

**Э Г Е О С**

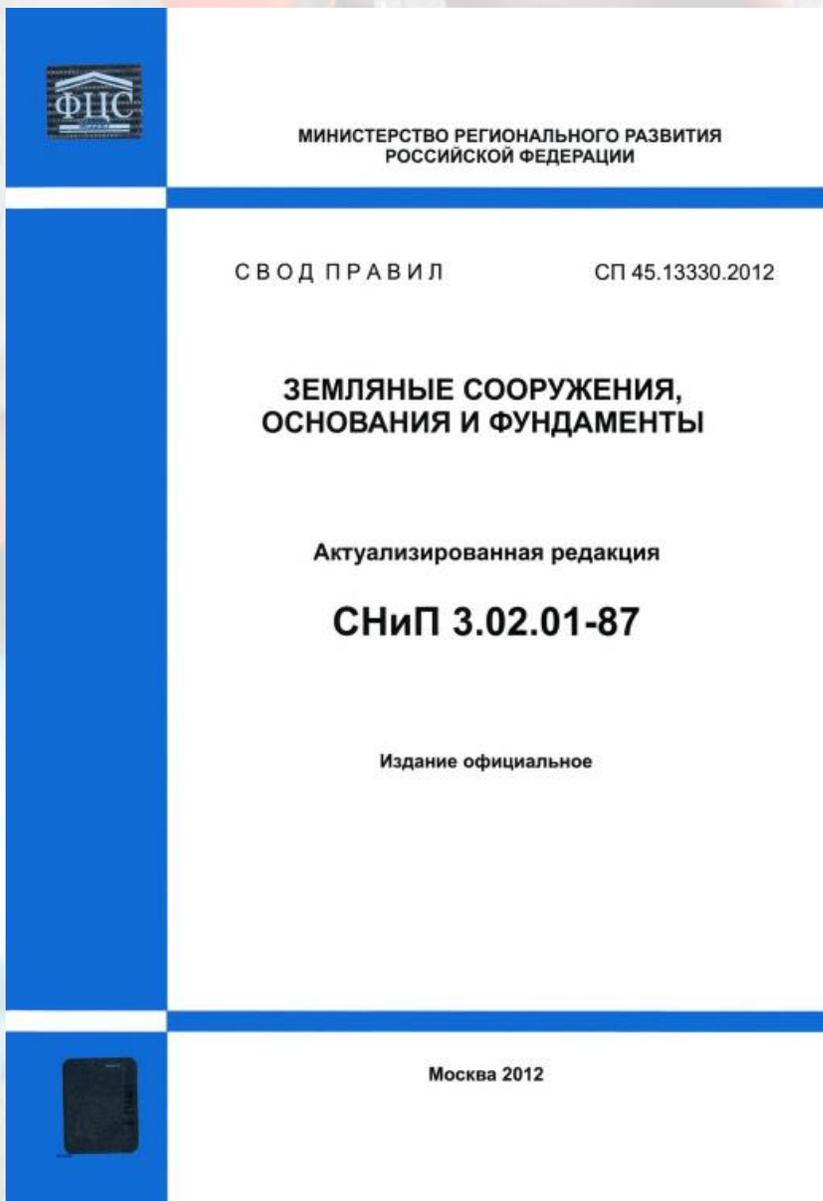
**ИСПЫТАНИЯ  
свай и грунтов**



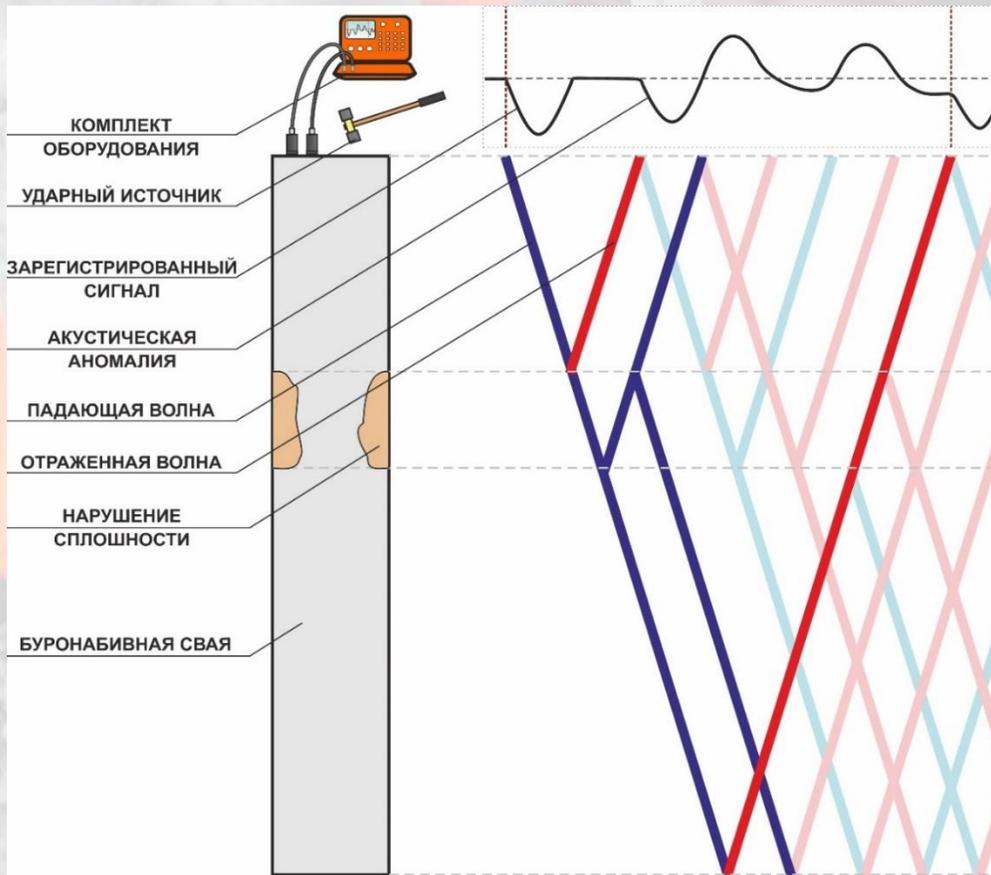
**Ограничения сейсмоакустического и  
ультразвукового контроля сплошности бетона свай**

**Лозовский Илья Николаевич – заведующий  
лабораторией ООО «ЭГЕОС»**

# Нормативные документы



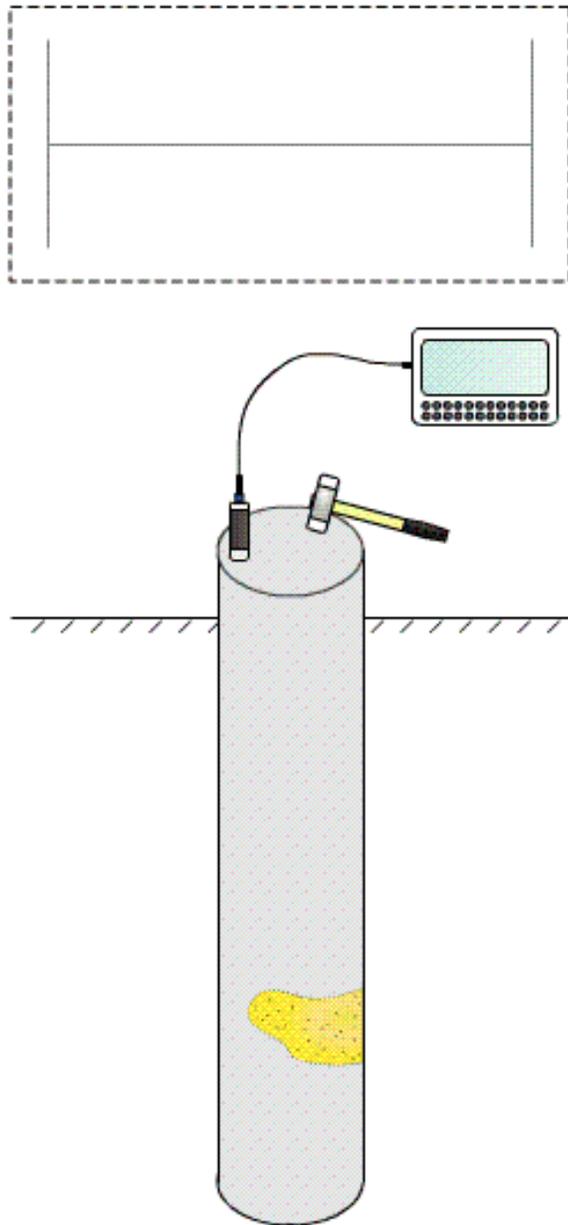
# Сейсмоакустический метод. Общие положения



- **Неразрушающий контроль качества свай сейсмоакустическим методом основан на регистрации искусственно возбуждаемых в стволе сваи упругих волн с целью получения сведений о длине и сплошности бетона сваи.**
- Возбуждение упругой волны происходит в результате механического удара молотка с известным весом и материалом бойка по оголовку сваи в направлении, параллельном оси сваи.
- От подошвы сваи и неоднородностей в теле сваи – изменений поперечного сечения сваи, разрывов ствола, инородных включений в стволе и др. возникают отраженные волны, которые распространяются в обратном направлении к оголовку сваи
- Регистрация акустических волн производится высокочувствительным датчиком (акселерометром или велосиметром), устанавливаемым на оголовке сваи. Зарегистрированные сигналы передаются на персональный компьютер для дальнейшей визуализации в виде рефлектограмм, обработки и интерпретации.



## Сейсмоакустический метод. Возможности метода



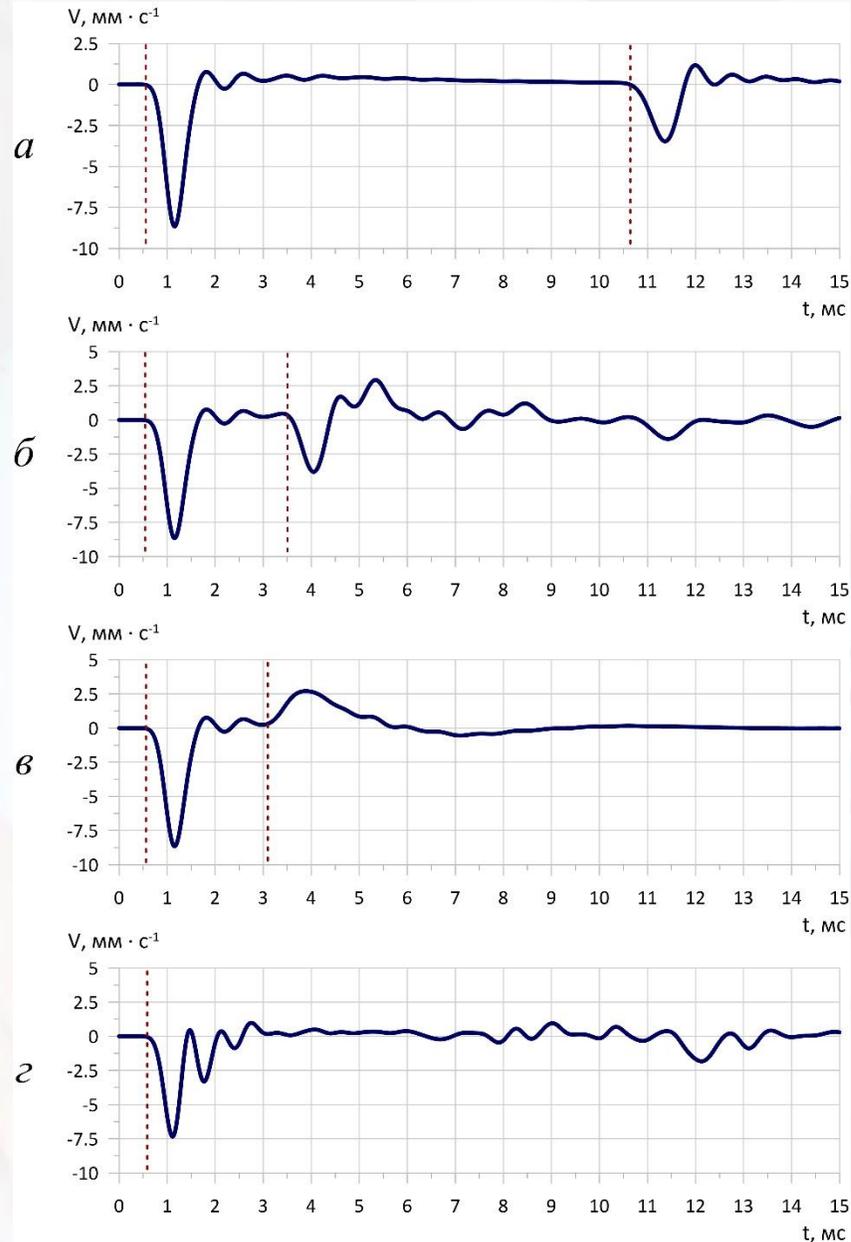
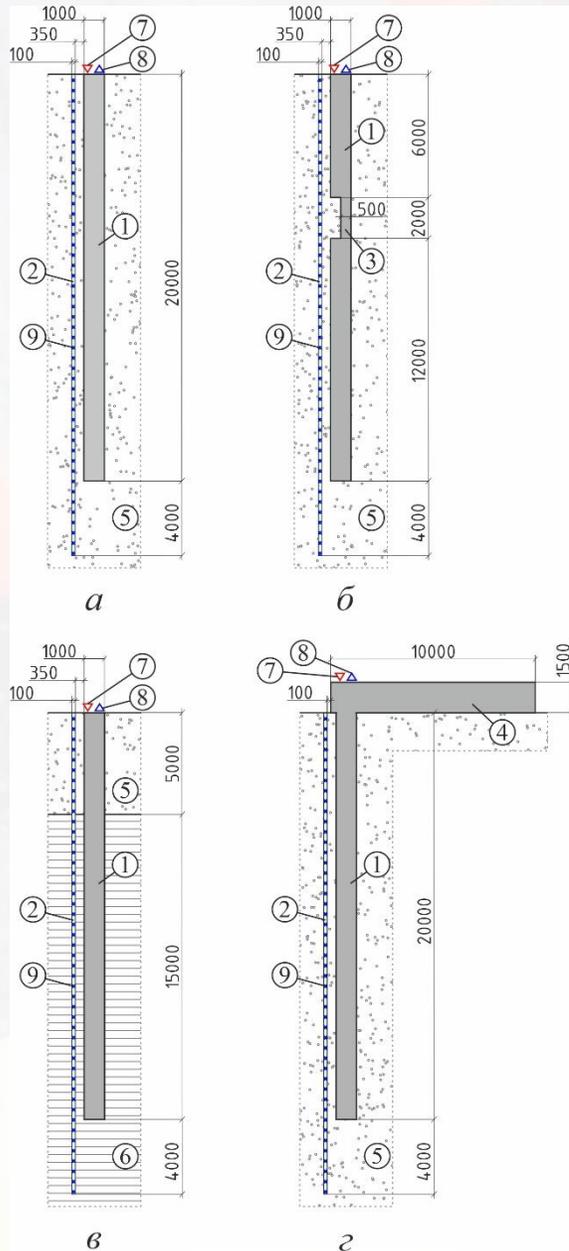
- Метод испытаний позволяет определить длину сваи в случае, когда на зарегистрированных данных возможно надежно выделить отражение от нижнего конца сваи.
- Метод испытаний позволяет обнаружить и локализовать по глубине неоднородности ствола сваи:
  - резкие изменения поперечного сечения сваи, составляющие не менее  $\pm 25\%$  от площади сваи;
  - включения инородного материала в бетоне сваи, составляющие не менее 25% от площади сваи, акустическая жесткость которых значительно отличается от акустической жесткости бетона сваи;
  - поперечные трещины в свае;
  - места соединения отдельных секций составных свай.
- В качестве точности определения длины сваи и/или расстояния до акустической аномалии допускается принять 10%.



## Сейсмоакустический метод. Ограничения метода

- В случае повышенных значений акустической жесткости вмещающей среды (скальные грунты, плотные глины и др.) и/или повышенных значений отношения длина/диаметр испытуемой сваи не всегда возможно выделение отражения от нижнего конца сваи и/или контроль сплошности сваи.
- В случае наличия на зарегистрированных сигналах значительных акустических аномалий и/или высокого уровня помех не всегда возможно выделение отражения от нижнего конца сваи и/или контроль сплошности сваи. В большинстве случаев метод испытаний не позволяет определить сплошность сваи ниже первой значительной акустической аномалии.
- Метод испытаний не позволяет:
  - контролировать длину и сплошность свай с ненормируемыми по размерам сечения и материалу характеристиками, например, свай, изготовленных по разрядно-импульсной технологии; свай малого диаметра в неоднородных грунтах, изготовленных по технологии «полого шнека» (CFA); грунтоцементных свай, сооружаемых по технологии jet grouting;
  - обнаружить нарушения сплошности у нижнего конца сваи (на участке в пределах ~10% от длины сваи) и нарушения сплошности в верхней части сваи (на участке ~1 метра или ~2 диаметров сваи в зависимости от того, какое значение больше);
  - обнаружить плавные изменения поперечного сечения / материала ствола сваи;
  - определить геометрические размеры и физические свойства нарушений сплошности;
  - сделать вывод о природе выявленных нарушений сплошности;
  - локализовать выявленные нарушения сплошности в пределах сечения сваи;
  - определять размеры уширенных пят в основании буронабивных свай;
  - определить длину составных свай.

# Сейсмоакустический метод. Результаты численного моделирования



- В ПК COMSOL Multiphysics 5.4 (модули Structural Mechanics и Acoustics) выполнено двумерное численное моделирование методом конечных элементов для набора случаев, иллюстрирующих основные возможности и ограничения сейсмоакустического метода.

- Длина свай – 20 м, диаметр – 1 м.

Таблица 1. Свойства материалов	Бетон	Вода	Песок	Глина
Плотность, $\rho$ , кг·м <sup>-3</sup>	2400	1000	1500	2200
Скорость продольных и поперечных волн, м·с <sup>-1</sup>	4000; 2450	1500	600; 200	2700; 1300
Рэлеевская модель затухания. Коэффициенты $\alpha$ , с <sup>-1</sup> ; $\beta$ , с	20; 10 <sup>-8</sup>	-	200; 10 <sup>-7</sup>	200; 10 <sup>-7</sup>

## Сейсмоакустический метод.

### Примеры полевых данных, иллюстрирующих ограничения метода

Диаметр БНС - 900 мм, длина БНС - 10, 19.5 м; класс бетона - В 30.

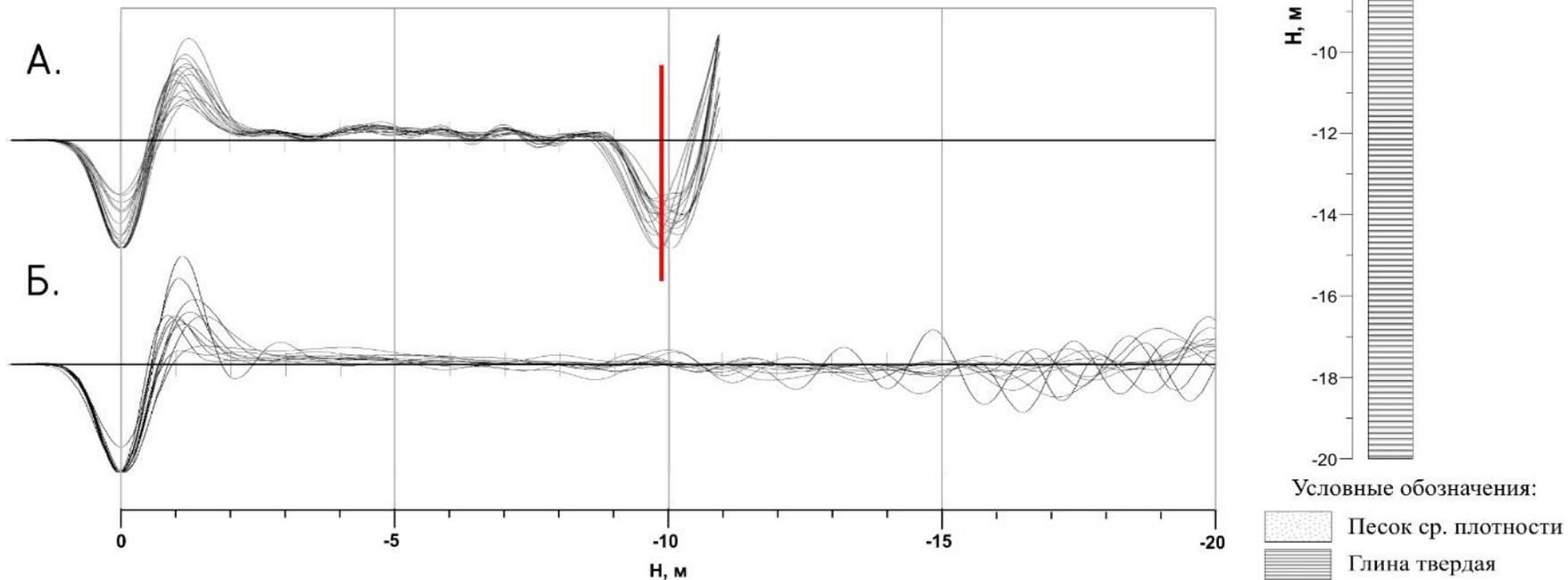
По результатам испытаний сейсмоакустическим методом:

А. БНС длиной 10 м, 10 шт (Длина/Диаметр = 11):

Длина свай соответствует проектной, сплошность бетона обеспечена

Б. БНС длиной 19.5 м, 10 шт (Длина/Диаметр = 22):

Отражение от нижнего конца БНС не зарегистрировано, проконтролировать сплошность сваи не представляется возможным



Результаты применения сейсмоакустического метода для свай длиной 10,0 и 19,5 м, изготовленных в твердых глинах на одном объекте строительства

## Сейсмоакустический метод.

### Примеры полевых данных, иллюстрирующих ограничения метода

Диаметр БНС - 1500 мм, длина БНС - 20.5 м; класс бетона - В 25.

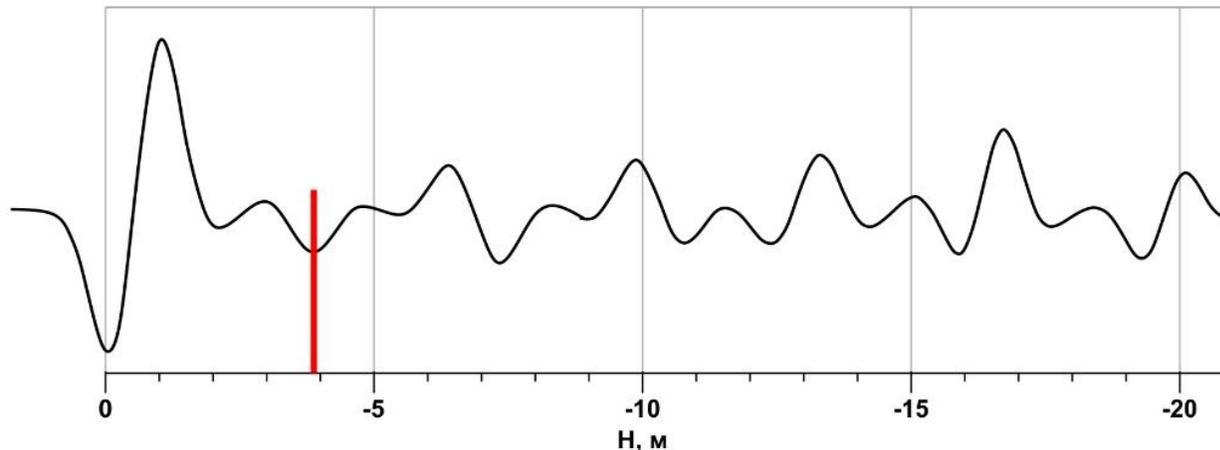
По результатам испытаний сейсмоакустическим методом:

На отн. отметке -3.9 м зарегистрирована акустическая аномалия, которая интерпретируется в качестве нарушения сплошности бетона БНС. Отражение от нижнего конца БНС не зарегистрировано. Длину сваи и сплошность сваи ниже отн. отметки -3.9 м определить не представляется возможным.

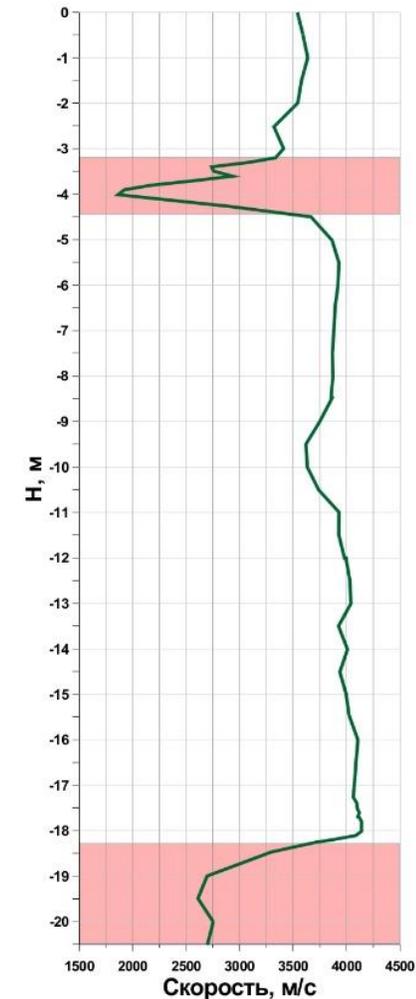
По результатам испытаний ультразвуковым методом:

В интервалах отн. отметок -4.4 — -3.2 м; -20.5 — -18.3 м зарегистрированы ультразвуковые аномалии, которые интерпретируются в качестве нарушения сплошности бетона БНС.

Результаты испытаний сейсмоакустическим методом



Результаты испытаний ультразвуковым методом



## Сейсмоакустический метод.

### Примеры полевых данных, иллюстрирующих ограничения метода

Диаметр БНС - 600 мм, длина БНС - 11.5 м; класс бетона - В 20.

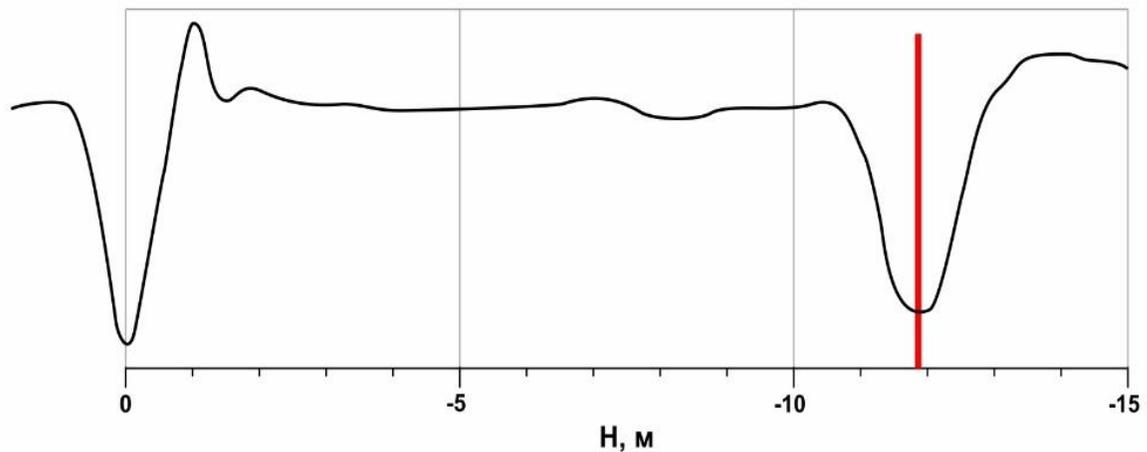
По результатам испытаний сейсмоакустическим методом:

Длина сваи соответствует проектной. Сплошность бетона обеспечена по всей длине сваи.

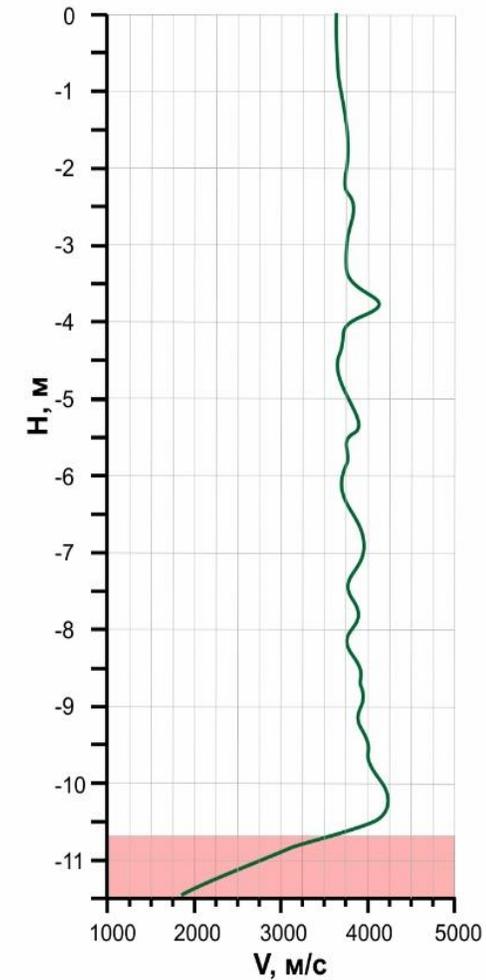
По результатам испытаний ультразвуковым методом:

В нижней части сваи на интервале отн. отметок -11.50 — -10.60 м зарегистрирована ультразвуковая аномалия, которая интерпретируется в качестве нарушения сплошности бетона БНС.

Результаты испытаний сейсмоакустическим методом

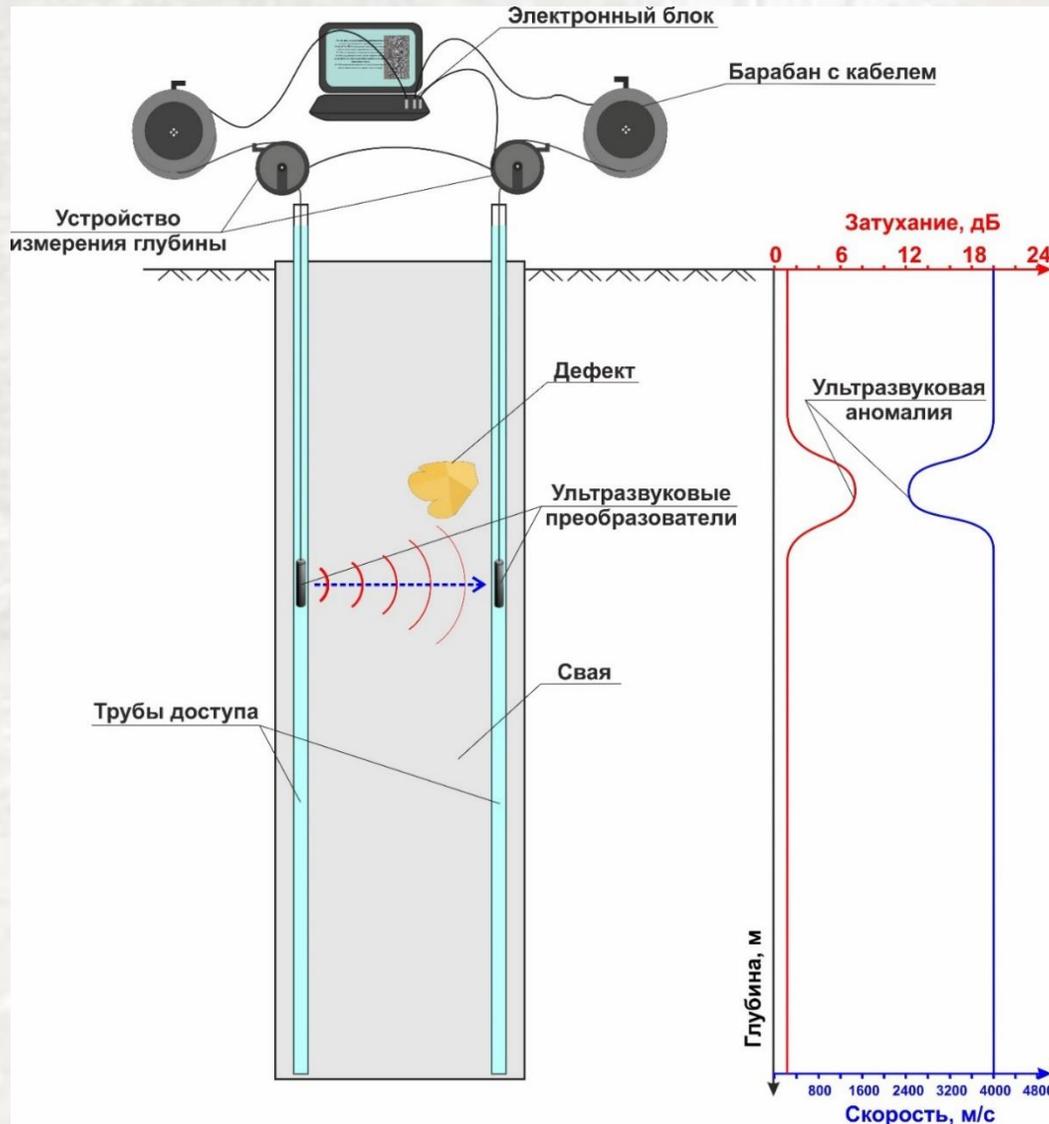


Результаты испытаний ультразвуковым методом



Дефект в области нижнего конца сваи, выделенный по данным ультразвукового метода, не проявляется на данных сейсмоакустического метода

# Ультразвуковой метод. Общие положения



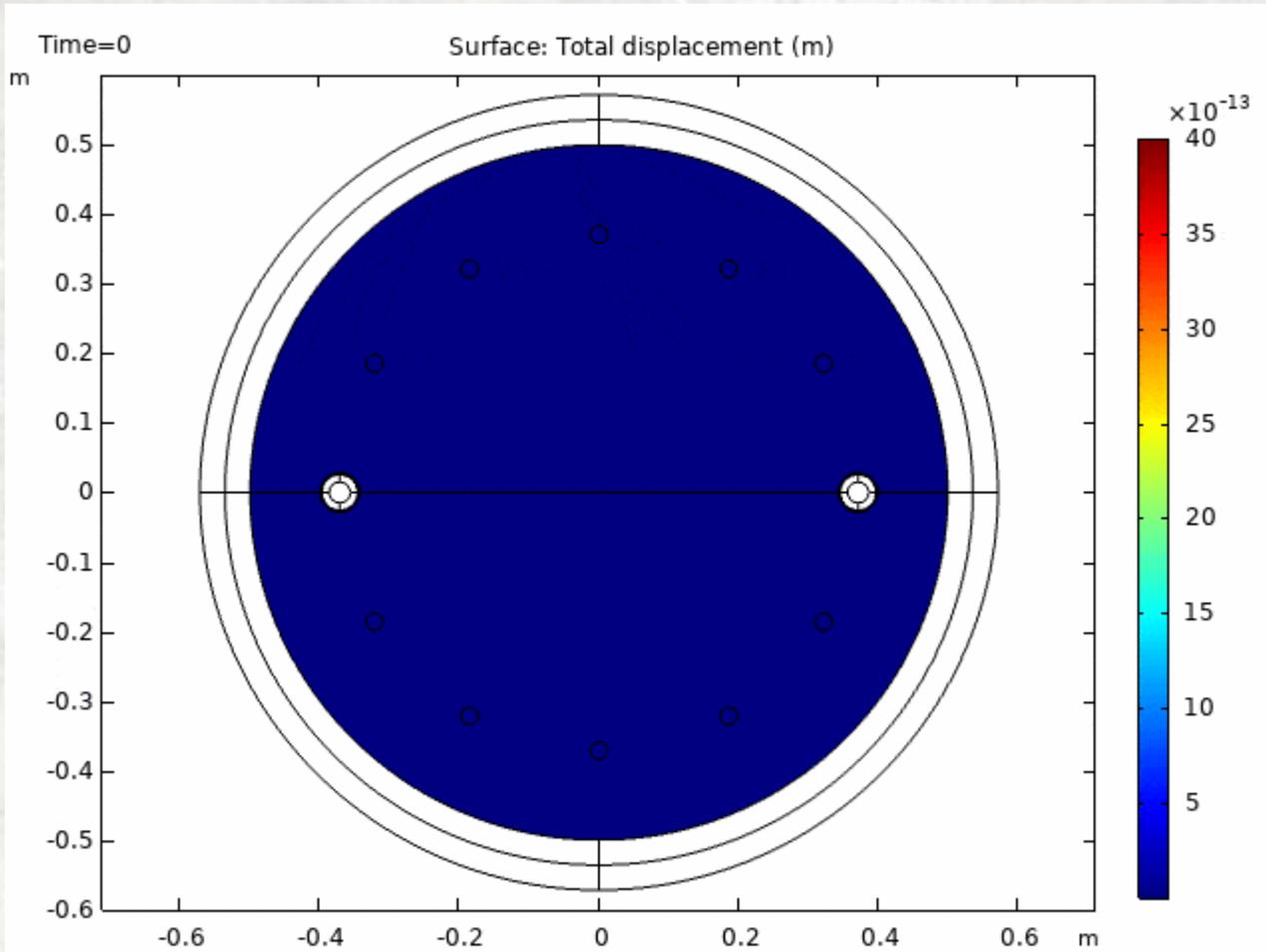
- Контроль сплошности свай ультразвуковым методом основан на анализе параметров ультразвуковых волн (скорость распространения и затухание) с целью получения выводов о сплошности бетона конструкции.
- Для проведения измерений в одну трубу доступа до нижней отметки погружают источник, а в другую приемник ультразвуковых волн. Источник и приемник синхронно поднимают и с заданным шагом производят возбуждение ультразвуковых сигналов. Упругие волны, возбужденные с помощью источника, распространяются в бетоне сваи и регистрируются с помощью приемника.
- Зарегистрированные сигналы (зависимость амплитуды ультразвукового сигнала от времени) передают на персональный компьютер для дальнейшей визуализации, обработки и интерпретации.

# Возможности ультразвукового метода

- Метод позволяет обнаружить и локализовать по глубине области нарушения сплошности бетона свай, а также производить оценку их расположения в пределах сечения свай.
- Метод испытаний позволяет контролировать сплошность бетона свай любой длины от нижней отметки труб доступа до верхней отметки бетона конструкции.
- Метод испытаний позволяет проводить испытания свай, оголовков которых находится ниже отметки уровня грунта или под водой; для проведения испытаний необходим доступ к трубам доступа.
- Дополнительные исследования по методике межскважинной ультразвуковой томографии позволяют производить оценку геометрических размеров и физических свойств выявленных нарушений сплошности бетона свай.



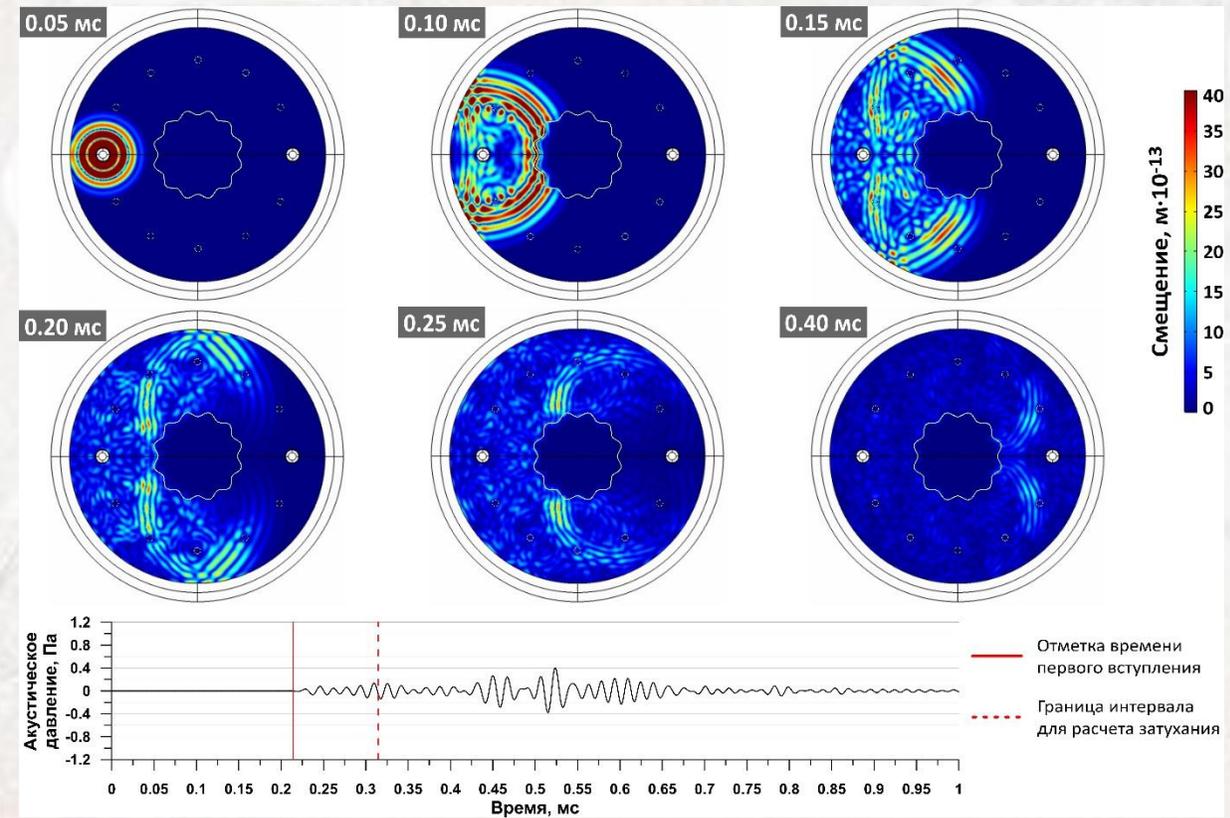
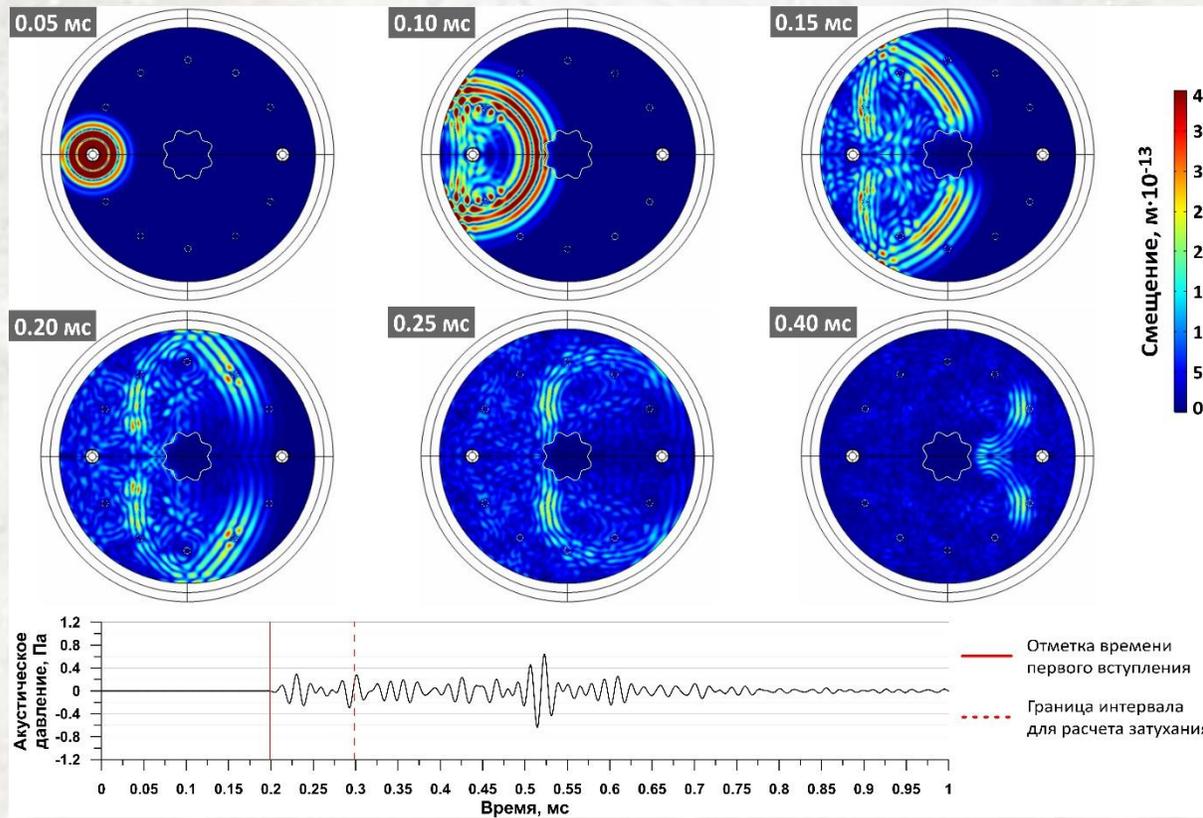
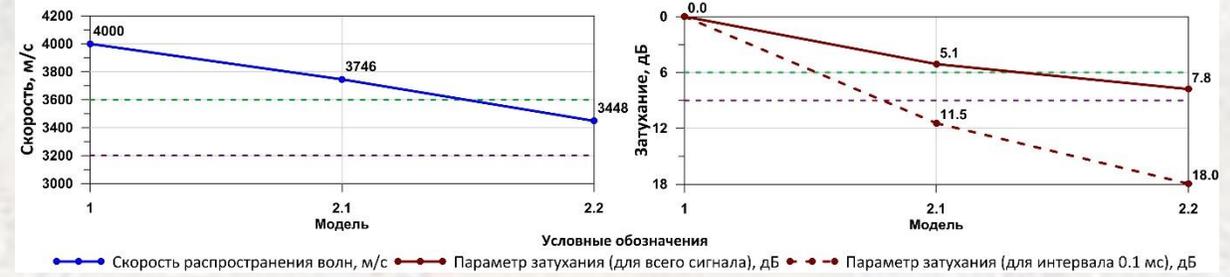
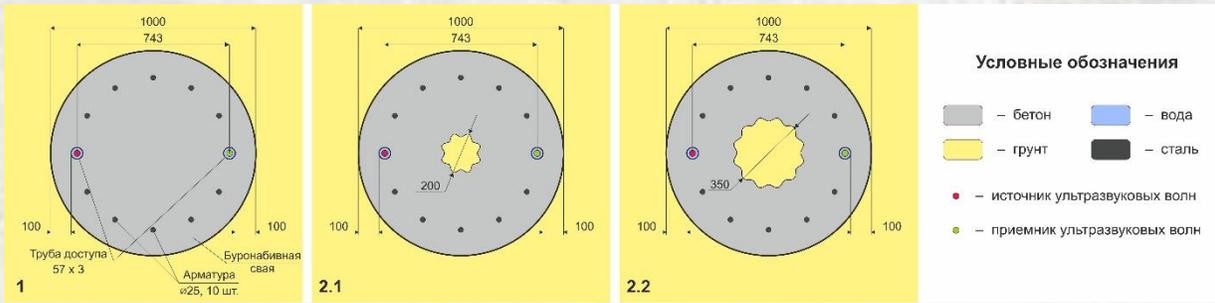
# Численное моделирование ультразвукового контроля свай



- Для изучения влияния местоположения и размера дефектов, а также нарушения сцепления труб доступа с бетоном на ультразвуковые сигналы и на возможность выявления дефектов, в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.4 выполнено моделирование методом конечных элементов.
- В качестве объектов моделирования выбраны железобетонные буронабивные сваи с ненарушенной сплошностью, с включением грунтового материала (дефектом) или с нарушением сцепления труб доступа с бетоном. Диаметр свай – 1000 мм. Защитный слой бетона (расстояние в свету между арматурным стержнем и боковой поверхностью сваи) – 100 мм. Армирование – 10 стальных стержней диаметром 25 мм. В сваи установлены 2 стальные трубы доступа 57 x 3 мм, заполненные водой.
- В качестве материала дефектов задан водонасыщенный песок. Вмещающие сваю грунты представлены двумя слоями: песком и идеально согласованным поглощающим слоем со слабоотражающим условием на внешней границе.

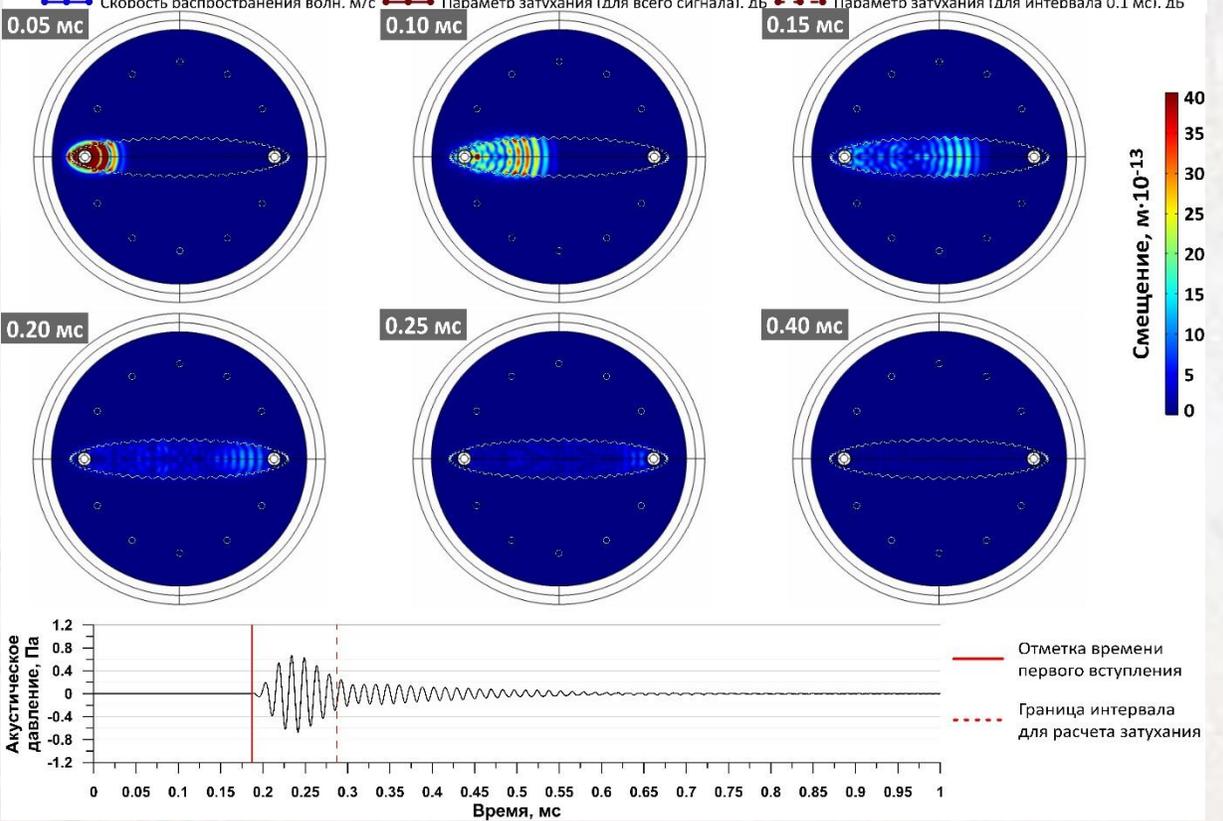
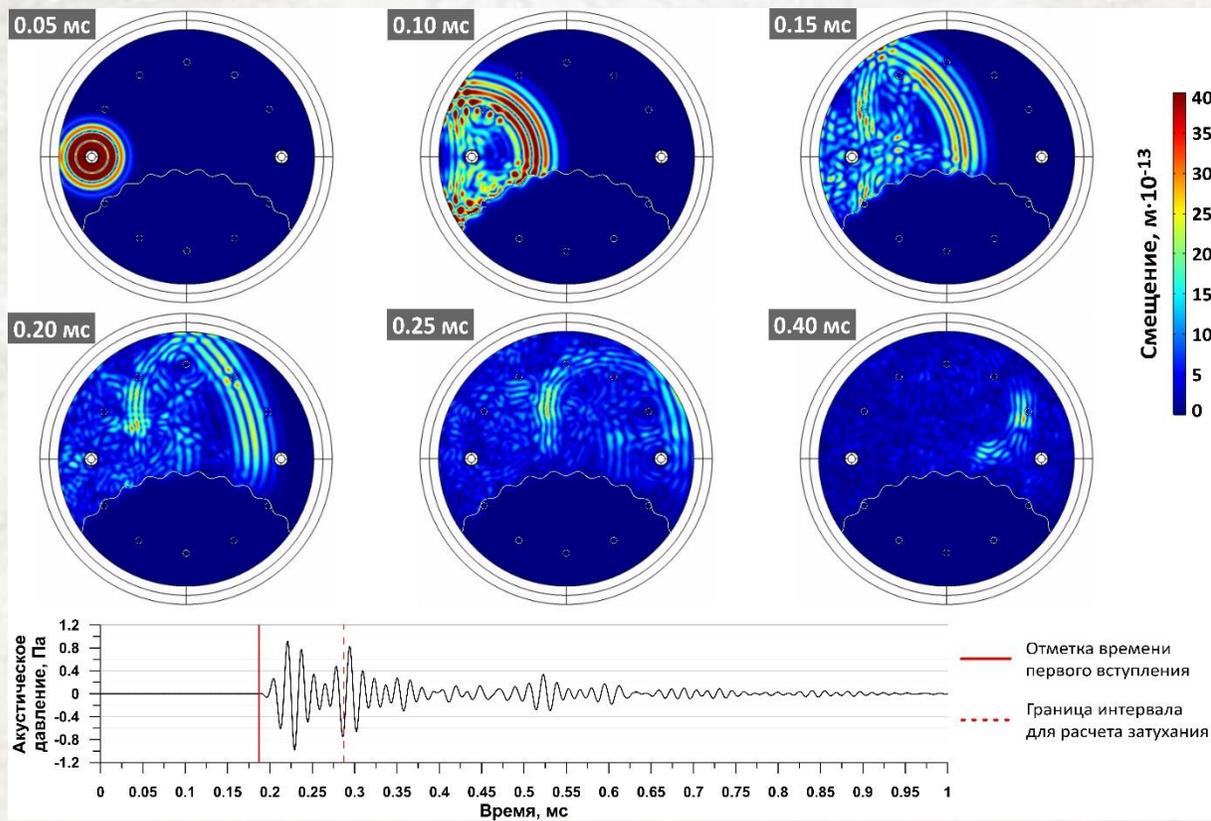
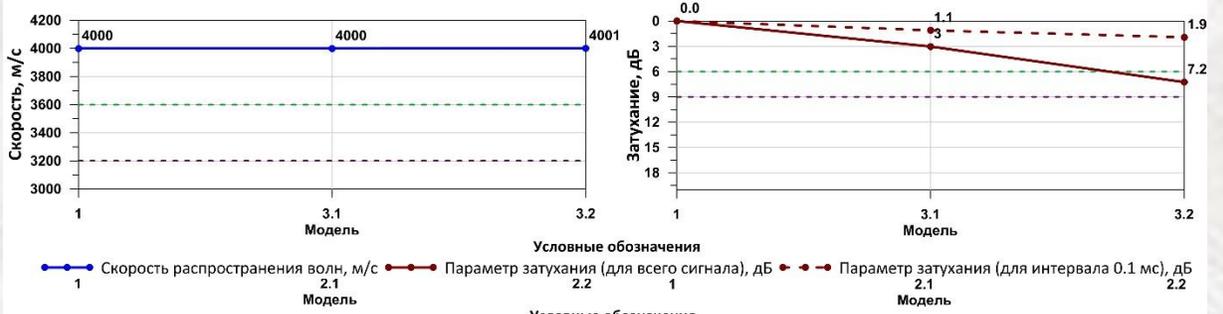
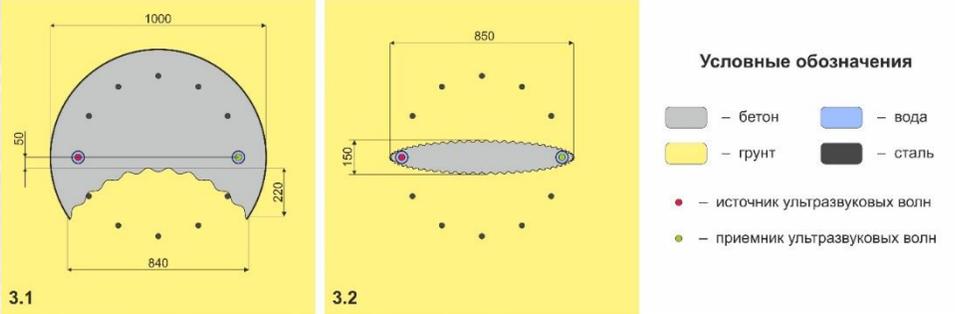
	Бетон	Вода	Песок (водонасыщ.)	Сталь	Воздух
Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2400	1000	2000	7900	1.2
Скорость продольных ( $V_p$ ) / поперечных ( $V_s$ ) волн, м/с	4000 / 2450	1500	1800 / 540	5500 / 3200	330
Рэлеевская модель затухания. Коэффициенты $\alpha$ , с <sup>-1</sup> / $\beta$ , с	$2 \cdot 10^3 / 10^{-8}$	-	$2 \cdot 10^5 / 10^{-6}$	$2 \cdot 10^2 / 10^{-9}$	-

# Влияние грунтовых включений на ультразвуковые сигналы



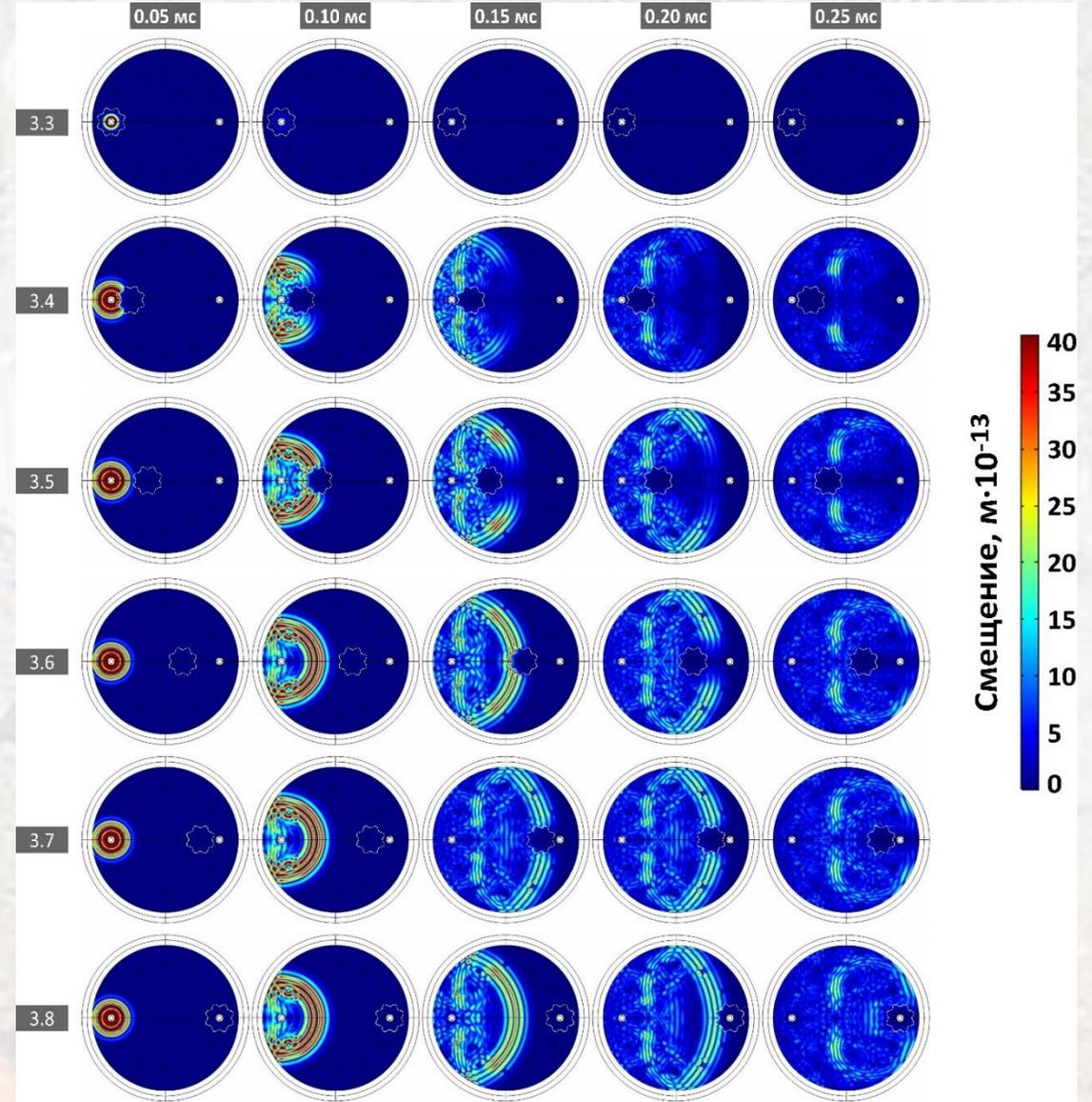
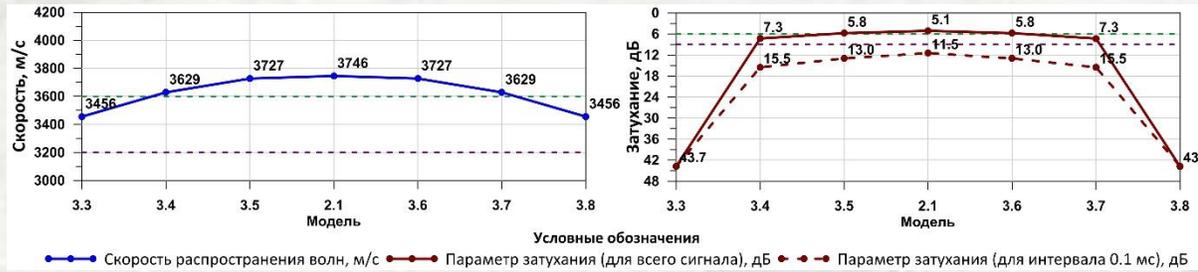
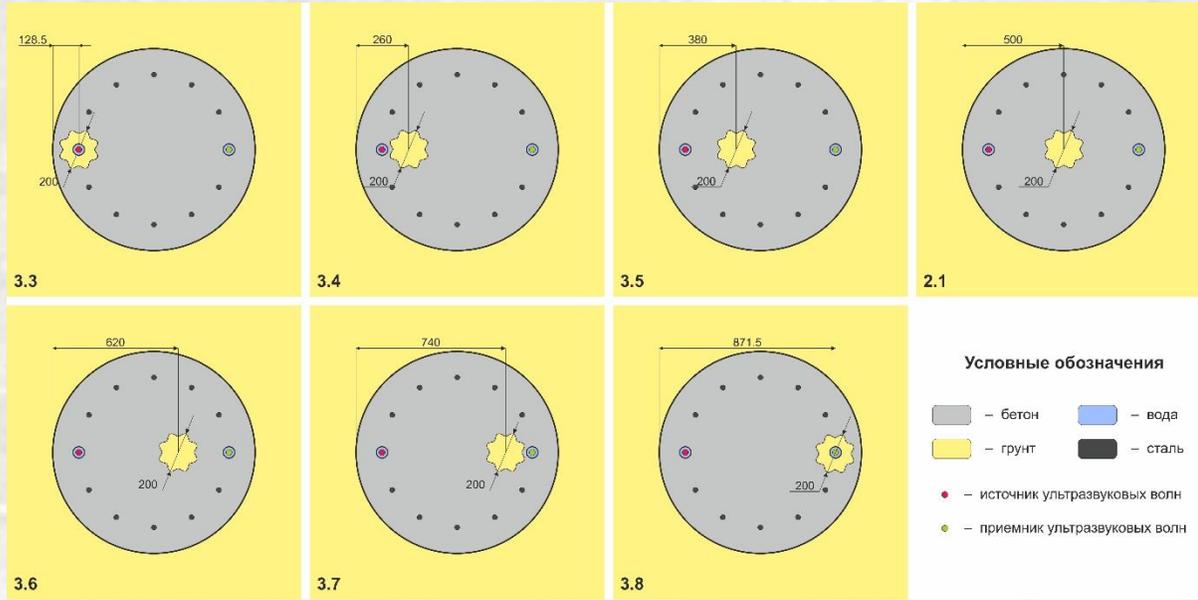
- Чем больше геометрический размер грунтового включения – тем позже время первого вступления и тем значительней снижение скорости распространения ультразвуковых волн. Отражения от границ включения и повышенное поглощение в его материале приводят к снижению амплитуды волн, встретивших на своем пути дефект, что влечет увеличение параметра затухания сигнала в моделях 2.1 и 2.2

# Влияние дефектов, удаленных от сечения сваи, ограниченного осями труб доступа, на УЗ сигналы



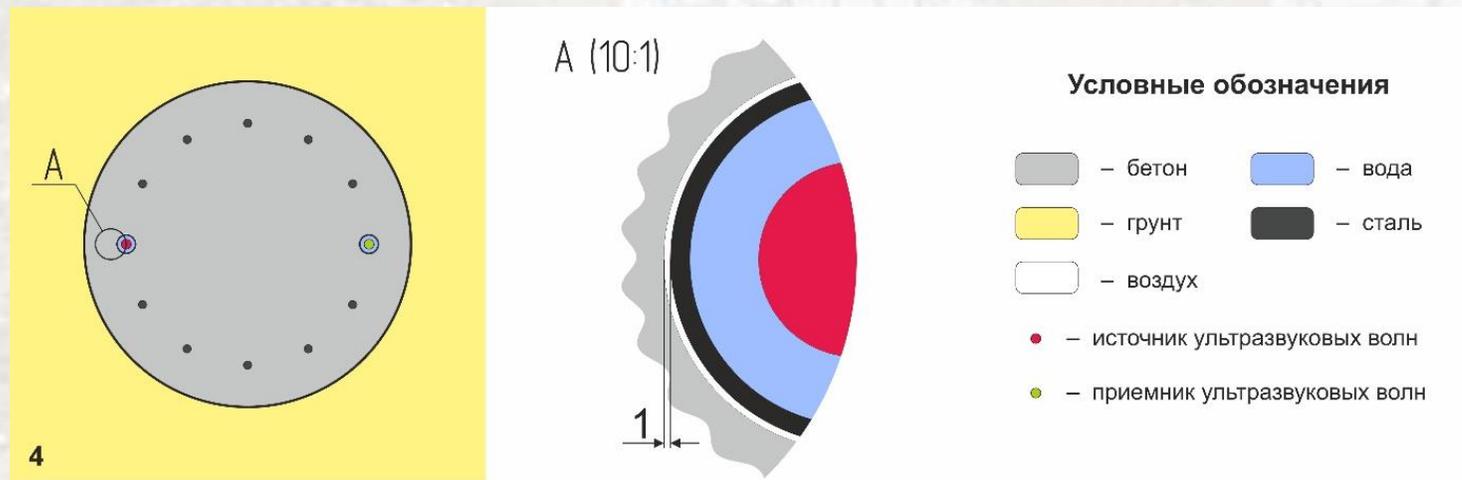
- Времена первого вступления и, соответственно, скорости распространения волн идентичны для всех трех сигналов, так как волны, распространяющиеся по прямолинейной траектории, не встречают на своем пути препятствий.
- Параметр затухания сигнала несущественно увеличивается в пределах интервала времени 0.1 мс и чуть больше – при расчете по всему сигналу

# Влияние местоположения грунтовых включений на ультразвуковые сигналы



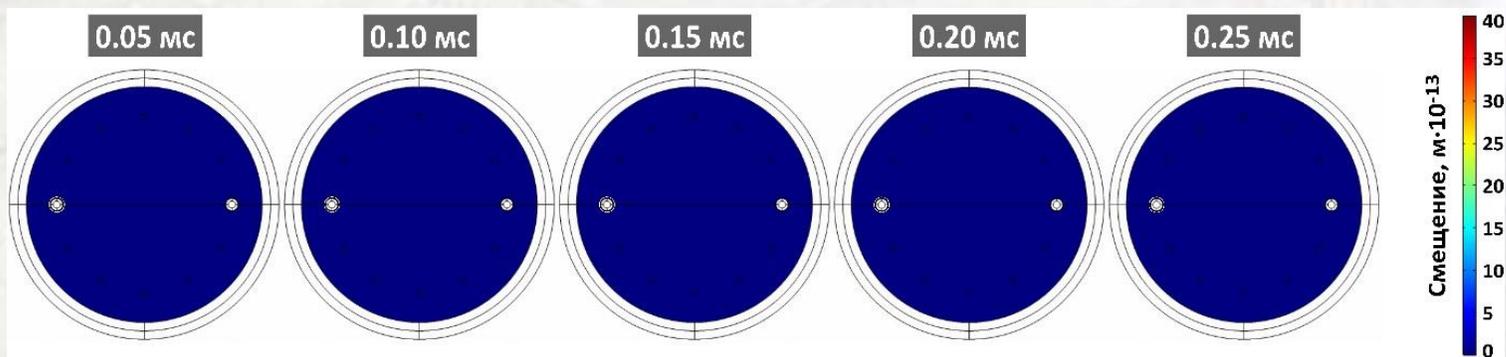
- Чтобы изучить, как скорость распространения и затухание волн зависят от расстояния между дефектом и трубой доступа, была составлена серия из 7 моделей.
- В качестве дефекта в моделях задано грунтовое включение характерным размером 200 мм, удаленное на различное расстояние от труб доступа.
- По мере приближения дефекта к трубе доступа скорость волн снижается, а затухание увеличивается. В моделях 3.3 и 3.8, в которых труба расположена в центре дефекта, наблюдается самое значительное, почти полное затухание сигнала.

# Влияние нарушения сцепления труб доступа с бетоном сваи на ультразвуковые сигналы



- Применение труб доступа из полимерного материала или недостаточное виброуплотнение бетонной смеси могут приводить к нарушению сцепления труб доступа с бетоном и образованию зазора между ними в верхней части сваи.

- Для исследования влияния воздушного зазора между трубой доступа и бетоном на распространение ультразвуковых волн составлена модель 4.



- Воздушный зазор препятствует распространению волн в теле сваи.

- Критическое снижение амплитуды зарегистрированного в модели сигнала эквивалентно затуханию ультразвуковых волн в свае со значительным дефектом, что может стать причиной ложной интерпретации данных полевых измерений.

# Выводы по результатам численного моделирования ограничений ультразвукового метода

1. Анализ параметров ультразвуковых волн (скорость распространения и затухание) не позволяет оценить размер и физические свойства дефектов. Например, небольшой дефект, расположенный в окрестности трубы доступа, может проявляться на ультразвуковых данных так же, как дефект значительного размера в середине сечения сваи. Для оценки параметров дефектов и подготовки выводов о возможности последующего использования сваи в составе фундамента необходимо проведение дополнительных исследований по методике межскважинной ультразвуковой томографии.
2. Зоны нарушения сплошности бетона приводят к снижению скорости распространения ультразвуковых волн только в случае, если они пересекают сечение сваи, ограниченное осями труб доступа. Дефекты, расположенные в стороне от данного сечения сваи, проявляются на ультразвуковых данных в виде снижения амплитуды сигнала (часто – незначительного).
3. Для увеличения контролируемой области в каждую испытываемую сваю следует устанавливать более двух труб доступа, например, в соответствии с указаниями ASTM D6760-16, по одной трубе на каждые 250 - 300 мм диаметра сваи.
4. Расчет параметра затухания целесообразно выполнять не только для всего зарегистрированного сигнала, но и для интервала времени 0.1 мс (начиная с момента первого вступления волн). Параметр затухания, рассчитанный в пределах временного интервала, характеризует материал сваи в узкой области между трубами доступа; рассчитанный для всего зарегистрированного сигнала – материал всего поперечного сечения.
5. Воздушный зазор между трубой доступа и бетоном приводит к критическому затуханию ультразвуковых волн. Для корректной интерпретации данных аномалий может потребоваться проведение дополнительных полевых измерений по методике межскважинной ультразвуковой томографии. При изготовлении свай следует принимать меры, обеспечивающие непрерывную связь между бетоном и трубами доступа по поверхности их контакта.
6. Пересчет значений скорости распространения ультразвуковых волн в значения прочности материала сваи является некорректным.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**