

УДК 534.222

EDN: PMFHXK DOI: 10.31429/vestnik-22-4-45-55

Разработка физически обоснованной модели распространения ультразвуковых волн в бетоне с частично деградированным наружным слоем

В. А. Чебаненко¹, С. Н. Шевцов¹, Е. В. Кириллова²✉¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, пр-кт Чехова, 41, Ростов-на-Дону, 344006, Россия² Университет прикладных наук Рейн-Майн, ул. Курт-Шумахер-Ринг 18, Висбаден, Германия✉ Кириллова Евгения Вадимовна; ORCID 0000-0002-6797-0920; e-mail: kirillova@web.de

Аннотация. В работе представлена численная модель распространения ультразвуковых волн в бетоне с деградированным поверхностным слоем, разработанная в пакете COMSOL Multiphysics. Модель учитывает градиентное распределение упругих свойств и частотно-зависимое затухание, отражающее процесс деградации материала. Возбуждение задавалось волновым пакетом, а граничные условия типа слабого отражения позволили минимизировать отражения. Проведено моделирование при 100 кГц для различных толщин деградированного слоя. Показано, что увеличение его толщины приводит к снижению скорости и росту затухания амплитуды волн, что согласуется с экспериментальными исследованиями. Новизна заключается в создании физически обоснованной модели бетона с градиентом свойств, применимой для генерации синтетических данных при обучении систем искусственного интеллекта для неразрушающего контроля.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, бетон, ультразвуковые волны, конечно-элементное моделирование, comsol multiphysics, градиент упругих свойств.

Финансирование. Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН 125011200151-9. Работа выполнена на оборудовании ЦКП ЮНЦ РАН № 501994. Участие Кирилловой Е.В. в этих исследованиях финансировалось за счет гранта 40170233 университета прикладных наук Рейн-Майн, Висбаден, Германия.

Цитирование: Чебаненко В. А., Шевцов С. Н., Кириллова Е. В. Разработка физически обоснованной модели распространения ультразвуковых волн в бетоне с частично деградированным наружным слоем // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2025. Т. 22, № 4. С. 45–55. EDN: PMFHXK. DOI: 10.31429/vestnik-22-4-45-55

Поступила 20 октября 2025 г. После доработки 22 ноября 2025 г. Принято 1 декабря 2025 г. Публикация 2 декабря 2025 г.

Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2025. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Development of a Physically Based Model of Ultrasonic Wave Propagation in Concrete with a Partially Degraded Surface Layer

V. A. Chebanenko¹, S. N. Shevtsov¹, E. V. Kirillova²✉¹ Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Prospekt Чехова, 41, Rostov-on-Don, 344006, Russia² RheinMain University of Applied Sciences in Wiesbaden, Kurt-Schumacher-Ring 18, Wiesbaden, 65197, Germany✉ Evgeniya V. Kirillova; ORCID 0000-0002-6797-0920; e-mail: kirillova@web.de

Abstract. This paper presents a numerical model of ultrasonic wave propagation in concrete with a degraded surface layer, developed using the COMSOL Multiphysics package. The model takes into account the gradient distribution of elastic properties and frequency-dependent attenuation, reflecting the material degradation process. Excitation was specified by a wave packet, and weak-reflection boundary conditions minimized reflections. Simulations were conducted at 100 kHz for various thicknesses of the degraded layer. It was shown that increasing its thickness leads to a decrease in velocity and an increase in attenuation of the wave amplitude, which is consistent with experimental studies. The novelty lies in the creation of a physically based model of concrete with a property gradient, applicable for generating synthetic data for training artificial intelligence systems for non-destructive testing.

Keywords: non-destructive testing, concrete, ultrasonic waves, finite element modeling, comsol multiphysics, elastic gradient.

Funding. This publication was prepared within the framework of the State Assignment of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS) No. 125011200151-9. The part of Evgeniya Kirillova in these research was funded by the grant 40170233 of the RheinMain University of Applied Sciences, Wiesbaden, Germany. The work was performed using equipment at the SSC RAS Common Use Center No. 501994.

Cite as: Chebanenko, V. A., Shevtsov, S. N., Kirillova, E. V., Development of a physically based model of ultrasonic wave propagation in concrete with a partially degraded surface layer. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2025, vol. 22, no. 4, pp. 45–55. DOI: 10.31429/vestnik-22-4-45-55

Received 20 October 2025. Revised 22 November 2025. Accepted 1 December 2025. Published 2 December 2025.

The authors contributed equally. The authors declare no competing interests.

© The Author(s), 2025. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\) license](#).

Введение

Бетон остаётся базовым конструкционным материалом современной строительной инфраструктуры благодаря сочетанию прочности, долговечности и технологичности. Одновременно рост доли эксплуатируемых и реконструируемых объектов, воздействие агрессивных сред, переменных нагрузок и климатических факторов усиливают риск накопления внутренних дефектов — пористости, микротрещин, каверн, расслоений, коррозионных очагов арматуры бетонных конструкций. Регулярная оценка их технического состояния становится критически важной для продления ресурса сооружений и предотвращения аварийных ситуаций. При этом традиционные инвазивные подходы (высверливание кернов) дорогостоящи, нарушают структуру материала и целостность конструкции, а визуальные методы не обнаруживают дефекты в объёме. Поэтому неразрушающий контроль (НК) бетона, прежде всего акустический, остаётся одним из ключевых инструментов инженерной диагностики [1–3].

Классический ультразвуковой импульсный метод (UPV) основан на регистрации времени пролёта и характеристик огибающей сигнала между парой преобразователей в различных конфигурациях. Он широко применяется для оценки прочности и однородности [1]. Для сложной геометрии и в условиях ограниченного доступа активно развиваются импульс-эхотомография и подход с использованием фокусировки синтезированной апертуры (SAFT) [4]. Недавние исследования продемонстрировали томографическое 3D-восстановление внутренней структуры образцов бетона и элементов конструкций, включая случаи с ограниченным количеством датчиков [4–6]. Параллельно развивается диагностика с использованием поверхностных и сдвиговых волн для локализации внутренних нарушений целостности в железобетоне [7, 8].

Основное затруднение интерпретации ультразвуковых измерений связано с неоднородностью бетона: разнокалиберные зёрна заполнителя, межфазная переходная зона, распределение пор и микротрещин порождают рассеяние, модуляцию фаз/амплитуд и частотно-зависимое затухание. Экспериментальные и теоретические работы явно указывают на важную роль многократного рассеяния, высокочувствительного мониторинга слабых изменений скоростей и напряжённого состояния [9, 10]. Существенным оказывается и подбор рабочей частоты, соответствующей компромиссу между глубиной прозвучивания и чувствительностью к неоднородностям [11]. Это напрямую связано с практическими рекомендациями по выбору преобразователей и режимов прозвучивания в обследованиях реальных конструкций [3, 12].

В этих условиях численное моделирование процесса распространения ультразвука в бетоне приобретает большое практическое значение. Оно позволяет объяснять наблюдаемые временно-частотные картины, отделять вклад граничных условий и контакта «датчик – бетон» от собственно объёмных неоднородностей, оценивать чувствительность измерений к геометрическим характеристикам дефектов, оптимизировать конфигурацию датчиков и частоту возбуждения [13–15]. Одним из таких направлений является конечно-элементное моделирование распространения упругих волн. Исследование в пакете ABAQUS Explicit моделирует

прохождение импульсов через неоднородную область с явно заданными включениями и трещинами, анализируя прохождение, отражение и дисперсию [16]. Другие исследователи используют COMSOL Multiphysics при решении задач НК бетона для выбора оптимальной частоты преобразователя с учётом схемы прозвучивания и оценки относительной ошибки [14], а также корреляции времени пролёта с прочностью по результатам лабораторных испытаний [17]. В другом недавнем исследовании авторы реконструируют реалистичную морфологию заполнителя и рассчитывают частотно-зависимое затухание в COMSOL, показывая, как геометрия и распределение размеров влияют на наблюдаемую дисперсию и ослабление сигнала [18].

Параллельно развиваются исследования на стыке моделирования и методов искусственного интеллекта (ИИ) для НК ультразвуком. Опубликованы обзоры по подходам глубокого обучения к автоматизации интерпретации данных НК, включая ультразвук [1, 19]. Для ультразвукового НК в целом проанализированы стратегии генерации синтетических обучающих выборок и их адаптации [2, 20, 21]. Отдельное направление — нейронные сети, основанные на физике (PINN), и другие варианты научного машинного обучения, где физические уравнения упругих волн вводятся в качестве регуляризатора обучения [3, 16, 18]. Для бетонных объектов уже появляются пилотные работы по объединению экспериментальных измерений с обработкой на основе глубокого обучения для локализации внутренних дефектов [22] и оценки степени поврежденности поверхностного слоя [23].

Настоящая статья посвящена предварительному этапу — разработке и верификации физически обоснованной модели распространения ультразвуковых волн в поврежденном бетоне в COMSOL Multiphysics с опорой на экспериментальные данные. Такая модель необходима для масштабной генерации синтетических данных под задачи обучения нейросетей и идентификации свойств в реальных конструкциях.

1. Постановка задачи и описание результатов экспериментов

Разрушение бетона под воздействием внешней среды представляет собой сложный и многоэтапный процесс, который, как правило, начинается у поверхности конструкции и постепенно распространяется вглубь материала. Например, исследования показывают, что механическое повреждение, вызванное циклами замерзания-оттаивания, проявляется ярче в поверхностных слоях, а затем глубже распространяется внутрь бетона [24]. Химические процессы, например карбонизация, изменяют щелочность цементного матрикса, уменьшают защиту арматуры и ускоряют деградации внутри материала [25]. В такой ситуации эффективная оценка механического состояния бетонных конструкций может стать важным инструментом для определения момента и характера необходимых мероприятий по их укреплению и ремонту. Это позволяет повысить безопасность эксплуатации сооружений и значительно снизить затраты на восстановление.

Для натурного моделирования процесса деградации бетона рассматривалось распространение упругих волн в неоднородной структуре, свойства которой изменились по толщине, имитируя ослабление материала у поверхностного слоя. Расчётные результаты сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными в Рижском университете [23, 26], где была изготовлена серия двухслойных бетонных образцов различной толщины и прочности. Общая высота каждого образца составляла 40 мм, при этом толщина верхнего, ослабленного слоя (ThD) варьировалась от 0 до 40 мм с шагом 3–5 мм (рис. 1a). Верхний слой (D — degraded) имел три степени снижения прочности, задаваемые изменением соотношения цемента и песка: D1 — 1:4, D2 — 1:7, D3 — 1:12. Нижний слой (S — strong) изготавливался с постоянным соотношением 1:3. Далее состав бетона с соотношением цемента и песка 1:3, а также изготовленный на его основе слой будут обозначаться как базовые. Всего было подготовлено 27 комбинаций (9 вариантов толщины × 3 варианта деградации).

Ультразвуковые измерения выполнялись методом поверхностного прозвучивания: неподвижный излучатель и перемещаемый приёмник регистрировали сигналы вдоль линии сканирования с шагом 5 мм, от 20 до 120 мм (рис. 1б). Для каждого образца регистрировалось 21 положение приёмника, при трёх частотах возбуждения — 50, 100 и 200 кГц, что в сово-

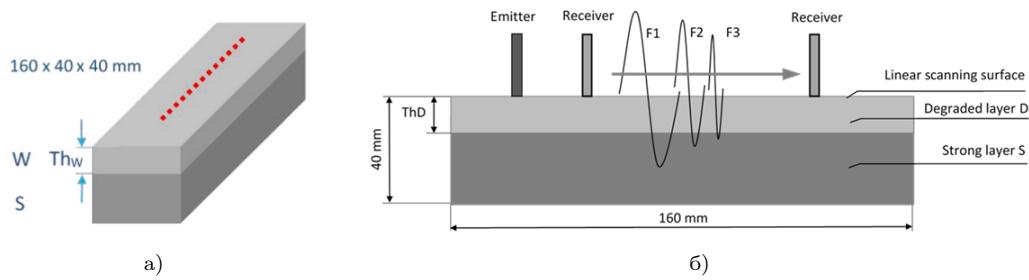


Рис. 1. Геометрия образцов и схема эксперимента [23, 26]

Fig. 1. Geometry of samples and experimental design [23, 26]

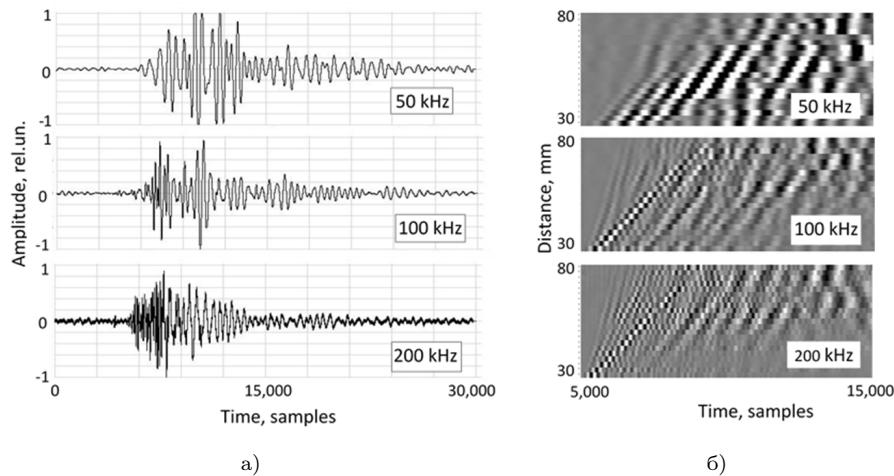


Рис. 2. Типичные формы ультразвуковых сигналов, зарегистрированные на поверхности бетонного образца при частотах возбуждения 50, 100 и 200 кГц (а), и соответствующие пространственно-временные распределения амплитуд волн, полученные при последовательном сканировании образца (б) [23, 26]

Fig. 2. Typical shapes of ultrasonic signals recorded on the surface of a concrete sample at excitation frequencies of 50, 100 and 200 kHz (a), and the corresponding spatiotemporal distributions of wave amplitudes obtained by sequential scanning of the sample (б) [23, 26]

купности дало 1701 сигнал. Возбуждение осуществлялось коротким пулом из двух периодов синусоиды с полусинусоидальной огибающей.

Для последующего анализа были построены пространственно-временные профили сигналов, отражающие характер распространения акустических волн в верхнем ослабленном слое (рис. 2). Сканирование выполнялось по центральной линии образца, а временная шкала представлена в виде последовательности выборок при частоте дискретизации 30 МГц (шаг 0,033 мкс).

На пространственно-временных профилях рис. 2 видно изменение характера распространения волн. При низкой частоте волна распространяется глубже и с меньшим затуханием, тогда как при 200 кГц возрастает рассеяние и проявляются сложные интерференционные структуры.

Такой подход позволил проследить изменение формы волны в зависимости от степени деградации и толщины верхнего слоя. На основе данных [26] были построены графики, представленные на рис. 3.

На рис. 3 показано изменение пространственно-временных профилей волнового поля при увеличении толщины деградированного слоя ThD. Белая и чёрная линии соответствуют ожидаемым временем прихода волнового фронта для двух предельных состояний материала: линия 1 — для базового бетона, линия 2 — для полностью ослабленного образца серий D2 или

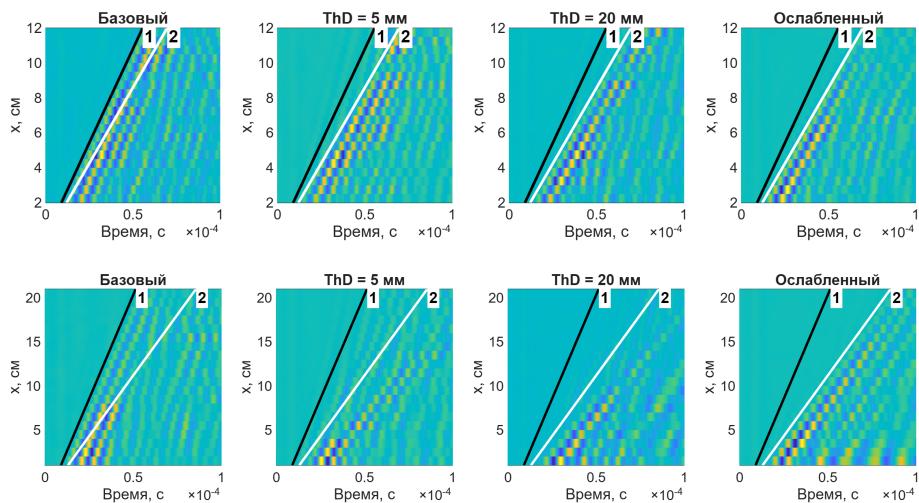


Рис. 3. Изменение пространственно-временных профилей акустических волн при частоте возбуждения 100 кГц с ростом толщины ослабленного верхнего слоя ThD в образцах серий D2 (сверху) и D3(снизу)

Fig. 3. Changes in the spatio-temporal profiles of acoustic waves at an excitation frequency of 100 kHz with an increase in the thickness of the weakened upper layer ThD in samples of the D2 (top) and D3 (bottom) series

D3. При малых значениях ThD фактический фронт волны проходит вблизи линии 1, однако по мере утолщения ослабленного слоя наблюдается его последовательное смещение к линии 2, сопровождаемое ростом рассеяния и снижением групповой скорости.

Следует отметить, что разница в свойствах серий D2 и D3 отражается в угле расхождения линий 1 и 2: для серии D2 он составляет около 5° , тогда как для более ослабленной серии D3 увеличивается до 11° . Это указывает на значительно более сильное падение упругости в серии D3 и, соответственно, на более выраженное замедление волны. Таким образом, подобные диаграммы позволяют надёжно оценивать степень и глубину поверхностного повреждения бетона по характеристикам распространения ультразвуковых волн.

2. Моделирование волновых полей с помощью конечно-элементного пакета COMSOL

Для всесторонней оценки состояния материала необходимы новые диагностические стратегии, основанные на современных методах анализа данных, включая технологии искусственного интеллекта. Их применение позволяет повысить точность интерпретации результатов и выявлять скрытые закономерности деградации материала. Однако обучение таких моделей требует большого объёма достоверных данных, что затруднительно при ограниченном количестве экспериментальных измерений. В связи с этим в работе выполнено численное моделирование распространения упругих волн в деградированном бетоне с использованием конечно-элементного пакета COMSOL Multiphysics, результаты которого могут быть использованы для последующей генерации синтетических обучающих выборок.

2.1. Построение модели в COMSOL

Модель представляет собой решение нестационарной задачи распространения упругих волн в бетонной плите с учётом неоднородности свойств и внутреннего затухания. Для уменьшения паразитных отражений и дифракции волн от боковых граней расчетная модель строилась в форме плиты, а не образцов в виде бетонных брусков квадратного сечения как в эксперименте. В узких образцах такие отражения значительно искажают форму сигнала и затрудняют анализ прямого волнового фронта. Использование плиты большей ширины обеспечивает более устойчивое распространение упругой волны в слое.

Для построения модели использовался модуль Solid Mechanics, описывающий динамические механические процессы в упругих телах. Упругие характеристики бетона — модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность — варьировались по толщине, более точно отражая реальную структуру деградированного материала, в котором верхние слои обладают пониженными упругими свойствами. Также в модели было введено переменное по толщине частотно-зависимое затухание с использованием узла Wave attenuation (волновое затухание). Данный узел вводит в модель вязкоупругие или частотно-зависимые потери, описываемые через коэффициенты демпфирования.

Функционально-градиентное распределение свойств по толщине моделировалось с использованием сглаженной функции Хевисайда flc2hs , встроенной в COMSOL Multiphysics. Эта функция имеет непрерывную вторую производную, что обеспечивает плавный переход между слоями и устойчивость численного решения. На её основе была задана обобщённая функция формы $F(z)$, описывающая изменение упругих и демпфирующих констант бетона по толщине плиты

$$F(z) = Y_d + (Y_s - Y_d) \cdot \hat{H}(h_p - h_d - z, h_t). \quad (2.1)$$

Здесь Y_d — значение константы для повреждённого слоя, Y_s — значение константы для базового слоя, h_p — толщина всей плиты, h_d — толщина поврежденного слоя, h_t — толщина переходного слоя, \hat{H} — сглаженная функция Хевисайда. На рис. 4 показан пример распределения модуля Юнга, построенный по функции формы (2.1) для плиты толщиной 4 см, при толщине повреждённого слоя 3 см и переходной зоной 3 мм.

Геометрия расчётной области (рис. 5а) представляет собой прямоугольную плиту размером $20 \times 30 \times 4$ см. Нижняя грань зафиксирована по нормали z , в то время как вдоль осей x и y перемещения остаются свободными. На боковых сторонах заданы граничные условия типа Low-Reflecting Boundary (слабое отражение), предназначенные для минимизации отражения упругих волн от границ области моделирования. Эти условия имитируют полуограниченную среду и обеспечивают рассеяние энергии, аналогичное поглощению в массивных бетонных конструкциях, тем самым, предотвращая искажения, связанные с переотражениями внутри модели.

Возбуждение волнового процесса осуществляется распределённой импульсной нагрузкой, приложенной вдоль оси z на площадке размером 5×25 мм (рис. 5а). Замена пьезоизлучателя эквивалентной распределённой нагрузкой выполнена для упрощения модели и сокращения времени вычислений. На расстоянии 20 мм от зоны нагружения расположен массив из 21 точки с шагом 5 мм, в которых фиксируются три параметра: смещение, скорость и ускорение вдоль оси z . Такая схема регистрации в точности повторяет эксперимент и позволяет анализировать пространственно-временное развитие бегущей упругой волны.

Следует отметить, что в эксперименте [26] использовался подвижный пьезоэлектрический датчик с зоной контакта 5×25 мм, обеспечивающий регистрацию усреднённого отклика по площади соприкосновения с поверхностью образца. Такой тип датчика воспринимает интегральную реакцию материала в пределах своей контактной зоны, однако предварительное

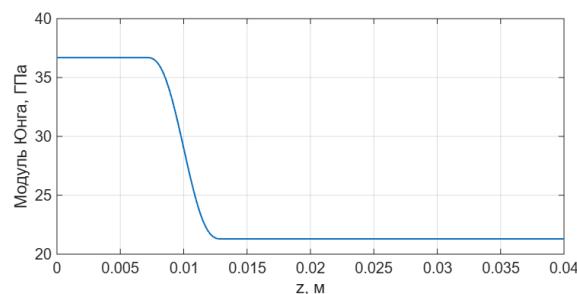


Рис. 4. Распределение модуля Юнга по толщине плиты

Fig. 4. Distribution of Young's modulus across the plate thickness

сравнение с численной моделью показало, что усреднение по площади практически не влияет на форму сигнала. Расчёты, выполненные в COMSOL, подтвердили, что амплитудно-временная структура отклика, полученная в точке, качественно совпадает с интегральным откликом по области контакта. Поэтому в численной модели регистрация данных осуществлялась в отдельных точках, что позволило существенно снизить вычислительную нагрузку без потери физической достоверности.

Поскольку пьезоэлектрический датчик преобразует механические колебания в электрический сигнал, пропорциональный ускорению поверхности, в модели для сопоставимости использовалась именно компонента ускорения вдоль оси z . Следует отметить, что экспериментальные данные [26] представлены в относительных единицах, что не влияет на возможность их качественного сопоставления с расчётыми результатами.

2.2. Материалные свойства

Для каждого из четырёх составов бетона — S, D1, D2 и D3, описанных ранее, были определены материальные параметры (табл. 1), используемые в численной модели. Модули Юнга рассчитывались по экспериментально измеренным скоростям продольных волн для соответствующих составов бетона [26]. Коэффициенты Пуассона принимались на основе усреднённых эмпирических данных для бетонов аналогичного типа, а плотность определялась по правилу смесей в соответствии с заданными пропорциями цемента и песчаного наполнителя. Следует отметить, что, поскольку базовый бетон содержит большую долю цемента, а его насыпная плотность ниже, чем у песка (1100–1600 против 1400–1700 кг/м³), итоговая плотность такого состава также оказывается меньше. При этом доля воды в растворе влияет на плотность бетона. Увеличение количества воды приводит к образованию дополнительных пор и пустот после испарения лишней влаги, что снижает общую плотность и прочность бетонного камня.

Коэффициенты демпфирования α_p оценивались на основе экспериментальных измерений затухания в однородных образцах всех четырёх составов при трёх частотах возбуждения. Расчёт

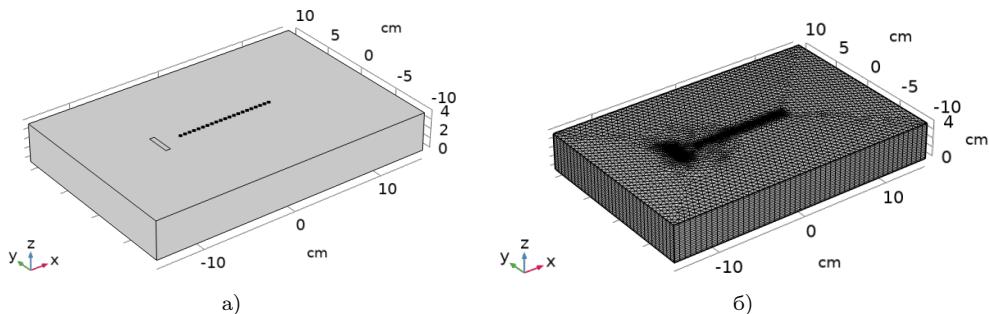


Рис. 5. Модель плиты: а) общий вид; б) конечно-элементное разбиение плиты

Fig. 5. Plate model: a) general view; b) finite element partitioning of the plate

Таблица 1. Материальные константы для различных составов бетона

Table 1. Material constants for different concrete compositions

Параметр	Единицы	Базовый состав	Ослабленный состав D1	Ослабленный состав D2	Ослабленный состав D3
E	ГПа	36,7	31,2	21,3	11,3
ν	—	0,25	0,22	0,19	0,16
ρ	кг/м ³	2277	2339	2432	2483
α_p (50 кГц)	дБ/м	59,0	84,1	38,9	31,5
α_p (100 кГц)	дБ/м	12,2	48,2	79,1	63,3
α_p (200 кГц)	дБ/м	29,2	59,1	98,6	154,7

выполнялся по методике, описанной в работе [27]. Затем на основе полученных коэффициентов строилась частотно-зависимая интерполяция внутри COMSOL.

2.3. Возбуждение волнового процесса

В качестве возбуждающего воздействия в модели использовался сигнал типа волнового пакета, широко применяемый в задачах акустического и ультразвукового неразрушающего контроля. Такой сигнал представляет собой несколько циклов синусоиды, огибающая которых формируется полуволной синусоидальной функции, что позволяет ограничить длительность.

Математически сигнал задавался выражением

$$P(t) = p_0 \sin(2\pi f_c t) \sin\left(\frac{2\pi f_c t}{n}\right)^2. \quad (2.2)$$

Здесь p_0 — амплитуда возбуждающего давления, f_c — центральная частота волнового пакета, t — время, n — число периодов несущей синусоиды внутри пакета. Пример для сигнала амплитудой 50 кПа, состоящего из 5 волн частотой 100 кГц, представлен на рис. 6.

3. Результаты и обсуждение

Для демонстрации работы модели был выполнен расчёт распространения упругих волн при частоте возбуждения 100 кГц для ряда образцов с различной толщиной ослабленного слоя из D2. Временной интервал моделирования составил 0,15 мс при шаге интегрирования 0,2 мкс, что соответствует 750 временным шагам.

Расчёчная сетка (рис. 5б) включала 90 645 объемных элементов, 14 606 граничных и 456 линейных элементов, всего около 736 800 степеней свободы. Моделирование одной задачи на персональном компьютере с процессором Intel Core i7 (12-е поколение) и 16 ГБ оперативной памяти заняло примерно 60 мин. На рис. 7 показано распределение амплитуды смещений вдоль оси z в момент времени 88 мкс по поверхности плиты с толщиной поврежденного слоя в 3 см.

На рис. 7а представлена пространственная картина распространения упругой волны в бетонной плите, полученная в ходе численного моделирования. Волновой фронт, исходящий из зоны возбуждения, формирует характерную концентрическую структуру, отражающую взаимодействие прямой и отражённых волн. Наибольшие значения смещений наблюдаются вблизи фронта основной волны. За фронтом видны зоны интерференции и постепенного затухания, обусловленные внутренними потерями в материале и действием граничных условий по типу слабого отражения.

Рис. 7б демонстрирует распределение мгновенных смещений вдоль центральной линии бетонной плиты в момент времени 88 мкс. Красным маркером обозначена область приложения возбуждающей нагрузки. Основная волна с максимальной амплитудой наблюдается правее —

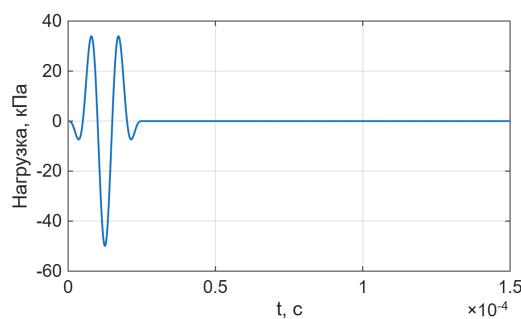


Рис. 6. Возбуждающая нагрузка

Fig. 6. Exciting load

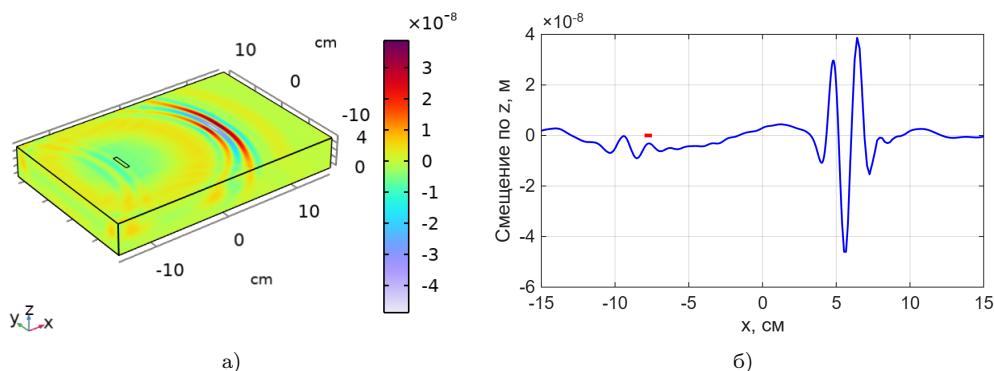


Рис. 7. Результаты расчета в момент 88 мкс: а) поле смещений по z на поверхности плиты, б) распределение амплитуд смещений по z вдоль оси x

Fig. 7. Calculation results at 88 μ s: a) displacement field along z on the plate surface, б) distribution of displacement amplitudes along z along the x axis

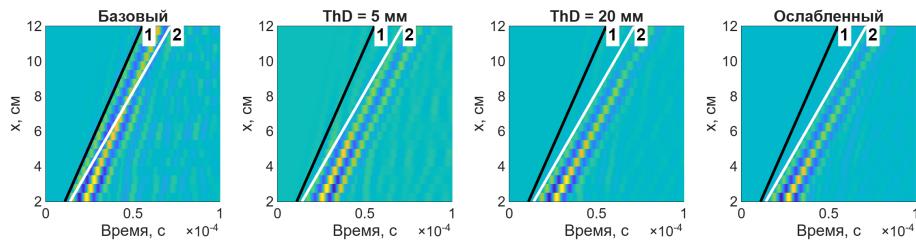


Рис. 8. Изменение пространственно-временных профилей формы волны на частоте 100 кГц с постепенным увеличением толщины поврежденного слоя

Fig. 8. Changes in the spatio-temporal profiles of the waveform at a frequency of 100 kHz with a gradual increase in the thickness of the damaged layer

на расстоянии нескольких сантиметров от источника. Характерный профиль соответствует волновому пакету, представленному на рис. 6.

На рис. 8 показаны рассчитанные пространственно-временные профили ускорений для бетонной плиты при частоте возбуждения 100 кГц и различных толщинах ослабленного слоя типа D2, зарегистрированные в 21 точке вдоль поверхности модели.

Белая и чёрная линии показывают времена прихода волнового фронта в точки измерения для двух предельных состояний материала. Линия 1 соответствует базовому бетону, линия 2 — полностью ослабленному образцу, изготовленному из состава D2. В случае базового состава фронт волны распространяется наиболее быстро и формирует чёткую, хорошо различимую диагональную полосу. При появлении деградированного слоя видны признаки замедления и усиления рассеяния, а именно смещение профиля вправо и менее контрастные контуры. В полностью ослабленном образце волна демонстрирует максимальное смещение вправо, что указывает на интенсивное рассеяние.

Сравнение расчётных и экспериментальных пространственно-временных профилей, представленных на рис. 3, показывает хорошее качественное соответствие между моделью и реальными данными. Как в эксперименте, так и в численном моделировании чётко выражено уменьшение наклона волнового фронта, примерно на 5° и усиление диффузного характера распространения. Базовый состав демонстрирует наиболее чёткий и быстрый фронт, тогда как полностью ослабленный бетон характеризуется более размытым профилем и выраженным затуханием. При этом расчётные данные ускорений демонстрируют более сглаженную структуру, что связано с отсутствием микронеоднородностей в модели, идеализированными

граничными условиями и переходу к рассмотрению плиты, а не брусков. В целом, соответствие тенденций подтверждает корректность модели и её способность воспроизводить основные физические закономерности волновых процессов в деградированном бетоне.

Заключение

В работе представлена методика численного моделирования распространения ультразвуковых волн в бетонных конструкциях с деградированным поверхностным слоем. Основное внимание уделено построению физически обоснованной модели, способной воспроизводить особенности волновых процессов, наблюдаемые в эксперименте.

Моделирование выполнялось в пакете COMSOL Multiphysics с учётом пространственной неоднородности упругих свойств и внутреннего затухания бетона. Градиентное распределение модуля упругости и коэффициентов демпфирования по толщине позволило воспроизвести постепенное ослабление материала от поверхности к глубине. Материальные параметры для четырёх составов бетона были определены на основе экспериментальных данных. Переход от рассмотрения призматических образцов к плите позволил снизить влияние отражений от боковых граней. А применение граничных условий типа слабо отражающей границы дополнительно позволило минимизировать отражения на краях области моделирования.

Результаты численных расчётов при частоте возбуждения 100 кГц показали изменение формы волны и пространственно-временных профилей с увеличением толщины деградированного слоя. Отмечено уменьшение скорости распространения, снижение амплитуды и усиление диффузного характера сигнала. Эти тенденции согласуются с экспериментальными наблюдениями, что подтверждает достоверность модели.

Предложенная модель обеспечивает основу для дальнейшего расширения исследования — генерации синтетических данных, необходимых для обучения систем искусственного интеллекта, предназначенных для автоматизированной диагностики состояния бетонных конструкций.

Литература [References]

1. Aparicio Secanellas, S., Liébana Gallego, J.C., Anaya Catalán, G., Martín Navarro, R., Ortega Heras, J., García Izquierdo, M.Á., González Hernández, M., Anaya Velayos, J.J., An ultrasonic tomography system for the inspection of columns in architectural heritage. *Sensors*, 2022, vol. 22, iss. 17, p. 6646. DOI: [10.3390/s22176646](https://doi.org/10.3390/s22176646)
2. Lencis, U., Udris, A., Kara De Maeijer, P., Korjakins, A., Methodology for determining the correct ultrasonic pulse velocity in concrete. *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 3, p. 720. DOI: [10.3390/buildings14030720](https://doi.org/10.3390/buildings14030720)
3. Vasanelli, E., Di Gennaro, D., Sticchi, M., Blasi, G., Capozzoli, L., Comparison of pulse-echo tomography and through-transmission ultrasonic test for UPV characterization of building materials. *Infrastructures*, 2025, vol. 10, p. 162. DOI: [10.3390/infrastructures10070162](https://doi.org/10.3390/infrastructures10070162)
4. Al-Neshawy, F., Ferreira, M., Puttonen, J., NDT assessment of a thick-walled reinforced concrete mock-up of NPP concrete structures. *EJ. Nondestruct. Test.*, 2022, vol. 27, pp. 1–10. DOI: [10.58286/27190](https://doi.org/10.58286/27190)
5. Rucka, M., Zielińska, M., Autonomous ultrasonic imaging and crack localisation in concrete beams during the fracture process. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, vol. 237, p. 113105. DOI: [10.1016/j.ymssp.2025.113105](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.113105)
6. Malikov, A.K.u., Flores Cuenca, M.F., Kim, B., Cho Y., Kim Y.H., Ultrasonic tomography imaging enhancement approach based on deep convolutional neural networks. *Journal of Visualization*, 2023, vol. 26, iss. 5, pp. 1067–1083. DOI: [10.1007/s12650-023-00922-6](https://doi.org/10.1007/s12650-023-00922-6)
7. Dinh, K., Tran, K., Gucunski, N., Ferraro, C.C., Nguyen, T., Imaging concrete structures with ultrasonic shear waves—Technology development and demonstration of capabilities. *Infrastructures*, 2023, vol. 8, iss. 3, p. 53. DOI: [10.3390/infrastructures8030053](https://doi.org/10.3390/infrastructures8030053)
8. Feller, V., Mielentz, F., Klewe, T., Krause, M., Orglmeister, R., Pflugradt, M., Ultrasonic phased array for investigations of concrete components. In *Proc. of NDT-CE 2015 – Int. symposium non-destructive testing in civil engineering*. Technische Universität Berlin/Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung, 2015, pp. 1–5.

9. Larose, E., de Rosny, J., Margerin, L., Anache, D., Gouédard, P., Campillo, M., van Tiggelen, B., Observation of multiple scattering of kHz vibrations in a concrete structure and application to monitoring weak changes. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2006, vol. 73, iss. 1, p. 016609. DOI: [10.1103/PhysRevE.73.016609](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.016609)
10. Larose, E., Hall S., Monitoring stress related velocity variation in concrete with a 2×10^5 relative resolution using diffuse ultrasound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, vol. 125, iss. 4, p. 1853–1856. DOI: [10.1121/1.3079771](https://doi.org/10.1121/1.3079771)
11. Zhang, L., Jiang, Z., Jia, Sh., Xie, L., Liu, Q., Li, H., Frequency-dependent reliability of ultrasonic testing based on numerical model with consideration of coarse aggregates in concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 19, p. e02462. DOI: [10.1016/j.cscm.2023.e02462](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02462)
12. Mata, R., Ruiz, R.O., Nuñez E., Correlation between compressive strength of concrete and ultrasonic pulse velocity: A case of study and a new correlation method. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 369, p. 130569. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.130569](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130569)
13. Cannas, B., Carcangiu, S., Concu, G., Fanni, A., Usai, M., Numerical simulations of ultrasonic non destructive techniques of masonry buildings. In *Proc. of the 2011 COMSOL Conference in Stuttgart*, 2011.
14. Jamal Mohamad, F.A., Anita, A., Ruzairi A.R., Sallehuddin, I., Juliza J., Noorhazirah, S., The identification of optimal frequency for ultrasonic transducers in concrete-defect detection using COMSOL® simulator. *ELEKTRIKA – Journal of Electrical Engineering*, 2025, vol. 24, iss. 2, pp. 104–110. DOI: [10.11113/elektrika.v24n2.589](https://doi.org/10.11113/elektrika.v24n2.589)
15. Jain, H., Patankar, V.H., Simulations and experimentation of ultrasonic wave propagation and flaw characterisation for underwater concrete structures. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2024, vol. 39, iss. 6, pp. 1581–1598. DOI: [10.1080/10589759.2023.2274006](https://doi.org/10.1080/10589759.2023.2274006)
16. Marković, N., Stojić, D., Cvetković, R., Radojičić, V., Conić Stefan Numerical modeling of ultrasonic wave propagation-by using of explicit fem in abaqus. *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering*, 2018, vol. 16, iss. 1, pp. 135–147. DOI: [10.2298/FUACE170830011M](https://doi.org/10.2298/FUACE170830011M)
17. Zhang, W., Yang, J., Ren, L., Dou, H., Chen, X., Jia, H., Mao, Y., Zhang, J., Xu, W., Zhou, H., Mu, X., High-performance capacitive ultrasonic transducer for non-destructive testing of concrete compressive strength. *Sensors*, 2025, vol. 25, iss. 16, p. 4903. DOI: [10.3390/s25164903](https://doi.org/10.3390/s25164903)
18. Tian, X., Ao, J., Ma, C., Shi, J., Guo, H., A hybrid strategy two-dimensional concrete aggregate filling algorithm. *Engineering Reports*, 2025, vol. 7, iss. 1, p. e13029. DOI: [10.1002/eng2.13029](https://doi.org/10.1002/eng2.13029)
19. Zhang, X., Yu, Y., Yu, Z., Qiao, F., Du, J., Yao, H., A scoping review: applications of deep learning in non-destructive building tests. *Electronics*, 2025, vol. 14, iss. 6, p. 1124. DOI: [10.3390/electronics14061124](https://doi.org/10.3390/electronics14061124)
20. McKnight, S., Gareth Pierce, S., Mohseni, E., MacKinnon, C., MacLeod, C., O'Hare, T., Loukas, C., A comparison of methods for generating synthetic training data for domain adaption of deep learning models in ultrasonic non-destructive evaluation. *NDT & E International*, 2024, vol. 141, p. 102978. DOI: [10.1016/j.ndteint.2023.102978](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102978)
21. Jiang, J., Zhang, D., Gong, F., Zhi, D., Prediction of ultrasonic pulse velocity for cement, mortar, and concrete through a multiscale homogenization approach. *Materials*, 2022, vol. 15, iss. 9, p. 3241. DOI: [10.3390/ma15093241](https://doi.org/10.3390/ma15093241)
22. Sun, W., Hou, S., Wu, G., Wu Z., Xiong, W., Zhang, J., Phased array ultrasonic and deep learning based internal defect detection in underwater concrete bridge structures. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, p. e04946. DOI: [10.1016/j.cscm.2025.e04946](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04946)
23. Kirillova, E., Tatarinov, A., Kovalenko, S., Shahmenko, G., Prediction of degradation of concrete surface layer using neural networks applied to ultrasound propagation signals. *Acoustics*, 2025, vol. 7, iss. 2, p. 19. DOI: [10.3390/acoustics7020019](https://doi.org/10.3390/acoustics7020019)
24. Guo, J., Sun, W., Xu, Y., Lin, W., Jing, W., Damage mechanism and modeling of concrete in freeze–thaw cycles: a review. *Buildings*, 2022, vol. 12, iss. 9, p. 1317. DOI: [10.3390/buildings12091317](https://doi.org/10.3390/buildings12091317)
25. Ikumapayi, C.M., Adeniji, A.A., Obisesan, A.A., Odeyemi, O., Ajayi, J.A., Effects of carbonation on the properties of concrete. *Sci. Rev.*, 2019, vol. 5, iss. 12, pp. 205–214. DOI: [10.32861/sr.512.205.214](https://doi.org/10.32861/sr.512.205.214)
26. Tatarinov, A., Sisojevs, A., Chaplinska, A., Shahmenko, G., Kurtenoks, V., An approach for assessment of concrete deterioration by surface waves. *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 37, pp. 453–461. DOI: [10.1016/j.prostr.2022.01.109](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.109)
27. Philippidis, T.P., Aggelis, D.G., Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. *Ultrasonics*, 2005, vol. 43, iss. 7, pp. 584–595. DOI: [10.1016/j.ultras.2004.12.001](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.12.001)