

РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

НКИП.408465.100 РЭ

# СПЕКТР-5

ПРИБОР ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
И ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ



**ИНТЕРПРИБОР**

## СОДЕРЖАНИЕ

1 НАЗНАЧЕНИЕ ПРИБОРА.....	3
2 ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....	4
3 СОСТАВ ПРИБОРА .....	5
4 УСТРОЙСТВО И РАБОТА.....	5
4.1 Принцип работы .....	5
4.2 Устройство прибора.....	7
5 МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ .....	10
6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПО НАЗНАЧЕНИЮ .....	11
6.1 Эксплуатационные ограничения .....	11
6.2 Подготовка к работе.....	13
6.3 Управление прибором и индикация электронным блоком рабочих режимов .....	13
6.4 Работа с планшетным компьютером .....	14
6.5 Порядок работы с прибором .....	34
6.6 Представление результатов испытаний .....	54
7 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ .....	54
8 МАРКИРОВКА И ПЛОМБИРОВАНИЕ.....	56
9 УПАКОВКА .....	56
10 ПРАВИЛА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ .....	57
11 УТИЛИЗАЦИЯ .....	57
12 ГАРАНТИЙНЫЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВА .....	58
13 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ .....	59
14 КОМПЛЕКТНОСТЬ .....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ А Протокол испытаний .....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	62
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	63

Руководство по эксплуатации предназначено для изучения характеристик, принципа работы, устройства, конструкции и порядка использования прибора диагностики элементов строительных конструкций и дорожных покрытий «СПЕКТР-5» (далее - прибор) с целью правильной его эксплуатации.

В связи с постоянной работой по совершенствованию прибора, улучшением его технических и потребительских качеств, в конструкцию могут быть внесены незначительные изменения, не отраженные в настоящем издании.

Эксплуатация прибора допускается только после изучения руководства по эксплуатации.

Производитель оставляет за собой право вносить изменения в настоящее руководство по эксплуатации. Актуальную версию руководства можно скачать со страницы продукта на сайте производителя: <https://www.interpribor.ru/>

При возникновении каких-либо затруднений в работе с прибором и при отсутствии необходимой информации в данном руководстве, необходимо позвонить по номеру, указанному в п.12.9.

## **ВНИМАНИЮ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ!**

Прибор предназначен для профессионального применения. Перед началом работы с прибором внимательно изучите требования нормативных документов на используемый метод ударного эха. С перечнем нормативных документов можно ознакомиться в разделе 13 настоящего РЭ.

## **1 НАЗНАЧЕНИЕ ПРИБОРА**

1.1 Прибор предназначен для измерения частоты упругой продольной волны (далее – Р-волны) при диагностике исследуемого объекта и для определения толщины бетонных фундаментных плит, настилов мостов и других бетонных конструкций с использованием метода импакт-эхо (ударного эха) в соответствии с требованиями п.7.1 ГОСТ Р 71733 и стандарта ASTM C 1383.

1.2 Прибор может быть использован для проверки бетонных элементов строительных конструкций на различных объектах (здания, сооружения, в том числе мосты, несущие конструкции, перекрытия, стены, плиты фундаментные и пр.), а также в дорожном строительстве при контроле качества дорожных покрытий и определении толщины асфальта дорожного полотна.

### 1.3 Рабочие условия эксплуатации:

- диапазон температур окружающего воздуха для электронного блока прибора от минус 10 °С до плюс 40 °С;

- диапазон температур окружающей среды для планшетного компьютера от 0 °С до плюс 35 °С (возможна непродолжительная работа планшетного компьютера вне указанного температурного диапазона);

- относительная влажность воздуха до 90 % при температуре плюс 25 °С и более низких температурах, без конденсации влаги;

- атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа.

1.4 Прибор соответствует обыкновенному исполнению изделий третьего порядка по ГОСТ Р 52931.

## 2 ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Таблица 1

Диапазон измерений частоты, кГц	от 1,5 до 65,4
Диапазон показаний толщины, мм	от 20 до 900
Собственная резонансная частота, кГц, не менее	130
Частота дискретизации ( $f_0$ ), кГц	500
Количество отсчетов в выборке сигнала (N)	1024/2048/4096/ 8192/16384
Разрешение по частоте ( $\Delta f$ ), Гц	488,28/244,14/ 122,07/61,04/ 30,52
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения частоты, %	$\pm 3$
Интерфейс связи с мобильным устройством	Bluetooth 5.0 (BLE)
Размер экрана планшетного компьютера, дюймов	8
Количество точек экрана планшетного компьютера, не хуже	1 280×800
Питание, В: - от встроенного Li-Pol аккумулятора - от внешнего источника питания (зарядное устройство, внешний аккумулятор (Powerbank))	3,7 $\pm$ 0,5  5 $\pm$ 0,25

Потребляемая мощность, Вт, не более	0,7
Время непрерывной работы, ч:	
- электронного блока	30
- планшетного компьютера	10
Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм:	
- планшетный компьютер в защитном чехле	240×150×30
- электронный блок	50×50×93
- прибор в кейсе	395×310×150
Масса электронного блока, кг, не менее	0,25
Масса базового комплекта, кг, не более	3,0
Полный средний срок службы, лет, не менее	10

### 3 СОСТАВ ПРИБОРА

Прибор состоит из:

- электронного блока с встроенными в него виброакустическим датчиком и электронным модулем;
- регистрирующего устройства в виде планшетного компьютера под управлением ОС Android (далее – ПЛК);
- комплекта ударных элементов (импакторов с круглой головкой, с диаметрами 4.5, 8 и 15 мм).

### 4 УСТРОЙСТВО И РАБОТА

#### 4.1 Принцип работы

Принцип работы прибора основан на методе ударного эха, использующего свойство акустической волны отражаться от границ раздела сред с различным акустическим импедансом.

Акустическая волна возбуждается в пластинчатой конструкции с помощью удара. **Удар наносится специальным ударным элементом с круглой головкой** различных диаметров (импактором) **на некотором расстоянии от датчика электронного блока, установленного на поверхность конструкции** (см. п.6.5.3).

R-волна генерируемая кратковременным точечным ударом, отражается между противоположными поверхностями пластины.

Электронный блок прибора измеряет частоту R-волн и передает измеренные значения в управляющую программу, установленную на ПЛК, для дальнейшей обработки.

Толщина материала рассчитывается на основе измеренной частоты и известной скорости распространения Р-волны. Скорость Р-волны должна быть задана до начала процедуры измерения, при этом может быть применено:

- известное табличное значение скорости звука в используемом материале (приложение Б);
- значение, определенное прямым измерением с помощью прибора для измерения скорости распространения звука, например - «Пульсар-2.2» и других подобных;
- расчетное значение скорости, определенное по контрольному образцу известной толщины.

Р-волна, распространяется в пластинчатой конструкции с некоторой скоростью  $V$ , частично отражаясь от границ раздела сред (асфальт-грунт, бетон - грунт, бетон - инородное включение, трещина, грунт-грунт и т.д.). **Отраженные волны возвращаются к верхней поверхности пластины и регистрируются датчиком прибора, установленным на некотором расстоянии от места нанесения удара.** Сигнал датчика оцифровывается электронным блоком и по беспроводному интерфейсу передаётся в ПЛК.

В ПЛК производится выделение частот Р-волн, полученных из амплитудно-временного сигнала, измеренного датчиком электронного блока.

Прибор позволяет проанализировать реакцию пластинчатой конструкции на ударное воздействие как во временной, так и в спектральной области.

Толщина исследуемой конструкции  $H$  (мм), определяется по формуле:

$$H = \frac{\beta}{n} \cdot \frac{V}{F}, \quad (1)$$

где

$V$  - скорость распространения Р-волны в материале конструкции, м/с;

$F$  - частота Р-волны, полученная из амплитудно-временного сигнала, кГц;

$n$  - постоянный коэффициент отражения, равный 2 или 4 в зависимости от акустических импедансов (п.6.1);

$\beta$  - поправочный коэффициент (табл. 3), зависящий от геометрии конструкции\* (коэффициент формы).

Таблица 2

<b>Геометрия сечения объекта</b>	<b>Значение <math>\beta</math></b>
Объект, имеющий контрольный образец с известной толщиной	1
Плита (длина и ширина превышают толщину более чем в 6 раз)	0,96
Цилиндр	0,92
Квадрат	0,87

### **Внимание!**

Коэффициенты для цилиндрических и квадратных сечений могут быть применены при исследовании протяженных стержневых объектов (колонн), подвергнутых поперечным точечным ударам.

При использовании цилиндрических и кубических контрольных образцов известной толщины, значения  $\beta = 0,92$  и  $\beta = 0,87$  могут быть применены только в том случае, если скорость звука в материале образцов определена прямым измерением методом поверхностного прозвучивания.

Согласно ASTM C1383 при обследовании плоскопараллельных конструкций (плиты, асфальтовые покрытия и пр.) и определении скорости методом поверхностного прозвучивания, используется  $\beta = 0,96$ .

В случае, если скорость звука в контрольном образце определена методом сквозного прозвучивания, либо скорость звука получена сопоставлением частоты собственных колебаний объекта контроля при прямом измерении толщины объекта (например, выбуренного керна), должен быть использован  $\beta = 1$ .

## **4.2 Устройство прибора**

Общий вид прибора представлен на рисунке 1.

Прибор комплектуется тремя видами импакторов с диаметрами круглых головок: 4,5, 8 и 15 мм.

---

\* Yiching Lin & Mary Sansalone «Transient Response of Thick Circular and Square Bars Subjected to Transverse Elastic Impact» (1992)

Импакторы предназначены для формирования, нормированного по длительности ударного воздействия по поверхности испытываемой конструкции.

В зависимости от прогнозируемой толщины и материала объекта испытаний, выбираются разные варианты импакторов (табл.7, п.6.5.3.1).



Рисунок 1 – Общий вид прибора СПЕКТР-5

**1** - Электронный блок прибора СПЕКТР-5 с виброакустическим датчиком (**4**)

**2** - Ударные устройства

**3** - Планшетный компьютер (ПлК)

Электронный блок (далее – ЭБ) прибора, включает в свой состав:

- корпус, состоящий из основания и крышки;
- виброакустический датчик-акселерометр;
- печатную плату, с установленными на ней электронными компонентами и размещенную во внутреннем отсеке корпуса;
- аккумуляторную батарею.

Аккумуляторная батарея (АКБ) встроена в корпус ЭБ, ее извлечение и замена потребителем не допускается.

На крышку ЭБ методом лазерной гравировки нанесены краткие данные об изделии.

Виброакустический датчик воспринимает эхосигналы после механического воздействия (удара) ударным устройством по поверхности исследуемого объекта, преобразует их в электрические сигналы, далее эти сигналы оцифровываются микроконтроллером электронного блока, передаются в ПЛК через Bluetooth-соединение, обрабатываются управляющей программой, установленной на ПЛК по определенному алгоритму и преобразуются в толщину исследуемого объекта.

Управление прибором осуществляется при помощи приложения на ПЛК.

Внешний вид ЭБ прибора приведен на рис.2.

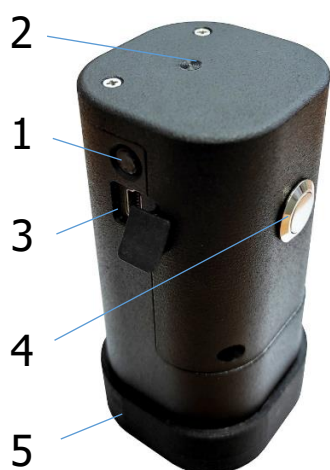


Рисунок 2

На боковые поверхности корпуса ЭБ выведены: кнопка включения/отключения ЭБ (**1**), USB разъем для подключения зарядного устройства (**3**) и кнопка разрешения передачи результата измерений по радиоканалу в ПЛК (**4**).

На торцевую поверхность корпуса ЭБ выведен двухцветный светодиодный индикатор режимов работы (**2**).

Защитная крышка (**5**) служит для защиты виброакустического датчика от случайных механических ударов и повреждений в отключенном состоянии прибора при его транспортировке и хранении.

Для увеличения продолжительности работы ПЛК и ЭБ в комплект поставки прибора включен внешний аккумулятор (Powerbank) (рис. 3) с помощью которого осуществляется быстрый подзаряд аккумуляторных батарей ПЛК и ЭБ.

Допускается использование прибора по назначению во время подзаряда ЭБ от внешнего аккумулятора.



Рисунок 3 – Внешний аккумулятор (Powerbank)

Общий вид стартового окна приложения для работы с прибором и пример реакции бетонной плиты на ударное воздействие показан на рисунке 4.

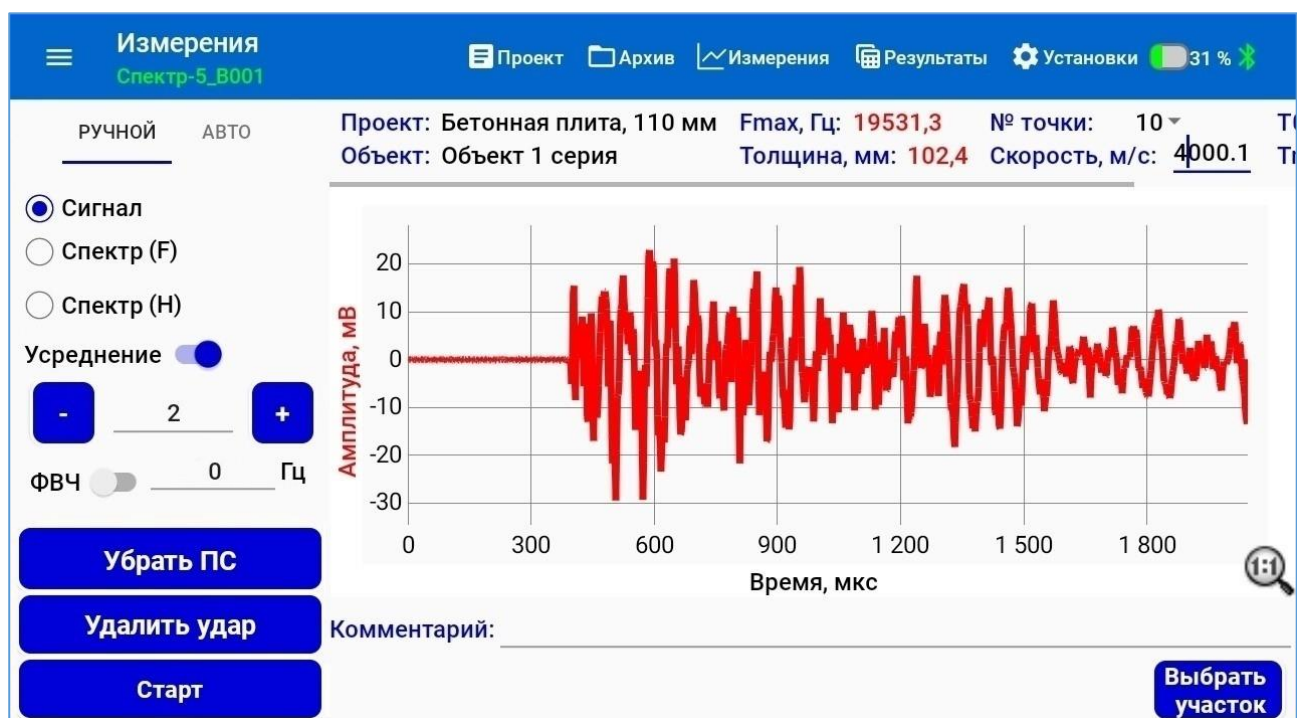


Рисунок 4 – Стартовое окно приложения прибора

## 5 МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

5.1 К работе с прибором допускаются лица, изучившие настоящее руководство по эксплуатации и прошедшие инструктаж по правилам техники безопасности, действующим на строительных объектах.

5.2 На обследование объекта составляется задание, которое должно содержать: схему обследования, перечень мероприятий,

необходимых для обеспечения обследования и безопасности работ с указанием лиц, ответственных за их выполнение.

5.3 По способу защиты человека от поражения электрическим током прибор соответствует классу III ГОСТ 12.2.007.0. Прибор не требует заземления.

## **6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПО НАЗНАЧЕНИЮ**

### **6.1 Эксплуатационные ограничения**

Прибор может быть использован при испытаниях пластинчатых конструкций с поперечными размерами, по крайней мере, в шесть раз превышающими толщину. Эти минимальные боковые размеры необходимы для предотвращения вмешательства других мод вибрации в идентификацию частоты моды толщины в амплитудном спектре.

Прибор НЕ МОЖЕТ быть использован при испытаниях плитных конструкций с накладками, таких как бетонная палуба моста с асфальтобетонным или портландцементным бетонным покрытием, в случае, если скорости звука в слоях близки по значениям. Метод измерений, используемый в приборе основан на предположении, что бетонная плита имеет одинаковую скорость Р-волны по всей своей толщине.

Прибор может быть использован для определения толщин асфальтовых поверхностей и бетонных плит, опирающихся на земляное полотно из грунта, гравия, проницаемого асфальтобетона или тонкого портландцементного бетона, при условии, что существует достаточная разница в акустическом импедансе между бетоном и земляным полотном или на границе раздела имеются воздушные пустоты для получения измеряемых отражений. Если эти условия не выполняются, форма волны будет иметь низкую амплитуду, и амплитудный спектр не будет включать доминирующий пик на частоте, соответствующей толщине объекта (формула (1), п.4.1). Если граница раздела между асфальтом (бетоном) и земляным полотном неровная, амплитудный спектр будет иметь округлый пик вместо острого пика, связанного с плоской поверхностью.

Согласно традиционной теории ударного эха, коэффициент  $n = 2$  в формуле (1) должен использоваться, если отражение волны Р происходит на границе раздела, где существует переход

между материалом с высоким акустическим импедансом и материалом с низким импедансом. Если переход обратный (от низкого акустического импеданса к высокому) - следует использовать  $n = 4$ .

С физической точки зрения это эмпирическое правило не всегда верно, поскольку оно полностью игнорирует вклад сигнала, отраженного от нижней стороны второго слоя (включая множественные отражения).

Коэффициенты  $n = 2$  и  $n = 4$  физически оправданы в случаях, когда только отражения от первой границы раздела слоев вносят существенный вклад. Это имеет место, например, в том случае, если существует очень большое несоответствие импеданса между двумя материалами (например, граница раздела бетон/воздух). Если, с другой стороны, несоответствие импеданса является умеренным (например, граница раздела бетон/сталь), критерий сверху также выполняется, если второй слой очень толстый по сравнению с длиной волны ( $\lambda$ ) внутри, т.е. для толщины слоя  $\Delta H \gg \lambda/2$ . Если, в отличие от  $\Delta H \ll \lambda/2$ , нет значительного взаимодействия между Р-волной и слоем и, следовательно, нет измеримого отражения от первой границы раздела. Если  $\Delta H$  сравнимо с  $\lambda/2$ , отражение представляет собой сложную суперпозицию вкладов от первой и второй границы раздела, и могут возникать резонансные эффекты\*.

Все измерения скорости звука в материалах исследуемого объекта должны выполняться на сухих и очищенных от мусора и грязи поверхностях, так как высокое содержание влаги на поверхности асфальта или бетона может повлиять на результаты измерения скорости.

Измерения прибором невозможны при наличии механического шума, создаваемого воздействием оборудования (отбойные молотки, слесарные молотки и кувалды, механические подметальные машины и пр.) на датчик ЭБ прибора.

---

\* Lecture 3: The Ominous Factor.

Frank Schubert, Bernd Köhler "TEN LECTURES ON IMPACT-ECHO", 2008

## 6.2 Подготовка к работе


6.2.1 При получении прибора установите сохранность тары. В случае ее повреждения следует составить акт и обратиться с рекламацией к транспортной организации.

6.2.2 Для подготовки прибора к работе необходимо:

- Внешним осмотром убедиться в отсутствии механических повреждений прибора.

- Перед началом эксплуатации прибора, зарядить ЭБ и ПлК, используя комплектные зарядные устройства (п. 7.7).

- Запустить сервисное приложение на ПлК, в меню «Подключение» приложения нажать на клавишу «Начать поиск», и кратковременно нажав кнопку «Вкл.» на ЭБ, включить его для соединения с ПлК по Bluetooth.

Индикация соединения ЭБ с ПлК по Bluetooth осуществляется включением синего светодиода 1 раз в 2 с. Индикатором соединения ПлК с ЭБ является зеленая иконка соединения  в окне приложения на ПлК.

- С помощью приложения на ПлК создать измерительный проект.

- Загрузить необходимые настройки процесса записи сигнала в ЭБ прибора (вызываются нажатием на пиктограмму «Установки» в зоне заголовка текущего окна) и нажать на клавишу «Записать настройки».



Подробнее о настройках в п.6.5.1.

- ЭБ готов к измерениям.

### Примечание

Индикация соединения электронного блока с ПлК по Bluetooth осуществляется включением синего светодиода 1 раз в 2 с.


## 6.3 Управление прибором и индикация электронным блоком рабочих режимов

Управление прибором осуществляется при помощи приложения на ПлК.

Индикация состояния ЭБ производится двухцветным светодиодом.

Включение ЭБ производится кратковременным нажатием кнопки «Вкл». При этом, с интервалом в 0.5 секунды включается синий светодиод, оповещая пользователя о готовности к подключению к ПЛК. После установления соединения ПЛК-ЭБ интервал включения синего светодиода увеличивается до 2-х секунд.

Если при включении и работе ЭБ с интервалом в 0.5 секунды включается красный светодиод, это означает, что напряжение батареи снизилось ниже порогового значения и требуется подзарядка аккумуляторной батареи ЭБ.

Для выключения ЭБ следует разорвать соединение ПЛК-ЭБ нажав на иконку соединения  в приложении на ПЛК и длительным нажатием на кнопку «Вкл.» электронного блока выключить ЭБ.

### **Внимание!**

При включении ЭБ длительным нажатием кнопки включения (более 2 с), запускается недоступный для пользователя режим обновления ПО. При этом синий светодиод включается 3 раза в секунду с перерывом на 1 с. В этом случае, необходимо выключить ЭБ длительным нажатием на кнопку включения и включить ЭБ повторно КРАТКОВРЕМЕННЫМ нажатием на кнопку «Вкл.».

При подключении к ЭБ зарядного устройства или внешнего аккумулятора включается красный светодиод индицируя процесс заряда АКБ. По окончании заряда светодиод гаснет.

## **6.4 Работа с планшетным компьютером**

При работе с ПЛК, длительным нажатием (более трех секунд) кнопки «Включение/отключение» включить ПЛК и дождаться его полной загрузки. Разблокировать ПЛК, проведя пальцем от нижнего края дисплея вверх. После включения ПЛК, автоматически загружается приложение, на несколько секунд показывается стартовое окно с логотипом НПП «ООО «Интерприбор» и затем появляется стартовое окно (рис. 4, п. 4.1).

В случае, если в процессе работы с ПЛК приложение было закрыто, найти на рабочем столе или в меню приложений ПЛК ярлык программы **СПЕКТР-5** и запустить приложение нажатием на ярлык.

### 6.4.1 Главное меню

Главное меню управления прибором (рис. 5) позволяет получить доступ ко всем основным функциям прибора. Все инструменты главного меню выведены в верхнюю закрепленную зону экрана.

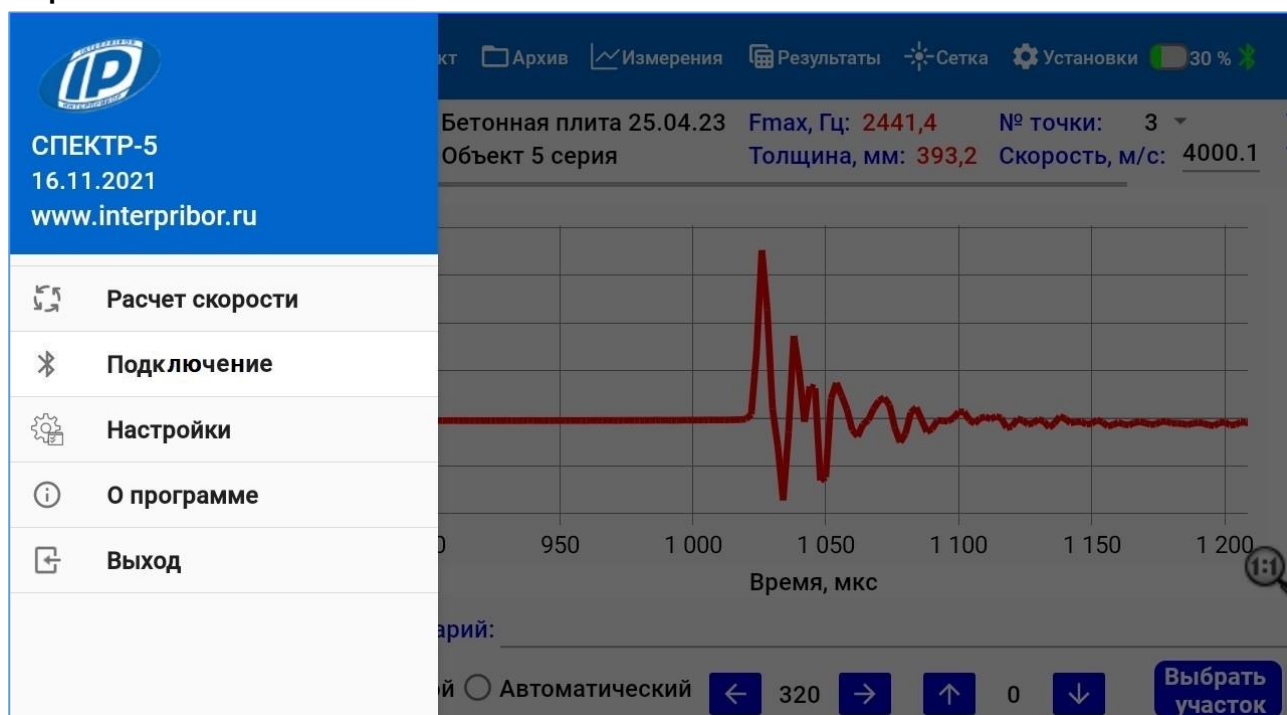



Рисунок 5 – Главное меню управления прибором

Доступ к вспомогательным и сервисным настройкам приложения обеспечивается с помощью скрываемого списочного меню ("шторки"). Списочное меню можно вызвать в любой момент времени при нахождении на любом рабочем экране приложения нажатием на «гамбургер-меню»  или сдвигом "шторки" пальцем от левого края дисплея вправо.

### 6.4.2 Экран меню «Подключение»

Для подключения электронного ЭБ к ПЛК необходимо последовательно нажать на клавишу «Начать поиск» и кратковременно - аппаратную кнопку «Включение/отключение» ЭБ.

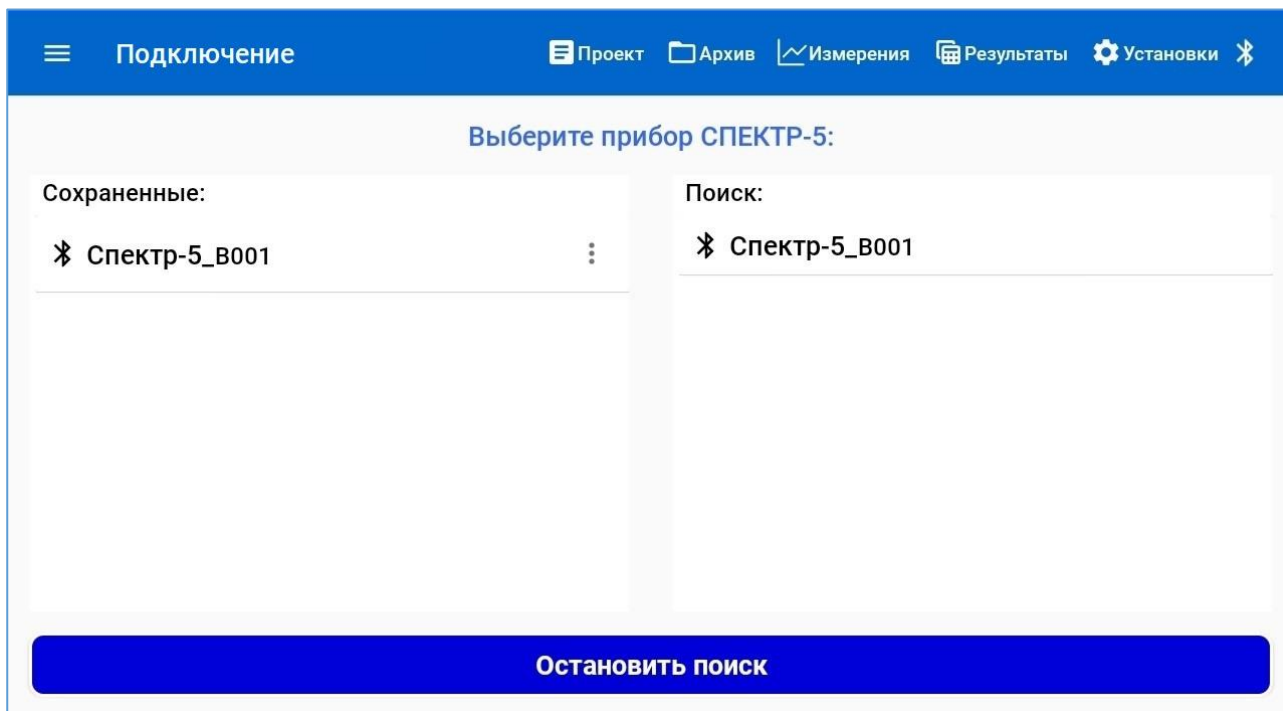



Рисунок 6 – Экран меню «Подключение»

После обнаружения ПЛК ЭБ он появится в списке найденных (рис. 6).

Подключить ЭБ к ПЛК можно кликом по строке с номером найденного прибора или по значку Bluetooth , расположенному в правом верхнем углу окна приложения. После сопряжения ЭБ с ПЛК цвет значка меняется с белого на зеленый и под названием меню в главном меню появляется строка с идентификатором прибора.

После подключения ЭБ к ПЛК на экран выводится блок с информационными параметрами прибора (рис. 7).

К информационным параметрам прибора относятся:

- заряд батареи прибора;
- серийный номер;
- версия рабочей программы прибора (прошивки);
- версия, используемого программного стека Bluetooth.

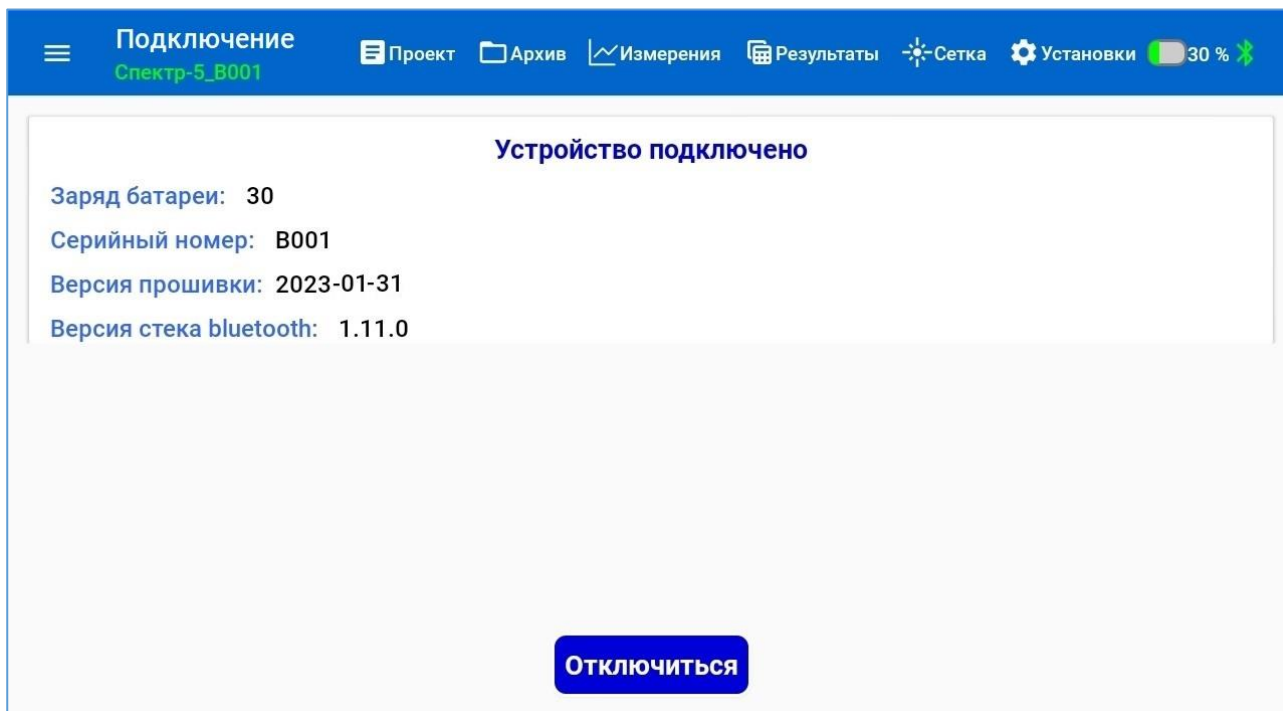


Рисунок 7 – Экран вывода информационных параметров прибора

### 6.4.3 Экран меню «Настройки»

На экране «Настройки» (рис. 8) можно настроить отклик ПЛК при нажатиях на экран при работе с приложением.

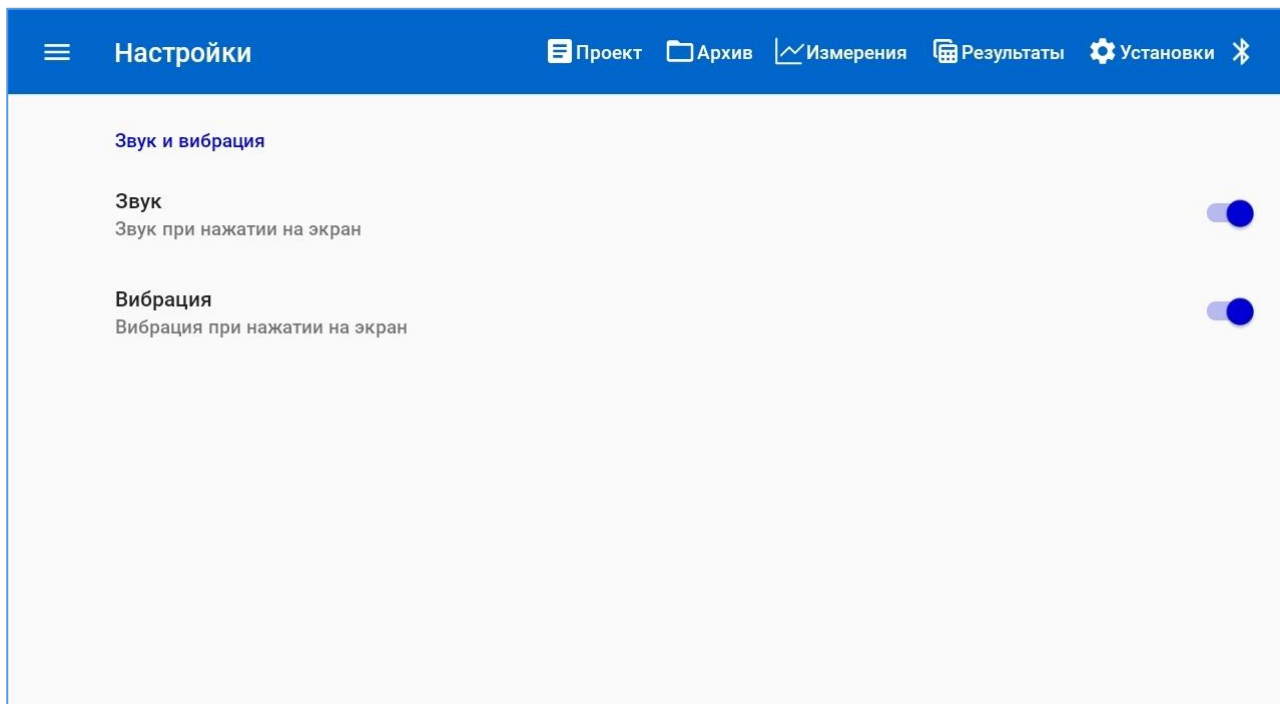


Рисунок 8 – Экран меню «Настройки»

#### 6.4.4 Экран меню «Расчет скорости»

При использовании данного меню имеется возможность определить ориентировочную скорость звука в материале конструкции (скорость распространения Р-волны).

Данную возможность можно использовать в случае, если проектная толщина объекта контроля точно известна, или если имеется возможность прямого измерения толщины исследуемой конструкции.

Использование этого меню не требует предварительного создания измерительного проекта.



Рисунок 9 – Экран меню «Расчет скорости» при вводе граничных условий

Для расчета значения скорости пользователю необходимо в окне меню (рис. 9) указать толщину объекта контроля, полученную при непосредственном измерении, диапазон возможных скоростей звука в материале конструкции и провести измерение (подробнее см. п.6.5.3.3).

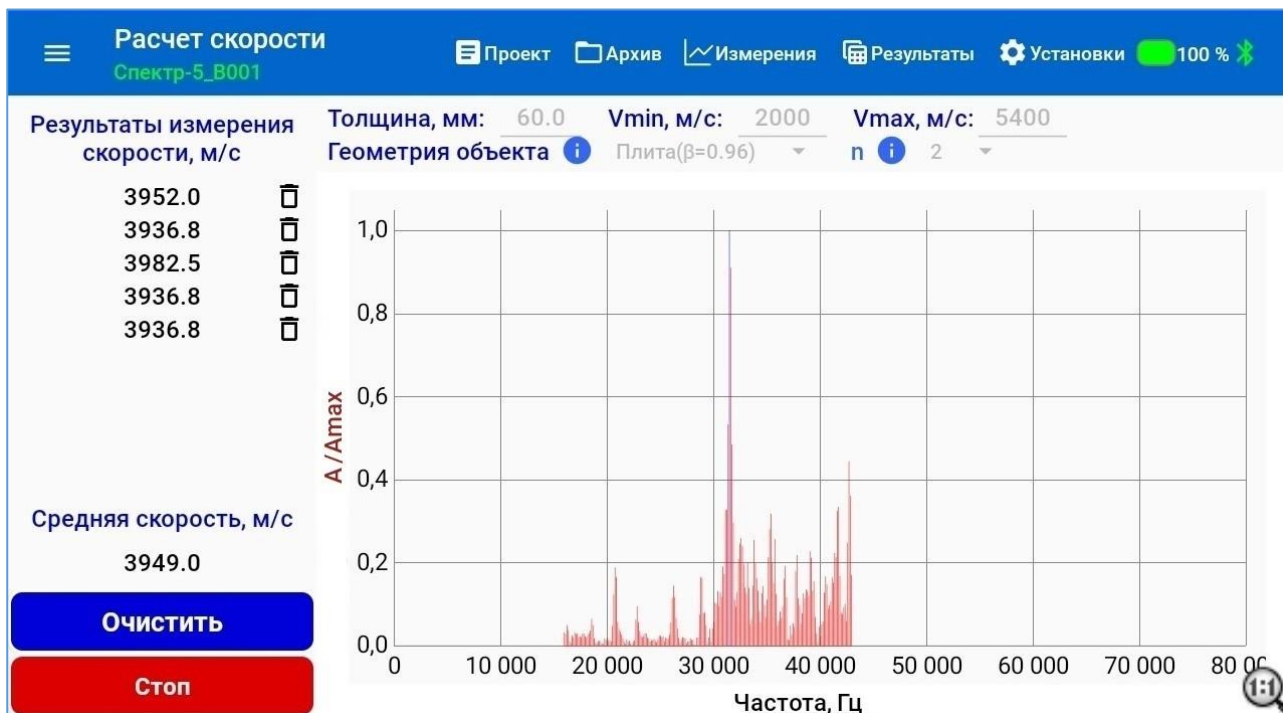


Рисунок 10 – Экран меню «Расчет скорости».

Результаты расчета скорости звука в материале

Полученное среднее значение скорости (рис.10) может быть использовано в качестве проектного значения, задаваемого в меню параметров проекта для последующего обследования конструкции.

#### 6.4.5 Экран меню «Проект»

После нажатия на пиктограмму «Проект» в зоне заголовка окна, происходит переход на экран просмотра или ввода (при создании нового проекта) атрибутов (свойств) и параметров проекта измерения сигналов прибором в процессе ударного эхо-тестирования (рис. 11).

Рисунок 11 – Экран параметров проекта

К атрибутам измерительного проекта относятся:

- имя проекта (короткое название, по которому можно быстро идентифицировать процесс или объект исследования);
- описание объекта исследований (краткое название объекта, его признаки, размеры, скорость звука в материале объекта).

Длина текстового описания имени проекта и объекта исследований не должна превышать 50 символов.

К параметрам текущего проекта относятся:

- тип проекта: «серия измерений на поверхности» или «группа не связанных измерений»;
- размеры используемой измерительной сетки и размеры исследуемой поверхности, в случае если был выбран тип проекта «серия измерений на поверхности»;
- строка выбора геометрии сечения исследуемого объекта: цилиндр, квадрат (рис. 12), плита /асфальт или объект, имеющий контрольный образец с известной толщиной (при этом каждой выбранной форме сечения соответствует свой коэффициент формы  $\beta$ , используемый приложением при вычислениях);

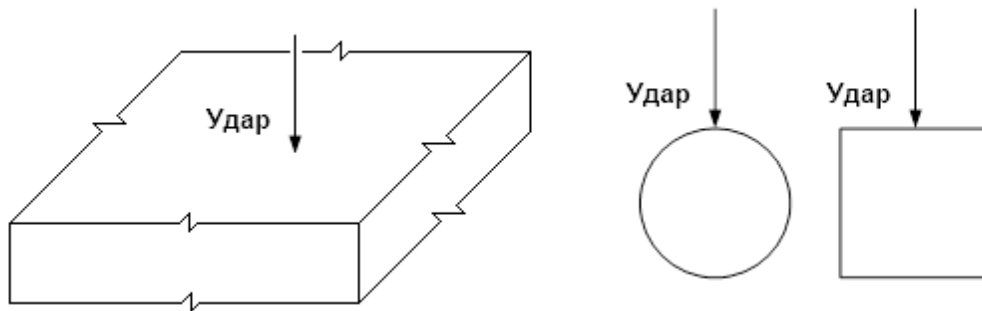



Рисунок 12 – Испытание на эхо-воздействие условно неограниченной плиты, объекта круглого или квадратного сечения

- скорость распространения звука в материале объекта (вводится вручную по результатам измерения этого значения внешним прибором «Пульсар» или аналогичным);

- коэффициент « $n$ », имеет значение  $n=2$ , если скорость распространения звука в подстилающей поверхности меньше, чем в образце измерения (пример: асфальтовое покрытие поверх грунта), и  $n=4$ , если скорость распространения звука в подстилающей поверхности больше, чем в образце измерения (например: асфальтовое покрытие поверх бетонной плиты).

При выборе геометрии проекта и задании коэффициента  $n$  при нажатии на кнопку  выводятся окна с подсказками для оператора (рис. 13, рис. 14).

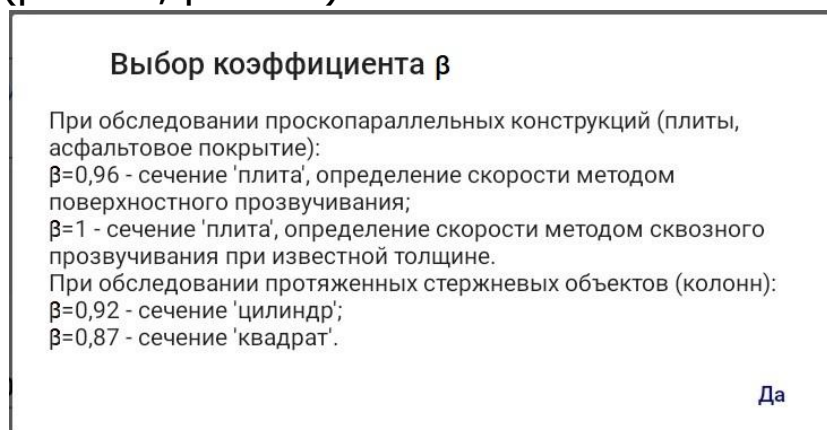


Рисунок 13

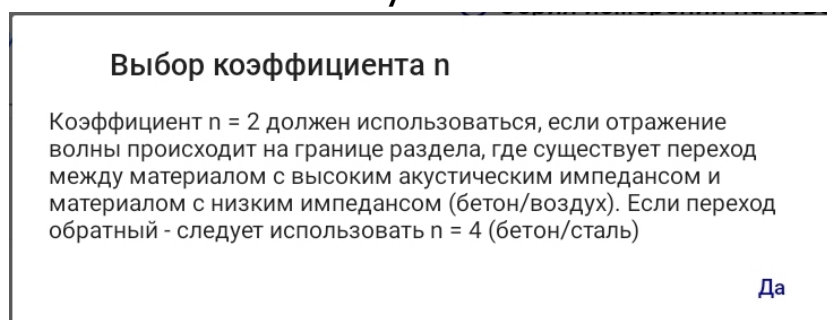


Рисунок 14

**Внимание!** Ввод атрибутов проекта, выбор и задание параметров настроек проекта в окне создания нового проекта может быть осуществлено заранее, до начала проведения измерений и до установления соединения с ЭБ.

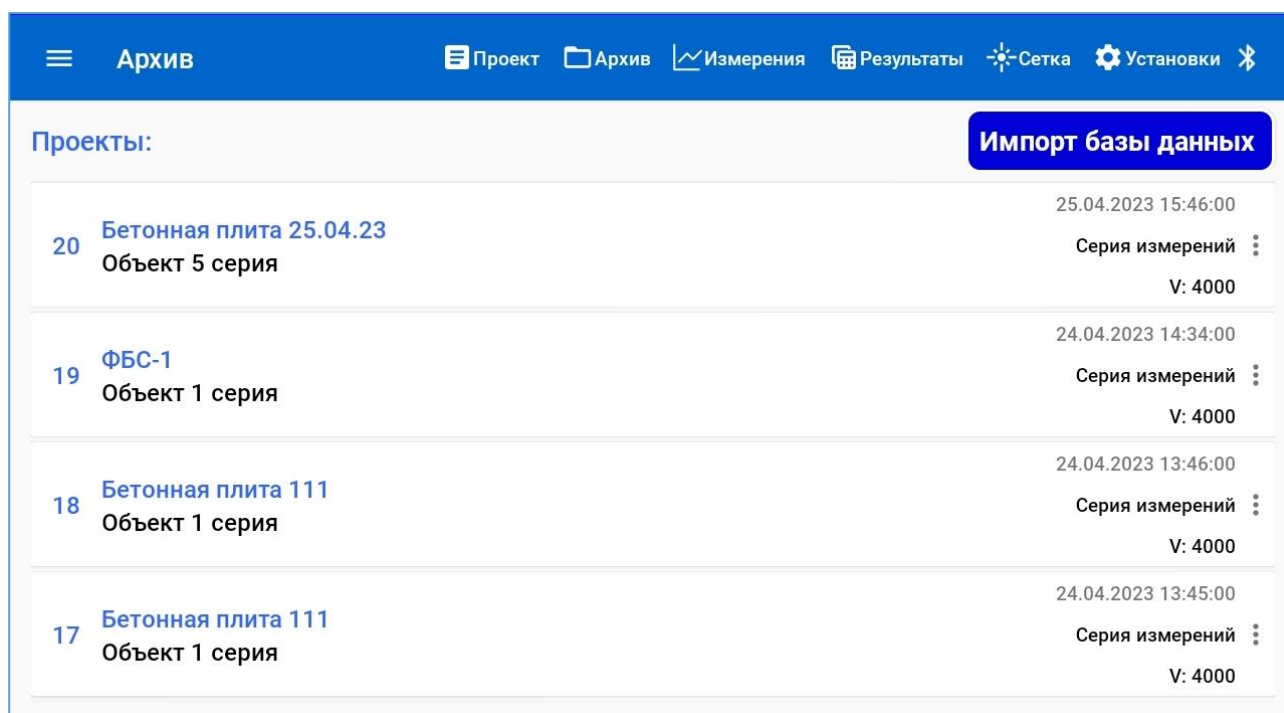
Для создания в базе данных на ПЛК нового проекта с введенными атрибутами используется клавиша «Создание нового проекта».

Изменение (запись) атрибутов и параметров проекта допустимо и позже, после вызова проекта из списка проектов, но только в случае, если процесс измерений еще не был запущен.

Клавиша «Сохранить настройки» служит для записи в файл конфигурации проекта установленных атрибутов и параметров.

#### 6.4.6 Экран меню «Архив»

После нажатия на пиктограмму «Архив» в зоне заголовка окна, происходит переход на экран просмотра списка заголовков всех проектов, сохраненных в памяти приложения (рис. 15).




№	Название проекта	Дата	Время	Серия измерений	В: 4000
20	Бетонная плита 25.04.23 Объект 5 серия	25.04.2023	15:46:00	Серия измерений	V: 4000
19	ФБС-1 Объект 1 серия	24.04.2023	14:34:00	Серия измерений	V: 4000
18	Бетонная плита 111 Объект 1 серия	24.04.2023	13:46:00	Серия измерений	V: 4000
17	Бетонная плита 111 Объект 1 серия	24.04.2023	13:45:00	Серия измерений	V: 4000

Рисунок 15 – Экран меню «Архив». Список заголовков проектов

Сортировка проектов в списке производится по дате/времени запуска процессов. Первым в списке выводится заголовок самого последнего измерительного проекта.

Заголовок каждого проекта в списке содержит имя процесса, введенное при создании настроек процесса, описание

объекта исследований, тип проекта и значение скорости звука в материале, введенное при создании проекта.

При необходимости, любой из проектов может быть удален из памяти приложения командой «Удалить» из вложенного меню, войти в которое можно по нажатию кнопки . Перед удалением папки проекта выводится всплывающее окно с предупреждающим сообщением и клавишами «Удалить» и «Отмена».

Результаты измерений, сохраненные в приложении **СПЕКТР-5** на одном ПлК, в полном объеме (включая wav- файлы акустических откликов при каждом ударе) можно перенести в аналогичное приложение на другом ПлК. Для этого необходимо скопировать файл базы данных из корневой папки приложения на исходном ПлК (Spectr5DB.db) и поместить его в произвольную папку на другом ПлК (например, /Documents).

Клавиша «Импорт базы данных» на экране «Архивы» позволяет загрузить в приложение скопированную базу результатов завершенных проектов в другой ПлК. При нажатии на данную клавишу необходимо указать путь к перенесенному файлу базы данных приложения.

**Внимание!** В базе данных приложения хранятся только заголовки, атрибуты и результаты измерений в табличном виде. После импортирования файла базы данных для переноса всех результатов измерений, включая wav-файлы акустических откликов при каждом ударе и файлы отчетов, необходимо скопировать и перенести с одного ПлК на другой содержимое папок Archive и Exceptions приложения в полном объеме!

При нажатии на поле заголовка проекта происходит переход на экран вывода в табличном представлении заголовков одиночных ударов, совершенных в процессе измерений в рамках текущего проекта.

Форма табличных представлений для разных типов проектов различается.

Для проекта группы одиночных измерений (рис. 16) название заголовка одиночного удара в группе содержит № удара, частоту доминирующей моды и значение толщины объекта.

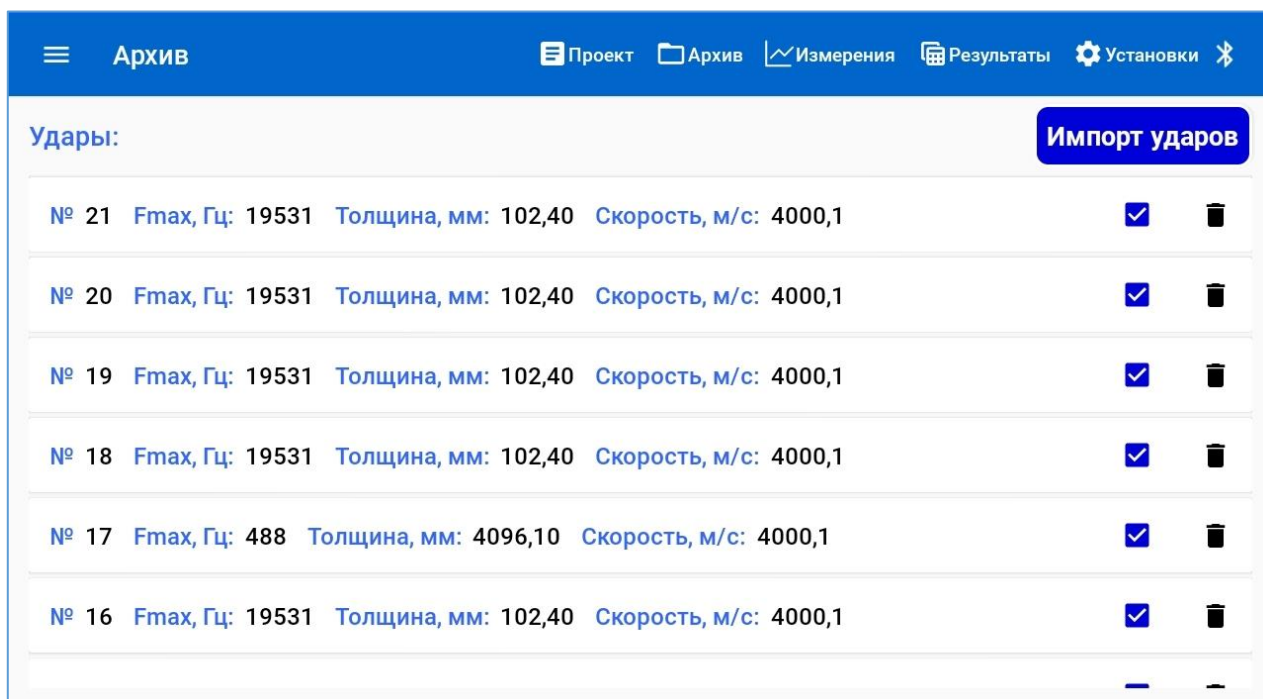


Рисунок 16 – Экран меню «Архив».  
Список заголовков одиночных ударов

Для проекта серии измерений на поверхности (рис. 17) название заголовка одиночного удара в серии содержит № удара, координаты удара, частоту доминирующей моды и значение толщины объекта.

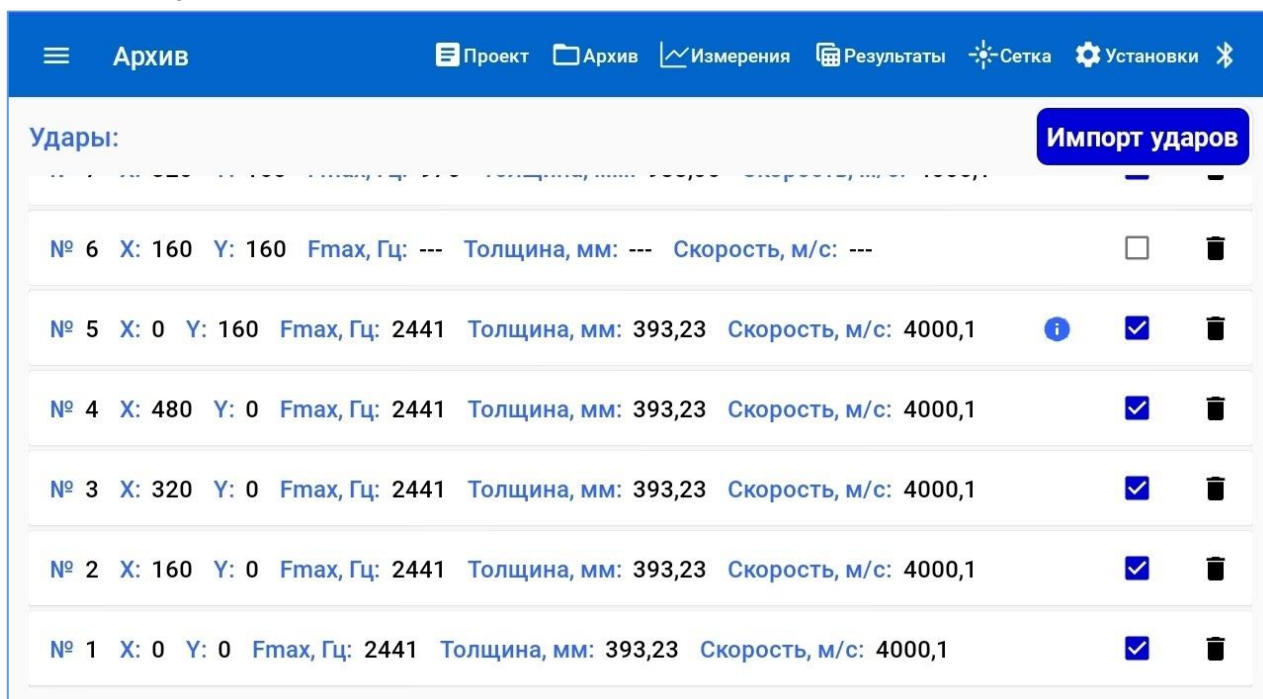



Рисунок 17 – Экран меню «Архив».  
Список заголовков серии ударов

Нажатие на пиктограмму 🗑️ удаляет выбранный сигнал из папки проекта.

Снятый флажок в пиктограмме  информирует пользователя, что в архиве отсутствует запись акустического отклика после совершения удара по объекту. Данный элемент представляет собой подсказку оператору, что в данном узле измерительной сетки измерение по какой-либо причине не было проведено (удар был пропущен).

Наличие в заголовке пиктограммы  говорит о том, что при сохранении сигнала был введен комментарий. При нажатии на пиктограмму отображается окно с комментарием.

Клик по заголовку удара активирует переход на экран «Измерение», с выводом на экран ПЛК графического представления измеренного сигнала.

Клавиша «Импорт ударов» позволяет загрузить сигналы ударов в текущий ПЛК, полученные на другом ПЛК, для чего при нажатии на данную клавишу необходимо указать путь к соответствующим файлам ударов.


#### 6.4.7 Экран меню «Измерение»

После нажатия на пиктограмму «Измерение» в зоне заголовка окна, происходит переход на экран графической визуализации измеренного сигнала в трех вариантах представления (рис. 18):

- амплитуды сигнала во времени (кнопка «Сигнал»);
- спектра в частотной области (кнопка «Спектр (F)»);
- спектра в области определяемых толщин (кнопка «Спектр (H)»).



Рисунок 18 – Экран меню «Измерение»

Переключатели вкладок  служат для выбора режима постобработки сигнала. В ручном режиме обработки доступны инструменты: «Усреднение», «ФВЧ», «Удаление постоянной составляющей». Описание вариантов использования данных инструментов приведено в п.6.5.6.

При нажатии на кнопку «Сигнал», на экран визуализации амплитуды сигнала во времени выводится записанный сигнал удара, сформированный с ранее загруженными в ЭБ настройками (порог срабатывания, длина предварительной записи, общее количество отсчетов в выборке сигнала).

В верхней части экрана над графиком выведено поле атрибутов проекта и результатов измерений (рис. 19).

Проект: Бетонная плита 25.04.23	Fmax, Гц: 2441,4	№ точки: 3	Т
Объект: Объект 5 серия	Толщина, мм: 393,2	Скорость, м/с: 4000.1	Т

Рисунок 19 – Поле атрибутов проекта

Поле атрибутов и результатов сдвигаемое. В случае длинных названия проекта и описания объекта, часть отображаемых параметров скрывается. Для их отображения достаточно сдвинуть все поле влево. При необходимости, значение скорости звука в поле атрибутов на текущем экране можно изменить. После изменения значения скорости, значение расчетной толщины будет автоматически пересчитано.

В случае неудачного результата после нанесения удара, записанный wav-файл сигнала можно немедленно удалить, нажатием на клавишу «Удалить удар».

При нажатии на кнопку «Спектр (F)», на экран визуализации выводится график амплитудного спектра сигнала в рабочей полосе частот (рис. 20).

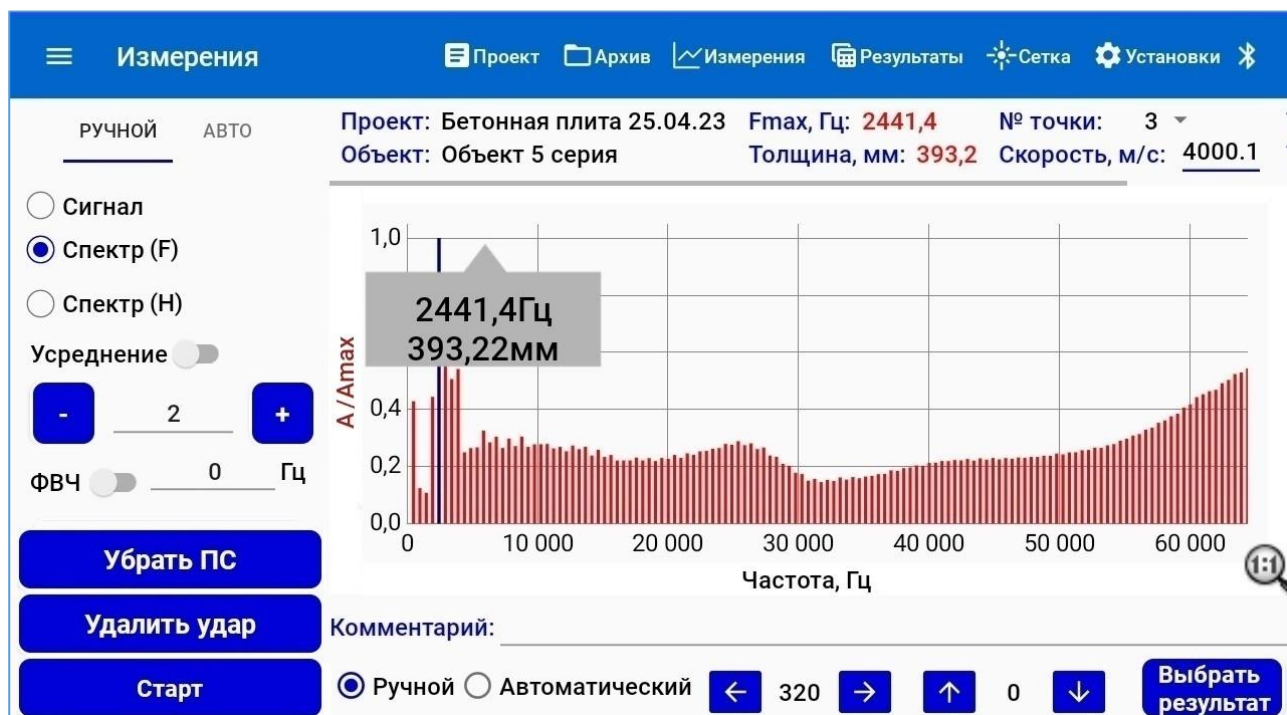


Рисунок 20 – Экран вывода графика амплитудного спектра в рабочей полосе частот

Максимум спектра на текущем экране соответствует измеренной частоте Р-волны в исследуемом материале. Для отображения на графике значения измеренной частоты и соответствующему вычисленному значению толщины объекта, необходимо выбрать и кликнуть линию спектра с максимальной амплитудой. Для максимального удобства выбора рекомендуется растянуть график.

При значительном количестве всплесков спектра (например, в примере сигнала п. 6.5.6.2), мешающих однозначному определению толщины объекта, могут быть использованы дополнительные инструменты обработки сигнала (усреднение, ФВЧ, избирательная обработка).

При включении движка «Усреднение», производится обработка измеренного сигнала по методу скользящего среднего значения с переменным шагом усреднения (n), устанавливаемого в настройках кнопками «+» и «-».

При включении движка ФВЧ и установке порога частоты фильтра высоких частот, на экране визуализации сигнала отсекаются всплески частот спектра, расположенные ниже заданной границы частоты фильтра.

При смене вида представления при нажатии на кнопку «Спектр (H)», на экран визуализации выводится график амплитудного спектра сигнала в диапазоне определяемых толщин (рис. 21).

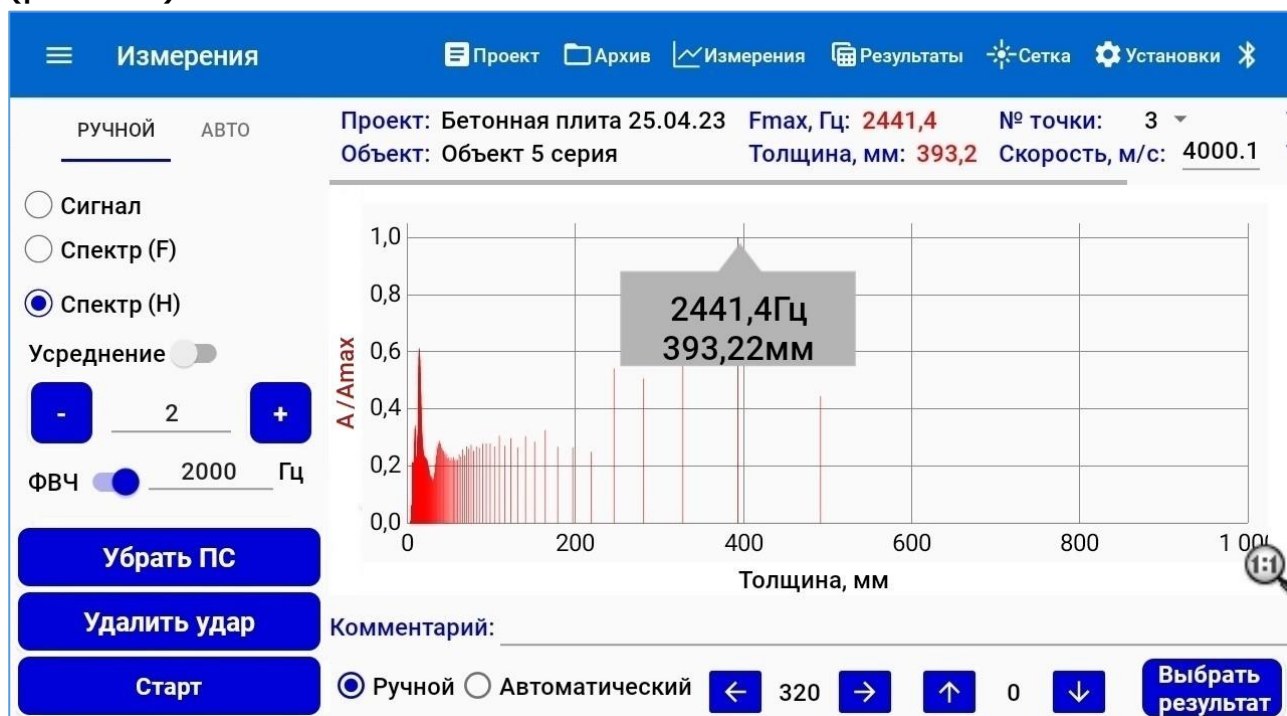



Рисунок 21 – Экран вывода графика амплитудного спектра в диапазоне определяемых толщин

Максимум спектра на экране при проведении измерений соответствует искомой толщине объекта, если соблюдены условия эксплуатационных ограничений (п.б.1).

Но в некоторых случаях имеется необходимость выбора линии спектра с другой амплитудой, более низкой по отношению к максимальному значению (например – при расслоениях или трещинах). С этой целью производится выбор необходимой частоты спектра, кликом по нужной линии.



График можно перемещать по экрану стандартным способом, а также менять масштаб осей при необходимости, разводя и смыкая пальцы.

Быстрый возврат масштаба шкалы в исходное состояние производится кликом по пиктограмме .

После выбора необходимой линии спектра она подсвечивается другим цветом и в всплывающем окне появляются измеренные значения частоты и толщины. Для подтверждения выбора нужной линии необходимо нажать на клавишу «Выбрать результат». После чего, изменяются соответствующие значения в поле

атрибутов и результатов измерений, а также данный результат попадает в архив сохраненных значений.

В случае, если в настройках проекта был выбран тип: «серия измерений на поверхности», в нижней части экрана выводятся кнопки выбора режима измерений (ручной и автоматический) и кнопки ручного выбора направления перехода на необходимую ячейку карты границ раздела слоев измеренных толщин (подробнее в п. 6.4.8).

Кнопки  позволяют переходить от одних результатов измерений к другим, произвольно перемещаясь по координатам измерительной сетки в вертикальном направлении, а кнопки  - в горизонтальном направлении.

Перемещение между результатами измерений возможно также с помощью выбора номера контрольной точки в поле атрибутов и результатов (рис. 22).

В этом случае переход от результата к результату будет производиться в последовательности, заданной приложением при формировании экрана вывода границ раздела слоев измеренных толщин (экран «Сетка»).

В случае, когда в настройках проекта был выбран тип проекта «Группа не связанных измерений», номер точки соответствует номеру последовательного измерения в группе измерений.

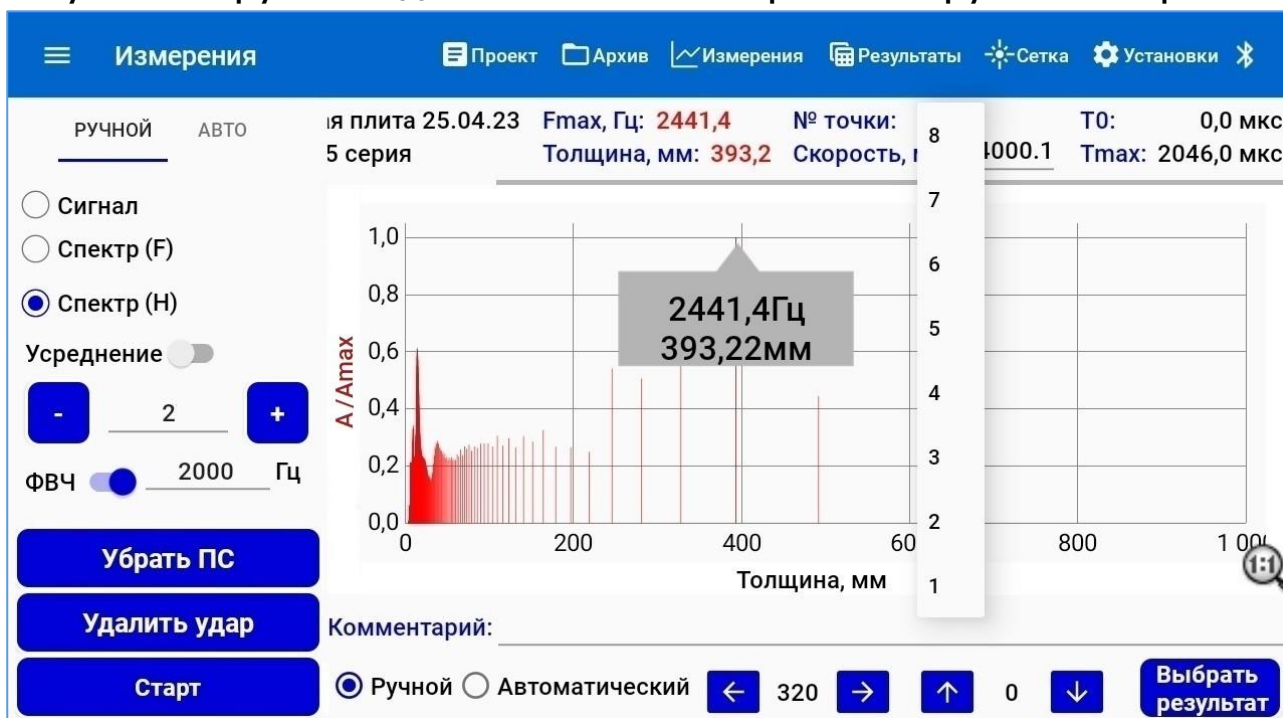


Рисунок 22 – Выбор номера контрольной точки в поле атрибутов и результатов

В случае обследования протяженных плоскопараллельных конструкций пользователь может воспользоваться автоматическим режимом постобработки сигнала.



Рисунок 23

Для этого необходимо перейти на вкладку «АВТО» (рис.23) и указать проектную или ожидаемую толщину объекта

Проектная толщина, мм  
60

контроля, после чего приложение автоматически определит реальную толщину объекта или глубину залегания дефекта (при его наличии).

#### 6.4.8 Экран меню «Сетка»

При нажатии на пиктограмму «Сетка» в зоне заголовка окна, осуществляется переход на экран вывода карты границ раздела слоев измеренных толщин в заданных координатах исследуемой поверхности (рис. 24).

Карта формируется с учетом параметров, заданных в настройках проекта: габаритных размеров исследуемой поверхности и размеров ячеек измерительной сетки.

Расположение любой ячейки на карте определяется начальными горизонтальными (X) и вертикальными (Y) координатами прямоугольной ячейки, привязанными к верхнему левому узлу ячейки.

В левой части экрана размещены кнопки выбора режима измерений (ручной и автоматический) и кнопки ручного выбора направления перехода на необходимую ячейку карты, с которой будут начаты измерения после запуска процесса по нажатию на клавишу «Старт» (в окне «Измерения»). Выбор начальной ячейки также может быть произведено вручную кликом пальцем по необходимой ячейке.

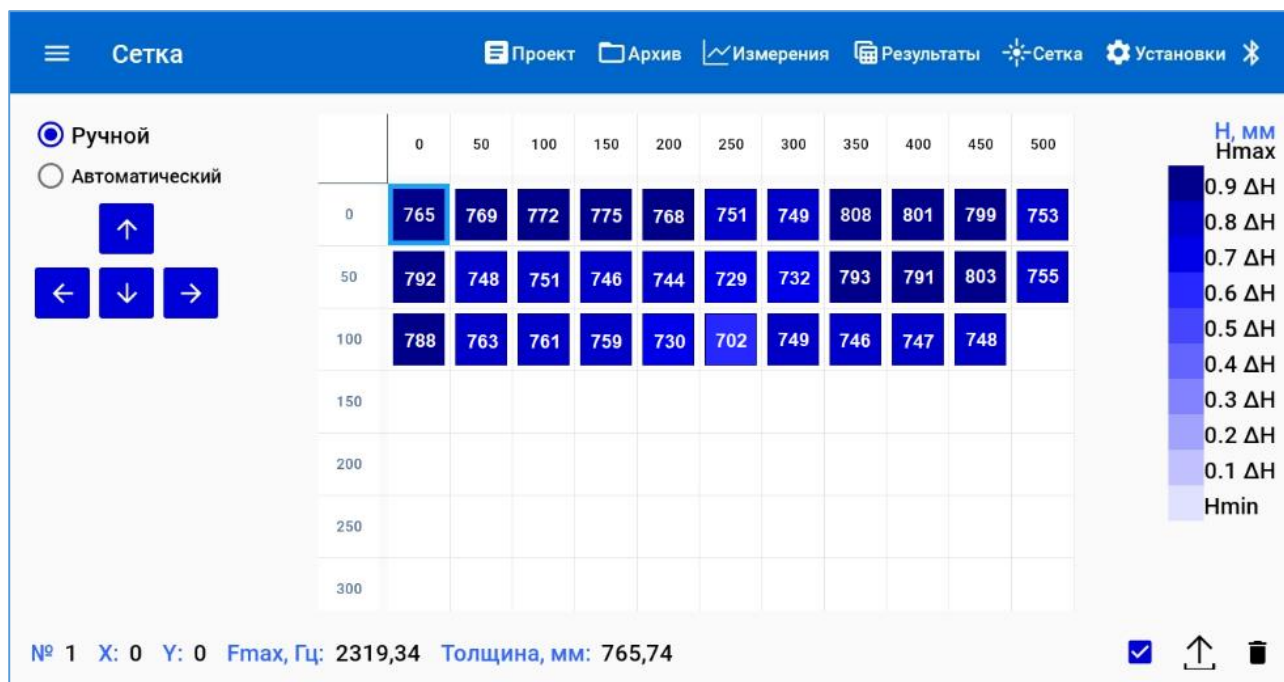


Рисунок 24 – Экран вывода карты границ раздела слоев вычисленных толщин

В ручном режиме измерений, для перехода в соседние ячейки карты по отношению к начальной ячейке необходимо использовать кнопки перехода.

В автоматическом режиме измерений, процесс измерений начинается с начальной ячейки, с направлением перехода в соседнюю ячейку для нанесения следующего удара всегда слева направо и сверху вниз. Алгоритм измерений позволяет гибким образом провести повторные измерения в любой ячейке карты в случае неудачных первичных измерениях. При повторном измерении в ячейке результат обновляется на новый.

В правой части окна экрана размещен столбик с цветовыми градиентами измеренных значений в ячейках. Справа от столбика размещены граничные значения вычисленных толщин.

Окрашивание ячеек карты производится с использованием цветowych маркеров, каждый цвет которых соответствует определенным граничным значениям измеренной толщины. Цветовое окрашивание ячеек производится с использованием принципа разделения измеренных толщин на десять градаций. Диапазоны граничных значений для каждой градации цвета приведены в таблице 3.

Таблица 3

№ маркера цвета	Цвет узла	Граничные значения измеренной толщины в контрольных узлах, мм
0	отсутствует	В ячейке измерение не проводилось
1		0,9 $\Delta H$ ... $H_{max}$
2		0,8 $\Delta H$ ... 0,9 $\Delta H$ ]
3		0,7 $\Delta H$ ... 0,8 $\Delta H$ ]
4		0,6 $\Delta H$ ... 0,7 $\Delta H$ ]
5		0,5 $\Delta H$ ... 0,6 $\Delta H$ ]
6		0,4 $\Delta H$ ... 0,5 $\Delta H$ ]
7		0,3 $\Delta H$ ... 0,4 $\Delta H$ ]
8		0,2 $\Delta H$ ... 0,3 $\Delta H$ ]
9		0,1 $\Delta H$ ... 0,2 $\Delta H$ ]
10		$H_{min}$ ... 0,1 $\Delta H$ ]

$\Delta H = H_{max} - H_{min}$ , где максимальное и минимальное значения определяются из всего массива результатов измерений текущего проекта. Значение  $\Delta H$  определяется и изменяется при каждом новом сохраненном результате измерения.

При кратковременном клике (одинарном тапе) области карты в интересующем оператора месте, внизу окна в строке результатов выводятся значения координат узла и сохраненные значения для этого узла.

При двойном клике в нужном месте карты, осуществляется переход на экран результата единичного измерения в этой области, вид отображения «Сигнал».

Сетку карты можно перемещать по экрану стандартным способом (перетаскиванием сетки, удерживая палец на экране).

### 6.4.9 Экран меню «О программе»

Вызов экрана «О программе» производится из главного меню.

На экран «О программе» (рис. 25) выводятся:

- информация о производителе устройства, обмен данными с которым обеспечивается с помощью данного приложения;
- адрес компании;
- контакты компании;
- номер текущей версии приложения.

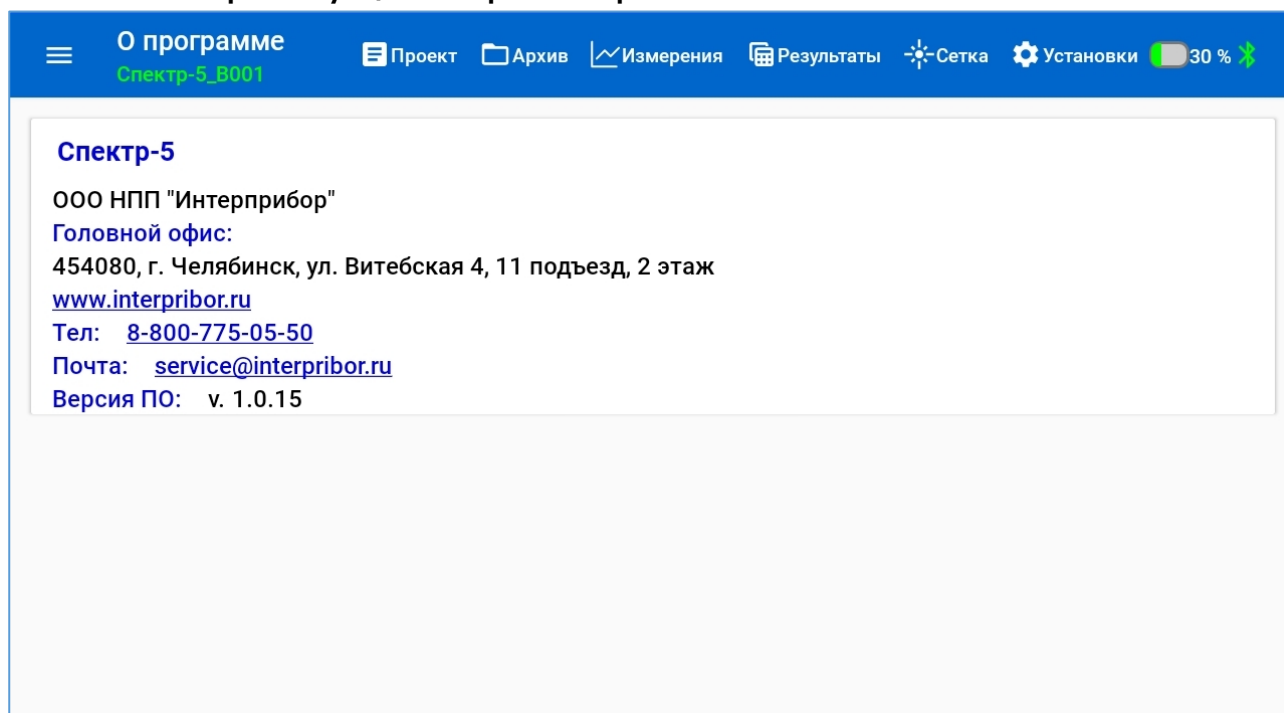


Рисунок 25 – Экран меню «О программе»


### 6.4.10 Экран меню «Выход»

Выход из приложения может быть осуществлен из любого экрана приложения, вызовом меню «Выход» главного меню и активацией соответствующей команды, или стандартным способом – сворачиванием приложения и смахиванием его с рабочего стола.



### 6.4.11 Рекомендации при работе с планшетом

При работе с приложением используется только горизонтальная ориентация дисплея ПлК. Для удобства работы отключите автоповорот изображения ПлК.

Если дисплей ПлК отключился в процессе работы, включите его кратковременным нажатием кнопки  после чего разблокируйте ПлК.



**Внимание!** Для установки беспроводной связи с прибором убедитесь, что в ПлК активирован встроенный Bluetooth-модуль.

## 6.5 Порядок работы с прибором

### 6.5.1 Подготовка к измерениям

Перед началом измерений необходимо создать измерительный проект в приложении для ПлК, выбрать тип проекта, геометрию объекта, коэффициент отражения и ввести значение измеренной скорости распространения звука в материале объекта.

Для целей подбора настроек параметров регистрации получаемых сигналов рекомендуется создать или использовать временный проект, автоматически сформированный после установки приложения.

Нажать на пиктограмму «Установки» в зоне заголовка текущего окна, ввести необходимые настройки процесса записи сигнала в ЭБ прибора (порог срабатывания, длину предварительной записи, количество отсчетов в формируемой выборке сигнала) и нажать на клавишу «Записать настройки».

ПлК готов к измерениям (рис. 26).

**Внимание!** Запись настроек и запуск измерений возможен только после соединения ПлК с прибором.

Значение порога срабатывания влияет на чувствительность измерительного устройства прибора. Минимальное значение порога срабатывания составляет 5 мВ.



Рисунок 26 – Экран меню «Измерение». Ввод параметров настройки процесса записи сигнала

При высоком уровне промышленных помех (ударов и вибраций) это значение необходимо увеличить для получения стабильно записываемых сигналов при каждом ударе импактора и в отсутствии ложных срабатываний.

Типовое и **рекомендуемое к установке** значение порога срабатывания составляет 150 мВ.

Вводимое значение предварительной записи (Предзапись) рекомендуется выбирать из ряда 256, 512, 1024, 2048 отсчетов, но не более половины от установленного общего количества отсчетов. Запись введенных значений в прибор осуществляется клавишей «Записать настройки».

Выбор бóльших значений параметра «Предзапись» позволяет скомпенсировать увеличение дискретности спектра сигнала при последующей обработке (см. п. 6.5.6.4). Запуск процесса измерений производится нажатием на клавишу «Старт».

Далее все измерения проводятся в автоматическом режиме до момента принудительной остановки измерений по нажатию клавиши «Стоп». Запись сигналов при этом производится автоматически при каждом ударе и при условии превышения порога срабатывания.

Инструмент  «Убирать ПС» в блоке параметров регистрации при активации меню «Установки» (рис. 26), позволяет убрать из записываемого сигнала постоянную составляющую.

После включения этого разрешения во всех записываемых сигналах постоянная составляющая будет удаляться (рис. 28). В записываемых wav-сигналах эта составляющая также будет отсутствовать.



Рисунок 27 – Экран меню «Измерение». Записанный сигнал до включения инструмента «Убрать ПС»

Клавиша **Убрать ПС** на экране меню «Измерения» позволяет убрать постоянную составляющую из записанного сигнала в случае, если эта составляющая была сохранена в записанном wav-сигнале.



Рисунок 28 – Экран меню «Измерение». Записанный сигнал после включения инструмента «Убрать ПС»

## Важно!

Выбираемое количество 2048 отсчетов в выборке соответствует периоду дискретизации внутреннего АЦП электронного блока 4096 мкс и частотному интервалу 244 Гц, а количество 4096 отсчетов соответствует периоду дискретизации 8192 мкс и частотному интервалу 122 Гц и т.п. Меньший частотный интервал обеспечивает более точное измерение частоты и толщины. Однако длину выборки следует выбирать с учетом поперечных размеров образца по отношению к его толщине. Если меньший поперечный размер по крайней мере в 20 раз превышает толщину, в настройках можно использовать 4096 отсчетов.

Если меньший поперечный размер не менее чем в 10 раз превышает толщину, можно использовать 2048 отсчетов. При еще меньших поперечных размерах объекта необходимо использовать более короткий период выборки. Но это приводит к большей неопределенности в измерении толщины (табл. 4).

Таблица 4 – Расчетные **абсолютные** погрешности определения толщины

H, мм	Абс. погрешности измерения толщины ( $\Delta H$ ), мм				
	N=1024	N=2048	N=4096	N=8196	N=16394
800	133,5	72,8	38,1	19,5	9,9
700	100,0	60,0	29,0	14,8	7,7
600	75,0	40,0	21,2	11,2	5,5
500	55,6	29,4	15,2	7,7	3,9
400	36,4	19,1	9,8	4,9	2,5
300	22,0	10,6	5,6	2,8	1,4
200	9,5	4,9	2,5	1,2	0,6
100	2,4	1,2	0,6	0,3	0,2

В таблице приведены расчетные значения при  $V=3910$  м/с

Эти ограничения необходимо использовать для того, чтобы гарантировать, что форма сигнала не включает моды вибраций, которые могут помешать определению частоты, отражающей толщину объекта в амплитудном спектре.

При обследовании объектов большой толщины рекомендуется использовать большую длину выборки, т.к. это позволит уменьшить погрешность в определении толщины объекта (табл.5).

Таблица 5 – Расчетные **относительные** погрешности определения толщины

H, мм	Отн. погрешности измерения толщины ( $\delta H$ ), %				
	N=1024	N=2048	N=4096	N=8196	N=16394
800	16,67	9,09	4,76	2,44	1,23
700	15	8	4,17	2,13	1,09
600	13	7,14	3,57	1,85	0,93
500	11,11	5,88	3,03	1,54	0,78
400	9,09	4,76	2,44	1,23	0,62
300	7,14	3,57	1,85	0,93	0,47
200	4,76	2,44	1,23	0,62	0,31
100	2,44	1,23	0,62	0,31	0,16

В таблице приведены расчетные значения при V=3910 м/с

Для получения приемлемых погрешностей при измерениях, длину выборки 1024 или 2048 отсчетов рекомендуется использовать только при измерениях толщин колонн и балок с учетом ограничений по поперечным размерам ( $H \leq 200$  мм, при N=1024 и  $H \leq 400$  мм, при N=2048).

При принятии решений о корректности измерений необходимо контролировать выполнение условия (табл. 6):

$$\delta_{Fi} = \frac{F_0}{2N} \cdot \frac{1}{F_i} \cdot 100 \% < 3 \%, \quad (2)$$

где

$\delta_{Fi}$  – относительная погрешность вычисления частоты;

$F_0$  – частота дискретизации (500000 Гц);

N – количество используемых отсчетов;

$F_i$  – текущее значение измеренной частоты, Гц.

Таблица 6 – Расчетные относительные погрешности измерения частоты

F, Гц	Отн. погрешности измерения частоты ( $\delta F$ ), %				
	N=1024	N=2048	N=4096	N=8196	N=16394
1464,8	> 3	> 3	> 3	2,08	1,04
1709	-	> 3	> 3	1,79	0,89
1953,1	> 3	> 3	> 3	1,56	0,78
2197,3	-	> 3	2,78	1,39	0,69
...	...	> 3	...	...	...
2929,7	> 3	> 3	2,08	1,04	0,52
...	...	> 3	...	...	...
3906,3	> 3	> 3	1,56	0,78	0,39
4150,4	-	2,94	1,47	0,74	0,37
...	...	...	...	...	...
8300,8	2,94	1,47	0,74	0,37	0,18
...	...	...	...	...	...

Обоснование выбора количества отсчетов в выборке сигнала при измерениях частоты, приведено в приложении В.

## 6.5.2 Подготовка испытательной поверхности

Удалите грязь и мусор с поверхности конструкции, толщина которой должна быть определена. При проведении измерений поверхность должны быть сухой. Вибрация конструкции объекта при измерениях не допускается!

Если испытываемая поверхность обладает серьезной шероховатостью (грубо текстурированные или рифленые поверхности), при которой очень трудно достичь хорошего контакта между наконечником датчика ЭБ и дорожным покрытием (или поверхностью бетонной конструкции), отшлифуйте поверхность для достижения хорошего контакта.

## 6.5.3 Проведение измерений

### 6.5.3.1 Проведение измерений в ручном режиме постобработки сигналов

Запустите измерение, нажатием на клавишу «Старт» в приложении на Плк.

Разместите датчик ЭБ на испытываемой поверхности в точке, где должна быть измерена толщина (рис. 29). Расположите ударный элемент таким образом, чтобы он наносил удар на расстоянии менее  $0,4 \Delta H$  ожидаемой номинальной толщины пластинчатой конструкции или контролируемого слоя от оси датчика (ГОСТ Р 71733-2024 п. 7.1, ASTM C1383 п. 13.2).

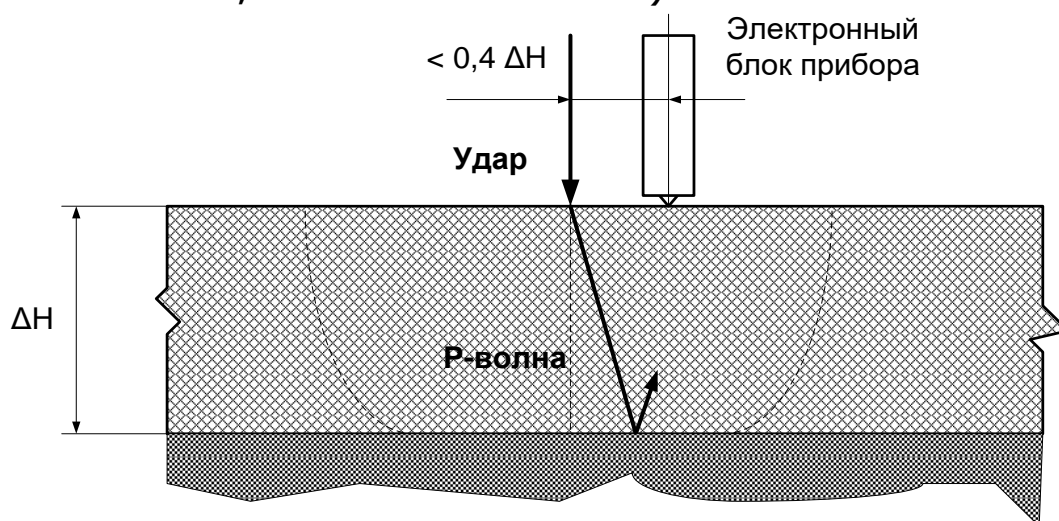


Рисунок 29 – Ориентация ударного элемента и электронного блока прибора при измерениях

Нажмите на кнопку разрешения передачи результата измерений на корпусе ЭБ прибора и нанесите удар по объекту изме-

рений импактором с ударной головкой соответствующего диаметра. Отпустите кнопку разрешения передачи результата измерений для исключения передачи результата измерений от случайного срабатывания виброакустического датчика электронного блока при его перемещении на другое место.

Визуально оцените полученный временной сигнал на наличие полезных составляющих, пригодных для дальнейшего анализа. В случае наличия большого количества случайных выбросов измените порог срабатывания в параметрах настройки и проведите повторное измерение. После завершения необходимых измерений нажмите клавишу «Стоп» в приложении на ПЛК (рис. 30).

В рамках временного проекта произведите серию пробных ударов в ручном режиме, правильно подобрав настройки процесса регистрации для получения устойчивой регистрации сигнала. Наблюдая за формой полученных сигналов, при необходимости подберите коэффициент усреднения и оцените необходимость применения фильтра высоких частот.

Проведите пробные удары импакторами с головками различных диаметров.

Добейтесь наиболее приемлемого результата.

После подбора параметров регистрации удалите пробные удары во временном проекте и перейдите в основной проект регистрации.

При проведении измерений на поверхности с большой площадью и большом количестве ожидаемых результатов измерений, в меню «Проект» введите имя проекта, задайте тип проекта «Серия измерений на поверхности» и другие параметры проекта (геометрию объекта, шаг сетки, скорость звука в материале\*). Сохраните проект.

Перейдите в автоматический режим и применив все ранее подобранные настройки, проведите серию измерений.

---

\* Может быть введено справочное значение скорости звука для испытуемого материала. При необходимости, скорость звука в материале может быть определена любым доступным способом (например, ультразвуковым измерением (прибором «Пульсар-2» или аналогичным прибором) или расчетом по известной толщине образца, см. п 6.5.3.3).



Рисунок 30 – Записанный сигнал после проведения измерения

При множественных измерениях (серии) на протяженной поверхности для удобства работы рекомендуется использовать меню «Сетка» (п.б.4.8).

При проведении измерений на объектах с различными акустическими свойствами необходимо учитывать определенные ограничения по пределам обнаружения при использовании ударных элементов различного диаметра (табл. 7).

Таблица 7 – Ограничения по пределам обнаружения

Условия испытаний					Пределы обнаружения		
Диаметр шара	Время контакта	Мин. част.	Макс. част.	Мин. длина волны	Мин. обнаруж. размер	Мин. глубина обнаруж.	Макс. глубина обнаруж.
$D_i$	$t_c$	$F_{min}$	$F_{max}$	$\lambda_{min}$	$L_{min} = \lambda_{min}$	$d_{min} = 0.5\lambda_{min}$	$d_{max} = 4\lambda_{min}$
[мм]	[мкс]	[кГц]	[кГц]	[мм]	[мм]	[мм]	[мм]
4,5	19,4	8,2	65,4	61,9	62	31	247
8	34,4	4,5	36,34	110,1	110	55	440
15	64,5	1,2	19,38	206,4	220	110	881

В таблице приведены расчетные значения при  $V=4000$  м/с

### 6.5.3.2 Измерения в режиме «АВТО»

В данном режиме приложение на ПЛК, используя ожидаемое значение измеряемой толщины объекта, автоматически подбирает значения коэффициента усреднения и частоты фильтра, что в некоторых случаях позволяет значительно сократить трудозатраты на выполнение обследования объекта.

Для запуска измерений в данном режиме необходимо перейти на вкладку «АВТО». На экране измерения в поле «Проектная толщина, мм» указать ожидаемую или проектную толщину обследуемого объекта. В поле «Скорость, м/с» ввести новое (при необходимости) или скорректировать текущее значение скорости звука, установленное ранее в настройках проекта. Запустить процесс измерения.



Рисунок 31 – Экран вывода графика амплитудного спектра сигнала в режиме «АВТО»

Результатом измерения будет являться уточненное значение толщины объекта контроля в строке результатов или глубина залегания дефекта в исследуемом объекте (при наличии).

### 6.5.3.3 Измерения в режиме «Расчет скорости»

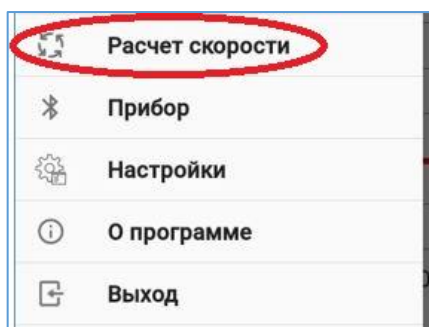


Рисунок 32

Меню «Расчет скорости» вызывается из главного меню нажатием на одноименную строку.

Перед запуском измерений необходимо в текущем окне (в строке параметров конструкции) ввести толщину объекта контроля, полученную при

непосредственном измерении и диапазон возможных скоростей звука в материале конструкции.

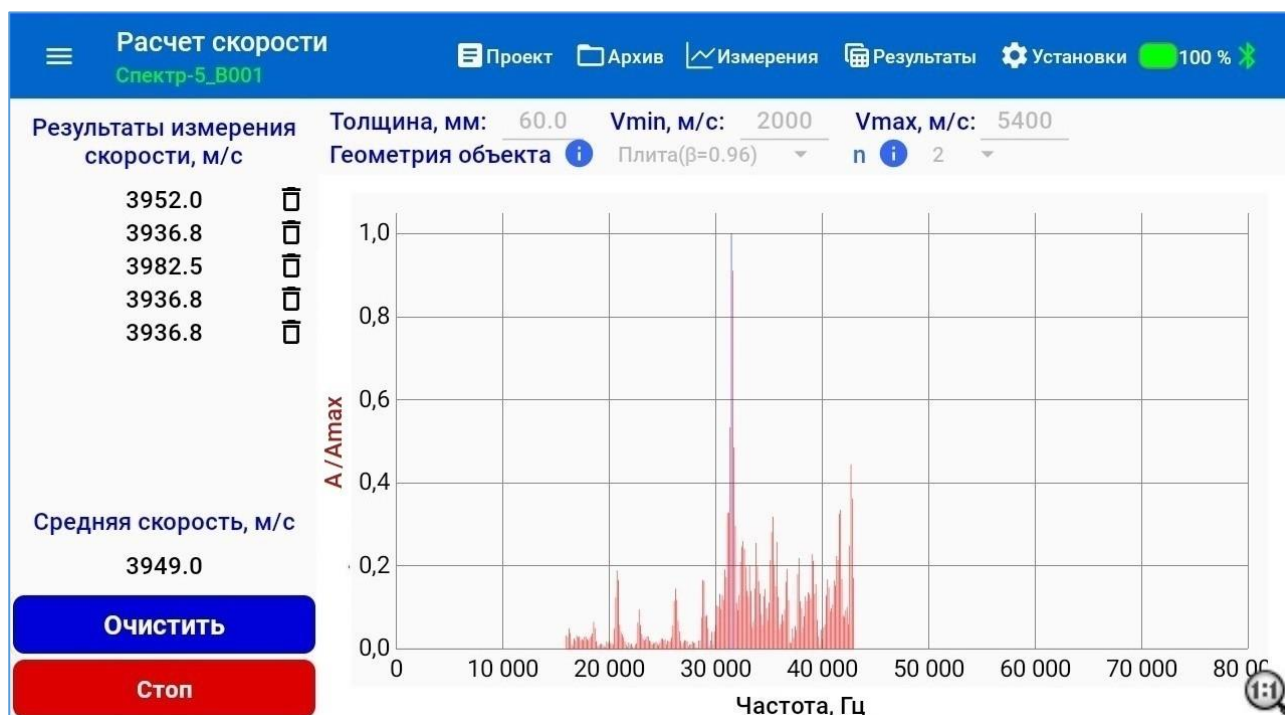



Рисунок 33 – Экран вывода графика амплитудного спектра сигнала в режиме «Расчет скорости»

Запустить измерение нажатием клавиши **Старт**, нанести не менее 5 ударов и оценить повторяемость измерений скорости. В случае значительных отклонений отдельных измерений от среднестатистического, эти измерения могут быть удалены нажатием на кнопку  напротив каждого результата измеренного в серии.

Полученное среднее значение скорости можно использовать в качестве проектного значения, задаваемого вручную в меню параметров проекта, создаваемого для последующего обследования конструкции.

#### 6.5.4 Просмотр и сохранение результатов измерений

Для просмотра результатов измерений в любом сохраненном проекте следует перейти на вкладку «Архив» и выбрать необходимый проект кликом по заголовку проекта.

Просмотреть результаты в табличном виде и в случае сомнений в каком-либо полученном результате измерения, перейти на экран графической визуализации сигнала.

В случае неоднозначного результата, при наличии нескольких максимумов спектра, выбрать один из них, для которого измеренное значение толщины наиболее близко к проектной толщине объекта. Сохранить новый результат.

#### 6.5.5 Оценка результатов

При оценке полученного результата важно правильно оценить подбор настроек при пробных ударах.

С этой целью должна оцениваться форма сигнала, получаемого после каждого пробного удара.

Полезный для дальнейшего анализа сигнал должен содержать шумоподобные, низко- и высокочастотные гармонические составляющие с большой амплитудой и не должен содержать случайных выбросов (рис. 34, рис. 35).

Величины вычисленных значений частоты и толщины должны лежать в диапазоне значений, допустимых по условиям измерений.

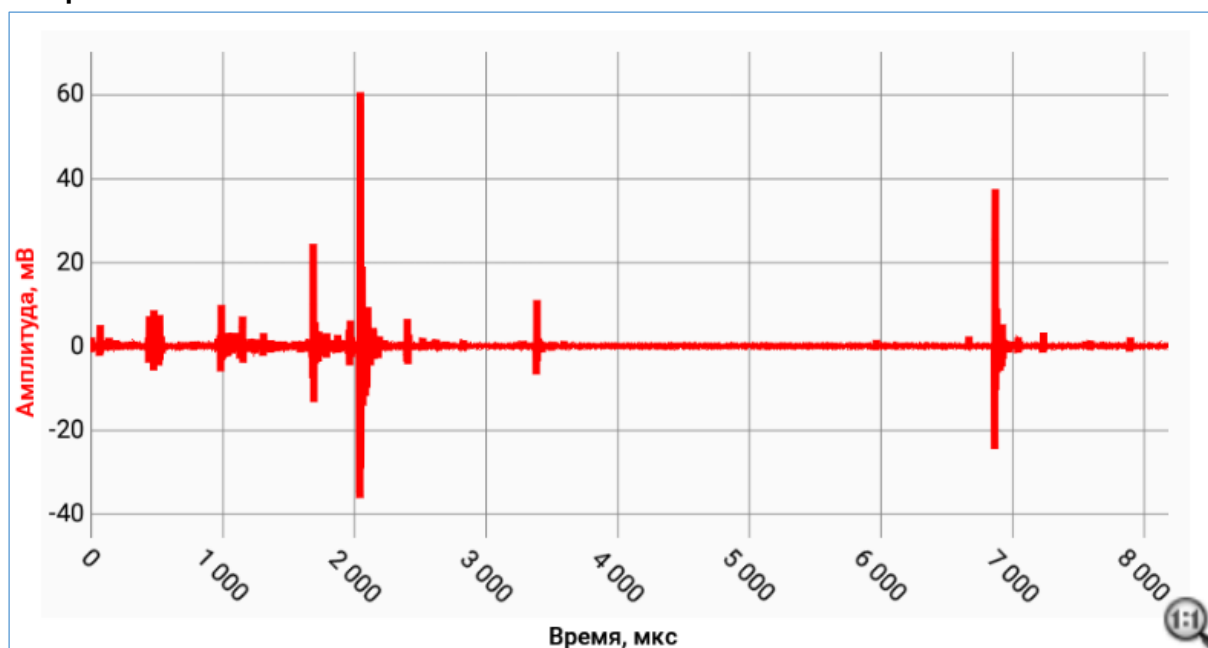


Рисунок 34 – Пример некорректного сигнала с удаленной постоянной составляющей

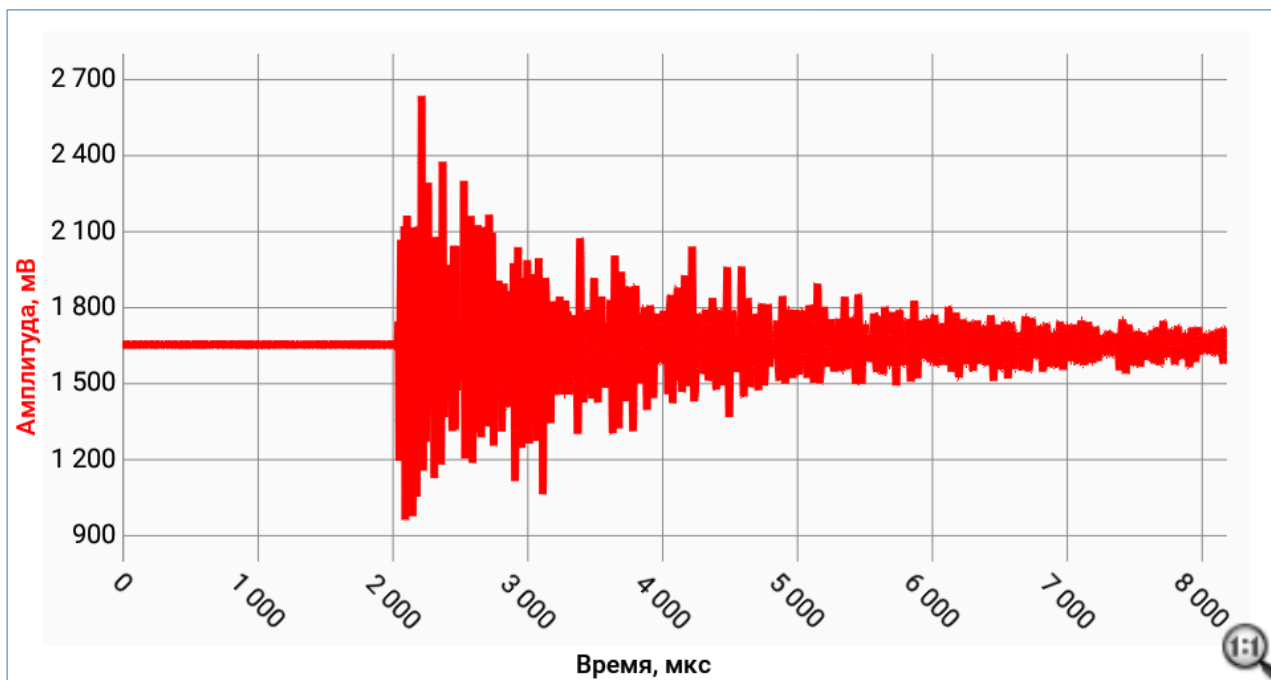


Рисунок 35 – Пример корректного сигнала

**Примеры** сигналов, полученных при простукивании бетонного куба с размером ребра 100 мм.

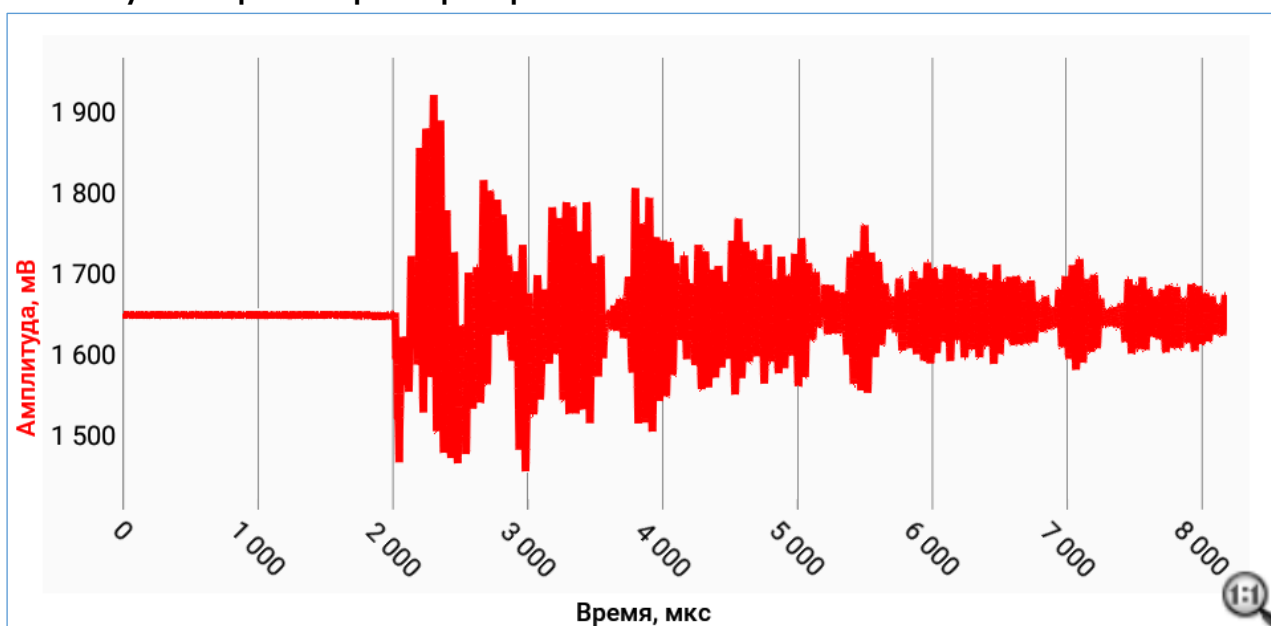


Рисунок 36 – Временная характеристика сигнала,  
Объект – Куб 100 мм

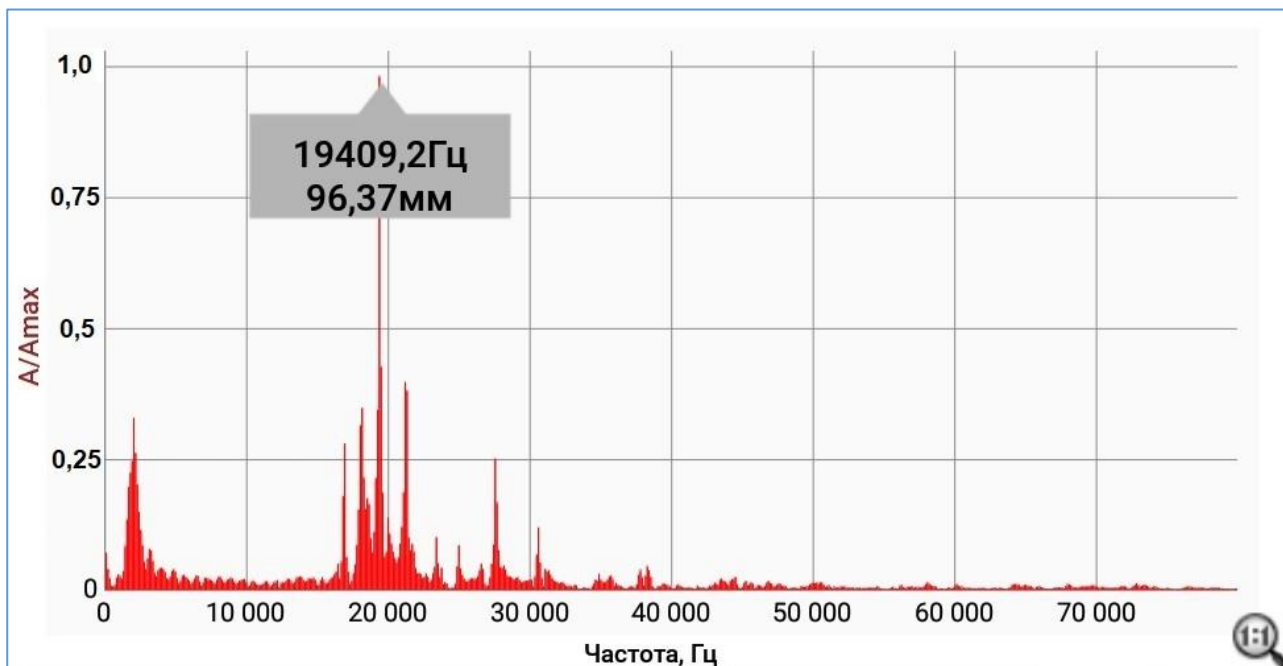


Рисунок 37 – Спектральная частотная характеристика сигнала

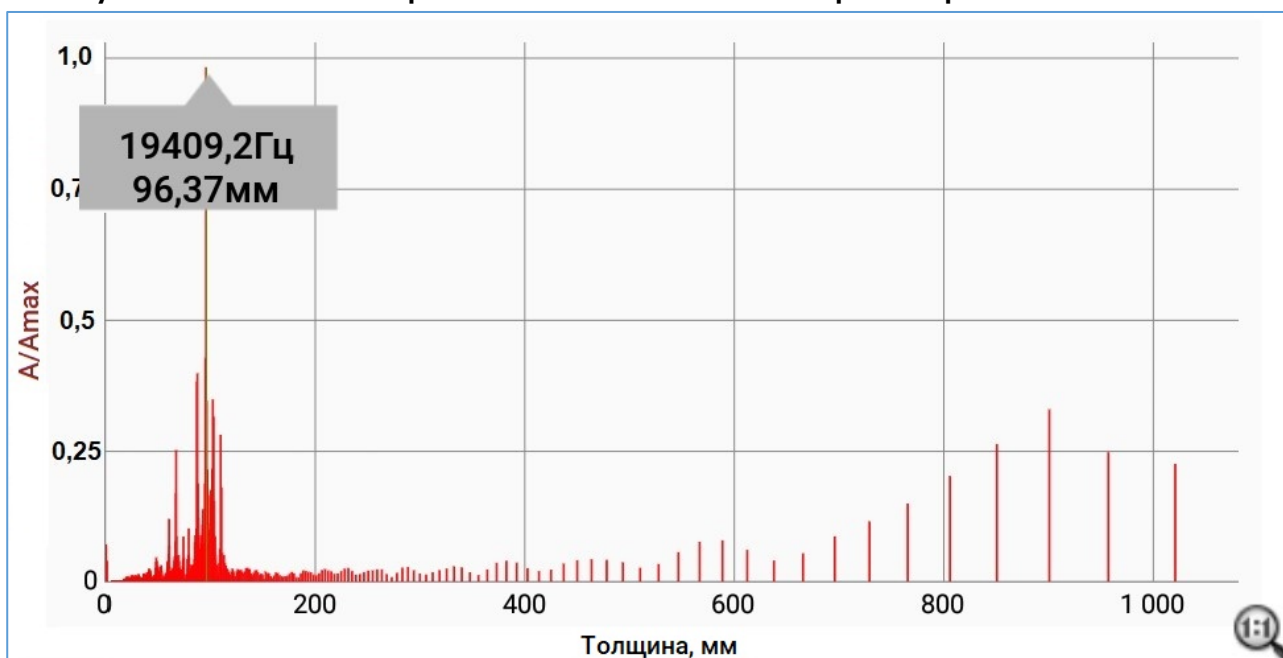


Рисунок 38 – Спектральная частотная характеристика сигнала с определением толщины объекта по максимальному соотношению  $A/A_{max}$

## 6.5.6 Использование инструментов обработки результатов

### 6.5.6.1 Удаление постоянной составляющей

Использование механизма удаления постоянной составляющей в записанном сигнале возможно только в случае наличия этой составляющей в записанном сигнале. Удаление составляющей производится по нажатию клавиши Убрать ПС.

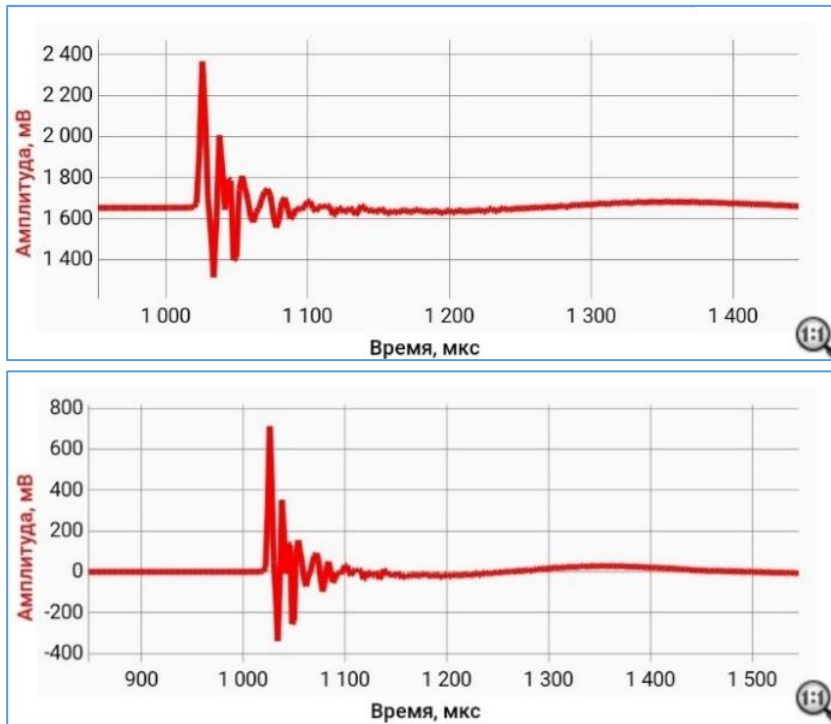


Рисунок 39 – Пример удаления постоянной составляющей  
6.5.6.2 Усреднение сигнала

При наличии в форме сигнала явно выраженной НЧ огибающей, необходимо включить усреднение сигнала и выбрать коэффициент в диапазоне  $N=2...10$ . Экспериментальным путем подобрать  $N$  таким образом, чтобы НЧ огибающая была максимально подавлена.

Необходимо учитывать, что после включения разрешения усреднения, в графике сигнала на экране автоматически удаляется постоянная составляющая. При этом, если эта составляющая имеется в записанном wav-сигнале, она в нем сохраняется.

**Пример** удаления НЧ огибающей из сигнала, полученного при простукивании асфальта с контрольной толщиной 72 мм.

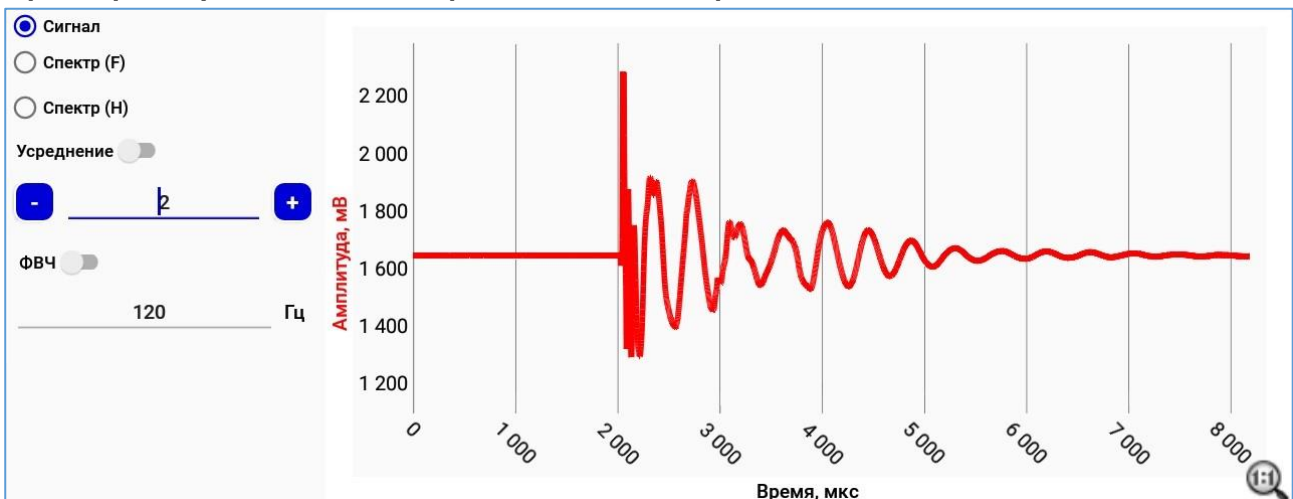


Рисунок 40 – Изначальный сигнал до применения усреднения

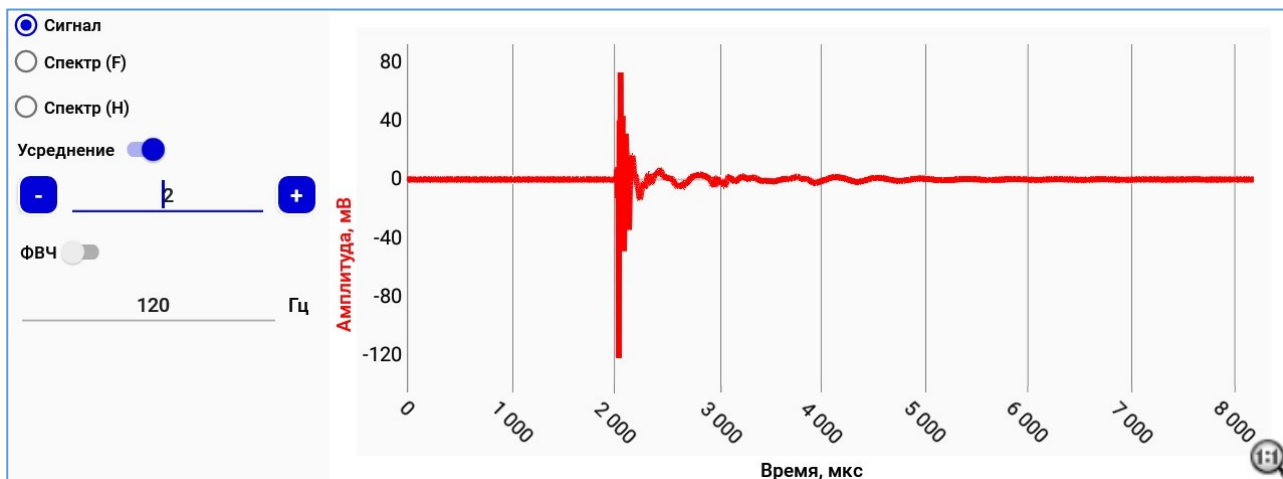


Рисунок 41 – Сигнал с применением усреднения N=2

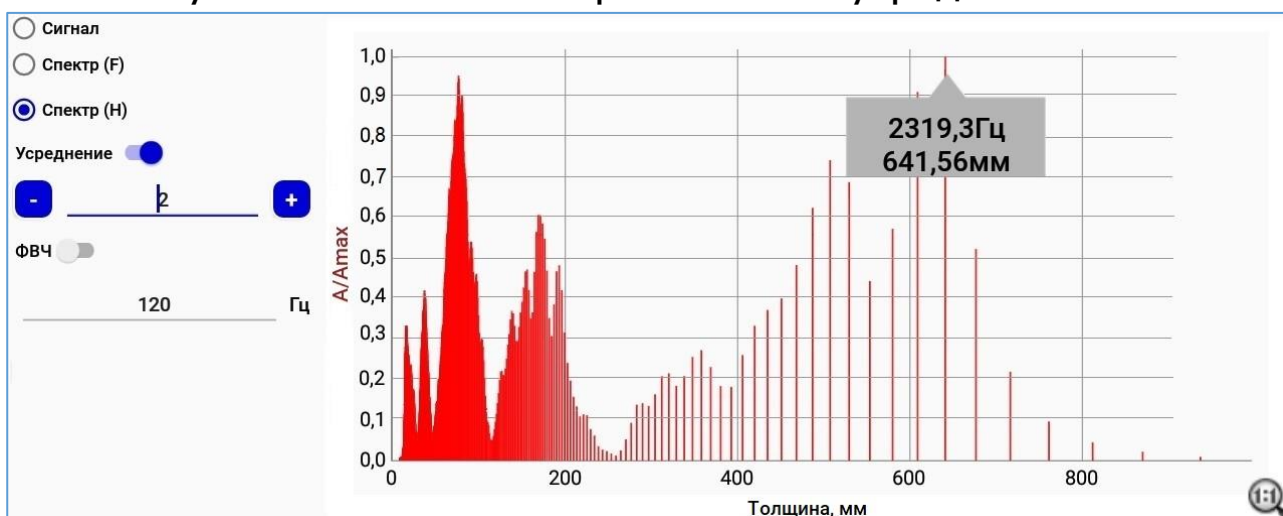


Рисунок 42 – Спектральная характеристика сигнала с определением толщины объекта по максимальному соотношению  $A/A_{max}$  (вид – первый максимум спектра)

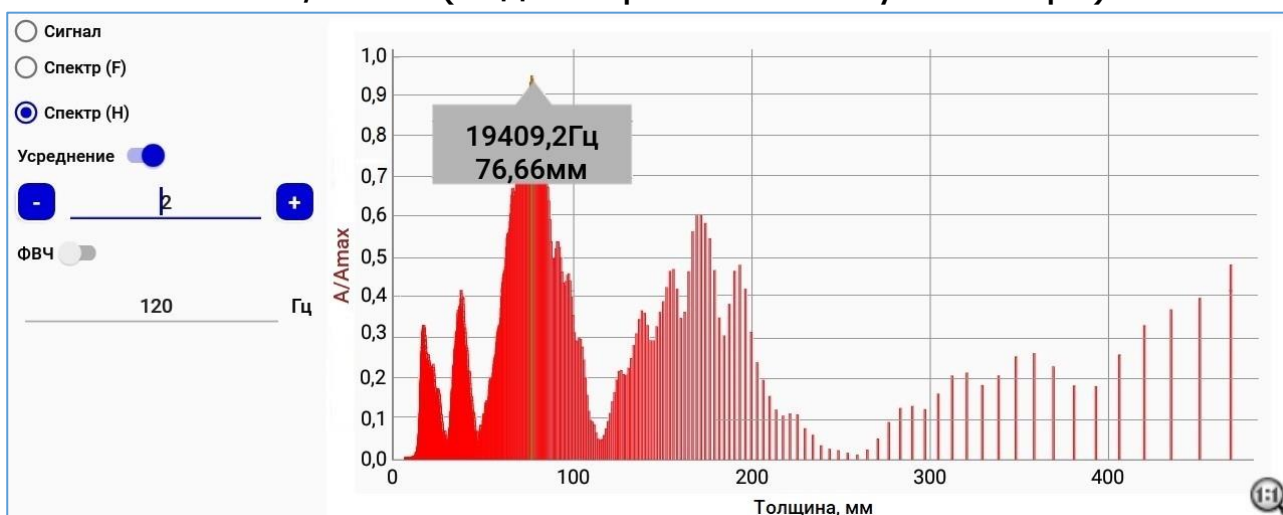


Рисунок 43 – Спектральная характеристика сигнала с определением толщины объекта по максимальному соотношению  $A/A_{max}$  (вид – второй максимум спектра)

### 6.5.6.3 Использование ФВЧ

На спектральной характеристике сигнала (рис. 42) можно увидеть, что максимум амплитудного спектра соответствует вычисленной толщине асфальта 641,56 мм. Но это значение находится далеко за пределом проектного значения и пределом «здравого смысла».

В данном случае, использование фильтра высоких частот с полосой среза 3500 Гц позволяет отсечь «ложный» максимум спектра. После применения фильтра определяется новый максимум амплитудного спектра (рис. 44), соответствующий толщине 76,66 мм, что близко по значению к толщине контрольного образца (погрешность определения толщины 6,5 %).

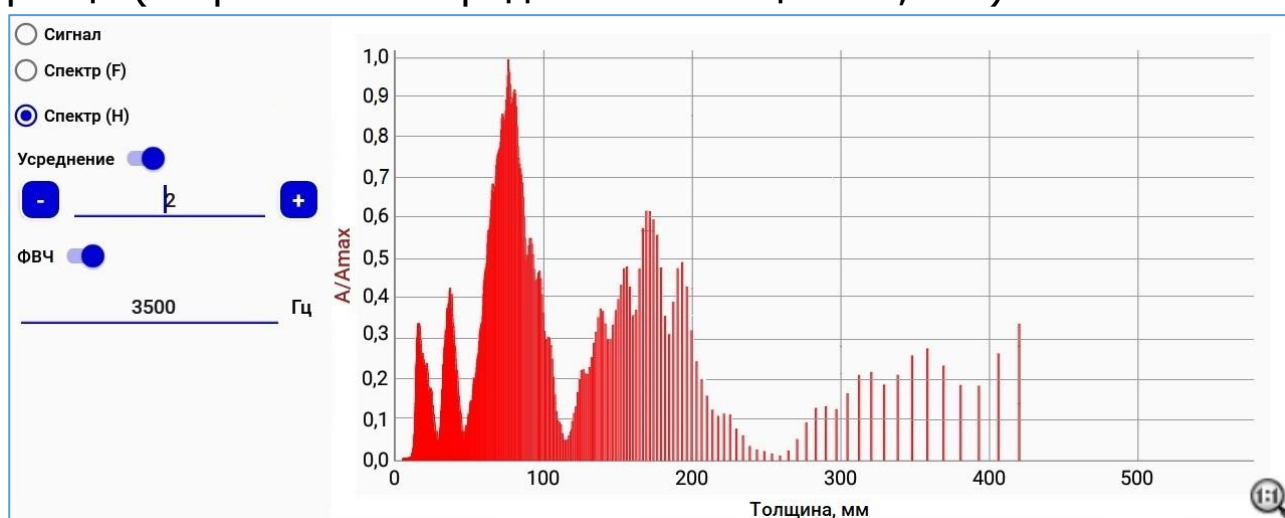


Рисунок 44 – Спектральная характеристика сигнала с определением толщины объекта по максимальному соотношению  $A/A_{max}$  и применением ФВЧ

После завершения обработки сигнала для сохранения окончательного результата в памяти проекта необходимо нажать на клавишу «Выбрать результат».

### 6.5.6.4 Выделение участка, содержащего полезный сигнал

Если по условиям измерений допускается снижение точности измерений (как правило, это допустимо при оценке объектов с небольшими толщинами), растяните исходную диаграмму (рис. 45) с целью выделения участка, содержащего полезный сигнал.

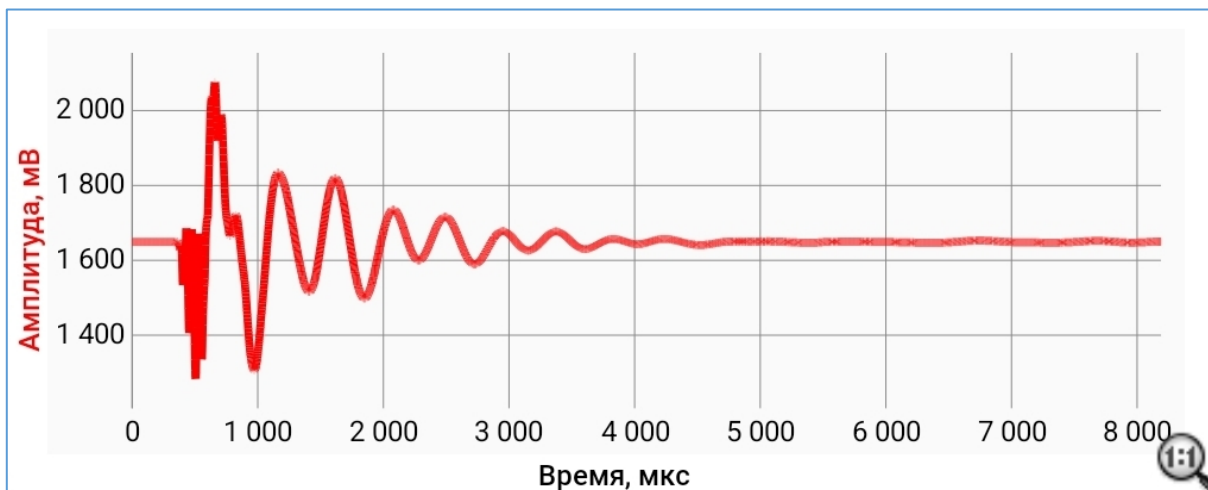


Рисунок 45 – Исходная амплитудная характеристика измеренного сигнала

При этом, для увеличения спектрального разрешения обязательно захватите весь начальный участок временной диаграммы (рис. 46). Нажмите на клавишу «Выбрать участок».

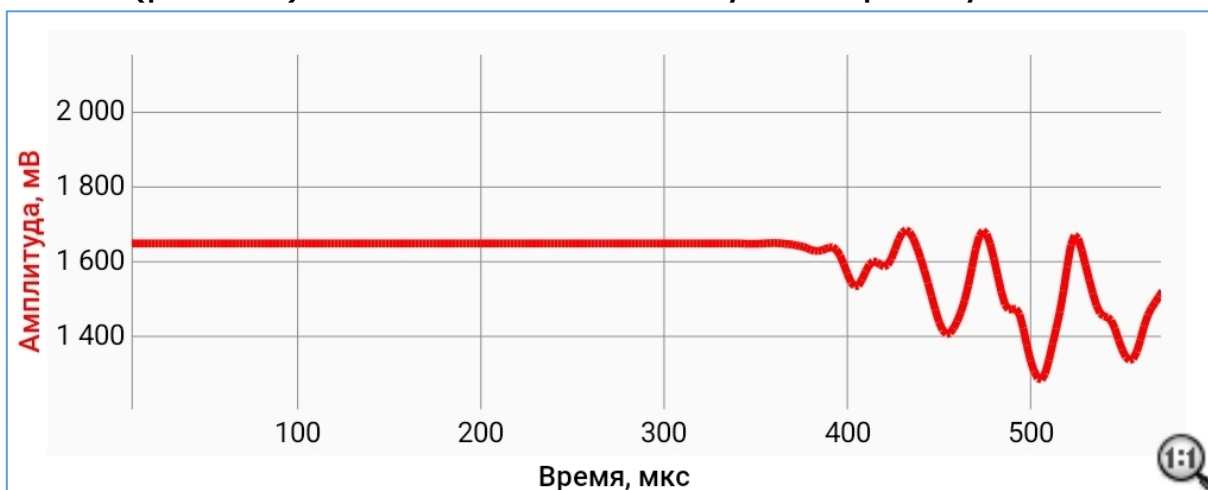


Рисунок 46 – Захваченный участок временной диаграммы

Приложение на ПЛК произведет обработку выбранного участка амплитудно-временной диаграммы по алгоритму дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с выводом на соответствующие экраны спектральных характеристик, определенные для данного целевого участка, и произведет автоматическое вычисления частоты и толщины для доминирующей моды спектра (рис. 47).

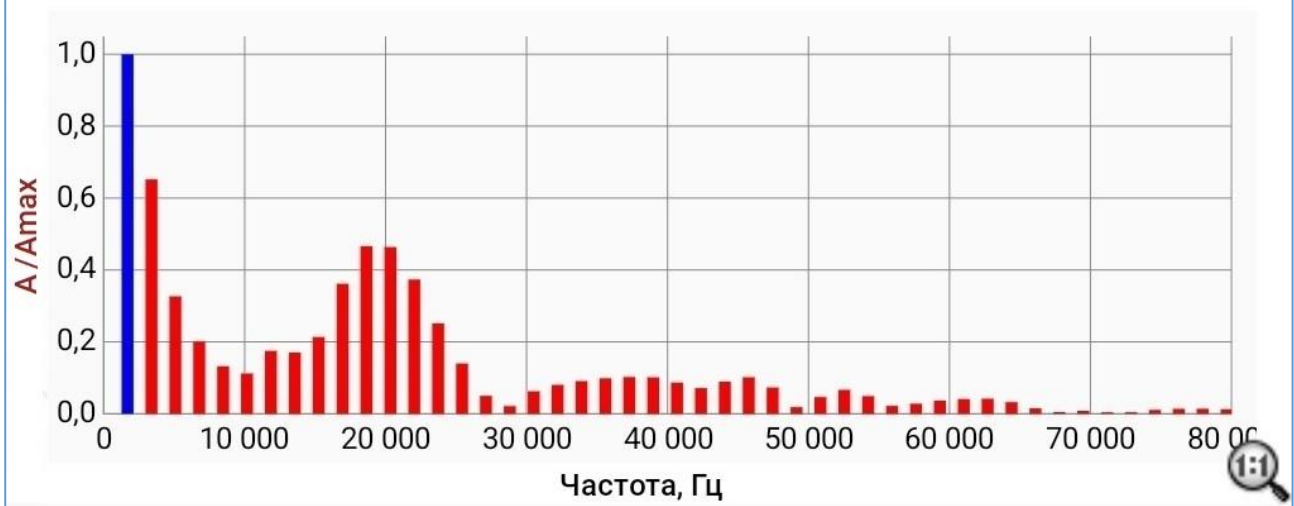


Рисунок 47 – Спектральная характеристика захваченного участка временной диаграммы

### **ВНИМАНИЕ!**

В связи с тем, что время необходимое для ДПФ существенно превышает время необходимое для быстрого преобразования Фурье (БПФ), использование временного участка сигнала большой длительности может привести к значительным задержкам в отображении спектрограммы.

При необходимости, значение спектрального максимума можно изменить вручную выбором соответствующей линии спектра и сохранением результата при нажатии на клавишу «Выбрать результат».

Как видно из рисунка 47 для образца асфальта известной толщины в 74 мм, вычисленное приложением значение 677,2 мм находится за пределами «здорового смысла». Вид полученной спектрограммы позволяет судить о том, что в данном случае необходимо применить дополнительные инструменты обработки.

После использования фильтра высоких частот (ФВЧ) с частотой среза 10 кГц в спектрограмме выделяется искомая составляющая (рис. 48).

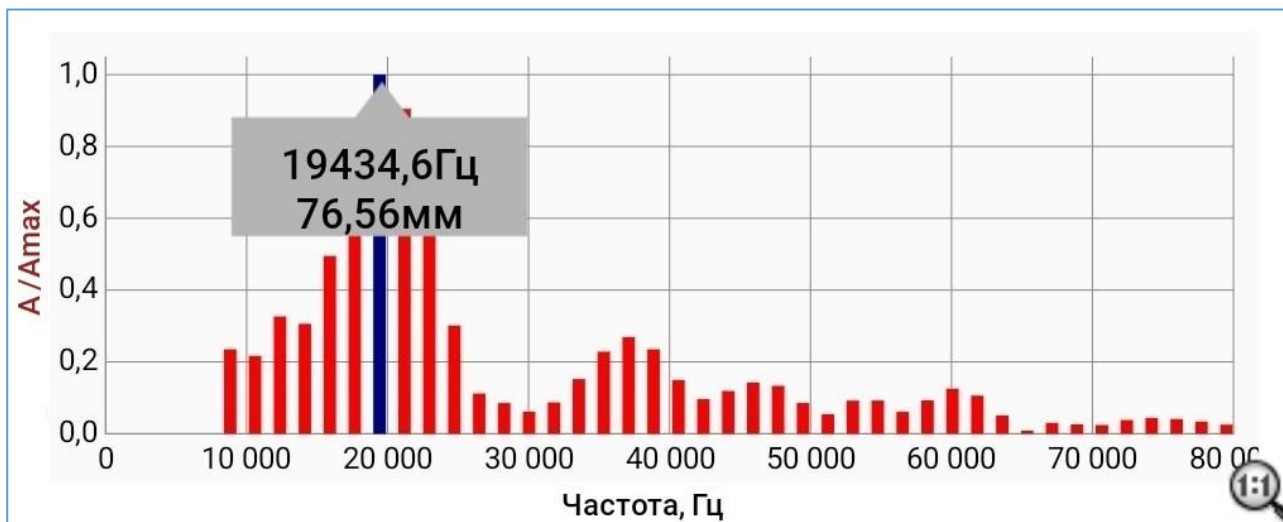


Рисунок 48 – Спектральная характеристика захваченного участка временной диаграммы после применения ФВЧ 10 кГц

Нажатием на клавишу «Выбрать результат» производится замена вычисленной толщины в итоговом результате (рис. 49).

Кроме того, это значение сохраняется и в заголовке удара в списке ударов измерительного проекта (экран «Архив»/Удары).

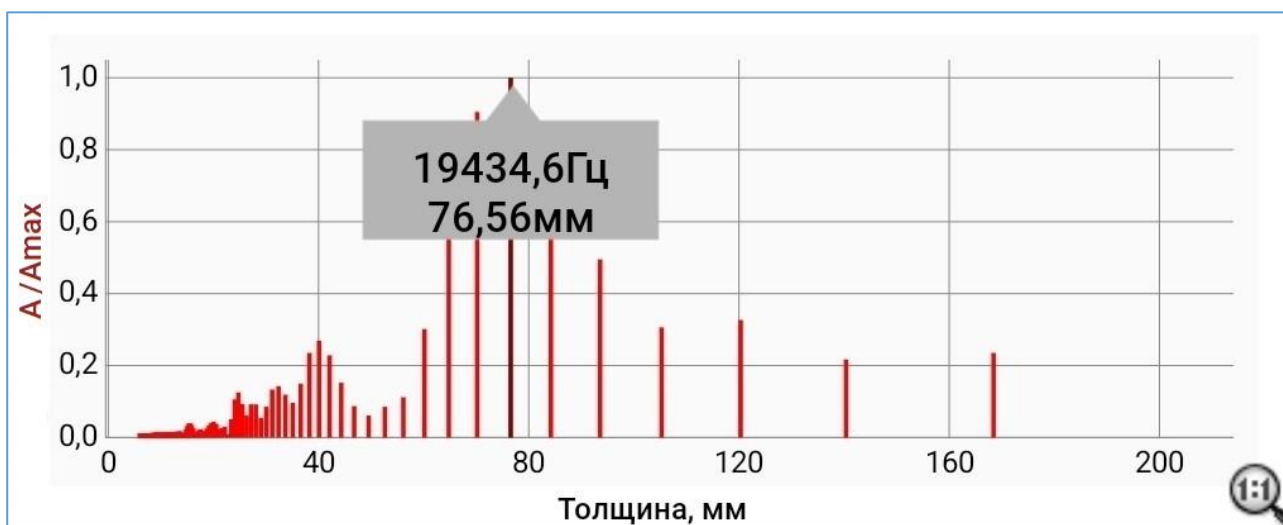


Рисунок 49 – Итоговая спектральная характеристика в диапазоне определяемых толщин

## **6.6 Представление результатов испытаний**

После полного завершения испытаний оператору предоставляется возможность сформировать протокол испытаний в формате PDF, для возможности его дальнейшей распечатки на компьютере или пересылке электронной почтой. Команда экспорта протокола результатов испытаний «Экспорт в pdf» вызывается из вложенного меню заголовков архивов процессов (п.6.4.6).

Протокол сохраняется в папке Spectr5/Archive/ с именем: Отчет\_ДД\_ММ\_ГГГГ\_ЧЧ\_ММ\_00.pdf.

В протокол испытаний включена следующая информация:

- Настройки и параметры измерительного проекта:

- 1) дата и время создания измерительного проекта;

- 2) имя (название) измерительного проекта;

- 3) тип измерительного проекта (серия измерений на поверхности или группа не связанных измерений);

- 4) геометрия объекта (сечение испытываемого объекта – квадрат, цилиндр, плита или объект с контрольным образцом известной толщины);

- 5) коэффициент отражения (2 или 4);

- 6) скорость звука в материале объекта;

- 7) Длина объекта по горизонтали (Lx);

- 8) Длина объекта по вертикали (Ly);

- 9) Шаг сетки по оси X;

- 10) Шаг сетки по оси Y;

- 11) Наименование организации, проводившей измерения;

- 12) ФИО оператора, проводившего испытания.

- Результаты испытаний в табличном виде;

- Карта распределения толщин объекта в местах нанесения контрольных ударов.

Форма протокола испытаний приведена в приложении А.

## **7 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ**

7.1 Прибор требует аккуратного и бережного обращения для обеспечения заявленных технических характеристик.

7.2 Прибор необходимо содержать в чистоте, оберегать от падений, ударов, вибрации, пыли и сырости. Периодически, не реже одного раза в 6 месяцев, удалять пыль сухой и чистой фла-

нелю и производить визуальный осмотр всех элементов прибора, уделяя особое внимание отсутствию грязи в разъемах, отсутствию повреждений корпуса ЭБ.




**Внимание!** Не допускается производить наклейку транспортных и иных этикеток на корпус ЭБ прибора и ПЛК.

7.3 При завершении измерений прибор необходимо очистить от пыли, грязи, частиц грунта и т.п. с помощью влажного куска ткани. Твердые загрязнения необходимо удалять с помощью спирта или бензинового раствора. Следы органических загрязнений удалять при помощи очищающего аэрозоля, например, Cramolin Contact CLEANER.

7.4 Для снижения расхода энергии встроенного элемента питания, рекомендуется ЭБ прибора включать непосредственно перед началом регистрации и отключать сразу после выполнения измерений.

7.5 Аккумуляторная батарея ПЛК достаточно быстро разряжается в режиме ожидания. Скорость разряда аккумуляторной батареи зависит от количества запущенных приложений, включенного дисплея.

Для экономии заряда рекомендуется:

- 1) не запускать на ПЛК приложения и не включать модули (Wi-Fi и т.д.), кроме модуля Bluetooth, необходимого для связи с ЭБ;
- 2) в случае перерыва в работе с ЭБ выключать дисплей (нажатием кнопки «» на ПЛК);
- 3) при длительном перерыве в работе, а также при транспортировке и хранении рекомендуется полностью выключать ПЛК.

7.6 Если ПЛК не реагирует на кнопку включения питания или выключается сразу после включения, зарядите его аккумулятор.

7.7 Перед началом проведения измерений убедиться, что аккумуляторная батарея ЭБ прибора полностью заряжена, во избежание остановки измерений во время запущенного процесса измерений.

Если при нажатии на кнопку прибора (или в процессе работы) красный светодиод включается 1 раз в секунду, прибор

индицирует, что элемент питания разряжен и аккумуляторную батарею необходимо зарядить во избежание отключения прибора.

Подключите прибор через поставляемое зарядное устройство к сети напряжением 220 В, к работающему компьютеру кабелем USB или внешнему аккумулятору. Заряд аккумулятора начнется автоматически. Допускается использование прибора по назначению во время заряда встроенной аккумуляторной батареи ЭБ от внешнего аккумулятора.



**Внимание!** Запрещается производить заряд аккумулятора с помощью зарядного устройства, не входящего в комплект поставки.

7.8 Прибор является сложным техническим изделием и не подлежит самостоятельному ремонту. При всех видах неисправностей необходимо обратиться к изготовителю.

## **8 МАРКИРОВКА И ПЛОМБИРОВАНИЕ**

8.1 Маркировка прибора содержит:

- товарный знак предприятия-изготовителя;
- условное обозначение прибора;
- заводской номер прибора;
- год выпуска.

8.2 На прибор, прошедший приемо-сдаточные испытания ставят пломбу.

## **9 УПАКОВКА**

Для обеспечения сохранности прибора и комплекта принадлежностей при транспортировании применяется укладочный кейс со средствами амортизации из поролона, категория упаковки КУ-1 по ГОСТ 23170.

Масса прибора в кейсе не превышает 3,5 кг.

Габаритные размеры прибора в кейсе 395×310×150 мм.

Эксплуатационная документация упакована в пакет, изготовленный из полиэтиленовой пленки. Маркировка упаковки производится в соответствии с ГОСТ 14192.

## **10 ПРАВИЛА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ**

10.1 Транспортирование приборов должно осуществляться в упакованном виде любым крытым видом транспорта (авиатранспортом - в отапливаемых герметизированных отсеках) в соответствии с правилами перевозок грузов, действующими на данном виде транспорта.

10.2 Расстановка и крепление ящиков с приборами в транспортных средствах должны исключать возможность их смещения и ударов друг о друга.

10.3 Погрузочно-разгрузочные работы должны осуществляться в соответствии с транспортной маркировкой по ГОСТ 14192.

10.4 Температурные условия транспортирования приборов от минус 20 °С до плюс 45 °С.

10.5 Упакованные приборы должны храниться в условиях, установленных для группы 1 по ГОСТ 15150.

## **11 УТИЛИЗАЦИЯ**

Специальных мер для утилизации материалов и комплектующих элементов, входящих в состав прибора, кроме литиевых аккумуляторов, не требуется, так как отсутствуют вещества, представляющие опасность для жизни, здоровья людей и окружающей среды после окончания срока службы.

Литиевые аккумуляторные батареи утилизируют в установленном порядке.

## 12 ГАРАНТИЙНЫЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВА

12.1 Предприятие-изготовитель гарантирует соответствие выпускаемых приборов требованиям технических условий. Гарантийный срок - 18 месяцев с момента продажи прибора.

12.2 Предприятие-изготовитель обязуется в течение гарантийного срока безвозмездно производить ремонт прибора, если он выйдет из строя.

12.3 Гарантийное обслуживание осуществляется в месте нахождения предприятия-изготовителя. Срок гарантии на прибор увеличивается на время его нахождения в ремонте.

Изделие предъявляется в гарантийный ремонт в следующей комплектации: электронный блок прибора «СПЕКТР-5», планшетный компьютер с установленным приложением, набор импакторов (с диаметрами круглых головок 4.5, 8 и 15 мм), руководство по эксплуатации НКИП.408465.100 РЭ, кейс, транспортная упаковка, обеспечивающая сохранность и надлежащую транспортировку оборудования.



**Внимание!** Оборудование для гарантийного ремонта должно быть предоставлено в чистом виде.

12.4 Срок проведения ремонтных работ - 30 рабочих дней с момента получения прибора предприятием-изготовителем.

12.5 Срок замены прибора - 30 рабочих дней с момента получения прибора предприятием-изготовителем при наличии существенного недостатка.

12.6 Недополученная в связи с неисправностью прибора прибыль, транспортные расходы, а также косвенные расходы и убытки не подлежат возмещению.

12.7 Гарантия не распространяется на:

- планшетный компьютер;
- литиевые аккумуляторы;
- внешний аккумулятор, зарядное устройство;
- быстроизнашивающиеся запчасти и комплектующие (соединительные кабели, разъёмы и т.п.);
- расходные материалы (карты памяти и т.п.).

12.8 Гарантийные обязательства теряют силу, если:

- имеются следы вскрытия (разборки), нарушена заводская пломба;

- прибор подвергался механическим, тепловым или атмосферным воздействиям;

- прибор вышел из строя из-за попадания внутрь посторонних предметов, жидкостей, агрессивных сред;

- на приборе удален, стерт, не читается или изменен заводской номер.

12.9 Гарантийный ремонт прибора осуществляет ООО НПП «Интерприбор»: 454080, Челябинск, а/я 12771, бесплатные звонки по России 8-800-775-05-50, тел. (351) 729-88-85.

### **13 НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящем РЭ использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.2.007.0-75 Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.

ГОСТ 14192-96 Маркировка грузов.

ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

ГОСТ Р 52931-2008 Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия.

ГОСТ Р 71733-2024 Строительные работы и типовые технологические процессы. Контроль качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов.

ASTM C1383-15 Стандартный метод испытаний для измерения скорости Р-волны и толщины бетонных плит методом ударного эхо (Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method).

## 14 КОМПЛЕКТНОСТЬ

Электронный блок прибора диагностики элементов строительных конструкций и дорожных покрытий СПЕКТР-5, шт.	1
Планшетный компьютер с операционной системой «Андроид» и установленным приложением, комплект	1*
Набор импакторов (с диаметрами круглых головок 4.5, 8 и 15 мм), комплект	1
Зарядное устройство USB (2А), шт.	1
Кабель USB-A-mini B, шт.	1
Защитной чехол (подвесная рамка) для планшетного компьютера, шт.	1
Руководство по эксплуатации НКИП.408465.100 РЭ, экз.	1
Справочное руководство по методике выполнения измерений при обследовании объектов НКИП.408465.100 И, экз.	1
Внешний аккумулятор (Powerbank), шт.	1**
Кейс, шт.	1

---

\* В комплекте: **зарядное устройство, кабель**, упаковка, руководство пользователя (гарантийный талон, паспорт)

\*\* По заказу

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Протокол испытаний

#### *Настройки и параметры измерительного проекта:*

Дата/время создания проекта	ДД-ММ-ГГГГ ЧЧ:ММ:00
Имя измерительного проекта	...
Тип проекта	...
Геометрия объекта	...
Коэффициент отражения (n)	2/4
Скорость звука в материале объекта (V), м/с	...
Длина объекта по горизонтали (Lx), м	...
Длина объекта по вертикали (Ly), м	...
Шаг сетки по оси X, см	...
Шаг сетки по оси Y, см	..
Наименование организации, проводившей испытания	<i>Заполняется вручную</i>
ФИО оператора, проводившего испытания	<i>Заполняется вручную</i>

#### *Результаты испытаний:*

№ удара	Координата X, см	Координата Y, см	Частота Р-волны (Fmax), Гц	Толщина объекта (H), мм
1				
...				
H min =				
H max =				

#### *Карта распределения толщин*

...

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

**Средние значения скоростей распространения продольных ультразвуковых волн в некоторых твердых материалах, м/с**

Асфальт	2700...3900
Базальт	5930
Бетон класса В12,5	4050**
Бетон класса В22,5	4500**
Бетон класса В25	4580**
Бетон класса В35-40	4600**
Гипс	4790*
Гранит	4450
Известняк	6130*
Известняк 86	4640*
Мрамор	6150
Эпоксидная смола ЭД-5	2580

Зависимости изменения скорости ультразвука в бетоне от его влажности в водонасыщенных бетонах для классов В12,5 ... В 35-40 по прочности на сжатие описываются следующими эмпирическими уравнениями\*\*:

$$C_{В12,5} = 4050 + 2,85 W^{3,2};$$

$$C_{В22,5} = 4500 + 2,85 W^{3,2};$$

$$C_{В25} = 4580 + 2,85 W^{3,2};$$

$$C_{В35-40} = 4600 + 2,85 W^{3,2};$$

где  $W$  – влажность бетона по массе (0...6) %.

---

\* Для указанных материалов средние скорости ультразвука приведены для влажности  $W = 0$  %.

\*\* Получены в процессе экспериментальных исследований мелиоративно-строительной лабораторией ГНУ ПНИИЭМТ, удк 666.9.017:620.179

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### (справочное)

#### О выборе количества отсчетов (N) в выборке сигнала

Для обеспечения измерений частоты прибором в диапазоне от 1500 Гц до 65400 Гц частота сэмпирования в ЭБ прибора выбрана равной 500 кГц для смягчения требований к антиалиазинговому фильтру [4].

Разрешающая способность по частоте ( $\Delta f$ ) определяется по формуле:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N}, \quad (\text{В-1})$$

где:

$f_s$  – частота сэмпирования.

$N$  – количество отсчётов сигнала.

Таким образом, для повышения разрешающей способности по частоте при неизменной частоте сэмпирования АЦП необходимо увеличивать длительность записи сигнала.

Максимальная ошибка определения частоты прибором равна  $\pm \Delta f / 2$ .

В наихудшем случае, искомая доминирующая частота  $f_d$  вычисляется по формуле:

$$f_d = f_{n-1} + \Delta f / 2 = f_n - \Delta f / 2 \quad (\text{В-2})$$

При этом, из-за эффекта растекания спектра соседние линии спектра окажутся равны по амплитуде.

Исходя из заявленной относительной погрешности определения частоты в 3 %, для получения необходимой погрешности на минимальной измеряемой частоте 1500 Гц, в записанном сигнале необходимо сохранить 8192 отсчёта во временной области (при этом, погрешность измерения частоты составит  $\approx 2,1$  %).

Взаимосвязь рассчитываемой толщины (H) конструкции, покрытия или глубины дефекта выражается как:

$$H = \frac{\beta \cdot V}{n \cdot f_d}, \quad (\text{В-3})$$

где:

$\beta$  – коэффициент формы конструкции, полученный эмпирически [1], [2], [4].

$V$  – скорость распространения продольной волны в материале конструкции;

$n$  – коэффициент отражения здесь равен 2, т.к. в большинстве случаев исследований по методу импакт-эхо использование коэффициента 4 не имеет практического смысла [3];

$f_d$  – доминирующая частота.

Таким образом максимальная погрешность измерения толщины конструкции будет находится в области минимальных частот диапазона, или максимальных толщин.

При обследовании плоскопараллельных конструкций значительной толщины (более 500 мм) рекомендуется использовать 8192 отсчёта во временной области выборки сигнала.

При толщине конструкции (800...1000) мм – 16384 отсчёта во временной области выборки сигнала.

На основе рекомендаций ASTM C1383 [4] длительность записи сигнала во временной области для проведения исследований методом импакт-эхо может составлять 4096 отсчета при частоте сэмплирования 500 кГц, если линейные размеры конструкции по крайней мере в 20 раз больше, чем толщина конструкции. При анализе конструкций с меньшим соотношением линейных размеров к толщине, ASTM C1383 рекомендует сокращать длительность записи сигнала, во избежание регистрации поверхностных волн, отраженных от торцевых поверхностей конструкции. Сокращение длительности записи сигнала во временной области приведет к повышению погрешности измерения частоты. Однако этого эффекта можно избежать, увеличивая предзапись регистрируемого сигнала.

#### *Список литературы:*

1. "Transient response of thick circular and square bars subjected to transverse elastic impact."

2. "Transient response of thick rectangular bars subjected to transverse elastic impact."

3. "Ten Lectures on Impact-Echo." Article in Journal of Nondestructive Evaluation", January 2008 DOI: 10.1007/s10921-008-0036-2

4. ASTM C 1383, "Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates using the Impact-Echo Method."

**Редакция 2026 06 03**