

О рациональном подходе к расчету демпфера пьезопреобразователя. Часть 1. Численное моделирование

М. С. Вечёра^{1,2}, С. И. Коновалов¹, Р. С. Коновалов^{1,3✉}, В. В. Шеметова^{1,4}, В. М. Цаплев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Константа УЗК», Санкт-Петербург, Россия

³ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО «Системы неразрушающего контроля», Санкт-Петербург, Россия

✉ rskonovlov.eut@gmail.com

Аннотация.

Цель работы: Получить универсальную расчетную модель пьезопреобразователя с демпфером усложненной формы, позволяющую оценивать эффективность демпфирования при любых конфигурациях демпфера.

Материалы и методы: Эффективность демпфирования оценена путем расчета методом конечных элементов и экспериментально.

Результаты: Рассмотрен процесс создания расчетной модели в 3D-пространстве, позволяющей исследовать эффективность демпферов различных форм и конфигураций. Предложена 3D-модель пьезопластины с демпфером в виде усеченного конуса. Изучен вопрос выбора параметров сетки конечных элементов, оптимальных с точки зрения достоверности результатов и задействованной вычислительной мощности. Проведен анализ влияния размера сетки на корректность получаемых результатов. Определен наиболее эффективный в отношении минимальной амплитуды паразитного сигнала угол наклона образующей конусного демпфера, полученный путем сравнительного анализа 2D-моделирования, 3D-моделирования и натурного эксперимента.

Заключение: Представлена расчетная модель пьезопреобразователя с демпфером в виде усеченного конуса в 3D-пространстве. Определено влияние максимального размера элемента сетки посредством сравнения с результатами моделирования в 2D-пространстве и натурного моделирования, установлен минимально необходимый размер элемента сетки. Отмечено удовлетворительное сходство результатов, полученных различными способами.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, пьезоэлектрический преобразователь, демпфер, моделирование, метод конечных элементов

Для цитирования: О рациональном подходе к расчету демпфера пьезопреобразователя. Часть 1. Численное моделирование / М. С. Вечёра, С. И. Коновалов, Р. С. Коновалов, В. В. Шеметова, В. М. Цаплев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 1. С. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-1-5-14.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

On a Rational Approach to Calculating the Piezoelectric Transducer Damper. Part 1. Numerical Simulation

M. S. Vechera^{1,2}, S. I. Konovalov¹, R. S. Konovalov^{1,3✉}, V. V. Shemetova^{1,4}, V. M. Tsaplev¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² LLC «Constanta US», Saint Petersburg, Russia

³ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russia

⁴ LLC «Ndt Systems», Saint Petersburg, Russia

✉ rskonovalov.eut@gmail.com

Abstract.

Purpose of the work: To develop a universal computational model for a piezoelectric transducer with a complex-shaped damper which allows for evaluating damping efficiency of any damper configuration.

Materials and methods: The damping efficiency was estimated through both computational and experimental methods. The computational approach used the finite element analysis technique, while the experimental evaluation involved direct measurements.

Results: The process of creating a computational model in 3D space, which makes it possible to study the effectiveness of dampers of various shapes and configurations, is considered. A 3D model of piezoplastics with a damper in the form of a truncated cone is proposed. The issue of choosing the parameters of the finite element grid that are optimal in terms of the reliability of the results and the computing power involved is studied. The analysis of the influence of the grid size on the correctness of the obtained results is carried out. The angle of inclination of the cone damper forming is determined to be the most effective from the point of view of the minimum amplitude of the parasitic signal by comparative analysis of the results obtained by 2D modeling, 3D modeling and field experiment.

Conclusion: A computational model of a piezoelectric transducer having a damping element in the form of a truncated cone in three-dimensional space is provided. The influence of the maximum size of the finite element mesh is determined by comparing the results with those obtained from two-dimensional modeling and field analysis. The minimum required mesh size is also determined. A satisfactory level of consistency between the results obtained through different methods is observed.

Keywords: non-destructive testing, piezoelectric transducer, damper, modeling, finite element method

For citation: On a Rational Approach to Calculating the Piezoelectric Transducer Damper. Part 1. Numerical Simulation / M. S. Vechera, S. I. Konovalov, R. S. Konovalov, V. V. Shemetova, V. M. Tsaplev // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 1. P. 5–14. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-1-5-14.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В настоящее время методы неразрушающего контроля применяются практически во всех отраслях промышленности. При этом акустический контроль – один из наиболее перспективных видов исследований несплошности материалов, что можно объяснить целым рядом его неоспоримых достоинств. К ним можно отнести: относительную дешевизну, безвредность для обслуживающего персонала, успешное применение для широкого класса исследуемых материалов, возможность осуществления контроля при одностороннем доступе к изделию и др. Разработчики аппаратуры для этого вида контроля

прилагают значительные усилия, чтобы усовершенствовать излучающие и приемные электроакустические преобразователи, входящие в ее состав. Они предназначены для преобразования электрической энергии в энергию акустических волн и наоборот. Их работа может основываться на разных физических принципах, и для их изготовления могут применяться разнообразные материалы. Стоит упомянуть некоторые публикации обзорного характера, описывающие различные физические подходы, применяемые при их разработке. Так, например, [1] касается пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), а электромагнитно-

акустические рассмотрены в [2]. Активно применяются в настоящее время и преобразователи, которые используют лазерное возбуждение [3]. Емкостные ультразвуковые микромашинные преобразователи (преобразователи электростатического действия) описаны в [4]. Наиболее широко в наши дни применяются пьезоэлектрические преобразователи [5]. В качестве активных в них используются элементы, выполненные из пьезоактивного материала. Таковыми могут быть пьезоэлектрические монокристаллы [6], пьезокерамика [1], пьезополимеры [7]. В ультразвуковой дефектоскопии таким элементом обычно служит пьезопластина. Для данной области прикладной акустики типичны задачи локационного характера. Именно поэтому общей тенденцией при проектировании ПЭП заключается в стремлении к уменьшению длительности зондирующего сигнала. Особенно важна возможность достижения этой цели без снижения уровня излучаемого сигнала. Для этого возможно применение демпферов различных геометрических форм и материалов, определяющих их состав.

В литературе традиционно отмечается, что наиболее практично и эффективно изготовление демпфера, смешивая некоторый связующий полимеризующийся материал и наполнитель. Поиску и изучению новых технологических способов изготовления демпфера посвящено значительное количество публикаций. Вопросу же влияния формы демпфера на эффективность работы ПЭП в литературе уделено явно недостаточное внимание [8], [9].

Разработка ПЭП – задача комплексная и наукоемкая. При разработке новых преобразователей всегда возникает вопрос о свойствах и геометрических параметрах конструктивных элементов, входящих в его состав. Для достижения оптимального решения применяются, как правило, два способа: натурные эксперименты и расчетное моделирование. Проведение натурных экспериментов связано с рядом сложностей и ограничений, самое главное из которых – материальная составляющая, требующая значительного количества дорогостоящих материалов и комплектующих, а также больших затрат времени и труда. Для реализации способа расчетного моделирования применяются различные программы компьютерного моделирования. Они позволяют проводить неограниченное количество исследований без значительных материальных затрат и оперативно изменять требуемые параметры. Далее можно проводить эксперимен-

тальную проверку полученных результатов. Главной проблемой при проведении расчетных экспериментов служит ограниченность производительности компьютера.

В настоящей статье авторы предлагают компьютерную модель задачи, направленной на исследование влияния формы демпфера на эффективность работы ПЭП в среде COMSOL Multiphysics. Модель отличается тем, что она может применяться для исследования демпфера любой конфигурации. Результаты, полученные при расчете, сопоставлены с результатами натурного моделирования.

Исследование конусного демпфера в 2D- и 3D-пространствах. С целью расчета демпферов любой формы и конфигурации был выполнен переход из 2D- в 3D-пространство. Решение задачи для 3D-пространства осуществлено на основании уже имеющейся и отработанной модели в 2D-пространстве, подробное описание которой приведено в [8], [9]. Геометрия 2D-модели приведена на рис. 1, где введены обозначения: h – высота демпфера, d – толщина пьезопластины, a – радиус пьезопластины, α – угол наклона боковой стенки демпфера. При расчете высота демпфера равнялась 9.5 мм, высота пьезопластины 0.8 мм, а ее радиус 6 мм. Угол наклона образующей изменялся в пределах от 90 до 60°. Из рисунка можно видеть, что данная модель осесимметрична и позволяет исследовать демпферы простой формы. Следует отметить, что из-за привязки к оси симметрии количество возможных вариантов формы демпферов существенно ограничено.

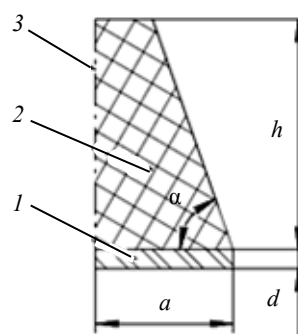


Рис. 1. Геометрия расчетной 2D-модели:

1 – пьезопластина; 2 – тело демпфера;
3 – ось симметрии

Fig. 1. Geometry of the calculated 2D model:

1 – piezoelectric plate; 2 – damper body;
3 – symmetry axis

Для расширения возможностей моделирования описанная модель была построена в 3D-пространстве. Исходная геометрия 3D-модели приведена на рис. 2.

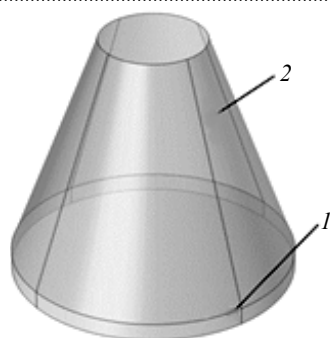


Рис. 2. Геометрия расчетной 3D-модели:
1 – пьезопластина; 2 – тело демпфера
Fig. 2. Geometry of the calculated 3D model:
1 – piezoelectric plate; 2 – damper body

Переход в 3D-пространство позволяет неограниченно увеличить количество возможных форм для изучения, но вместе с тем возрастают требования к вычислительной мощности компьютера.

Программа COMSOL для расчета использует метод конечных элементов, поэтому первостепенным вопросом при проведении компьютерных расчетов служит выбор оптимального размера элемента сетки. При выборе параметров сетки необходимо исходить из рационального соотношения между скоростью расчета и достоверностью его результатов. Помимо этого, чрезмерно малый размер элемента сетки может привести к принципиальной невозможности расчета модели. В [8], [9] авторы отмечали, что для получения корректных результатов требуется соблюдать критерий Куранта–Фридрихса–Леви [8], равный 0.1. При этом максимальный размер элементов сетки при решении в 2D должен быть порядка $\lambda/6$, а при решении в 3D – $\lambda/3$, где λ – длина волны излучения. Данные соотношения – эмпири-

ческие, при этом обеспечивается физически корректный расчет волновых процессов [10]–[12].

В качестве демпфера в настоящем исследовании использовалась смесь эпоксидной смолы КДА и вольфрамового порошка ПВ-1 в соотношении 1:1 по массе. Ультразвуковые параметры данного материала были определены ранее [8], [9], и для расчета максимального шага сетки использовалась скорость поперечной волны, равная 950 м/с. Исходя из этого, наибольший шаг сетки при расчете в 2D должен равняться 0.06 мм, а для расчета в 3D – 0.12 мм. Однако следует отметить, что при переходе в 3D-пространство количество конечных элементов моделикратно возрастает. Так, при указанном максимальном размере элементов сетки их количество составляет 992 тыс., а количество степеней свободы при этом равняется практически 13 млн. Вычислительные мощности компьютера, использовавшегося для расчетов, не позволяют рассчитать модель с указанными параметрами.

С целью уменьшения количества степеней свободы было исследовано влияние размера элемента сетки на результаты моделирования. В качестве модели для исследования был выбран демпфер в виде усеченного конуса с углом наклона образующей 75° . Моделирование при этом проходило в 2D- и 3D-пространствах. Данные 2D-моделирования необходимы для оценки корректности расчета 3D-модели. Это обусловлено тем, что результаты 2D-моделирования ранее были проверены с помощью сравнения с результатами натурного моделирования. Были смоделированы

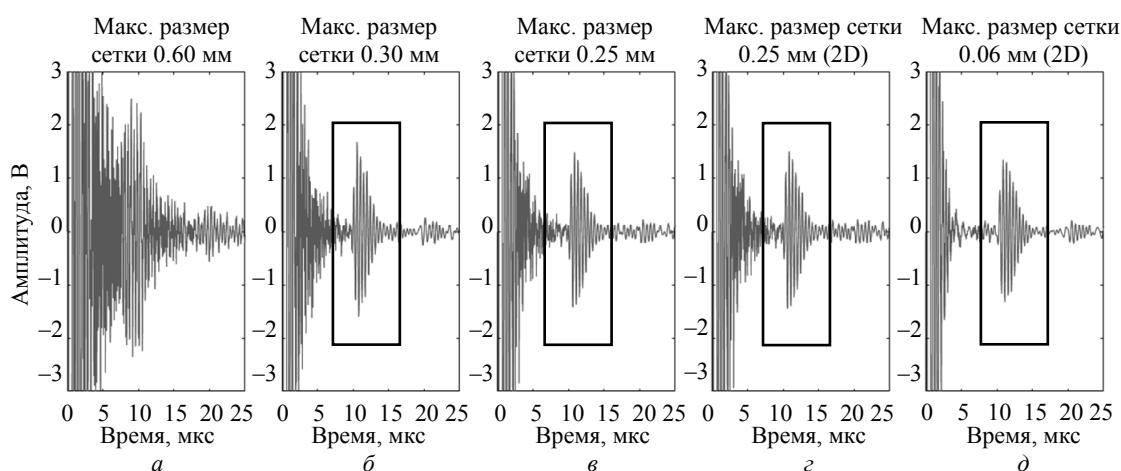


Рис. 3. Выходное напряжение на пьезоэлементе для случая демпфера в виде усеченного конуса с углом наклона образующей 75° при максимальном размере элементов сетки: а – 0.6 мм; б – 0.3 мм; в – 0.25 мм; г – 0.25 мм, расчет в 2D; д – 0.06 мм, расчет в 2D

Fig. 3. The output voltage on the piezoelectric element for the damper body having the form of a truncated cone with an angle of generatrix inclination 75° at the maximum size of the grid elements: а – 0.6 mm; б – 0.3 mm; в – 0.25 mm; г – 0.25 mm, calculation in 2D; д – 0.06 mm, calculation in 2D

случаи при размерах элемента 0.6, 0.3 и 0.25 мм в 3D-пространстве и 0.25 и 0.06 мм в 2D-пространстве, результаты расчетов приведены на рис. 3.

Результаты, представленные на рис. 3, позволяют утверждать, что при уменьшении размера элемента сетки с 0.3 до 0.25 мм не наблюдается значительного изменения амплитуды и формы паразитного сигнала. Под паразитным сигналом в настоящей статье понимается сигнал, возвращаемый на пьезопластину после отражения от тыльной стороны демпфера. На рис. 3 паразитный сигнал для наглядности помещен в рамку. Однако при расчетах необходимо использовать сетку с минимально возможным размером элементов с целью увеличения достоверности результатов. Используемый для расчетов компьютер позволяет рассчитать данную модель с размером элементов сетки не менее 0.25 мм. Немаловажен тот факт, что уменьшение размера элементов сетки приводит к изменению формы и длительности реверберационных шумов в начале развертки, а также к незначительному изменению амплитуды паразитного сигнала. Исследование характера реверберационных шумов выходит за рамки настоящей статьи, поэтому в контексте данного исследования

этот параметр не является определяющим. Различия амплитуд паразитного сигнала при моделировании с различным размером элементов сетки не превышает 10 %, чем также можно пренебречь. Следует также отметить, что результаты моделирования в 2D- и 3D-пространствах при одинаковом размере элементов сетки практически идентичны, что позволяет судить о физической корректности результатов, получаемых в 3D. Кроме этого, в контексте данного исследования не наблюдается значительных различий при моделировании с размерами сетки 0.25 и 0.06 мм. Приведенные факты позволяют утверждать, что, несмотря на несоблюдение указанного эмпирического правила выбора размера сетки, результаты, получаемые при помощи 3D-модели, корректны и могут быть использованы для оценки эффективности демпферов ПЭП различной формы, что наглядно будет продемонстрировано далее.

На рис. 4 представлены результаты сравнения данных расчета описанной модели в 3D-пространстве с полученными ранее данными расчета аналогичной модели в 2D-пространстве для всех исследуемых углов наклона образующей конусного демпфера. Для удобства результаты 3D-мо-

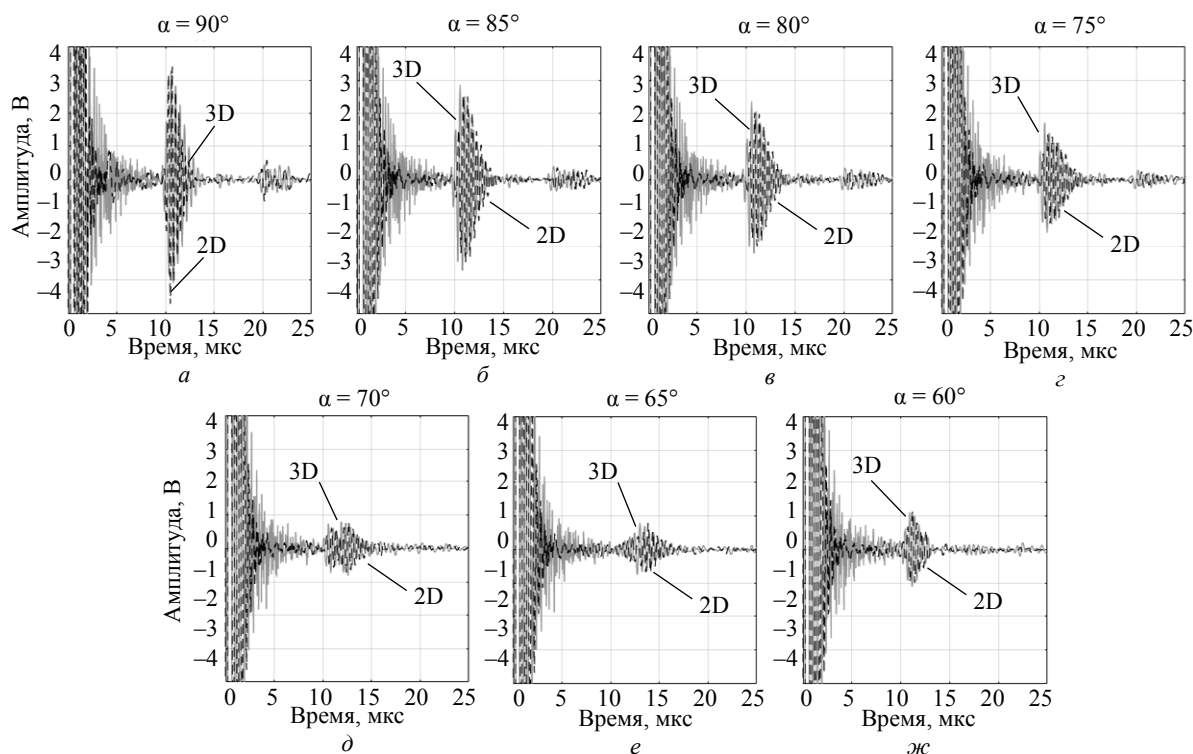


Рис. 4. Сравнение расчетного выходного напряжения на пьезоэлементе в 2D- и 3D-пространствах при угле наклона образующей α , равным: а – 90°; б – 85°; в – 80°; г – 75°; д – 70°; е – 65°; ж – 60°
 Fig. 4. Comparison of the calculated output voltage on the piezoelectric element in 2D and 3D spaces at the angle of inclination of the generatrix α equal to: а – 90°; б – 85°; в – 80°; г – 75°; д – 70°; е – 65°; ж – 60°

делирования нанесены сплошными линиями, а 2D-моделирования – штриховыми.

Полученные результаты позволяют с полной уверенностью судить о том, что результаты моделирования в 2D- и 3D-пространствах имеют отличия только в длительности паразитного сигнала и зондирующего импульса. При этом амплитуда паразитного сигнала из тела демпфера идентична при моделировании в 2D- и 3D-пространствах, что первостепенно при изучении вопроса оптимальной формы демпфера.

Следует также отметить, что размер элемента сетки практически не влияет на результаты моделирования и в дальнейшем максимальный шаг сетки выбирался равным 0.25 мм. Кроме этого, необходимо отметить, что результаты моделирования при указанном шаге качественно совпадают с результатами не только моделирования в 2D-пространстве, но и натурных экспериментов, что будет продемонстрировано далее.

Для сравнения результатов моделирования и натурных экспериментов были изготовлены экспериментальные образцы демпферов, располо-

женных на пьезопластине. Подробно процесс изготовления опытных образцов описан в [8], [9]. Однако для лучшего представления читателем сути рассматриваемых вопросов целесообразно привести некоторые основные сведения о технологии изготовления опытных образцов. В качестве активного элемента были использованы пьезопластины марки ЦТС-19 диаметром 12 мм с частотой резонанса 2.5 МГц. В качестве материала демпфера использована смесь эпоксидной смолы КДА, отвердителя ЭТАЛ-45М и мелкодисперсного порошка вольфрама марки ПВ-1. Компоненты смеси были размешаны до однородности, после чего смесь дегазировалась. Для получения демпферов требуемой формы использовалась оснастка из водорастворимого пластика, изготавливаемая при помощи технологии 3D-печати. Перед исследованием образцы демпферов были оставлены до полной полимеризации не менее чем на 48 ч.

Для получения осциллограмм ультразвуковых сигналов, фиксируемых пьезопластиной, каждый из образцов был подключен к дефектоскопу и парал-

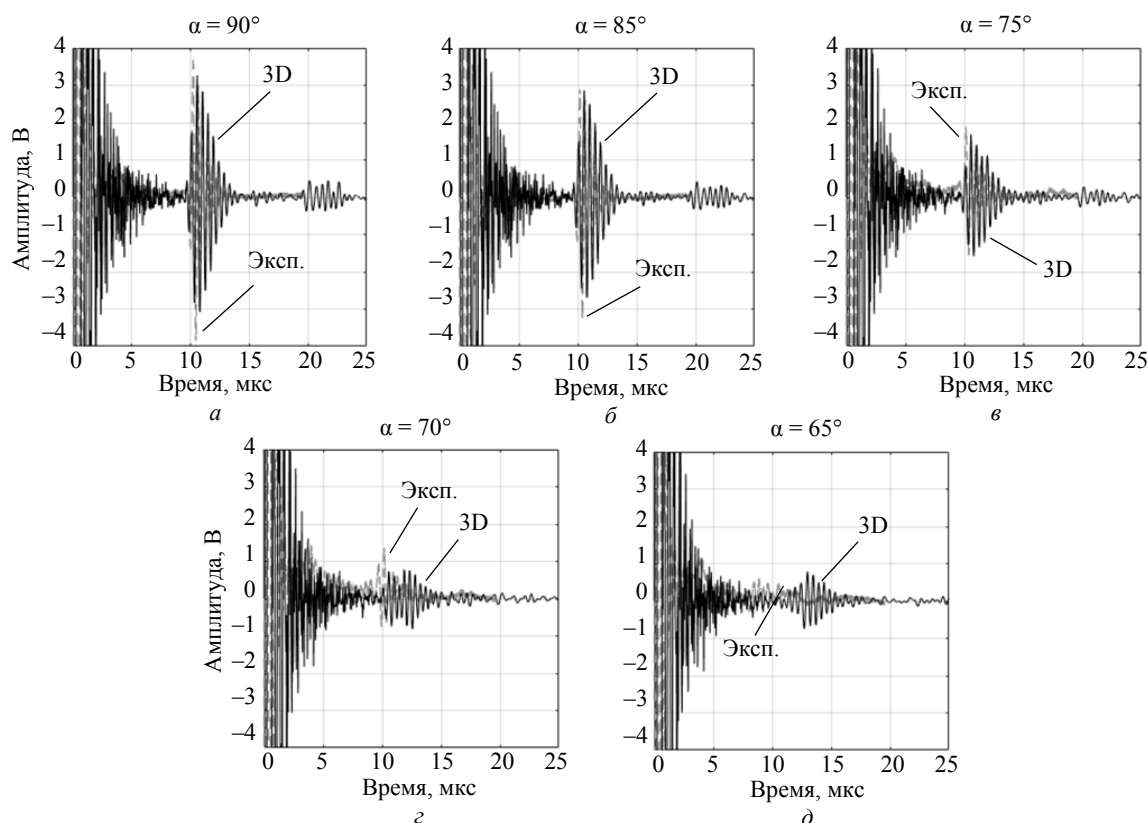


Рис. 5. Сопоставление выходного напряжения на пьезоэлементе полученного расчетным моделированием в 3D-пространстве и экспериментальных значений при углах наклона образующей α , равных:

$\alpha - 90^\circ$; б – 85° ; в – 75° ; г – 70° ; д – 65°

Fig. 5. Comparison of the output voltage on the piezoelectric element obtained by calculation modeling in 3D space and experimental values at the angles of inclination of the generatrix α equal to:

$\alpha - 90^\circ$; б – 85° ; в – 75° ; г – 70° ; д – 65°

тельно к осциллографу. Дефектоскоп в данной работе использовался в качестве источника напряжения. Получаемые сигналы были оцифрованы, а затем восстановлены при помощи MatLab для дальнейшего сравнения. На рис. 5 представлено сравнение результатов моделирования в 3D-пространстве и натурных экспериментов. Для удобства результаты 3D-моделирования нанесены сплошными линиями, а натурального эксперимента – штриховыми.

Можно видеть (и это уже было отмечено ранее) результаты 3D-моделирования имеют удовлетворительное сходство с результатами натурных экспериментов. Смещение по времени паразитного сигнала, наблюдаемое при углах наклона образующей 70 и 65°, следует из меньшей высоты натурных образцов демпферов ввиду неполного заполнения оснастки по причине высокой вязкости демпфирующей смеси. Заметны также различия длительностей сигналов, полученных расчетным и экспериментальным путями, что, как уже было отмечено, не относится к исследуемым параметрам. При этом амплитуда возвращенного сигнала практически одинакова и минимум отраженных сигналов наблюдается при угле наклона образующей конуса 65° вне зависимости от типа исследования.

Для более наглядного сравнения на рис. 6 представлена зависимость размаха сигнала, возвращенного из материала демпфера, в зависимости от угла наклона его боковой стенки для различных способов моделирования демпфера. Следует отметить, что линии, соединяющие точки, получены аппроксимацией полиномом третьей степени.

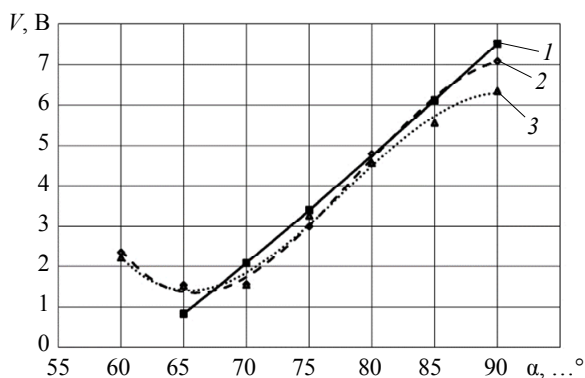


Рис. 6. Зависимость размаха паразитного сигнала V от угла наклона образующей α для случаев:

1 – натурального моделирования; 2 – 2D-моделирования;
 3 – 3D-моделирования

Fig. 6. Dependence of the amplitude of the parasitic signal V on the angle of inclination of the generatrix α for the case of:
 1 – real modeling; 2 – 2D simulation; 3 – 3D simulation

Из данных, представленных на рис. 6, видно, что амплитуда паразитного сигнала, возвращенного из толщи демпфера практически одинакова при различных типах исследования зависимости эффективности демпфера от его формы. Исследование демпфера в виде усеченного конуса с различным углом наклона образующей показало, что наибольшей эффективности такой демпфер достигает при угле наклона образующей 65°, что определяется минимумом амплитуды паразитного сигнала. Данный результат был получен в предыдущих исследованиях [8], [9], что в очередной раз доказывает корректность результатов, получаемых при помощи разработанной 3D-модели.

Заключение. В статье предложен метод расчетного моделирования пьезопреобразователя с демпфером в виде усеченного конуса в 2D- и 3D-пространствах. Полученные расчетным путем результаты сопоставлены с результатами натурального моделирования. В результате выполнения настоящего исследования:

1. Определен оптимальный с точки зрения задействованной вычислительной мощности и достоверности результатов максимальный шаг сетки для расчета в 3D-пространстве. Установлено, что при максимальном шаге сетки, равном 0.25 мм, результаты расчета имеют хорошее сходство с результатами расчета в 2D-пространстве. Данное обстоятельство продемонстрировано наглядным сравнением результатов моделирования для случая демпфера в виде усеченного конуса с углом наклона образующей 75°.

2. Разработана расчетная 3D-модель пьезопреобразователя с демпфером и экспериментально подтверждена корректность ее работы. Полученная модель позволяет оценивать эффективность работы демпфера расчетным путем. При этом следует отметить, что переход в 3D-пространство практически неограниченно расширяет количество форм демпферов, подлежащих расчету.

3. Продemonстрировано сходство результатов 2D-, 3D-моделирования с результатами натурального эксперимента. Вне зависимости от способа исследования предложенной формы демпфера, определен оптимальный угол наклона образующей 65°.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что предложенная модель – это универсальный способ оценки эффективности работы демпфера пьезопреобразователя. Следует также отметить, что данная модель позволяет рассчитывать пьезопреобразователи с иными свой-

ствами компонентов – маркой пьезоматериала или составом демпфирующей смеси. Расчетное моделирование пьезопреобразователей может оказаться высокоэффективным при разработке новых и усовершенствования существующих преобразователей, что особенно важно при серийном производстве ПЭП. Помимо этого, результаты проведенного в

рамках настоящей статьи исследования влияния размера элементов сетки на результаты моделирования позволяют осуществлять корректные расчеты с высокой степенью достоверности результатов, получаемых на компьютерах с ограниченной вычислительной мощностью.

Список литературы

1. Uchino K. Piezoelectric devices for sustainability technologies // Encyclopedia of Sustainable Technol. (Second Edition). 2024. Vol. 3. P. 463–477.
2. Memon A., Alhems L. EMAT Generated guided waves in pipes: A review // NDT in Canada. E-J. of Nondestructive Testing. 2023. Vol. 28(10).
3. Application of laser ultrasonic testing technology in the characterization of material properties: A review / Y. Lian, F. Du, L. Xie, Q. Hu, P. Jin, Y. Wang, Z. Lu // Measurement. 2024. Vol. 234. P. 114855.
4. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: Technology and application / M. Sabri Salim, M. F. A. Malek, R. B. W. Heng, K. M. Juni, N. Sabri // J. of Med. Ultrasound. 2012. Vol. 20, no. 1. P. 8–31.
5. Applications of piezoelectric-based sensors, actuators, and energy harvesters / M. Ali Mangi, H. Elahi, A. Ali, H. Jabbar, A. Bin Aqeel, A. Farrukh, S. Bibi, W. A. Altabay, S. A. Kouritem, M. Noori // Sensors and Actuators Reports. 2025. Vol. 9. P. 100302.
6. Piezoelectric single crystal ultrasonic transducers for biomedical applications / Q. Zhou, K. Ho Lam, H. Zheng, W. Qiu, K. Kirk Shung // Progress in Materials Sci. 2014. Vol. 66. P. 87–111.
7. Piezoelectric films for high frequency ultrasonic transducers in biomedical applications / Q. Zhou, S. Lau, D. Wu, K. K. Shung // Progress in Materials Sci. 2011. Vol. 56, no. 2. P. 139–174.
8. Влияние геометрической формы демпфера на эффективность работы ультразвукового пьезоэлек-

трического преобразователя / М. С. Вечёра, С. И. Коновалов, Р. С. Коновалов, Б. И. В. М. Цаплев, А. Д. Соловьева // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 2. С. 5–14.

9. К вопросу о рациональном выборе формы демпфера ультразвукового пьезопреобразователя / М. С. Вечера, С. И. Коновалов, Р. С. Коновалов, В. М. Цаплев // Дефектоскопия, 2024, № 4, С. 3–15.

10. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. 1928. Vol. 100. P. 32–74.

11. Marburg S. Discretization requirements: how many elements per wavelength are necessary? / Ed. B. Nolte // Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids. Finite and Boundary Element Methods. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. P. 309–332. doi: 10.1007/978-3-540-77448-8_12.

12. More than six elements per wavelength: The practical use of structural finite element models and their accuracy in comparison with experimental results / P. Langer, M. Maeder, C. Guist, M. Krause, S. Marburg // J. of Computational Acoustics. 2017. Vol. 25, no. 04. P. 1750025.

13. Two dimensional FEM simulation of ultrasonic wave propagation in isotropic solid media using COMSOL / B. Ghose, K. Balasubramaniam, C. Krishnamurthy, A. Rao // COMSOL Conf. Chennai, India: IEEE, 2010. Vol. 37. P. 38.

Информация об авторах

Вечёра Михаил Сергеевич – аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», инженер ООО «Константа УЗК», Огородный переулок, д. 21, г. Санкт-Петербург, 198097, Россия.
E-mail: vechiora.mihail@yandex.ru, vms@constant.ru
<https://orcid.org/0009-0003-0018-6810>

Коновалов Сергей Ильич – д-р техн. наук, профессор кафедры электроакустики и ультразвуковой техники, профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: sikonovalev.eut@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5033-344X>

Коновалов Роман Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Московский пр., д. 9, г. Санкт-Петербург, 190031, Россия.
E-mail: rskonovalev.eut@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0155-2718>

Шеметова Валентина Владимировна – студентка гр. 0582 СПбГЭТУ «ЛЭТИ», инженер ООО «Системы неразрушающего контроля», ул. Мельничная, д.8, лит. Л, г. Санкт-Петербург, 192019, Россия.
E-mail: valentin.shemo@gmail.com

Цаплев Валерий Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры электроакустики и ультразвуковой техники, профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: valery@convergences-fr.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7386-7233>

Вклад авторов:

Вечёра М. С. – концепция исследования; подготовка и проведение исследований; подготовка рукописи.
Коновалов С. И. – методология исследования; подготовка рукописи; редактирование рукописи.
Коновалов Р. С. – анализ данных; коррекция рукописи.
Шеметова В. В. – проведение численных исследований; анализ данных; подготовка рукописи.
Цаплев В. М. – анализ данных; коррекция и редактирование рукописи.

References

1. Uchino K. Piezoelectric devices for sustainability technologies // Encyclopedia of Sustainable Technol. (Second Edition). 2024. Vol. 3. P. 463–477.
2. Memon A., Alhems L. EMAT Generated guided waves in pipes: A review // NDT in Canada. E-J. of Nondestructive Testing. 2023. Vol. 28(10).
3. Application of laser ultrasonic testing technology in the characterization of material properties: A review / Y. Lian, F. Du, L. Xie, Q. Hu, P. Jin, Y. Wang, Z. Lu // Measurement. 2024. Vol. 234. P. 114855.
4. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: Technology and application / M. Sabri Salim, M. F. A. Malek, R. B. W. Heng, K. M. Juni, N. Sabri // J. of Med. Ultrasound. 2012. Vol. 20, no. 1. P. 8–31.
5. Applications of piezoelectric-based sensors, actuators, and energy harvesters / M. Ali Mangi, H. Elahi, A. Ali, H. Jabbar, A. Bin Aqeel, A. Farrukh, S. Bibi, W. A. Altabay, S. A. Kouritem, M. Noori // Sensors and Actuators Reports. 2025. Vol. 9. P. 100302.
6. Piezoelectric single crystal ultrasonic transducers for biomedical applications / Q. Zhou, K. Ho Lam, H. Zheng, W. Qiu, K. Kirk Shung // Progress in Materials Sci. 2014. Vol. 66. P. 87–111.
7. Piezoelectric films for high frequency ultrasonic transducers in biomedical applications / Q. Zhou, S. Lau, D. Wu, K. K. Shung // Progress in Materials Sci. 2011. Vol. 56, no. 2. P. 139–174.
8. Vlijanje geometricheskoj formy dempfera na jeffektivnost' raboty ul'trazvukovogo p'ezojelektricheskogo preobrazovatelja / M. S. Vechjora, S. I. Kononov, R. S. Kononov, B. I. V. M. Caplev, A. D. Solov'eva // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2024. T. 17, № 2. S. 5–14. (In Russ.).
9. K voprosu o racional'nom vybore formy dempfera ul'trazvukovogo p'ezopreobrazovatelja / M. S. Vechera, S. I. Kononov, R. S. Kononov, B. I. V. M. Caplev // Defektoskopiya, 2024, № 4, S. 3–15. (In Russ.).
10. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. 1928. Vol. 100. P. 32–74.
11. Marburg S. Discretization requirements: how many elements per wavelength are necessary? / Ed. B. Nolte // Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids. Finite and Boundary Element Methods. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. P. 309–332. doi: 10.1007/978-3-540-77448-8_12.
12. More than six elements per wavelength: The practical use of structural finite element models and their accuracy in comparison with experimental results / P. Langer, M. Maeder, C. Guist, M. Krause, S. Marburg // J. of Computational Acoustics. 2017. Vol. 25, no. 04. P. 1750025.
13. Two dimensional FEM simulation of ultrasonic wave propagation in isotropic solid media using COMSOL / B. Ghose, K. Balasubramaniam, C. Krishnamurthy, A. Rao // COMSOL Conf. Chennai, India: IEEE, 2010. Vol. 37. P. 38.

Information about the authors

Mikhail S. Vechera – graduate student, Department Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer of LLC «Constanta US», Ogorodny Lane, 21, St Petersburg, 198097, Russia.
E-mail: vechiora.mihail@yandex.ru, vms@constanta.ru
<https://orcid.org/0009-0003-0018-6810>

Sergey I. Kononov – Dr Sci. (Eng.), Professor of department Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: sikononov.eut@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5033-344X>

Roman S. Konovalov – Cand. Sci. (Eng.), the head of department Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University, Associate Professor Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Moskovsky Pr., 9, St. Petersburg, 190031, Russia.
E-mail: rskonovalov.eut@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0155-2718>

Valentina V. Shemetova – student gr. 0582, Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer, LLC «NDT Systems», Melnichnaya St., 8L, St. Petersburg, 192019, Russia.
E-mail: valentin.shemo@gmail.com

Valery M. Tsaplev – Dr Sci. (Eng.), Professor of Department Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: valery@convergences-fr.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7386-7233>

Author contribution statement:

Vechera M. S. – research concept; preparation and conduct of research; preparation of the manuscript.

Konovalov S. I. – research methodology; manuscript preparation; manuscript editing.

Konovalov R. S. – data analysis; correction of the manuscript.

Shemetova V. V. – conducting numerical research; data analysis; preparation of the manuscript.

Tsaplev V. M. – data analysis; correction and editing of the manuscript.

Статья поступила в редакцию 01.11.2025; принята к публикации после рецензирования 27.11.2025; опубликована онлайн 29.01.2026.

Submitted 01.11.2025; accepted 27.11.2025; published online 29.01.2026.
