

УДК 550.837.76

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ
В S-ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗОНЫ КОНТАКТА
“БЕТОННАЯ КРЕПЬ – ПОРОДНЫЙ МАССИВ”**

**В. Н. Опарин¹, Е. В. Денисова¹, А. П. Хмелинин¹,
К. О. Соколов², А. И. Конурин¹**

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: slimthing@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия,

²Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: k.sokolov@ro.ru, проспект Ленина 43, 677980, г. Якутск, Россия

Методом георадиолокации исследована трехслойная модель контакта “бетонная крепь – полость – породный массив” с учетом вариации толщины полости и электромагнитных свойств материалов, ее заполняющих. Численное моделирование основано на использовании метода конечных разностей во временной области. Результаты численного моделирования сопоставлены с результатами физического моделирования, реализованного с помощью георадара SIR-3000 и антенного блока Model52600 с рабочей частотой 2.6 ГГц (S-диапазона). Установлено влияние размеров полости в бетонной обделке и электромагнитных свойств заполняющего материала на точность измерения дальности до нижней границы полости, а также до неоднородности в виде металлической арматуры, расположенной непосредственно за полостью в породном массиве, и толщины самой полости.

Бетонная крепь, полость, зона контакта, георадар, метод конечных разностей во временной области, численная модель, электромагнитные свойства, радарограмма

DOI: 10.15372/FTPRPI20230602

Наличие различного типа дефектов в зоне контакта “бетонная крепь – породный массив”, таких как зоны обводнения, полости или пустоты, зоны нарушения сплошности и т. п., — серьезная угроза безопасности и долговечности эксплуатации горной выработки. Наиболее распространенный строительный дефект — полость или пустота. Под воздействием напряжений, термических деформаций в массиве горных пород дефекты могут привести к разрушению бетонной крепи горной выработки или попаданию в нее воды и, как следствие, к ухудшению ее качества. Важным условием дальнейшего функционирования бетонной крепи является своевременность выполнения ремонтных работ.

В настоящее время один из наиболее востребованных методов выявления поверхностных дефектов — визуальное обследование поверхности бетонной крепи. Но такой метод имеет некоторые недостатки — наличие труднодоступных мест (арки, боковые поверхности, плохая

освещенность и т. п.), также он достаточно трудоемкий, обнаруживает зоны разрушений только на поверхности крепи и не дает информации о состоянии массива за бетонной крепью или о дефектах, находящихся внутри нее.

СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ ДОСТИЖЕНИЙ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ И АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обнаружение скрытых дефектов в бетоне в виде полостей возможно только с помощью специального оборудования. Большое распространение получили методы неразрушающего контроля, например метод георадиолокации, который широко применяется в последнее время для решения этой задачи [1–5]. С помощью данного метода и технического средства, его реализующего — георадара, можно получить информацию о местоположении полости, ее толщине и типе заполняющего материала. Интерпретация результатов георадиолокационного сканирования поверхности бетонной крепи существенно усложняется, поскольку такая среда, как “бетонная крепь – полость – породный массив”, представляет собой многослойную структуру. Ввиду сложности проведения экспериментальных исследований многослойных структур с большим количеством переменных используется физическое моделирование на стендах в сочетании с численным моделированием известными методами: методом моментов (MoM), методом конечных элементов (FEM), методом конечных разностей во временной области (FDTD) или гибридными методами [6].

В [7] для георадара с частотой 500 МГц рассмотрена модель туннельной обделки с полостями, заполненными воздухом или водой; установлено влияние арматуры во вторичной обделке на точность обнаружения полостей. Так, увеличение размеров полости приводит к возрастанию ошибки при определении ее площади, а размеры толщины полости на отклик георадара не влияют, особенно при наличии в бетонной обделке арматуры. В [8] исследовано влияние диаметра арматуры, залитой в бетоне, на параметры отклика георадара с рабочей частотой 2600 МГц. Экспериментальные данные сравнивались с результатом моделирования в программной среде grgMax; здесь установлены линейные зависимости между диаметром арматуры и максимальной нормированной амплитудой волнового пакета, принятого георадаром. В [9] проведены георадарные исследования с рабочей частотой 400 МГц туннеля Nu Sa (Western Region of Yunnan Province, Китай), где обнаружение полостей подтверждалось с помощью бурения кернов; определены глубина залегания и площадь полостей. Проблема устранения размытости изображений георадара на рабочих частотах 200–400 МГц решалась в [10–12], что давало погрешность в измерении толщины полости 15 %. При использовании частот 900 и 1600 МГц соответствующие ошибки определения толщины уменьшались до 10 и 5 %.

В [13] исследован туннель с бетонной обделкой Кароор, Victoria, Канада. При рабочей частоте георадара 1000 МГц обследована поверхность туннеля протяженностью 17.58 км, а результаты обнаружения пустот подтверждались бурением кернов. Зоны обнаруживаемых неоднородностей, обладающих близкими к бетону электромагнитными свойствами, визуально не выделялись на радарограммах. С помощью георадарной съемки выявлено местоположение арматуры, деревянной опалубки, металлических опор, а также расположение и ориентация крупных разломов.

Модельные эксперименты по исследованию полостей разных размеров в бетонной конструкции выполнены в [14], установлены зависимости между толщиной полости и амплитудно-фазовыми характеристиками отраженного от нее сигнала. Предложен метод количественной оценки толщины полости на основе двухлучевой модели распространения микроволн, который повысил точность определения толщины на 54 %. Для реализации модельных экспериментов использовался георадар SIR-2000 с антенной Model5100 (1600 МГц).

В [15] построена физическая модель обделки туннеля размерами $4.2 \times 4.2 \times 2$ м, состоящая из первичной, вторичной облицовок и окружающего массива. Для имитации реальных сценариев в туннельном строительстве смоделированы и исследованы различные категории дефектов (расслоения, пустоты, в том числе и заполненные песком) на частотах 1000, 500, 250 МГц. Антенны частотой 1000 МГц позволяли определять неглубокие полости во вторичной обделке, но не обнаруживали полости в первичной. На частоте 250 МГц не обеспечивалась достаточная разрешающая способность георадара при определении полостей сантиметрового размера. Установлена частота георадара 500 МГц, на которой удалось обеспечить оптимальную разрешающую способность по глубине выявления дефектов в бетоне.

В [16] с помощью метода георадиолокации исследованы туннели Sigana и Torul (Турция) с различного рода повреждениями. Использовались антенны с частотами 500 и 800 МГц. В бетонной облицовке туннелей обнаружены зоны с трещинами и швами, которые со временем заполнялись водой и далее вода проникала в туннель. На радарограммах выявлены сигналы с повышенными значениями амплитуд, предположительно вызванные наличием арматуры в зоне контакта “бетонная крепь – скальная порода”.

Наиболее часто георадиолокационная диагностика состояния зоны контакта “бетонная крепь – породный массив” выполняется в диапазоне частот 400 – 900 МГц, что не всегда обеспечивает требуемую точность при определении характеристик различного рода дефектов, так как их размеры в большинстве своем значительно меньше длины электромагнитной волны, излучаемой георадаром. Это приводит к наложению сигналов, отраженных от нижней и верхней границ полости, и делает практически невозможным вычисление времени регистрации электромагнитной волны, отраженной от нее. Различные методы обработки данных георадиолокационного сканирования пустотных дефектов с целью повышения точности измерения их толщины предложены в [17 – 19], но по-прежнему нет единых подходов в решении этой проблемы. Антенны низкочастотного диапазона больше подходят для обследования закрепного пространства, где необходимо обеспечить большую дальность при обнаружении различного типа неоднородностей непосредственно в самом породном массиве.

Использование сверхвысокочастотного диапазона (S-диапазона) способно повысить точность измерения толщины дефектов в виде полостей в зоне контакта “бетонная крепь – породный массив” мощностью примерно до 500 мм, в том числе и заполненных материалами, близкими по электромагнитным свойствам к свойствам как самого бетона, так и вмещающего породного массива. Георадиолокационное сканирование бетонной обделки и близлежащего закрепного пространства в несколько этапов антеннами с разным частотным диапазоном способно существенно повысить информативность метода георадиолокации и своевременно устранить дефекты бетонной крепи, минимизировать риски ее подтопления и разрушения.

В настоящей работе решались следующие задачи:

- аналитическое изучение зависимостей модуля коэффициента отражения плоской электромагнитной волны S-диапазона от размеров полости с учетом вариации электромагнитных свойств материала, ее заполняющего;
- построение численной 2D модели трехслойной геосреды “бетонная крепь – полость – породный массив”, основанной на FDTD методе, и ее адаптация к реальным условиям эксплуатации горных выработок;
- выбор методики определения “нулевого времени” и расчета времен задержки сигналов георадара, отраженных от границ раздела сред с разными электромагнитными свойствами;

— на основе результатов численного моделирования исследование влияние толщины полости на относительную погрешность измерения таких параметров, как дальность до неоднородности (металлической арматуры), расположенной за полостью, и толщина самой полости, заполненной различного рода материалами (воздух, песок, мокрый песок);

— исследование глубинности метода георадиолокации (для S-диапазона частот) при обнаружении отражающего объекта (металлической арматуры), расположенного за полостью, с помощью физического моделирования с применением георадара SIR-3000 и антенного блока Model52600 с рабочей частотой 2.6 ГГц;

— оценка влияния электромагнитных свойств материала, заполняющего полость, и ее толщины на изменение эквивалентной диэлектрической проницаемости многослойной модели, а также на изменение интенсивности отраженного от металлической арматуры электромагнитного сигнала;

— сопоставление результатов численного и физического моделирования с целью проверки достижимости решения поставленной проблемы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ОТРАЖЕНИЯ – ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ПЛОСКОМ СЛОЕ

Для наземных георадаров, используемых для подповерхностного зондирования, существенным является вопрос взаимодействия ближнего поля антенн с исследуемой геосредой, содержащей различного типа неоднородности (трещины, зоны обводнения, полости или пустоты, т. е. слои, отличные по своим свойствам от свойств вмещающего массива). Схема постановки задачи применительно к слоисто-неоднородной среде представляет собой трехслойную модель “бетонная крепь – полость – породный массив” (рис. 1).

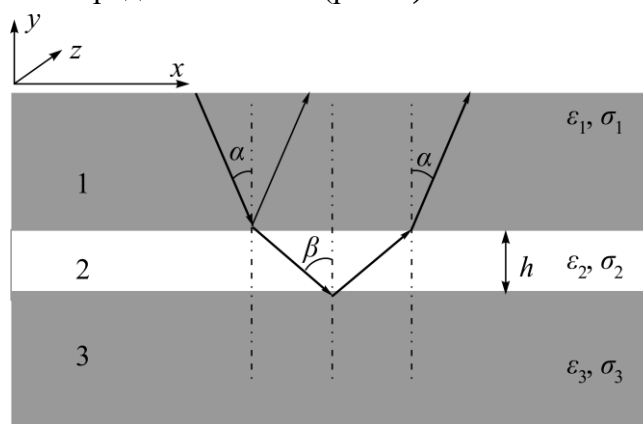


Рис. 1. Отражение – преломление плоской электромагнитной волны на плоском слое толщиной h для трехслойной модели “бетонная крепь – полость – породный массив”: 1 — бетон; 2 — полость; 3 — окружающий массив горных пород

Пусть передающая антенна расположена на поверхности бетонной обделки горной выработки (слой 1), при этом контакт “бетонная крепь – породный массив” содержит полость (слой 2), которая может быть заполнена воздухом, песком или мокрым песком с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 и проводимостью σ_2 . Это соответствует реальным условиям строительства бетонных конструкций туннелей и горных выработок. Электромагнитные свойства породного массива (например, силикатные горные породы — слой 3) могут быть приняты равными электромагнитным свойствам бетонной крепи, т. е. слои 1 и 3 обладают одинаковыми диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = \epsilon_3$ и проводимостью $\sigma_1 = \sigma_3$. Магнитная проницаемость

всех слоев $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_0$ (μ_0 — магнитная проницаемость воздуха $4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Среда, представляющая собой неидеальный диэлектрик с параметрами ε и σ , ведет себя по отношению к распространяющимся в ней радиоволнам как диэлектрик с комплексным значением диэлектрической проницаемости. Все выводы, относящиеся к процессам распространения электромагнитных волн в среде типа “неидеальный диэлектрик”, могут быть получены из соответствующих зависимостей для идеального диэлектрика путем замены вещественной диэлектрической проницаемости на комплексное значение ε'_k . При практических расчетах удобнее заменять относительную диэлектрическую проницаемость на относительную комплексную диэлектрическую проницаемость, определяемую формулой $\varepsilon'_k = \varepsilon_k / \varepsilon_0 = \varepsilon - i\sigma / (\varepsilon_0 \omega)$, где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота электромагнитной волны (f — частота георадара), ε — действительная часть диэлектрической проницаемости. Подставляя в данную формулу известную постоянную ε_0 (диэлектрическая проницаемость вакуума $2.8\pi \cdot 10^{-11}$ Ф/м), можно получить выражение для расчета: $\varepsilon'_k = \varepsilon' - i60\lambda\sigma$, где $\lambda = c / f$ — длина излучаемой волны в воздухе; c — скорость распространения электромагнитной волны в воздухе ($2.99 \cdot 10^8$ м/с).

Рассмотрим нормальное падение электромагнитной волны ($\alpha = 0$) на границе раздела сред для трехслойной модели “бетонная крепь – полость – породный массив” (рис. 1). При этом длина волны в среде много меньше расстояния до границы раздела сред.

В [20] выведен коэффициент отражения электромагнитной волны от слоисто-неоднородной среды, в который входят коэффициенты отражения на верхней V_{12} и нижней V_{23} границах слоя 2:

$$|V| = \frac{V_{12} + V_{23} e^{\frac{-2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} \operatorname{tg} \delta h} e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} h}}{1 + V_{12} V_{23} e^{\frac{-2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} \operatorname{tg} \delta h} e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_2} h}}. \quad (1)$$

Здесь $V_{12} = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$; $V_{23} = (Z_3 - Z_2) / (Z_3 + Z_2)$; $Z_1 = 1 / \sqrt{\varepsilon'_{1k}}$, $Z_2 = 1 / \sqrt{\varepsilon'_{2k}}$, $Z_3 = 1 / \sqrt{\varepsilon'_{3k}}$ — характеристические импедансы соответствующих сред при нормальном падении электромагнитной волны; h — толщина слоя 2; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь, который рассчитывается как соотношение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости материала, заполняющего слой 2, — ε'_{2k} [21]: $\operatorname{tg} \delta = \sigma_2 / (2\pi f \varepsilon_2 \varepsilon_0)$.

Для слоистой структуры, представленной на рис. 1, электромагнитные свойства слоев 1 и 3 равны электромагнитным свойствам бетона ($\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 5.32$; $\sigma_1 = \sigma_3 = 0.0326$ См/м), тогда $Z_1 = Z_3$, а коэффициенты отражения на верхней и нижней границах связаны соотношением $V_{12} = -V_{23}$. Аналитические расчеты и численное моделирование выполнялись для частоты излучаемой электромагнитной волны 2.6 ГГц. Электромагнитные свойства сред и параметры модели приведены ниже:

Размеры моделируемой области (бетонного блока) (x, y, z), мм	600 (600), 350 (100), 2 (2)
Толщина полости h , мм	20, 30, 40, 50
Шаг дискретизации ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$), мм	2, 2, 2
Время моделирования, нс	6
Начальное положение приемо-передающей антенны (x, y, z), мм	100, 220–250, 0
Шаг перемещения приемо-передающей антенны, мм	10
Диаметр металлической арматуры, мм	10
Глубина залегания арматуры h_0 соответствует конкретной толщине полости h (указана в скобках), мм	170 (при $h = 20$), 180 (при $h = 30$),

	190 (при $h = 40$), 200 (при $h = 50$)
Диэлектрическая проницаемость бетона и породного массива $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$	5.32
Проводимость бетона и породного массива $\sigma_1 = \sigma_3$, См/м	0.0326
Диэлектрическая проницаемость песка ε_2	15
Проводимость песка σ_2 , См/м	0.035
Диэлектрическая проницаемость мокрого песка ε_2	30
Проводимость мокрого песка σ_2 , См/м	0.15

Расчеты выполнялись для следующих вариантов материала, заполняющего полость (слой 2), — воздух, песок и мокрый песок. Электромагнитные свойства указанных материалов приняты согласно [22].

На рис. 2 приведены зависимости модуля коэффициента отражения электромагнитной волны по энергии от размеров слоя 2 — $|V|^2(h/\lambda\sqrt{\varepsilon_2})$, учитывающие вариацию электромагнитных свойств заполняющего материала — диэлектрической проницаемости и электропроводности.

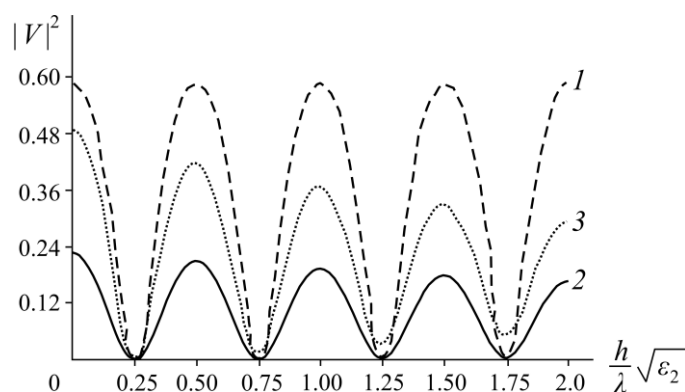


Рис. 2. Зависимости модуля коэффициента отражения электромагнитной волны по энергии от слоя 2 от отношения его толщины к длине волны при нормальном падении (частота 2.6 ГГц) для материалов, заполняющих его: 1 — воздух ($\varepsilon_2 = 1$; $\sigma_2 = 0$); 2 — песок ($\varepsilon_2 = 15$; $\sigma_2 = 0.035$); 3 — мокрый песок ($\varepsilon_2 = 30$; $\sigma_2 = 0.15$)

Модуль коэффициента отражения электромагнитной волны от слоя 2 (формула (1)) при увеличении его толщины изменяется с периодом $\lambda/(2\sqrt{\varepsilon_2})$, причем амплитуда этих колебаний убывает пропорционально $e^{(-2\pi/\lambda)\sqrt{\varepsilon_2}\text{tg}\delta h}$. Если $h \rightarrow \infty$, то поле в слое 2 затухает до нуля и коэффициент отражения от слоя 2 равен коэффициенту отражения от его верхней границы. В случае отсутствия затухания ($\text{tg}\delta = 0$) модуль коэффициента отражения испытывает периодические изменения с постоянной амплитудой и периодом $\lambda/(2\sqrt{\varepsilon_2})$, что соответствует заполнению слоя воздухом [20].

В случае $Z_1 = Z_3$, когда затухание в слое 2 отсутствует, при $h = m\lambda/(4\sqrt{\varepsilon_2}) = m\lambda_2/4$, где m — целое число, λ_2 — длина волны в слое 2, который становится неотражающим и вся энергия падающей волны переходит в третью среду (слой 3). Слой 2 в этом случае как бы не существует, а слои 1 и 3 соприкасаются друг с другом и не отображаются на радарограммах. В наибольшей степени отражающая способность слоя 2 проявляется при толщинах $h = m\lambda_2/2$.

ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ GPRMAX

Для моделирования использовался метод конечных разностей во временной области (FDTD). Базовый алгоритм метода был предложен Кане Ёе, в честь которого ячейки, на которые разбивается модель, названы ячейки Ёе [23, 24]. Численное решение получено во временной области путем решения уравнений Максвелла для каждой ячейки. Этот вид ячеек используется для дискретизации как непрерывного пространства, так и времени при решении уравнений Максвелла в процессе моделирования распространения электромагнитных волн в среде. Все сценарии численного моделирования выполнены с помощью программного обеспечения gprMax — набора инструментов для моделирования электромагнитных волн, основанного на численном методе конечных разностей во временной области [24, 25].

За основу при построении численной модели взаимодействия георадара с бетонной обделкой горной выработки принята модель, предложенная в [26]. В качестве зондирующего импульса использовался импульс Ricker (форма волны Рикера) с центральной частотой 2.6 ГГц и усиленной амплитудой 10.

Для двухмерной модели размер z принимается равным одному шагу дискретизации. За ось поляризации передающей антенны георадара, в качестве которой используется диполь, взята ось z , так как только она допустима для построения двухмерной модели (2D TMz-режим). В связи с этим в двумерном случае рассчитываются только E_z компонента электрического поля и компоненты H_x и H_y магнитного поля. Каждая трасса (A-scan) отображает временной график одной из составляющих электромагнитного поля в точке расположения приемной антенны. Более информативна — синтетическая радарограмма — профиль (B-scan), который представляет собой сочетание множества трасс A-scan, построенных при перемещении георадара вдоль заданного направления. На синтетических радарограммах будут отображены: прямая волна, пришедшая от передающей антенны из точки x ; волны, отраженные от верхней и нижней границ раздела сред “бетонная крепь — полость — породный массив”; и волна, отраженная от металлической арматуры, расположенной в нижнем слое 3. На рис. 3 представлена трехслойная модель “бетонная крепь — полость — породный массив” с расположенной в нижнем слое (породном массиве) неоднородности — металлической арматуры.

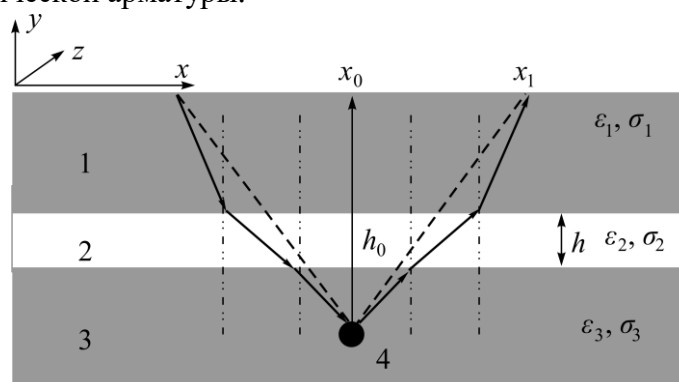


Рис. 3. Схема распространения электромагнитной волны в трехслойной модели “бетонная крепь (слой 1) — полость (слой 2) — породный массив (слой 3)” с расположенной в нижнем слое 3 неоднородностью (4) в виде металлической арматуры

Электромагнитные параметры, используемые при моделировании сред, взяты из рекомендаций [22]. Металлическая арматура заданного диаметра применяется для формирования гиперболического годографа, с помощью которого можно оценить эквивалентную диэлектрическую проницаемость и скорость распространения электромагнитных волн в исследуемой трехслойной модели.

Электромагнитная волна, излучаемая передающей антенной георадара, расположенной в точке x , распространяется в слоисто-неоднородном массиве по принципу Ферма (сплошная линия на рис. 3). В данной работе рассмотрена модель распространения электромагнитной волны по лучу (штриховая линия).

Пусть в модели массива, состоящем из n слоев с заданными значениями ε и v (скорость распространения электромагнитной волны), локальный объект (арматура) расположен в последнем слое на глубине h_0 , тогда расстояние, пройденное лучом: $h_{\text{л}} = \sqrt{(x - x_0)^2 + h_0^2}$. В слое i луч проходит расстояние $h_{\text{ли}} = h_i / \cos(\alpha)$, $i \in 1, \dots, n-1$, где $\alpha = \arcsin[(x - x_0) / h_{\text{л}}]$. В последнем слое $h_{\text{лн}} = (h_0 - \sum_{i=1}^{n-1} h_i) / \cos(\alpha)$. Время распространения луча в слое i $t_{\text{ли}} = h_{\text{ли}} / v_i$; общее время распространения луча $t_{\text{л}} = \sum_{i=1}^n t_{\text{ли}}$; средняя лучевая скорость $v_{\text{л}} = \sum_{i=1}^n h_{\text{ли}} / t_{\text{л}}$. Эквивалентная диэлектрическая проницаемость находится в результате численного моделирования данных из выражения [27]:

$$\varepsilon'_{\text{eq}} = \left(\frac{0.3}{v_{\text{л}}} \right)^2 \quad \text{или} \quad \varepsilon'_{\text{eq}} = \frac{0.09 \left(\sum_{i=1}^n \frac{h_{\text{ли}}}{v_i} \right)^2}{h_{\text{л}}^2}. \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет вычислить эквивалентную диэлектрическую проницаемость по гиперболическому годографу, полученному при георадиолокационном зондировании трехслойной среды. Аналогичные подходы к расчету эквивалентной диэлектрической проницаемости предложены в [7, 28].

Точность определения эквивалентной диэлектрической проницаемости во многом зависит от способа обработки экспериментальных данных — вычисления времени распространения электромагнитной волны до металлической арматуры и обратно. В разных источниках предложены различные подходы к его определению, в том числе с учетом рекомендаций разработчиков георадаров. Истинное положение земной поверхности при интерпретации радарограмм (или “нулевое время”) зависит от многих факторов — конструкции приемо-передающей аппаратуры, типа антенн, электромагнитных свойств геосреды в ближней зоне антенны. В [29] обобщены исследования по определению “нулевого времени”. В данной работе при интерпретации радарограмм для расчета “нулевого времени” принята методика, приведенная в [30].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 показано изменение эквивалентной диэлектрической проницаемости трехслойной модели с изменением толщины полости для разных заполняющих материалов (воздух, песок и мокрый песок) и диэлектрической проницаемости, рекомендованной производителем георадара SIR-3000 при исследовании бетонных конструкций [31], а также измеренной реальной диэлектрической проницаемости бетонной обделки горной выработки, равной 6.5 [32].

Согласно представленным результатам, увеличение толщины полости, заполненной материалом с диэлектрической проницаемостью, превышающей диэлектрическую проницаемость бетона (с мокрым песком), существенно увеличивает эквивалентную диэлектрическую проницаемость трехслойной модели. И наоборот, при заполнении полости воздухом диэлектрическая проницаемость трехслойной модели уменьшается с увеличением толщины полости. Для обоих случаев зависимости $\varepsilon_{\text{eq}}(h)$ становятся практически линейными.

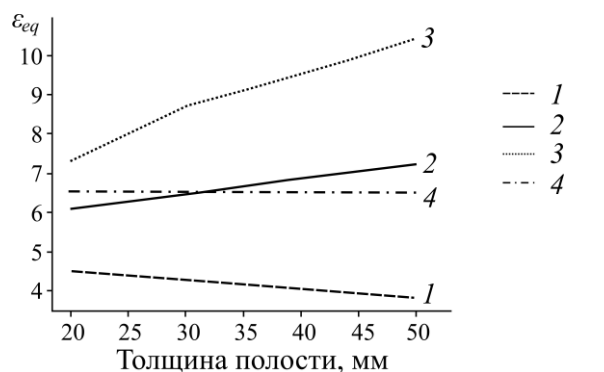
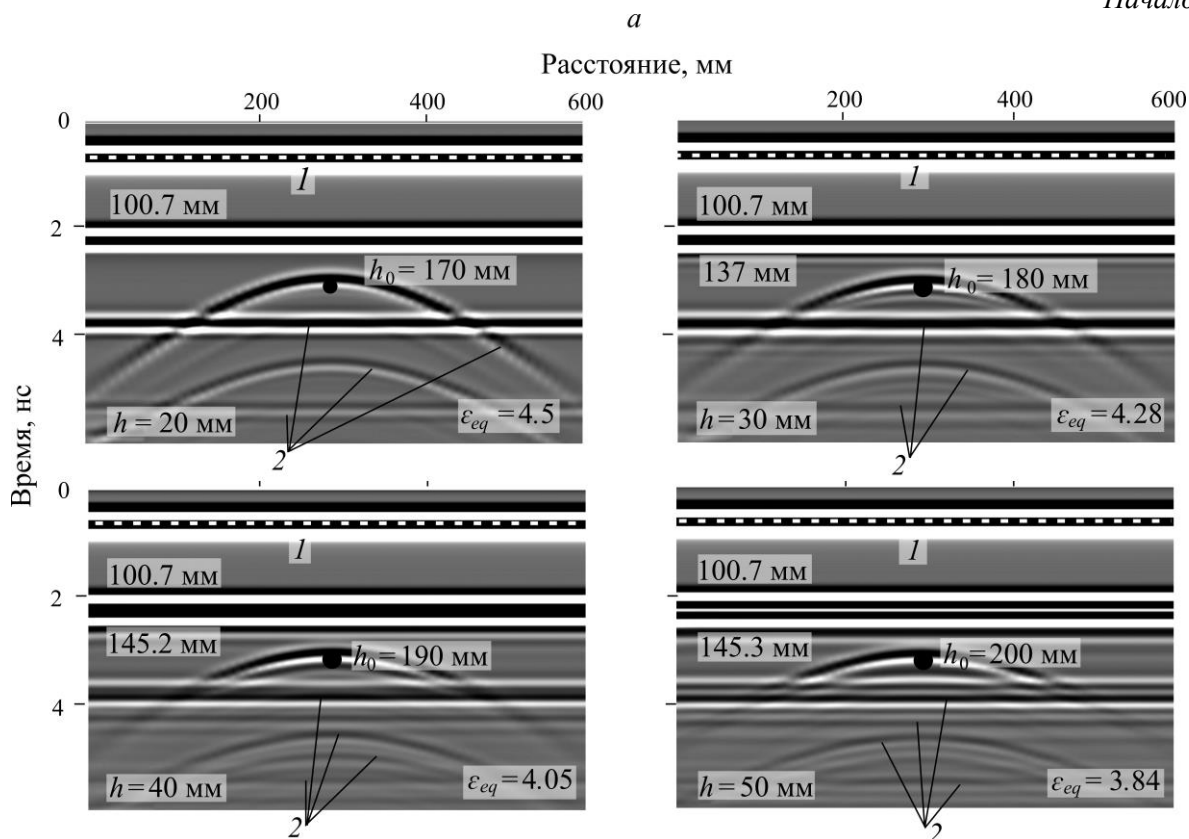


Рис. 4. Зависимость эквивалентной диэлектрической проницаемости трехслойной модели от толщины полости для разных материалов: 1 — воздух; 2 — песок; 3 — мокрый песок; 4 — диэлектрическая проницаемость бетона, равная 6.5

Эквивалентная диэлектрическая проницаемость трехслойной модели, когда диэлектрические проницаемости отдельных слоев близки по своим значениям (бетон / песок), с увеличением толщины пустотного слоя изменяется незначительно и примерно совпадает с рекомендованной производителем георадара и измеренной в реальных условиях для бетонной крепи.

На рис. 5 представлены результаты численного моделирования: синтетические радарограммы (B-scan) данных георадиолокации (S-диапазона при рабочей частоте 2.6 ГГц) для трехслойной модели “бетонная крепь – полость – породный массив”, содержащей металлическую арматуру в нижнем слое, с учетом вариации толщины полости, а также диэлектрической проницаемости и проводимости материала, заполняющего пустоту (воздух, песок и мокрый песок) с помощью программного обеспечения grMax.

Начало рис. 5



Окончание рис. 5

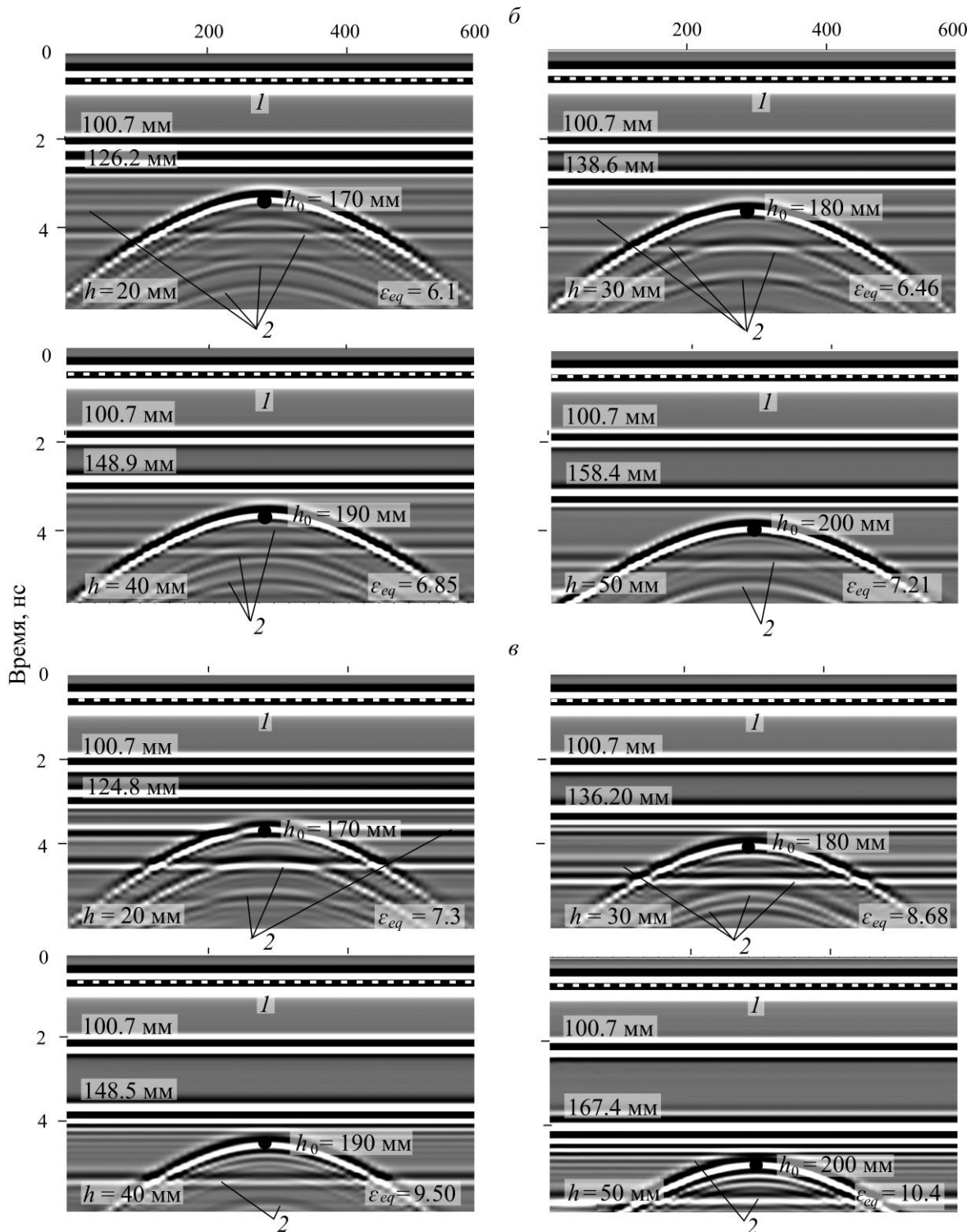


Рис. 5. Синтетические радарограммы трехслойной модели “бетонная крепь – полость – породный массив”, содержащей в нижнем слое металлическую арматуру (B-scans), при заполнении полости разной толщины h : а — воздухом; б — песком; в — мокрым песком; 1 — сигнал прямого прохождения; 2 — кратно отраженные сигналы-помехи от металлической арматуры и границ слоев. Вычисленные расстояния до границ полости: верхней — 100.7 мм; нижней — от 124.8 до 167.4 мм.

По результатам численного моделирования процесса взаимодействия георадара с трехслойной моделью, содержащей неоднородность в виде металлической арматуры, установлено, что для дипольной антенны с рабочей частотой 2.6 ГГц, расположенной на поверхности из бетона, “нулевое время”, рассчитанное по первому отрицательному импульсу зондирующего сигнала, равно 0.5 нс. Относительно этого времени вычислены времена распространения электромагнитной волны до нижней и верхней границ раздела сред “бетонная крепь – полость”, а также до арматуры и обратно к приемнику. С учетом времени распространения электромагнитной волны в трехслойной модели и точного расстояния, на котором расположена арматура, рассчитана скорость электромагнитной волны для каждого варианта моделирования и эквивалентные диэлектрические проницаемости трехслойной модели. Используя эквивалентную диэлектрическую проницаемость трехслойной модели и времена распространения электромагнитной волны до границ раздела сред, можно найти расстояние как до нижней, так и до верхней границы полости. Для всех вариантов моделирования вычисленное расстояние до верхней границы полости составило 100.7 мм (на фоне истинного значения 100 мм). Далее для полученных расстояний до границ полости можно рассчитать ее толщину.

На рис. 6 приведены зависимости относительной погрешности вычисленных по результатам моделирования толщины полости и расстояния до ее нижней границы с учетом вариации толщины h и электромагнитных свойств заполняющего материала.

Относительная погрешность Δ рассчитана по формуле [33]:

$$\Delta = \frac{R_{\text{экс}} - R_0}{R_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $R_{\text{экс}}$ — экспериментально измеренное расстояние (по результатам моделирования или в реальных условиях георадаром); R_0 — его истинное значение.

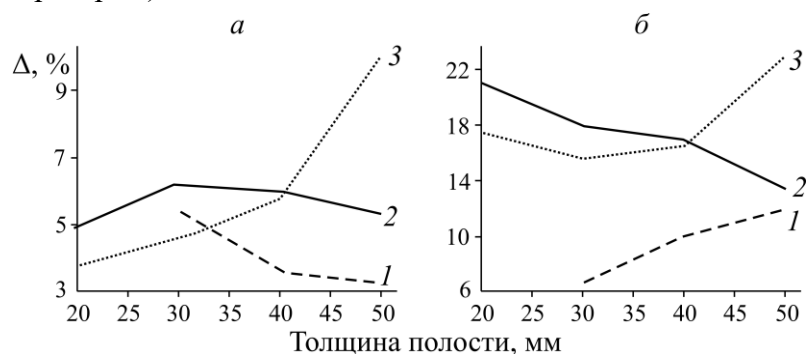


Рис. 6. Относительные погрешности результатов расчетов: а — расстояние до нижней границы полости; б — толщина полости с учетом вариации электромагнитных свойств заполняющего материала: 1 — воздух; 2 — песок; 3 — мокрый песок

Установлено, что погрешность измерения толщины полости более чем в 2 раза превышает погрешность измерения расстояния до его нижней границы. Она минимальна при измерении толщины полости, заполненной воздухом (не более 11 %), но при толщине $h \approx \lambda_2 / 4$ (20 мм) по временам задержки сигнала невозможно определить ее нижнюю границу. Это свидетельствует о прозрачности такого слоя и невозможности его идентификации на радарограммах. При измерении толщины полости, заполненной песком, относительная погрешность составляет в среднем 16–18 %, существенно зависит от размеров слоя и становится минимальной

при $h \approx 1.25\lambda_2$ (толщины 40 и 50 мм). При измерении толщины слоя, заполненного мокрым песком, погрешность измерения возрастает, когда толщина слоя h превышает $2\lambda_2$ (40 мм). Таким образом, при исследовании георадаром многослойных сред приемлемую (не более 12 %) точность измерений толщины полости с размерами больше, чем $\lambda_2/4$, можно получить в том случае, если она будет заполнена воздухом. Для других сред точность определяется размерами слоя и зависит от электромагнитных свойств материала, заполняющего полость.

По данным численного моделирования получены амплитуды сигналов ($E_{z\max}$), отраженных от металлической арматуры, расположенной в середине нижнего слоя исследуемой трехслойной модели, в зависимости от толщины полости и электромагнитных свойств заполняющего материала (рис. 7). Максимальные уровни амплитуд принятых георадаром электромагнитных сигналов получены при заполнении полости песком, что обеспечивает высокую дальность обнаружения арматуры в нижнем слое. При заполнении полости воздухом и мокрым песком, уровни амплитуд принятых сигналов меньше амплитуд для слоя с заполнением песком на 18–30 и 33–42 % соответственно. Это сказывается на возможности идентификации отражающих объектов.

На рис. 7 треугольниками отмечены точки для случаев, когда толщина полости с заполнением кратна $h = m\lambda_2/2$. Коэффициент отражения от такого слоя будет максимальным, в связи с чем может возникнуть неоднозначность при определении местоположения неоднородности. Для полости, заполненной мокрым песком, все значения амплитуд отраженных сигналов соответствуют толщине слоя, кратной $h = m\lambda_2/2$, поэтому отмечается их устойчивое уменьшение. В [34] рассмотрен метод амплитуд при измерении скоростей распространения электромагнитных волн в многослойных средах на примере автодорожного покрытия. Показано, что с помощью метода амплитуд определить скорость распространения электромагнитных волн и диэлектрическую проницаемость в нижних слоях (ниже второго) практически невозможно, что подтвердил численный эксперимент.

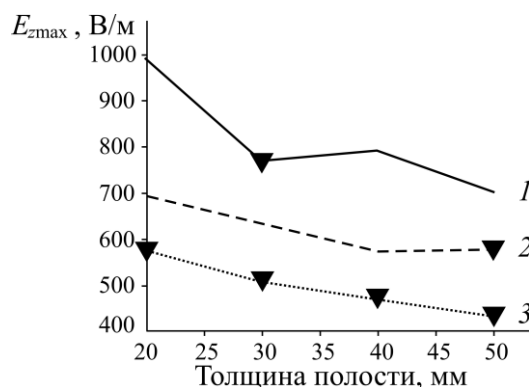


Рис. 7. Зависимость амплитуды отраженных от металлической арматуры электромагнитных сигналов от толщины полости для разных сред, ее заполняющих: 1 — песок; 2 — воздух; 3 — мокрый песок

Выполненный объем численного моделирования позволил получить следующие результаты:

— изменение эквивалентной диэлектрической проницаемости трехслойной модели “бетонная крепь – полость – породный массив” подчиняется линейной зависимости (заметно увеличивается для соотношения $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 \approx 5$ и уменьшается для $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 \approx 0.2$). Для соотношения $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 \approx 1–3$ практически остается постоянной и может быть принята равной ε_1 ;

— погрешность измерения расстояния до верхней и нижней границ раздела слоев существенно ниже погрешности измерения толщины слоя и составила не более 6,5 % для заполнения полости песком или мокрым песком (толщиной, не превышающей 2λ) и не более 3,5 % — воздухом;

— погрешность измерения толщины слоя, заполненного песком или мокрым песком, составила 14–23 % и существенно зависит от толщины слоя; минимальна, когда его размеры находятся в диапазоне $\lambda_2 \leq h \leq 2\lambda_2$;

— погрешность измерения толщины слоя, заполненного воздухом, составила не более 11 % для его размеров больше, чем $\lambda_2/4$; при $h \approx \lambda_2/4$ слой становится практически прозрачным и не идентифицируется на радарограммах;

— наибольшую дальность действия георадиолокационного метода можно обеспечить, когда диэлектрическая проницаемость слоев эквивалентна $\varepsilon_2/\varepsilon_1 \approx 1-3$. При увеличении контраста (отношения $\varepsilon_2/\varepsilon_1$) диэлектрических проницаемостей слоев с 3 до 5 (для мокрого песка) и уменьшении до 0,2 (для воздуха) дальность действия георадиолокационного метода снижается примерно на 33–42 и 18–30 % соответственно;

— из-за изменения размеров слоя определить эквивалентную диэлектрическую проницаемость и в дальнейшем местоположение объекта в нижнем слое по амплитудам отраженных сигналов может быть затруднительно, в то время как обработка результатов моделирования по временам задержки принятых сигналов согласно методике в [30] показала приемлемую точность определения границ раздела сред с разными электромагнитными свойствами.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ КОНТАКТА

“БЕТОННАЯ КРЕПЬ – ПОРОДНЫЙ МАССИВ” МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Для исследования зоны контакта “бетонная крепь – породный массив” методом физического моделирования разработан и изготовлен экспериментальный стенд (рис. 8). Размеры бетонных блоков для моделирования механического контакта бетонной крепи и массива вмещающих пород – $600 \times 250 \times 100$ мм.



Рис. 8. Экспериментальный стенд с измерительным оборудованием: 1, 3 — бетонные блоки; 2 — полость, заполненная песком; 4 — арматура; 5 — пенополистирол; 6 — георадар SIR-3000 с антенным блоком Model52600

Основная задача физического моделирования — исследование глубинности метода сверхвысокочастотной (S-диапазон) георадиолокации при диагностике механического состояния массива вмещающих пород в зоне контакта на частоте зондирующего электромагнитного сигнала 2.6 ГГц. Для определения максимальной дальности георадиолокационного метода, а также получения информации о сигналах, отраженных от линейных протяженных проводящих неоднородностей, в центре нижнего бетонного блока заглублена металлическая арматура диаметром 10 мм и длиной 100 мм.

Электромагнитные свойства сухого бетона мало отличаются от электромагнитных свойств силикатных горных пород, например гнейсов, поэтому общие принципы подобия не нарушаются при моделировании массива вмещающих пород бетонным блоком. В натурных условиях мощность массива вмещающих пород много больше толщины бетонной крепи. Здесь рассматривается только зона контакта “бетонная крепь – породный массив”.

Бетонные блоки 1 и 3 на рис. 8 разделены полостью 2 с изменяемыми параметрами: толщиной h и электромагнитными свойствами материала, его заполняющего (ϵ_2 и σ_2). Полость моделирует нарушение породного массива в зоне контакта “бетонная крепь – породный массив”. Электромагнитные свойства материала, заполняющего полость, варьировались путем помещения в нее различного по составу заполнителя — воздуха, песка и мокрого песка. Толщина полости 2 для каждого заполняющего материала изменяется от 20 до 50 мм. Антенный блок (Model52600) георадара SIR-3000 6 с центральной частотой 2.6 ГГц перемещался параллельно верхнему бетонному блоку 1 от 0 до 600 мм по оси x , измерительные метки проставлялись при пересечении центра антенного блока с каждой линией сетки с интервалом 5 см. Зарегистрированные радарограммы обрабатывались с помощью программного обеспечения RADAN.

На рис. 9 представлены радарограммы, полученные при георадиолокационном обследовании физической модели при продольной ориентации антенного блока относительно направления его перемещения. Согласно полученным радарограммам, для модели с заполнением полости песком (рис. 9б) границы раздела сред “бетонная крепь – полость” слабо различались. При заполнении полости воздухом (рис. 9а) или мокрым песком (рис. 9в) отчетливо выделяются сигналы, отраженные от ее верхней и нижней границ в виде параллельных осей синфазности, а контуры гиперболического годографа, вызванного отражением от металлической арматуры, более размыты (при заполнении полости мокрым песком толщиной $2.5\lambda_2 = 50$ мм гиперболический годограф практически не идентифицируется). При заполнении полости толщиной 20 мм ($h \approx \lambda_2 / 4$) воздухом слой становится прозрачным и не отображается на радарограмме, что подтверждается результатами как аналитического (рис. 2, линия 3), так и численного моделирования (рис. 5а).

Результаты физического моделирования обрабатывались с учетом диэлектрической проницаемости $\epsilon = 6.5$, характерной для бетонной крепи, согласно рекомендациям производителя георадара SIR-3000 [31] и ранее экспериментально измеренной в условиях горной выработки с бетонной обделкой в [32]. Для расчета дальности до металлического стержня использовалось соотношение $h_0 = c / (2t\sqrt{\epsilon_{eq}})$, где h_0 — глубина залегания металлической арматуры, t — время распространения сигнала до границы раздела соответствующей среды, регистрируемое георадаром. По формуле (4) рассчитывалась погрешность экспериментально измеренной георадаром дальности до металлической арматуры и дальности, измеренной по результатам численного моделирования.

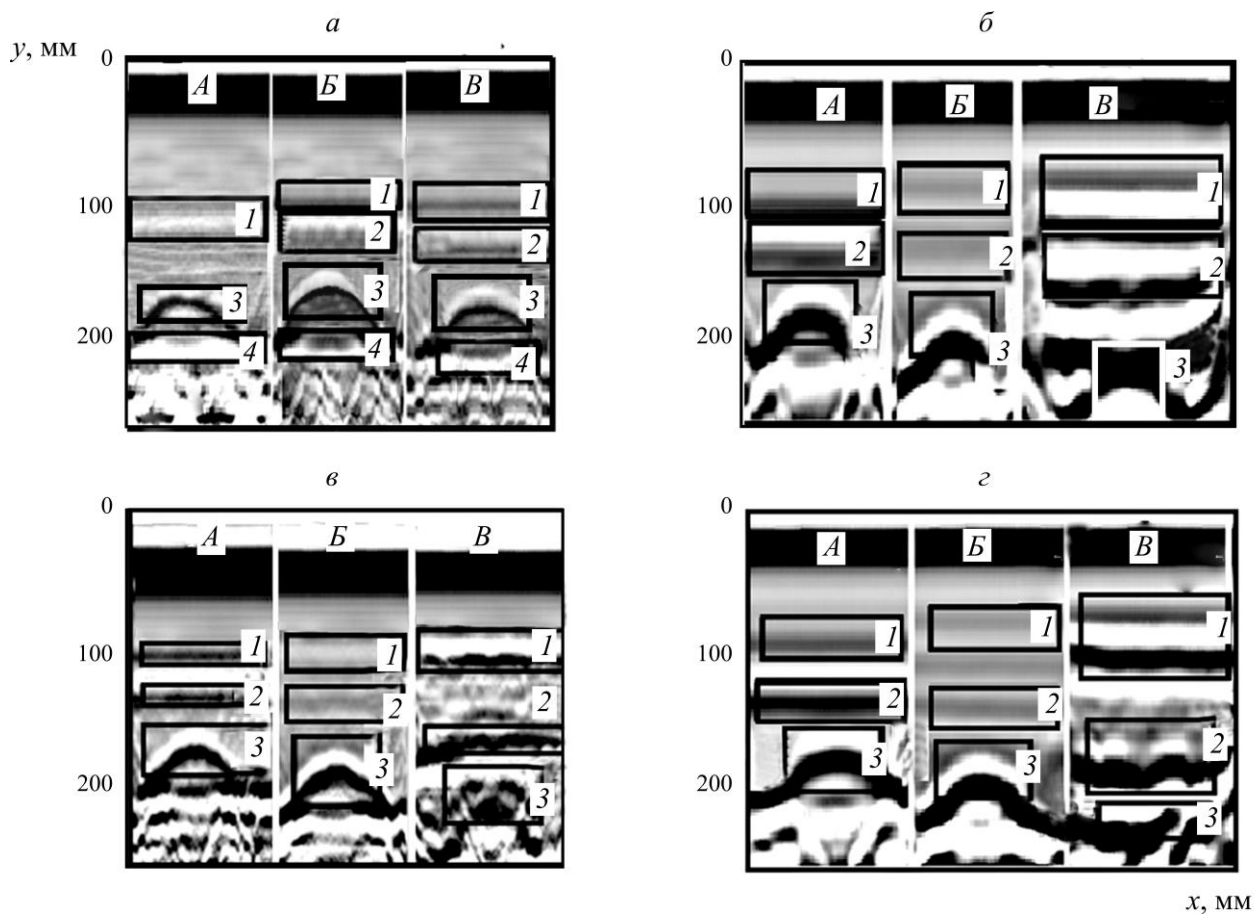


Рис. 9. Физическое моделирование зоны контакта “бетонная крепь – полость – породный массив” методом георадиолокации при заполнении полости: А — воздухом; Б — песком; В — мокрым песком: 1 — сигнал, отраженный от верхней границы зоны контакта; 2 — сигнал, отраженный от нижней границы зоны контакта; 3 — сигнал, отраженный от металлического стержня, расположенного в нижнем слое бетона; 4 — отражение от нижней границы модели. Толщина полости 20 мм (а); 30 мм (б); 40 мм (в); 50 мм (г)

На рис. 10 представлены результаты этих расчетов с учетом изменения толщины полости и электромагнитных свойств материала, его заполняющего.

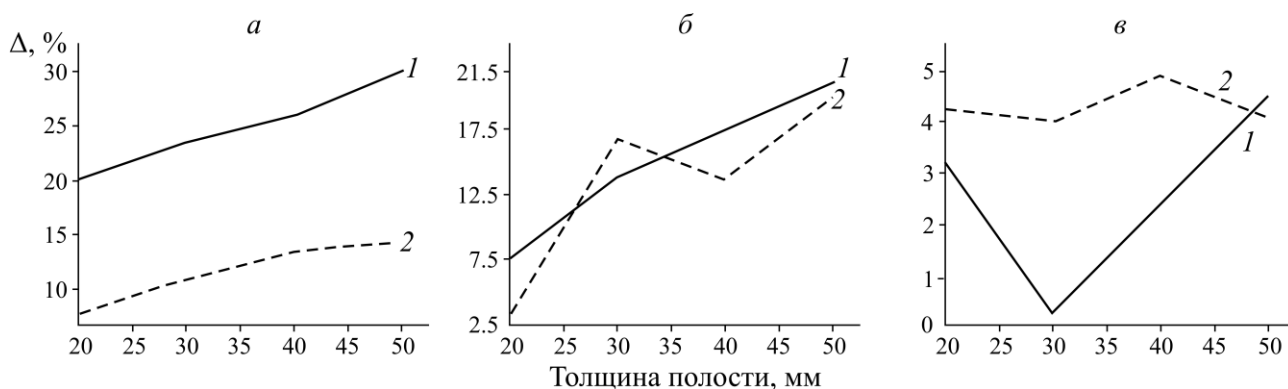


Рис. 10. Относительная погрешность определения дальности до металлической арматуры, расположенной в нижнем слое трехслойной модели, в зависимости от изменения толщины полости при разных электромагнитных свойствах заполняющего материала: а — воздух; б — мокрый песок; в — песок; 1 — эксперимент; 2 — результат моделирования

Сравнительный анализ численных и экспериментальных данных показал, что при обследовании состояния зоны механического контакта “бетонная крепь – породный массив” при неизменной частоте S-диапазона (2.6 ГГц) электромагнитного зондирующего сигнала максимальная дальность действия георадиолокационного метода и точность измерения расстояния до цели (металлической арматуры) для трех материалов, заполняющих полость, обеспечивается, если диэлектрическая проницаемость слоев эквивалентна $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 \approx 1-3$ (для песка — рис. 10в).

При увеличении контраста (отношения $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$) диэлектрических проницаемостей слоев от 3 до 5 (для мокрого песка — рис. 10б) и уменьшении до 0.2 (для воздуха — рис. 10а) дальность действия георадиолокационного метода снижается примерно на 30%, а погрешность определения глубины расположения металлической арматуры возрастает на 10–15%. Это связано с тем, что при обработке результатов измерений программное обеспечение RADAN не позволяет учитывать вариацию диэлектрической проницаемости вмещающих слоев [31].

ВЫВОДЫ

Выполнен комплекс расчетов коэффициентов отражения от дефекта в виде полости в бетонной обделке, заполненной различными типами материалов; численных исследований на базе метода FDTD для исследования сигнала георадара, отраженного от неоднородности в виде металлической арматуры, расположенной за полостью с разными материалами заполнения; физического моделирования зоны контакта “бетонная крепь – породный массив” с использованием георадара SIR-3000 и антенного блока (Model52600) с центральной частотой 2.6 ГГц (S-диапазон). Изучено влияние толщины полости и электромагнитных свойств материалов, ее заполняющих, на точность измерения расстояния до неоднородности в виде металлической арматуры. Это повышает достоверность интерпретации экспериментальных данных, получаемых методом георадиолокации в диагностике различного типа дефектов для зоны контакта в реальных условиях, а также контрастных объектов.

Толщина полости и электромагнитные свойства материала существенно влияют на относительную погрешность измерения дальности до металлической арматуры, расположенной за таким слоем. Минимальная относительная погрешность фиксируется при толщине слоя, равной длине волны электромагнитного сигнала. Для толщины слоя, размеры которого превышают длину волны в 2 раза, относительная погрешность измерения дальности до металлической арматуры значительно увеличивается.

Относительная погрешность измерения расстояния до нижней границы полости примерно в 2 раза меньше погрешности измерения ее толщины и составляет не более 6.5 % для заполнения полости песком или мокрым песком и не более 3.5 % — воздухом. Гиперболические годографы от контрастных неоднородностей, расположенных за полостями с размерами более двух длин волн, не идентифицируются на радарограммах.

Обработка результатов численного моделирования по времени задержки отраженных сигналов показала приемлемую точность измерения расстояния до металлической арматуры, расположенной в нижнем слое трехслойной модели. Для многослойной среды измерение эквивалентной диэлектрической проницаемости зависит от толщины полости, а также электромагнитных свойств заполняющего материала.

С помощью численного и физического моделирования обоснована эффективность применения антенны S-диапазона (2.6 ГГц) при измерении толщины дефектов бетонной крепи в виде полостей, заполненных материалами с различными электромагнитными свойствами (воздух, песок или мокрый песок). В реальных инженерных ситуациях поверхность полости не будет плоской (ровной), а ее толщина постоянной на всей протяженности такого слоя. Сама бетонная обделка и породный массив могут быть неоднородными средами, что необходимо учитывать в дальнейших исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Qin H., Zhang D., Tang Y., and Wang Y.** Automatic recognition of tunnel lining elements from GPR images using deep convolutional networks with data augmentation, *Autom. Constr.*, 2021, Vol. 130. — 103830.
2. **Qin H., Tang Y., Wang Z., Xie X., and Zhang D.** Shield tunnel grouting layer estimation using sliding window probabilistic inversion of GPR data, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 2021, Vol. 112. — 103913.
3. **McCann D. M. and Forde M. C.** Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures, *NDT E Int.*, 2001, Vol. 34. — P. 71–84.
4. **Shaw M. R., Millard S. G., Molyneaux T. C. K., Taylor M. J., and Bungey J. H.** Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks, *NDT E Int.*, 2004, Vol. 38. — P. 203–212.
5. **Gokhan K. and Levent E.** Neural network based inspection of voids and karst conduits in hydro–electric power station tunnels using GPR, *J. Appl. Geophys.*, 2018, Vol. 151. — P. 194–204.
6. **Feng D., Wang X., and Zhang B.** Specific evaluation of tunnel lining multi-defects by all-refined GPR simulation method using hybrid algorithm of FETD and FDTD, *Constr. Build. Mater.*, 2018, Vol. 185. — P. 220–229.
7. **Wu Xianlong, Bao Xiaohua, Shen Jun, Chen Xiangsheng, Cui, and Hongzhi.** Evaluation of void defects behind tunnel lining through gpr forward simulation, *Sensors*, 2022, Vol. 22. — 9702.
8. **Hasan Istiaque and Yazdani Nur.** An experimental and numerical study on embedded rebar diameter in concrete using ground penetrating radar, *Chinese J. Eng.*, 2016. — P. 1–7.
9. **Li Chuan, Li Minmin, Yang Xiumei, Zhang Weiping, Fan Mingkun, Yang Xi, and Wang Lulu.** Boundary recognition of tunnel lining void from ground penetrating radar data, *J. Geophys. Eng.*, 2023, Vol. 20.
10. **Luo T X H and Lai W W L.** GPR pattern recognition of shallow subsurface air voids, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 2020, Vol. 99: — 103355.
11. **Lee S. J., Lee J. W., Choi Y. T., Lee J. S. and Sagong M.** Analysis of GPR signal patterns by tunnel lining thickness and cavity condition, *J. Korean Soc. Railway*, 2020, Vol. 24. — P. 781–729.
12. **Harseno R. W., Lee S. J., Kee S. H. and Kim S.** Evaluation of air-cavities behind concrete tunnel linings using GPR Measurements, *Remote Sens*, 2022, Vol. 14. — 5438.
13. **Parkinson Graham, Berger Klothn, and Ekes Csaba.** Ground penetrating radar evaluation of concrete tunnel linings, 12th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar, June 16–19, 2008, Birmingham, UK.
14. **Takayama Jun-ya, Ohara Yuki, and Sun Wei.** Nondestructive evaluation of air voids in concrete structures using microwave radar technique, *SICE J. Control, Meas., Syst. Integr.*, 2022, Vol. 15. — P. 36–47.
15. **Qin Hui, Xie Xiongyao, Tang Yu, and Wang Zhengzheng.** Experimental study on gpr detection of voids inside and behind tunnel linings, *J. Env. & Eng. Geophys.*, 2020, Vol. 25. — P. 65–74.
16. **Sarıçiçek Işıl and Seren Aysel.** Investigation concrete quality of zigana and torul tunnels by using GPR method, 2015.
17. **Liu H., Deng Z., Han F., Xia Y., Liu Q.H., and Sato M.** Time-frequency analysis of air-coupled GPR data for identification of delamination between pavement layers, *Constr. Build. Mater.*, 2017, Vol. 154. — C. 1207–1215.
18. **Dinh K. and Gucunski N.** Factors affecting the detectability of concrete delamination in GPR images, *Constr. Build. Mater.*, 2021. — C. 274. — 121837.
19. **Takayama J.-Y., Ohara Y., and Sun W.** Nondestructive evaluation of air voids in concrete structures using microwave radar technique, *SCIE J. Control Meas. Syst. Integr.*, 2022, Vol. 15. — P. 36–47.
20. **Зубкович С. Г.** Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. — М.: Сов. радио, 1968. — 224 с.

21. **Рубан А. Д., Бауков Ю. Н., Шкуратник В. Л.** Горная геофизика. Электрометрические методы гео-контроля. Ч. 3. Высокочастотные электромагнитные методы: учеб. пособие. — М.: МГГУ, 2002. — 147 с.
22. **Effects** of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz. Recommendation ITU-R 2015. — P. 2040-1. Доступно онлайн: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-1-201507-S!!PDF-E.pdf (дата обращения 24.08.2023 г.).
23. **Yee K.** Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, IEEE. Trans. Antennas. Propag., 1966, Vol. 14. — P. 302 – 307.
24. **Open source** Finite-difference time-domain: <https://www.gprmax.com> (дата обращения 24.08.2023 г.).
25. **Akhaury U., Giannakis I., and Warren C., Giannopoulos A.** Machine learning based forward solver: An Automatic Framework in gprMax, 11th Int. Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 2021.
26. **Warren Craig, Giannopoulos Antonios, and Giannakis Iraklis.** GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar, Comput. Phys. Commun., 2016, Vol. 209, No. 3.
27. **Владов М. Л., Судакова М. С.** Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. — М.: Геос, 2017. — 240 с.
28. **Xiao M., Chen C., and Su Z.** The calculation method of equivalent dielectric constant of multi-layer underground media, Geophys. Geochem. Explor., 2013, Vol. 37. — P. 368 – 372.
29. **Yelf R.** Where is true time zero? Proc. tenth. Int. conf. on grounds penetrating radar, Delft, The Netherlands, 21–24 June, 2004. — P. 279 – 282.
30. **Zadhoush Hossain, Giannopoulos Antonios, and Giannakis Iraklis.** Optimising the complex refractive index model for estimating the permittivity of heterogeneous concrete models, Remote Sensing, 2021, Vol. 13.
31. **Описание** георадара SIR-3000 [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.geophysical.com/sir3000.htm> (дата обращения 24.08.2023 года).
32. **Baryshnikov V., Khmelinin A., and Denisova E.** GPR detection of inhomogeneities in concrete lining of underground tunnels, J. Min. Sci., 2014, Vol. 50. — P. 25 – 32.
33. **Шкуратник В. Л.** Измерения в физическом эксперименте. — М.: АГН, 2000. — 256 с.
34. **Основы** расшифровки и интерпретации радарограмм: учеб. пособие / Ю. А. Сухобок, В. В. Пупатенко, Г. М. Стоянович. — Хабаровск: ДВГУПС, 2018. — 87 с.

Поступила в редакцию 08/XI 2023

После доработки 15/XI 2023

Принята к публикации 16/XI 2023