутбук.

Получены записи данных фотоэлектронных датчиков перемещения. Датчики зафиксировали следующие значения:

ФЭП-1 – осадку модели сваи;

ФЭП-2 – осадка глубинного датчика №1

ФЭП-3 – осадка глубинного датчика №2

ФЭП-4 – осадка поверхности грунта.



## **2 Результаты проведения опыта**

### **2.1 Деформации модели по датчикам перемещений**

Построены графики зависимостей осадки от нагрузки на сваю и скорости осадки от нагрузки (Рисунок 7, 8, 9). На графике зависимости скорости осадки от времени видно, что скорость осадки изменяется циклически, причём амплитуда циклов увеличивается с увеличением вдавливающей силы.

Можно выделить 3 стадии по скорости осадки модели сваи:

I стадия – вдавливающая нагрузка 0 – 600Н (Рисунок 7);

II стадия – вдавливающая нагрузка 600-1600Н (Рисунок 8);

III стадия – вдавливающая нагрузка 1600 – разрушение грунта (Рисунок 9).

Каждый этап характеризуется увеличением скорости относительно предыдущего примерно в 5 раз.

Датчики глубинных анкеров показали разнонаправленные значения перемещений: датчик № 1 зафиксировал осадку, датчик № 2 – подъём грунта в месте измерения. В обоих случаях перемещения не превышают 0,25 мм.

Скорости перемещений обоих анкеров изменяются циклически. Амплитуды циклов плавно увеличиваются, а затем уменьшаются. Форма циклов изменения скорости несимметрична относительно направления изменения: датчик № 1 показал острый пик при уменьшении скорости и сглаженный – при увеличении. Датчик № 2 показал острый пик при увеличении скорости, а сглаженный – при уменьшении, т. е. картину, противоположную датчику № 1.

Датчик деформации поверхности керна показал подъём поверхности при нагружении модели сваи, который также сопровождался циклическим изменением скорости деформации.

При исследовании полученных графиков модели сваи постоянно возрастающей статической нагрузкой были выявлены следующие результаты:

Осадка модели сваи при нагружении нагрузкой в 600Н – 0,13мм.

Максимальная скорость осадки при нагрузке 600 Н –  $12,5 \times 10^{-6}$  мм/с.

Максимальная скорость осадки при нагрузке 1600 Н –  $75,0 \times 10^{-6}$  мм/с.

Несущая способность сваи – 1630 Н.

## **2.2 Деформации грунта вокруг модели сваи на срезах**

После завершения опыта грунтовый керн был разрезан сначала плоскостью проходящей по диаметру штока до уровня конца сваи, а затем горизонтальной плоскостью в уровне конца сваи. По вертикали грунт разрезался так: были сделаны продольные надрезы ножом по краям штока до уровня конца сваи, затем керн вручную раскололи надвое. По горизонтали же, в виду меньшего сцепления в окрашенных слоях, грунт был сдвинут в уровне оголовка сваи (Рисунок 4).

На Рисунке 4 виден продольный разрез грунта по диаметру штока с не вынутой из грунта сваей. Линии горизонтальных окрашенных слоев сильно изгибаются в вертикальном направлении вблизи модели сваи. Слева от сваи видна косая трещина отрыва, уходящая от головы сваи в сторону под углом примерно  $30^\circ$  к оси сваи. Ниже, на уровне чуть выше 2-го окрашенного слоя, идёт вторая трещина отрыва в том же направлении. 2-й окрашенный слой изогнулся грунтом вниз между этими трещинами.



Рисунок 4 - Вертикальный срез грунта в верхней части сваи

Справа от модели сваи, в верхней части видны разрушения керна, которые можно было бы идентифицировать с трещиной отрыва, уходящей от сваи под углом примерно  $60^\circ$ , если бы эта трещина была лучше зафиксирована. Между 1-м и 2-м окрашенными слоями просматривается трещина отрыва, уходящая от сваи под углом примерно  $35-40^\circ$ .

В местах пересечения трещин с 1-м и 2-м окрашенными слоями последние испытывают местные изгибания.

На вскрытом теле сваи виден налипший грунт, что свидетельствует о совместном перемещении околосвайного грунта со свайей, а следовательно, об их совместной работе. В нижней части грунт налипает на сваю сильнее, чем грунт, расположенный на большем от сваи расстоянии, что

подтверждает наличие уплотненного ядра. Налипший на сваю, а именно на нижнюю ее часть, грунт можно увидеть и на Рисунке 4.

Соединив изогнутыми линиями начала изгибов линий окрашенных слоев, мы получили, что уплотнённое ядро расположено в нижней части сваи и прилегает к ней вплотную, слабо расширяясь книзу. Внутри уплотнённого ядра грунт подвергся сдвигающим деформациям и, по-видимому, сильно уплотнён.

По трещинам и изгибу окрашенных слоёв видно, что вне уплотнённого ядра грунт также деформирован в большой области вокруг и ниже модели сваи. Она имеет сложное очертание, но, в целом, образует фигуру, расширяющуюся книзу от верха сваи до её нижнего конца. Грунт в этой области разрушен трещинами и разрыхлён.

На вертикальном разрезе керна мы видим изогнутые линии горизонтальных окрашенных слоев. Они изогнуты в направлении действия нагрузки на сваю. Их изгиб говорит о совместном перемещении околосвайного грунта, а точки изгибов, если их соединить, дают границы этого перемещающегося грунта. Если грунт перемещается вместе со сваем, значит, между ними есть сцепление. Так как перемещающийся грунт имеет границы, значит, он отличается в процессе нагружения от остального грунта керна. Параметр, отличающий его, – плотность. Об этом говорит наличие налипшего на сваю грунта в нижней его части. Этот перемещающийся грунт есть уплотненное ядро.

Тот факт, что налипший грунт присутствует лишь в нижней части сваи, при том, что изогнутые линии окрашенных слоев есть и в верхней ее части, указывает на то, что в какой-то момент нагружения сваи, верхняя часть уплотненного ядра из работы выключается, отлипая от сваи. Об этом свидетельствует и разница длин изогнутых линий окрашенных слоев (в нижней части сваи они длиннее).



Рисунок 5 - Горизонтальный срез под нижним концом сваи

На Рисунке 5 представлен горизонтальный разрез керна в уровне конца сваи. На этот уровень как раз приходится один из окрашенных слоев.

Грунт под уплотненной зоной окрашен не полностью, так как часть окрашенного слоя вошла в нее. Поверхность получилась рельефная, вдавленная под уплотненным ядром. Видно на Рисунке 5, что её тёмная (вдавленная) часть не является осесимметричной и образует сложную фигуру с тремя или четырьмя углами. В центре её окрашенная белым фигура имеет круглую форму. Очевидно, что это горизонтальная проекция уплотненного ядра, прилегающего к свае и налипшего на её нижнюю часть.

### **3 Построение модели деформации**

Теоретическое обоснование результатов опыта

Согласно нашим исследованиям, была предложена изменяющаяся модель работы сваи в грунте при воздействии на нее возрастающей статической нагрузки, согласно которой несущая способность сваи зависит от

прочности и целостности околосвайной уплотненной зоны грунта. Принято считать [1], что околосвайное уплотнённое ядро имеет квазиконическую форму (Рисунок 6).

Действительно, линии окрашенных слоев изгибаются почти симметрично относительно оси сваи, что может говорить о симметричности уплотнённого ядра, которое принимает близкую к конусу пространственную форму. Отсутствие налипшего грунта в верхней части сваи и меньшей длины линии окрашенных слоев, соединяющие начала их изгибов с поверхностью сваи, могут говорить о том, что и этот околосвайный грунт работал совместно со свайей, однако в какой-то момент их совместная работа прекратилась, тогда как нижний околосвайный грунт не отлип и после проведения эксперимента. Треки изгибов нижнего околосвайного грунта длиннее верхних, что указывает на то, что последний прошел совместно со свайей большее расстояние.

Согласно нашим предположениям, совместная работа сваи и околосвайного грунтового конуса имеет три стадии. На I стадии при малых нагрузках скорость осадки колеблется вокруг практически постоянной величины, колебания скорости происходят с одинаковой амплитудой (Рисунок 7).

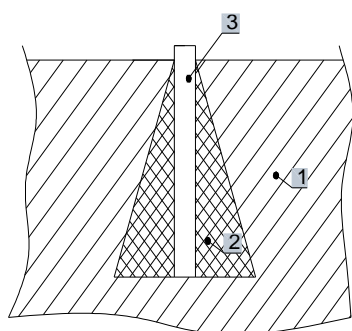


Рисунок 6 - Модель работы сваи в грунте: 1 - толща (кern) грунта в лабораторном лотке; 2 - уплотненный грунтовой конус, определяющий несущую способность сваи; 3 - модель сваи.

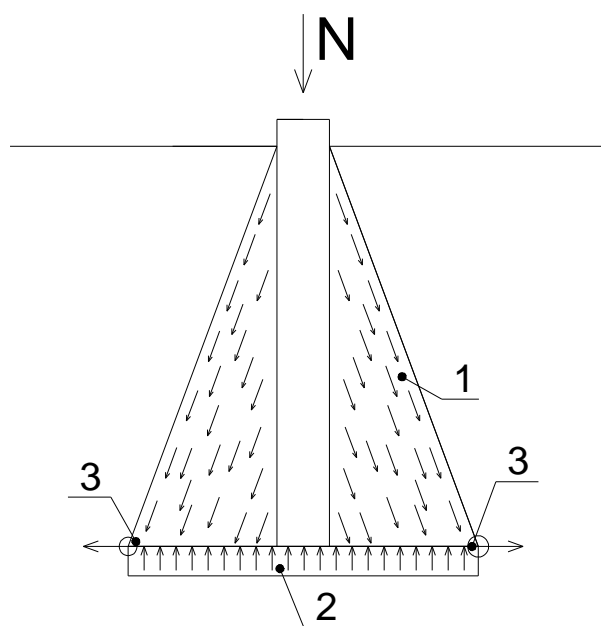


Рисунок 7 - I стадия квазиупругих деформаций грунта

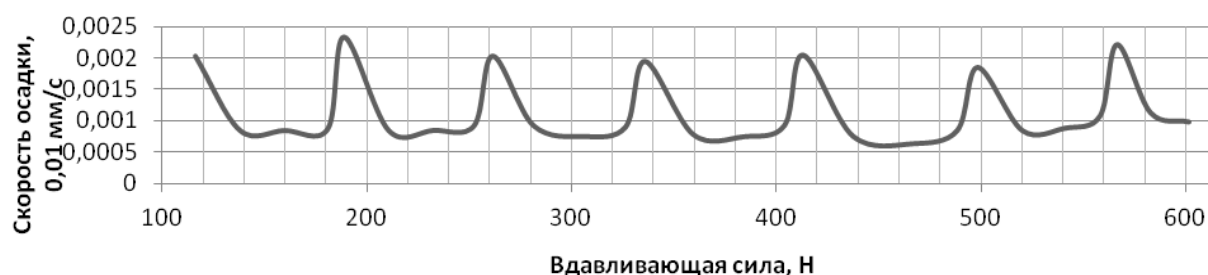


Рисунок 8 - Участок графика зависимости скорости осадки от нагрузки, соответствующий I стадии осадки сваи.

На I стадии происходит уплотнение околосвайного грунтового конуса (1) и основания (2). Касательные напряжения от боковой поверхности сваи передаются грунту и уплотняют его. В то же время, подпорный грунт не дает свае и конусу оседать, в свою очередь, также уплотняясь. Вследствие разницы направлений векторов напряжений подпорного грунта (2) и грунтового конуса (1) происходит откалывание грани основания (3). Данное предположение было сделано при исследовании скачков на графиках

ке скорости осадки, где, в I стадии работы грунта появляются скачки скорости на графике (см. рис. 8) и, соответственно, ускорение осадки. Так как скорость после скачка стабилизируется и не растет, можно предположить, что микроразрушения происходят в уплотненном ядре. Если бы микроразрушения происходили в объеме грунта, не включающем уплотненное ядро, несущая способность этого грунта постоянно снижалась бы, а скорость росла. При возрастании осадки сваи и конуса, согласно нашим предположениям, уплотняется зона (2), а боковая поверхность фигуры (1) стремится восстановить свой угол наклона к оси сваи за счет сцепления с новыми областями грунта, и скорость осадки приходит в стабильное состояние.

II стадия характерна постоянным возрастанием средней скорости на Рисунке 10, а также регулярными, периодическими скачками скорости осадки сваи. Частота появления скачков скорости, а также средняя скорость на графике увеличивается примерно в 5 раз по сравнению с первой стадией. Согласно этим данным было высказано предположение, что с возрастанием статической нагрузки происходит окончательное откалывание граней основания, и конусообразная уплотненная зона не успевает их восстановить (Рисунок 9). В результате боковая поверхность становится выгнутой относительно поверхности сваи, и вследствие уменьшения объема конуса, увеличивается осадка сваи. Поэтому вследствие постоянных изменений основания грунтового конуса, а также его боковой поверхности мы наблюдаем множественные скачки на графике. На участке 600-800 Н этого графика мы можем наблюдать переход осадки сваи из I во II стадию. При стабилизации нагрузки осадка продолжается, но с течением времени угасает.



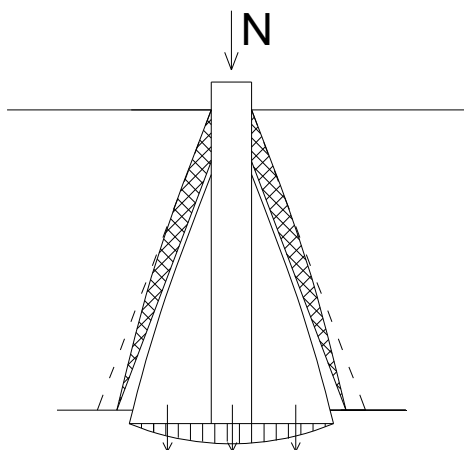


Рисунок 9 - II стадия нарастания пластических деформаций.



Рисунок 10 - Участок графика зависимости скорости осадки от нагрузки, соответствующий II стадии осадки сваи.

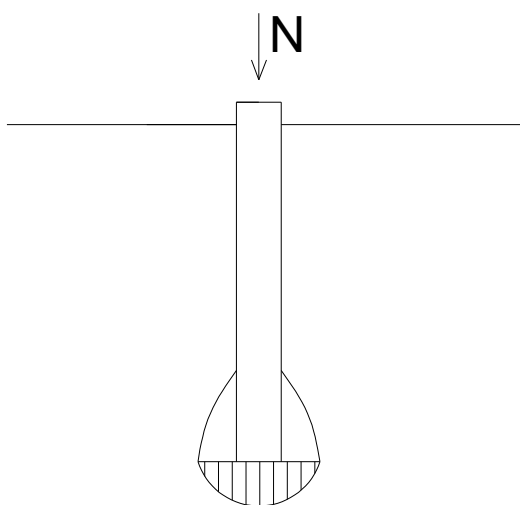


Рисунок 11 - III стадия разрушения основания сваи.

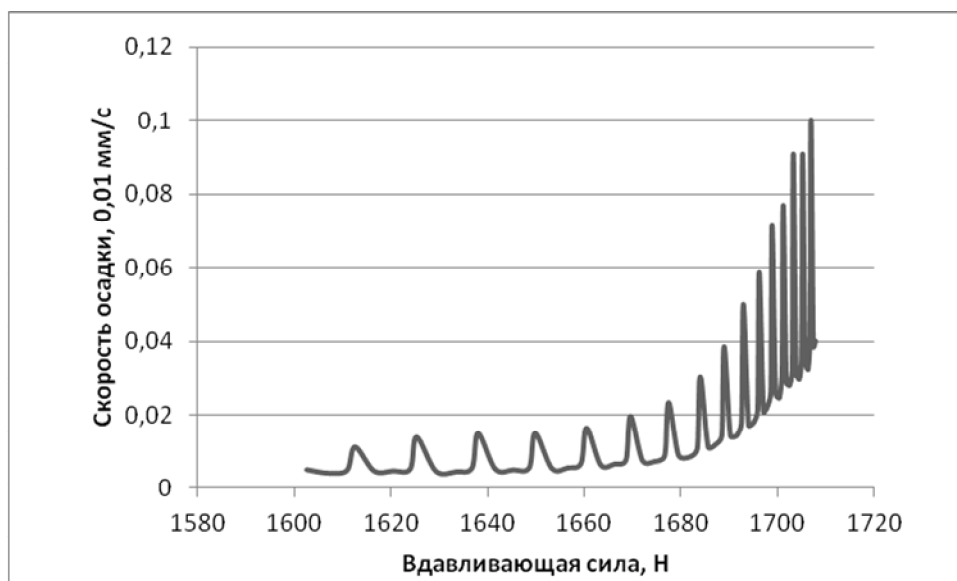


Рисунок 12 - Участок графика зависимости скорости осадки от нагрузки, соответствующий началу стадии разрушения околосвайного грунта.

III стадия характерна осадкой сваи с постоянно нарастающей скоростью, отражающей нарастающую потерю несущей способности. Колебания скорости перестают гаситься (рис 12).

В результате отрыва кромок основания грунтового конуса его боковая поверхность не имеет сопротивления со стороны подпорного грунта, вследствие чего ядро конуса (1) резко опускается вниз, а боковая поверхность (2) откалывается под влиянием срезающей силы, действующей на границе уплотненной зоны со стороны подпорного грунта. Восстановления поверхности не происходит, так как образуется новый уменьшенный конус со своими собственными откосами (Рисунок 11, характеризующий стадию разрушения), отколовшаяся же часть теряет связь с поверхностью сваи, и свая, в дальнейшем, проскальзывает относительно нее.

### **Заключение**

В процессе опыта и его анализа установлено:

- буронабивная свая работает совместно с околосвайным грунтом, формируя в нём уплотненное ядро вблизи сваи и разрушая (и разрыхляя) грунт косыми трещинами вне уплотнённого ядра;

- наружная граница уплотнённого ядра располагаются почти симметрично относительно оси сваи;
- наружная граница разрыхлённой области оставляет след на срезе керна в виде трещин, отходящих от сваи под углами 30-40°. Пространственная форма границы не является конической и требует уточнения;
- в зависимости от значения приложенной нагрузки на графиках четко просматриваются три стадии осадки сваи, которые можно трактовать как: I – стадию преобладания упругих деформаций, II – стадию нарастания пластических деформаций и III - стадию разрушения основания сваи;
- на всех стадиях нагружения сваи наблюдается циклическое изменение скорости деформации, причём амплитуда колебаний скорости нарастает от стадии к стадии, особенно резко – в стадии разрушения;
- в процессе нагружения сваи происходит подъём поверхности керна вблизи сваи и разнонаправленные перемещения анкеров, заглублённых в грунт рядом со сваями;
- скорость деформации глубинных анкеров также изменяется циклически при нагружении сваи.

## **Выводы**

По окончании опыта сделаны следующие предположения и выводы:

- наличие скачков на графике скорости и последующая его мгновенная стабилизация говорит о микроразрушениях в структуре грунта с последующим их нивелированием, которое выражается в восстановлении его структуры;
- в зависимости от амплитуды циклов деформации выделяются три стадии работы грунта вокруг сваи: I-я стадия отражает местные разрушения микроструктуры, не имеющие развития и гасящиеся упругим сопротивлением грунта; II-я стадия характерна нарастанием пластических деформаций, которые образуют поверхности скольжения и формируют на

них блоки грунта макроскопических размеров; в III-ей стадии происходит разрушение околосвайного грунта тотальными поверхностями скольжения;

- в эксперименте установлено, что разрушение околосвайного грунта происходит двумя, как минимум, путями: 1) сдвигом при сжатии - непосредственно вблизи свай, с образованием уплотнённого ядра; 2) сдвигом и отрывом – за пределами уплотнённого ядра. Разрыхлённая область за пределами уплотнённого ядра трансформируется в ходе нагружения свай.

#### **Литература:**

1. Гольдштейн М.Н., Царьков А.А., Черкасов И.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.

2. Бахолдин Б.В., Ястребов П.И. Анализ результатов комплексных экспериментальных исследований взаимодействия грунта с забивными сваями//Тр. НИИОСП им. Н.М.Герсеванова, М., 2001, с. 100-110.

3. Григорян А.А., Иванов Е.С. несущая способность и способ устройства свай в лёссовых грунтах//Труды к VIIIМеждународному Конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению, М.: Стройиздат, 1973, с. 140-150.

4. Третьяченко Г.Н. Моделирование при изучении прочности конструкций. – Киев: Наукова думка, 1979. – 232 с.

#### **References**

1. Gol'dshtejn M.N., Car'kov A.A., Cherkasov I.I. Mehanika gruntov, osnovanija i fundamenty. – M.: Transport, 1981. – 320 s.

2. Baholdin B.V., Jastrebov P.I. Analiz rezul'tatov kompleksnyh jeksperimen-tal'nyh is-sledovaniy vzaimodejstvija grunta s zabivnymi svajami//Tr. NIIOSP im. N.M.Gersevanova, M., 2001, s. 100-110.

3. Grigorjan A.A., Ivanov E.S. nesushhaja sposobnost' i sposob ustrojstva svaj v ljosso-vyh gruntah//Trudy k VIII Mezhdunarodnomu Kongressu po mehanike gruntov i fundamentostroeniju, M.: Strojizdat, 1973, s. 140-150.

4. Tret'jachenko G.N. Modelirovanie pri izuchenii prochnosti konstrukcij. – Kiev: Naukova dumka, 1979. – 232 s.