

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СОГЛАСУЮЩЕГО СЛОЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Н. Н. ДЕДОВИЧ<sup>1)</sup>, П. В. КУЧИНСКИЙ<sup>1)</sup>, А. Ф. РОМАНОВ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,  
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

**Аннотация.** Приведена методика поиска оптимальных параметров согласующего слоя пьезоэлектрического преобразователя, предназначенного для излучения и приема ультразвуковых колебаний в газовой среде. В качестве способа оптимизации параметров согласующего слоя использовано моделирование пьезоэлектрического преобразователя методом конечных элементов с помощью программного пакета *COMSOL Multiphysics*. Представлены модели пьезоэлектрического преобразователя, и выполнена оптимизация параметров согласующего слоя в целях повышения эффективности преобразования электрического сигнала в ультразвуковые колебания и обратно. Полученные модели позволяют оценить частотные характеристики пьезоэлектрического преобразователя и проанализировать как эффективность взаимного преобразования электрической и ультразвуковой энергии, так и процесс распространения ультразвуковых волн. Показано, что моделирование методом конечных элементов дает возможность установить требования к материалу и геометрии согласующего слоя пьезоэлектрического преобразователя, а незначительное усложнение модели позволяет прогнозировать работу пьезоэлектрических преобразователей в режиме излучения и приема ультразвуковых сигналов в газовой среде при конструировании и изготовлении опытных образцов.

**Ключевые слова:** ультразвук; пьезоэлектрический преобразователь; конструкция; согласующий слой; моделирование; метод конечных элементов.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках отдельного проекта научно-исследовательской работы «Исследование и разработка широкополосных пьезоэлектрических преобразователей для использования в высокочастотных ультразвуковых измерительных приборах, функционирующих в широком диапазоне температур и давлений» (№ гос. регистрации 20231563).

### Образец цитирования:

Дедович НН, Кучинский ПВ, Романов АФ. Оптимизация параметров согласующего слоя пьезоэлектрического преобразователя методом конечных элементов. Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2025;3:70–77.  
EDN: XRMMIY

### For citation:

Dedovich NN, Kuchynski PV, Romanov AF. Optimisation of the parameters of the matching layer of a piezoelectric transducer by the finite element method. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2025;3:70–77. Russian.  
EDN: XRMMIY

### Авторы:

**Николай Николаевич Дедович** – научный сотрудник лаборатории информационно-измерительных систем.

**Петр Васильевич Кучинский** – доктор физико-математических наук, доцент; директор.

**Anatolii Filipovich Romanov** – кандидат технических наук; заведующий лабораторией информационно-измерительных систем.

### Authors:

**Nikolai N. Dedovich**, researcher at the laboratory of information and measuring systems.

*lis\_2015@mail.ru*

**Petr V. Kuchynski**, doctor of science (physics and mathematics), docent; director.

*kuchynski@bsu.by*

**Anatoly F. Romanov**, PhD (engineering); head of the laboratory of information and measuring systems.

*ramanau@bsu.by*

## OPTIMISATION OF THE PARAMETERS OF THE MATCHING LAYER OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER BY THE FINITE ELEMENT METHOD

N. N. DEDOVICH<sup>a</sup>, P. V. KUCHYNSKI<sup>a</sup>, A. F. ROMANOV<sup>a</sup>

<sup>a</sup>A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University,  
7 Kurchatava Street, Minsk 220045, Belarus

Corresponding author: A. F. Romanov (ramanau@bsu.by)

**Abstract.** A methodology for finding the optimal parameters of the matching layer of a piezoelectric transducer designed to convert and receive ultrasonic vibrations in a gas is presented. As a way to optimise the parameters of the matching layer, modelling of a piezoelectric transducer by the finite element method using the *COMSOL Multiphysics* software package is used. Models of a piezoelectric transducer are presented and optimisation of the parameters of the matching layer is implemented in order to increase the efficiency of electrical signal conversion into ultrasonic vibrations and vice versa. The obtained models allow to estimate the frequency characteristics of a piezoelectric transducer and to analyse the efficiency of mutual conversion of electrical and ultrasonic energy, as well as the process of propagation of ultrasonic waves. It is shown that the finite element modelling method allows to establish requirements for the material and geometry of the matching layer of a piezoelectric transducer, and a slight complication of the model makes it possible to predict the operation of piezoelectric transducers in the mode of radiation and reception of ultrasonic signals in a gas environment during the design and manufacture of prototypes.

**Keywords:** ultrasound; piezoelectric transducer; designs; matching layer; modelling; finite element method.

**Acknowledgements.** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education of the Republic of Belarus as part of a separate project of the research work «Research and development of broadband piezoelectric transducers for use in high-precision ultrasonic measuring instruments operating in a wide range of temperatures and pressures» (state registration No. 20231563).

### Введение

При проектировании ультразвуковых времязимпульсных расходомеров для газовой среды важное значение имеют расчет и оптимизация конструкции ультразвукового преобразователя для генерации зондирующих ультразвуковых сигналов. Базовым элементом конструкции пьезоэлектрического преобразователя (ПП) для ультразвукового метода измерений [1; 2] является пьезокерамический элемент (ПЭ), который обеспечивает обратимость выполняемых преобразований и позволяет использовать ПП как в качестве излучателя, так и в качестве приемника ультразвуковых волн. Геометрические характеристики ПЭ определяют его частотные свойства, а также диаграмму звукового давления (диаграмму излучения) и эффективность взаимного преобразования электрической и ультразвуковой энергии. Применение ПП в широком диапазоне температур и давлений газовой среды предполагает жесткие условия эксплуатации из-за большой разницы акустических сопротивлений среды и ПЭ, что накладывает повышенные требования к конструкции ПП.

Для эффективного излучения и приема ультразвуковых волн в газовой среде необходимо наличие одного или нескольких согласующих слоев с промежуточным значением акустического импеданса между импедансом ПЭ и импедансом среды. При проектировании ПП важно определить требования к характеристикам материала и геометрии согласующего слоя, чтобы максимально повысить эффективность электроакустических преобразований. Для поиска оптимальных параметров согласующего слоя можно использовать моделирование ПП методом конечных элементов [3; 4].

### Материалы и методы исследования

При проектировании ПП одним из возможных способов оценки его ожидаемых характеристик является моделирование как отдельных элементов ПП, так и общей конструкции ПП с учетом внешних факторов. Вышеупомянутый метод конечных элементов позволяет решать системы дифференциальных и интегральных уравнений, описывающих физические процессы в узлах сетки, полученной в результате разбиения объекта на мелкие элементы. Предполагается, что размеры этих элементов настолько малы, что внутри них не происходит существенных изменений физических параметров, характеризующих моделируемые процессы. Так как результат моделирования методом конечных

элементов зависит от количества и размеров элементов сетки<sup>1</sup> [5; 6], для проведения моделирования использовался программный пакет *COMSOL Multiphysics*, который дает возможность контролировать статистические характеристики сетки, а также строить осесимметричные модели для снижения вычислительных затрат.

В результате решения уравнений прямого пьезоэффекта в узлах сетки были получены основные механические характеристики состояния поверхности диска (напряжение и деформация) при колебании на резонансной частоте [4]. Модель ПЭ имела вид диска диаметром 14 мм и толщиной 2,1 мм. Достоверность модели ПЭ или модели общей конструкции ПП оценивалась по результатам измерений амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик. Относительная ошибка не превышала 4 %. Для сравнительной оценки эффективности излучения с использованием метода конечных элементов были проведены расчеты акустического давления в узлах сетки газовой среды на основе уравнения Гельмгольца, при этом источником локальных давлений являлись твердая поверхность ПЭ, с одной стороны, и поверхность согласующего слоя, с другой стороны [7].

Расчет и оптимизация параметров согласующего слоя были выполнены на основе двумерной осесимметричной модели (рис. 1). Согласно этой модели ПП, представляющий собой ПЭ с согласующим слоем, расположен между двумя полусферами воздуха при атмосферном давлении и комнатной температуре. Ось симметрии соответствует направлению излучения. Внешние границы полусфер воздуха обладают идеальными характеристиками и гарантируют полное поглощение акустического излучения. Такая модель позволяет анализировать эффективность электроакустических преобразований при излучении в свободном пространстве. Кроме того, наличие согласующего слоя только с одной стороны ПЭ дает возможность сравнивать характеристики излучения в противоположных направлениях и оценивать качество согласования ПЭ со средой.

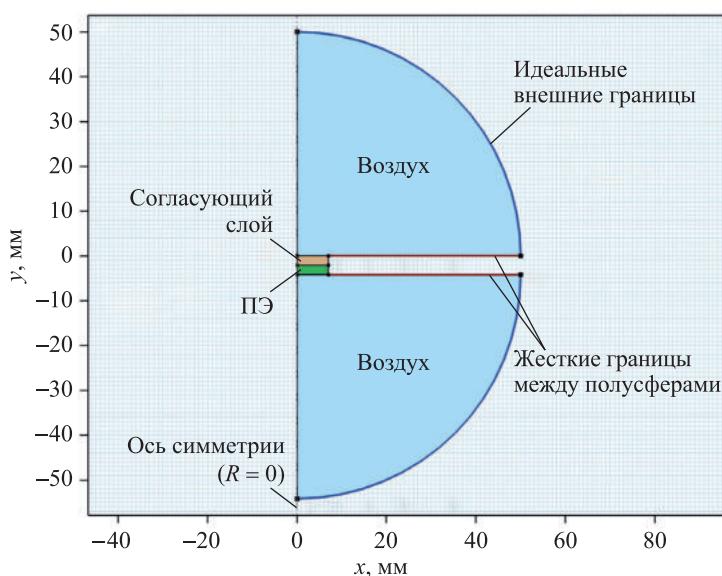


Рис. 1. Модель ПП, работающего в воздушной среде

Fig. 1. Model of a piezoelectric transducer  
operating in an air environment

Исходные требования к параметрам согласующего слоя были получены в результате расчетов при условии применения согласующего слоя с промежуточным значением акустического импеданса между импедансом ПЭ и импедансом среды. На первом этапе определялись характеристики излучения (акустическое давление и диаграмма излучения) со стороны ПЭ и со стороны согласующего слоя, а затем проводилась оптимизация параметров согласующего слоя в целях повышения интенсивности излучения в направлении оси излучения ПП.

Для оценки качества согласования ПЭ с газовой средой, а также результатов оптимизации параметров согласующего слоя в целях повышения эффективности электроакустических преобразований модель менялась от простой к сложной. Первоначально в качестве ПП использовался ПЭ без согласующего слоя. На следующем этапе к ПЭ добавлялся согласующий слой с расчетными ха-

<sup>1</sup>Красников Г. Е., Нагорнов О. В., Старостин Н. В. Моделирование физических процессов с использованием пакета COMSOL Multiphysics : учеб. пособие. М. : Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2012. 184 с.

теристиками материала (плотность и модуль Юнга) и выполнялась их оптимизация. На последнем этапе проводились изменение и оптимизация геометрии излучающей поверхности ПП с согласующим слоем. В дополнение была представлена модель на основе оптимизированного ПП, которая позволяет анализировать эффективность электроакустических преобразований при излучении в свободном пространстве.

### Результаты и их обсуждение

При наличии сигнала возбуждения ПЭ излучает в обе стороны по осям симметрии. Максимальное излучение осуществляется на частоте, соответствующей радиальной моде пьезоэлемента. Применение согласующего слоя позволяет увеличить энергию излучения со стороны согласующего слоя (рис. 2). Модуль оптимизации в программном пакете *COMSOL Multiphysics* позволил решить задачу оптимизации плотности материала и значения модуля Юнга согласующего слоя при условии незначительного изменения удельного акустического сопротивления согласующего слоя [7]. В дополнение к полученным ранее решениям здесь были учтены механические потери.

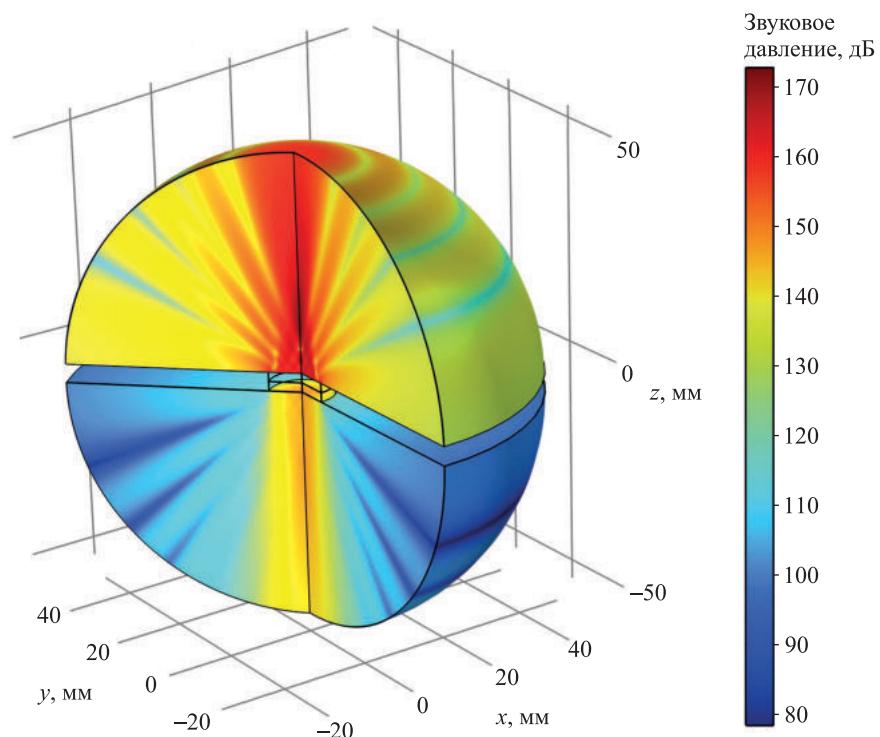


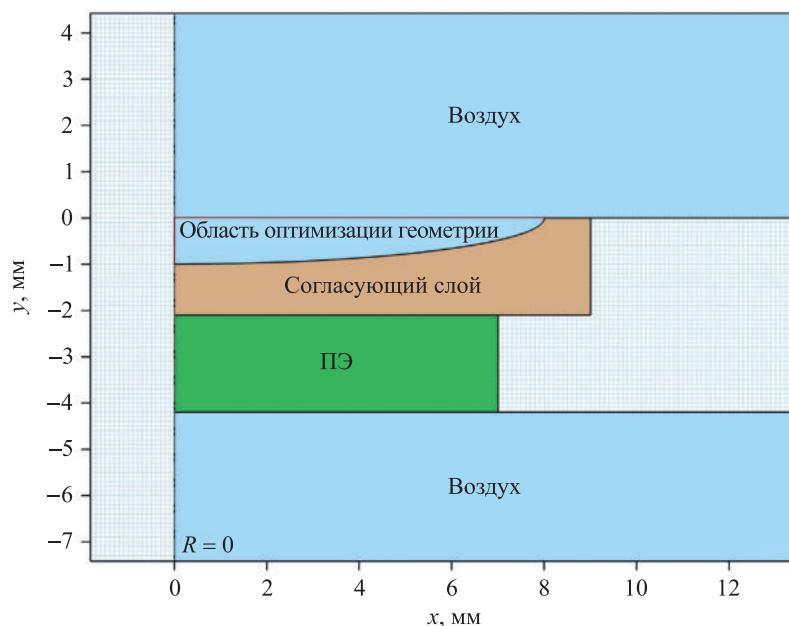
Рис. 2. Характеристика излучения ПП  
 Fig. 2. Radiation characteristics of a piezoelectric transducer

Следующим шагом оптимизации согласующего слоя было установление оптимальной геометрии в целях повышения интенсивности излучения в направлении оси излучения ПП. Для этого изменялись размер излучающей поверхности согласующего слоя и его форма путем удаления из плоской поверхности согласующего слоя, соответствующей исходной геометрии, или добавления к ней части слоя в виде четверти эллипсоида (рис. 3). Оси эллипсоида определяют глубину и диаметр образованной вогнутости или выпуклости на поверхности согласующего слоя. При поиске оптимальной геометрии обе оси эллипсоида и размеры согласующего слоя (толщина и диаметр) являются переменными в целях повышения интенсивности излучения в направлении оси излучения ПП. Аналогично был проведен анализ решений оптимизации, когда эллипс сдвинут относительно оси симметрии ПП.

На рис. 4 и 5 представлены графики, иллюстрирующие повышение интенсивности излучения ПП в результате согласования ПЭ с рабочей средой и оптимизации характеристик материала и геометрии согласующего слоя. Оптимизация характеристик материала согласующего слоя (плотность и модуль Юнга) повышает эффективность электроакустических преобразований и, следовательно, интенсивность излучения ПП [7]. Оптимизация геометрии согласующего слоя (см. рис. 3) позволяет изменить диаграмму звукового давления и сфокусировать излучение в направлении оси симметрии ПП, что

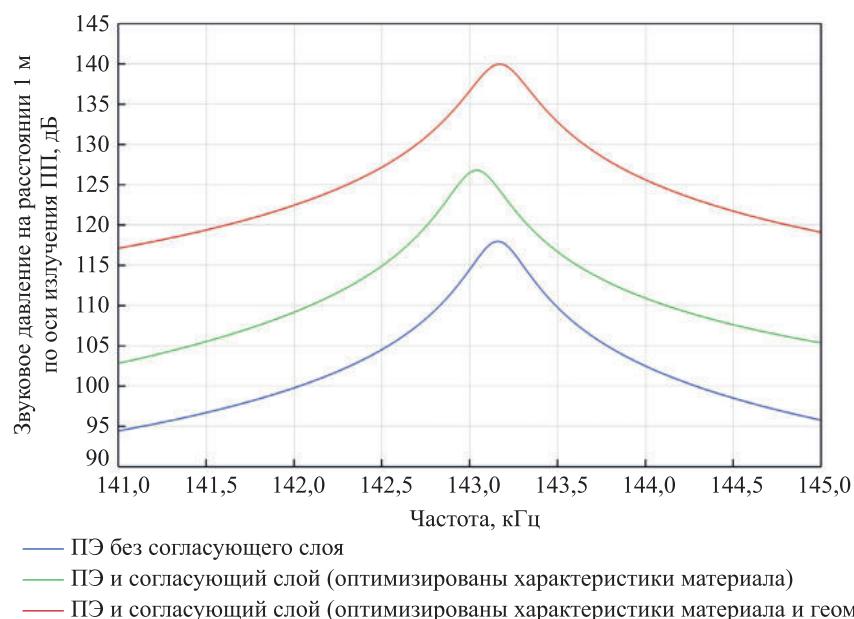
дополнительно повышает уровень акустических колебаний. В силу обратимости физических процессов полученное решение также способствует увеличению чувствительности ПП в режиме приема ультразвуковых волн.

Таким образом, согласующий слой с оптимизированными характеристиками материала и геометрией позволяет увеличить амплитуду электрического сигнала на выходе приемника излучения и, соответственно, повысить значение отношения сигнала к шуму приемо-передающих устройств. Как следствие, решение задачи оптимизации параметров согласующего слоя даст возможность снизить требования к напряжению источника питания измерительной системы.



*Ruc. 3. Модель оптимизации геометрии согласующего слоя  
 (красной линией обозначена условная граница  
 исходной геометрии согласующего слоя)*

*Fig. 3. Model of optimisation of the geometry of the matching layer  
 (the red line indicates the conditional boundary  
 of the initial geometry of the matching layer)*



*Ruc. 4. Изменение звукового давления  
 на расстоянии 1 м по оси излучения ПП*

*Fig. 4. Change in sound pressure value at a distance of 1 m  
 along the radiation axis of a piezoelectric transducer*

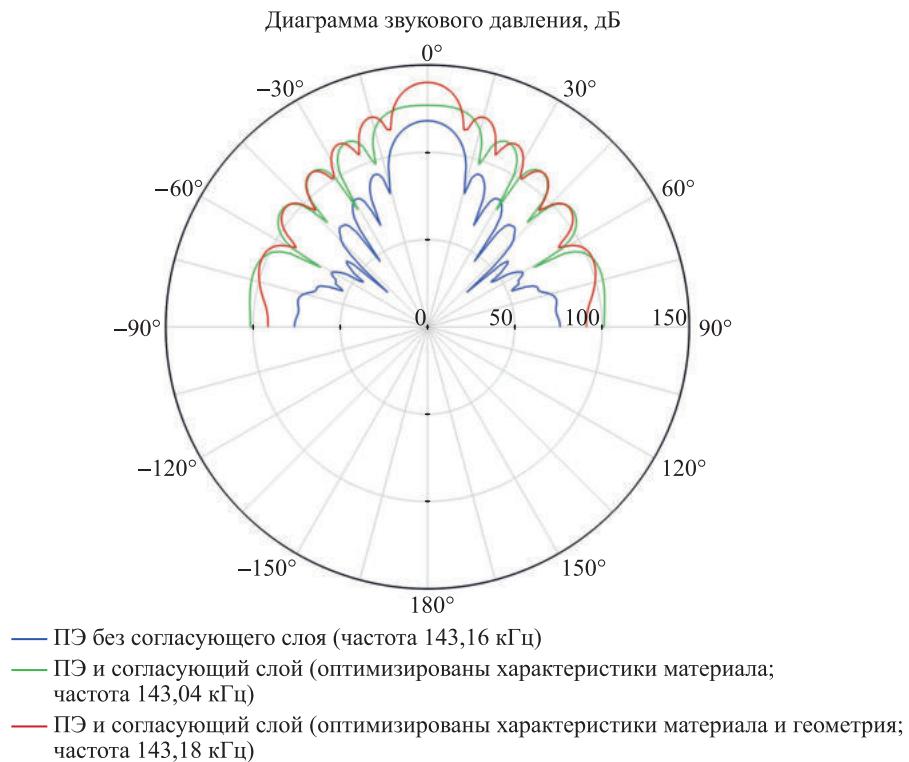


Рис. 5. Изменение диаграммы звукового давления

Fig. 5. Changing the sound pressure diagram

Важным этапом при проектировании ПП является проверка достоверности результатов физико-математического моделирования. Одним из способов оценки результатов моделирования является их сравнение с измеренными амплитудно-частотными и фазочастотными характеристиками ПП. Этот метод позволяет контролировать электрические свойства ПП, но не дает возможности тестировать акустические свойства ПП. Измерение акустических свойств опытных образцов ПП требует применения специального оборудования. Для того чтобы проверить полученные результаты оптимизации, дополним модель (см. рис. 1) таким же ПП, который будет использоваться в качестве приемника ультразвуковых колебаний. Модель для двух ПП, расположенных в воздушной среде на расстоянии 100 мм друг от друга по оси излучения и приема, представлена на рис. 6.

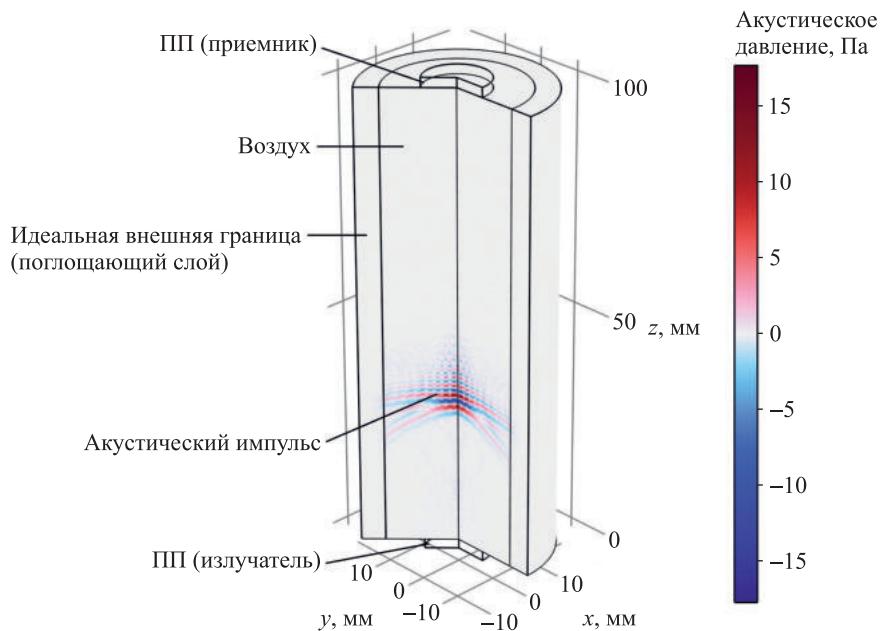
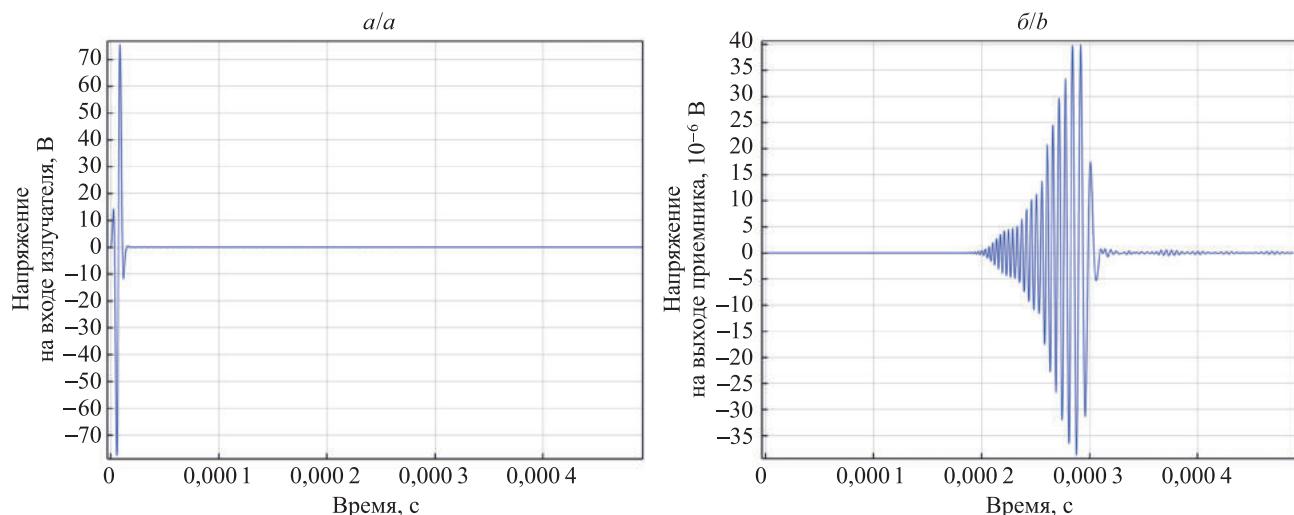


Рис. 6. Модель тестирования приемо-излучающих характеристик ПП

Fig. 6. Model of testing the receiving and emitting characteristics of a piezoelectric transducer

Двумерная осесимметрическая модель представляет собой воздушный цилиндр с идеальной поглощающей боковой поверхностью. Данная модель соответствует испытаниям в свободном пространстве. Два ПП расположены по оси симметрии на торцах цилиндра так, чтобы согласующий слой ПП контактировал с воздухом.

В результате моделирования прямого электроакустического преобразования, распространения сигналов в газовой среде и обратного акустоэлектрического преобразования получены электрические сигналы на выходе излучателя и приемника (рис. 7). Нижний ПП (излучатель) возбуждается гармоническим импульсом с частотой резонанса ПЭ, амплитудой 100 В и длительностью один период через последовательно включенное сопротивление 10 Ом. Импульс формируется в результате модуляции гармонического колебания гауссовой функцией. Параллельно верхнему ПП (приемник) включено сопротивление 1000 Ом.



*Рис. 7. Импульс возбуждения излучателя (а) и сигнал на выходе приемника (б) (начало оси времени соответствует моменту возбуждения излучателя электрическим импульсом)*

*Fig. 7. Excitation pulse of the emitter (a) and the signal at the output of the receiver (b) (the beginning of the time axis corresponds to the moment when the emitter is excited by an electric pulse)*

На рис. 7 показан момент времени после распространения импульса звукового давления от излучателя к приемнику (0,0001 с после возбуждения излучающего ПП). В дальнейшем при изготовлении опытных образцов ПП полученный в результате моделирования (см. рис. 6) электрический сигнал на выходе приемника несложно сравнить с результатами измерений и тем самым оценить акустические свойства ПП. Таким образом, незначительное усложнение модели позволяет прогнозировать работу ПП в режиме излучения и приема ультразвуковых сигналов в газовой среде при проектировании и изготовлении опытных образцов ПП.

## Заключение

Моделирование методом конечных элементов позволяет оптимизировать характеристики материала и геометрию согласующего слоя ПП, работающих в газовой среде, в целях повышения интенсивности излучения в направлении оси излучения ПП. Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что они могут быть использованы при разработке технологии изготовления и организации производства ПП (ультразвуковых датчиков), эксплуатируемых в газовой среде, что дает возможность сократить расходы при проектировании ПП для контрольно-измерительных приборов.

## Библиографические ссылки

1. Богуш МВ. *Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей*. Панич АЕ, редактор. Москва: Техносфера; 2014. 312 с. (Пьезоэлектрическое приборостроение; том 9).
2. Богуш МВ, Пикалев ЭМ. Ультразвуковые излучатели – приемники для газа. В: *Фундаментальные проблемы функционального материаловедения, пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий. Пьезотехника-2005. Сборник трудов Международной научно-практической конференции; 23–26 августа 2005 г.; Ростов-на-Дону, Азов, Россия. Том 3*. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского государственного педагогического университета; 2005. с. 13–17.

3. Богуш МВ. Проектирование пьезоэлектрических датчиков с использованием конечно-элементных математических моделей. *Приборы*. 2007;12:30–38. EDN: IJCXUR.
4. Дедович НН, Романов АФ. Моделирование элементов конструкции пьезоэлектрического преобразователя методом конечных элементов. В: Свистун АИ, Гусев ОК, Воробей РИ, Жагора НА, Князев МА, Маляревич АМ и др., редакторы. *Приборостроение-2024. Материалы 17-й Международной научно-технической конференции; 26–29 ноября 2024 г.; Минск, Беларусь*. Минск: [б. и.]; 2024. с. 44–46.
5. Галлагер Р. *Метод конечных элементов. Основы*. Картвелишвили ВМ, переводчик; Баничук НВ, редактор. Москва: Мир; 1984. 428 с.
6. Стрэнг Г, Фикс Дж. *Теория метода конечных элементов*. Агошков ВИ, Василенко ВА, Шайдуров ВВ, переводчики; Марчук ГИ, редактор. Москва: Мир; 1977. 350 с.
7. Дедович НН, Романов АФ. Оптимизация элементов конструкции пьезоэлектрического преобразователя методом конечных элементов. В: Свистун АИ, Гусев ОК, Воробей РИ, Жагора НА, Князев МА, Маляревич АМ и др., редакторы. *Приборостроение-2024. Материалы 17-й Международной научно-технической конференции; 26–29 ноября 2024 г.; Минск, Беларусь*. Минск: [б. и.]; 2024. с. 42–44.

Получена 28.03.2025 / исправлена 07.04.2025 / принята 07.04.2025.  
Received 28.03.2025 / revised 07.04.2025 / accepted 07.04.2025.