

## Конечно-элементное моделирование мембранного модуля

*В.В. Амеличев<sup>1</sup>, Д.М. Григорьев<sup>1</sup>, А.А. Резнев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГКУ «Войсковая часть 68240», г. Москва, Россия

*V.Amelichev@tcen.ru*

Размеры и конструкция корпуса мембранного модуля оказывают значительное влияние на его характеристики. Из-за сложности конструкции корпуса для расчета амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) мембраны мембранного модуля необходимо использовать конечно-элементное моделирование. В работе предложен способ моделирования тонкой диэлектрической мембраны в составе мембранного модуля с использованием структурно-акустического анализа в программном комплексе ANSYS. Данный метод позволяет проводить расчет с учетом влияния размеров надмембранного и подмембранного объемов. Получены зависимости резонансной частоты надмембранного объема от его геометрических размеров. Показано, что с увеличением размера подмембранного объема чувствительность мембраны приближается к значению в открытом пространстве. Проведено сравнение АЧХ мембранных модулей и показано, что наличие надмембранного и подмембранного объемов значительно влияет на значения резонансной частоты и чувствительности. Использован способ задания остаточных напряжений в мембране с помощью термического воздействия. Выполнен расчет чувствительности диэлектрической мембраны с учетом эффекта буклетирования. Проведен анализ полученных результатов и показано, что чувствительность мембраны, рассчитанная с учетом эффекта буклетирования, имеет хорошее совпадение с результатами измерений. Предложенный способ позволяет рассчитывать АЧХ мембранного модуля с учетом влияния конструктивных особенностей корпуса, а также остаточных механических напряжений в мембране. Использование структурно-акустического анализа дает возможность добиться более точных результатов при расчете АЧХ мембраны, что повысит эффективность проектирования преобразователей акустического давления и обеспечит достижение оптимальных характеристик изделия.

**Ключевые слова:** конечно-элементное моделирование; диэлектрическая мембрана; мембранный модуль; амплитудно-частотная характеристика; надмембранный объем; подмембранный объем; остаточные напряжения; буклетирование

*Для цитирования:* Амеличев В.В., Григорьев Д.М., Резнев А.А. Конечно-элементное моделирование мембранного модуля // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 3. – С. 277–284. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-3-277-284

## Finite Element Modeling of Membrane Module

V.V. Amelichev<sup>1</sup>, D.M. Grigoryev<sup>1</sup>, A.A. Reznev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Scientific-Manufacturing Complex «Technological Centre»,  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*FGKU «Voyskovaya Chast (Military Unit) 68240», Moscow, Russia*

V.Amelichev@tcen.ru

**Abstract:** A design and size of the membrane module package have a significant impact on its characteristics. It is necessary to use the finite element modeling calculation of the frequency response of the membrane module membrane due to complexity of the package design. In this study the method of the thin dielectric membrane modeling by means of the structural and acoustic analysis in the ANSYS software has been proposed. This method permits to perform the calculation taking into account the influence of the front and back chambers sizes. The dependences of resonance frequency of the front chamber and back chamber on its geometric sizes have been obtained. It has been shown that with the back chamber size increasing, the value of the membrane sensitivity approaches to its parameters in the open space and with the account of the front and back chambers. The membrane modules frequency response comparison has been performed and has been shown that the presence of the front and back chambers significantly affects the values of the resonance frequency and sensitivity. The method of setting resilient stresses in the membrane using thermal impact has been used. The complicatedly deformed state of the membrane, called the buckling effect, has been obtained. The calculation of the dielectric membrane with an account of the buckling effect has been executed. The analysis of the obtained results has been performed and it has been shown that the calculated sensitivity of the membrane with an account of the buckling effect have a good coincidence with the measurements results. The proposed method enables to calculate the membrane module frequency response with an account of impact of the package design peculiarities and also, to take into account the residual stresses in the membrane. The use of the structural-acoustic analysis enables to achieve more accurate results while calculating the membrane frequency response, which increases the efficiency of the acoustic pressure transducers designing, and ensures an achievement of the product optimal characteristics.

**Keywords:** finite element modeling; dielectric membrane; membrane module; frequency response; front chamber; residual stress; buckling

**For citation:** Amelichev V.V., Grigoryev D.M., Reznev A.A. Finite element modeling of membrane module. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 277–284. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-3-277-284

**Введение.** Прогресс в области обработки информации и ее передачи ставит вопрос об источниках самой информации, прежде всего, непосредственно из окружающего мира. Эту информацию могут дать МЭМС-сенсоры, предназначенные для реального мониторинга окружающей среды, состояния здоровья человека, различных технических средств и сооружений и т.д. [1].

Характеристики преобразователей акустического давления зависят от конструктивных параметров корпуса. Так, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) может менять форму при изменении подмембранного и надмембранного объемов [2, 3]. Влияние объемов на характеристики можно рассчитать с использованием специализированных САПР. Современные средства конечно-элементного моделирования позволяют рассчитать АЧХ преобразователя для любых конструктивных решений и материалов [4].

В преобразователях акустического давления, реализованных на интерферометрическом принципе работы, чувствительный элемент состоит из мембраны, вмонтированной в специализированный корпус [5]. Геометрические параметры корпуса могут варьироваться относительно размеров кремниевого кристалла с мембраной и стыковочного размера втулки с ферулой [6]. Использование специализированных САПР с настроенными моделями мембран мембранных модулей позволяет сократить сроки разработки изделий для высокочувствительных приборов контроля акустического давления.

**Расчет резонансной частоты надмембранного объема.** Для расчета резонансной частоты надмембранного объема мембранного модуля использовался структурно-акустический модальный анализ в программном комплексе ANSYS. Структурная схема мембранного модуля представлена на рис.1. Трехмерная модель мембранного модуля состоит из структурной модели корпуса, мембраны и акустической воздушной среды в надмембранном и подмембранном объемах. Для экономии вычислительных ресурсов применялись граничные условия модели мембранного модуля, учитывающие симметричность конструкции, поэтому расчеты проводились для 1/2 и 1/32 ее структурных частей. На рис.2 представлен фрагмент трехмерной модели мембраны, жестко закрепленной по периметру.

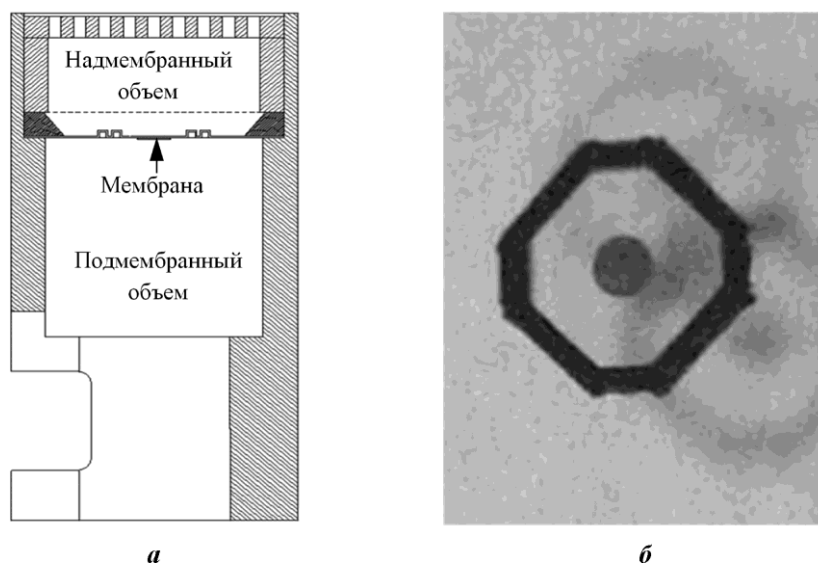


Рис.1. Структурная схема мембранного модуля (а) и фотография мембраны (б)  
Fig.1. Structural diagram of the membrane module (a) and membranes photo (b)

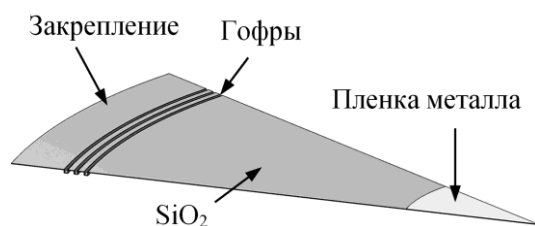


Рис.2. Фрагмент трехмерной модели мембраны  
Fig.2. Fragment of a three-dimensional model of the membrane

В выбранном анализе воздушная среда сжимаема и в ней отсутствует перенос вещества [7]. В расчете использовались конечные элементы SOLID187 для мембраны и FLUID221 для моделирования акустической среды. Взаимодействие мембраны с акустической средой реализовано с помощью интерфейса FSI (Fluid–Structure Interaction) [8]. Полученные расчетные значения модели мембранного модуля представлены в виде зависимостей резонансной

частоты надмембранного объема от его радиуса при фиксированной высоте воздушной среды 6 мм и от высоты надмембранного объема при фиксированном радиусе 0,5 мм (рис.3).

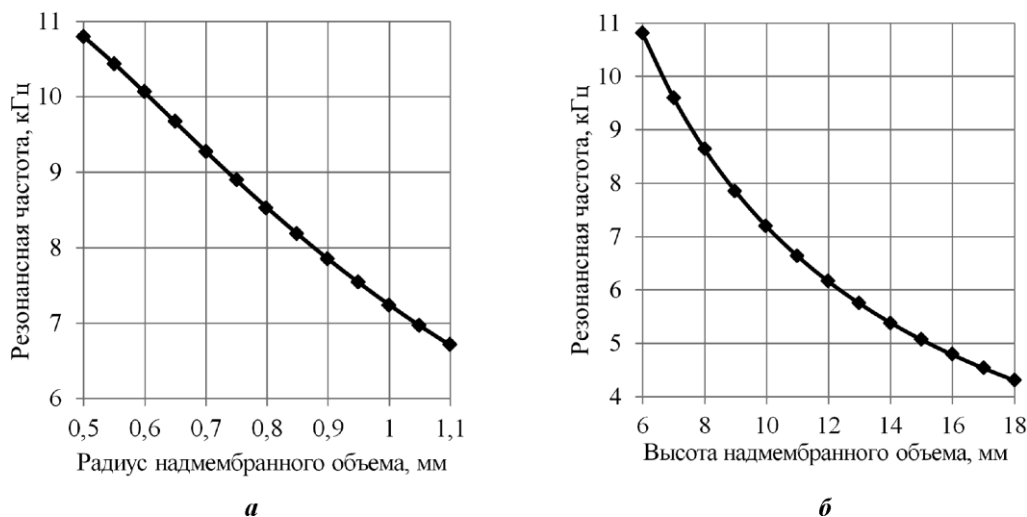


Рис.3. Зависимости резонансной частоты надмембранного объема от радиуса (а) и высоты (б) надмембранного объема  
Fig.3. Dependence front chamber resonance frequency from the front chamber radius (a) and the front chamber height (b)

Из представленных на рис.3 зависимостей видно, что форм-фактор надмембранного объема может оказывать значительное влияние на АЧХ. Так, при одинаковом значении надмембранного объема, но при различных его формах (длинный цилиндр и плоская шайба) резонансные частоты различаются. При определенном соотношении радиуса входного отверстия и высоты надмембранного объема можно обеспечить необходимую коррекцию АЧХ мембранного модуля.

**Расчет АЧХ мембранного модуля.** Для расчета АЧХ мембранного модуля применялся структурно-акустический гармонический анализ отклика системы в программном комплексе ANSYS. К акустическому отверстию приложено акустическое давление 1 Па. На рис.4 представлена зависимость чувствительности от размера подмембранного объема. Расчет выполнен для модели с высотой надмембранного объема 6 мм и радиусом входного отверстия 0,5 мм. При увеличении подмембранного объема чувствительность стремится к чувствительности на открытом пространстве.

В результате расчета мембраны мембранного модуля с безграничными надмембранным и подмембранным объемами корпуса (открытое пространство) на АЧХ получен один резонанс на частоте 10 324 Гц (рис.5, кривая 1). При последовательном добавлении подмембранного объема 4,3 мм<sup>3</sup> (рис.5, кривая 2) происходит уменьшение амплитуды выходного сигнала на 4 дБВ. Резонансная частота увеличивается с 10,3 кГц до 11,2 кГц. При задании надмембранного и подмембранного объемов 7,4 и 4,3 мм<sup>3</sup> соответственно на АЧХ мембранного модуля появляются два резонансных пика (рис.5, кривая 3). Один вызван акустическим резонансом надмембранного объема, второй – резонансом мембраны. Кроме того, в результате сложного структурно-акустического взаимодействия минимальное значение резонансной частоты уменьшилось до 6,7 кГц.

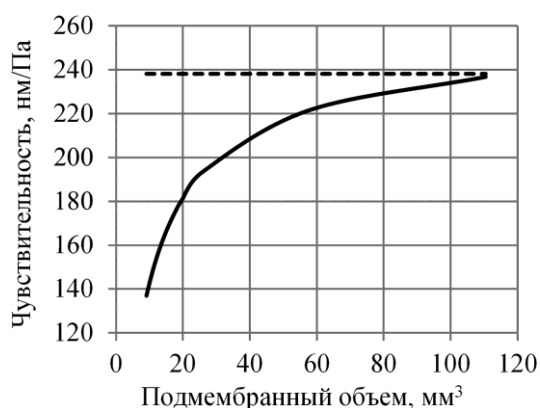


Рис.4. Зависимость чувствительности от размера подмембранного объема (пунктир – уровень чувствительности мембраны в открытом пространстве)

Fig.4. Dependence of sensitivity from the back chamber size (dashed line marks the level of membrane sensitivity in open space)

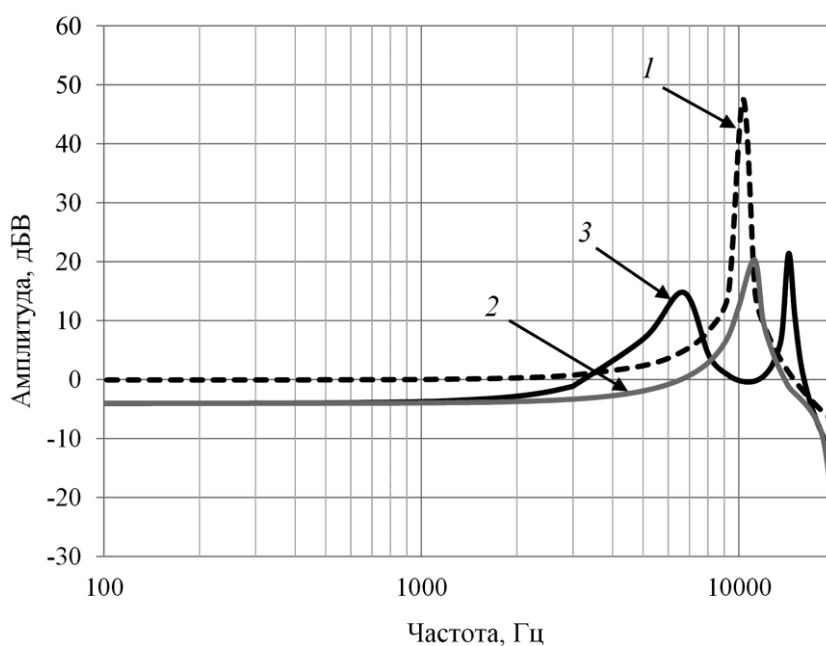


Рис.5. АЧХ мембраны мембранного модуля: 1 – в открытом пространстве; 2 – с ограниченным подмембранным объемом и неограниченным надмембранным объемом; 3 – с ограниченными надмембранным и подмембранным объемами

Fig.5. Frequency response of the membrane: 1 – in open space; 2 – with back chamber; 3 – with back chamber and front chamber

Приведенные примеры расчета показывают влияние конструктивных параметров, выраженных в виде подмембранного и надмембранного объемов, на форму АЧХ мембраны в составе мембранного модуля.

**Конечно-элементное моделирование эффекта буклетирования мембраны.** В реальной структуре мембрана представляет собой не ровный диск, как предполагалось при расчете АЧХ, а сложнодеформированную структуру. Деформация тонкой диэлектрической мембраны, как правило, образуется под воздействием остаточных разжимающих механических напряжений [9]. Их природа связана с технологией формирования субмикронных диэлектрических мембран. Сложную деформацию мембраны под действием остаточных механических напряжений называют эффектом буклетирования. Для получения более точных результатов расчета характеристик мембран необходимо учитывать остаточные разжимающие механические напряжения. Одним из способов задания остаточного напряжения в модели мембраны является температурное воздействие, которое можно рассчитать по формуле [10, 11]

$$\Delta T = -\frac{\sigma_0(1-\nu)}{E\alpha},$$

где  $\Delta T$  – величина, на которую необходимо изменить температуру тела для задания остаточного напряжения;  $\sigma_0$  – остаточное напряжение;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга;  $\alpha$  – коэффициент термического расширения.

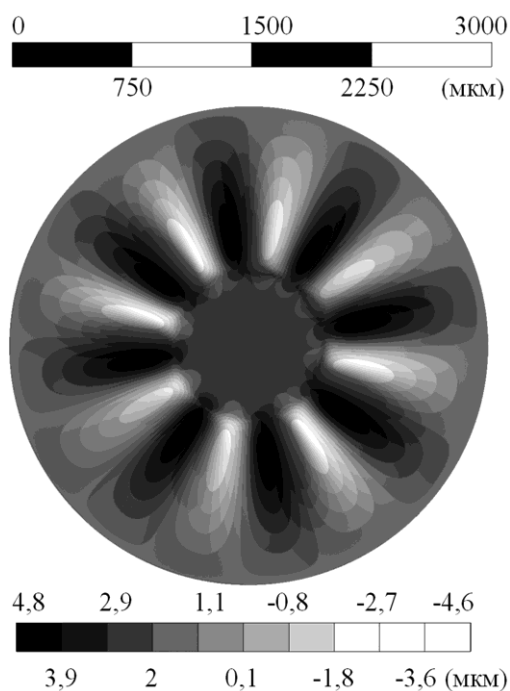


Рис. 6. Результат моделирования эффекта буклетирования диэлектрической мембраны  
Fig.6. Result of buckling effect simulation in the dielectric membrane

Рассмотрим конечно-элементную модель мембраны, где в качестве материала используется  $\text{SiO}_2$ , а в центральной части на поверхность нанесена тонкая пленка Ni. Основные конструктивные параметры модели мембраны следующие: диаметр 3 мм, толщина 1 мкм, диаметр диска из пленки Ni 1 мм, толщина 0,2 мкм. Результат моделирования эффекта буклетирования в диэлектрической мембране представлен на рис.6. Механические напряжения в модели мембраны заданы с помощью температурного воздействия на уровне 1 МПа, исходя из экспериментальных данных, полученных с помощью установки FSM 500 TC-R.

Изображенная форма деформаций в модели мембраны соответствует внешнему виду реальных образцов с аналогичными конструктивными параметрами. Наибольший интерес в данном случае представляет расчет чувствительности буклетированной мембраны к акустическому воздействию. Ранее проведенные расчеты чувствительности плоской (небуклетированной) мембраны

были на уровне 2,3 мкм/Па, что не соответствовало результатам измерений реальных образцов, у которых этот параметр находится в диапазоне 400–600 нм/Па. Результат расчета чувствительности буклетированной мембраны при тех же конструктивных параметрах составил 375 нм/Па, что имеет хорошее совпадение с результатами измерений реальных образцов.

**Заключение.** Конечно-элементное моделирование позволяет в расчете конструкции мембранных модулей учитывать не только влияние подмембранного и надмем-

бранного объемов на АЧХ мембраны преобразователя акустического давления, но и напряженные состояния тонких диэлектрических мембран.

Задание механических напряжений и последующее применение структурно-акустического гармонического анализа отклика системы в программном комплексе ANSYS дают возможность получать более точные результаты при расчете АЧХ мембраны. Это повышает эффективность проектирования преобразователей акустического давления и позволяет добиться оптимальных характеристик изделия.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники» на базе НПК «Технологический центр».*

### Литература

1. Вернер В.Д., Мальцев П.П., Сауров А.Н. МЭМС и третья индустриальная революция // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – №. 11. – С. 2–5.
2. Амеличев В.В., Ильков А.В. Конструктивно-технологический базис создания электроакустических преобразователей. – М.: Техносфера, 2012. – 104 с.
3. Резнев А.А., Вернер В.Д. Тенденции развития МЭМС. – М.: Амиант, 2010. – 274 с.
4. Gasket design for optimal acoustic performance in MEMS microphones. – URL: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/e9/86/75/b2/8e/fd/48/69/DM00103201.pdf/files/DM00103201.pdf/jcr:content/translations/en.DM00103201.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/e9/86/75/b2/8e/fd/48/69/DM00103201.pdf/files/DM00103201.pdf/jcr:content/translations/en.DM00103201.pdf) (дата обращения: 09.10.2017).
5. Gruca G.L. Ferrule-top micromachined devices: A universal platform for optomechanical sensing: Doctor's thesis. – Amsterdam: Vrije Universiteit, 2014. – 160 p.
6. Greywall D.S. Micromachined optical-interference microphone // Sensors and Actuators A: Physical. – 1999. – Vol. 75. – N. 3. – P. 257–268.
7. ANSYS parametric design language guide. Canonsburg: ANSYS Inc., 2013. – 110 p.
8. Czarny J. Conception, fabrication and characterization of a MEMS microphone: Doctor's thesis. – Lyon: INSA. – 2015. – 128 p.
9. CMOS-MEMS: Advanced micro and nanosystems / H. Baltes, O. Brand, G.K. Fedder et al. – John Wiley & Sons, 2008. – 608 p.
10. Ziebart V., Paul O., Baltes H. Strongly buckled square micromachined membranes // Journal of Microelectromechanical Systems. – 1999. – Vol. 8. – N. 4. – P. 423–432.
11. Spatially resolved measurement of the stress tensor in thin membranes using bending waves / R. Waitz, C. Lutz, S. Nossner et al. // Physical Review Applied. – 2015. – Vol. 3. – N. 4. – P. 044002-1–044002-7.

Поступила 13.11.2017 г.; принята к публикации 27.02.2018 г.

**Амеличев Владимир Викторович** – кандидат технических наук, начальник отдела НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), V.Amelichev@tcen.ru

**Григорьев Дмитрий Михайлович** – младший научный сотрудник НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), D.Grigorev@tcen.ru

**Резнев Алексей Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя ФГКУ «Войсковая часть 68240» (Россия, 101000, г. Москва, ФГКУ «В/Ч 68240»), village@dol.ru

### References

1. Verner V. D., Mal'cev P. P., Saurov A. N. MEMS i tret'ya industrial'naya revolyuciya [MEMS and the third industrial revolution]. *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2012, no. 11, pp. 2–5. (In Russian).
2. Amelichev V.V., Il'kov A.V. *Konstruktivno-tehnologicheskij bazis sozdaniya elektroakusticheskikh*

*preobrazovatelej* [Design and technological basis of creation of electroacoustic transducers]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012. 104 p. (In Russian).

3. Reznev A.A., Verner V.D. *Tendencii razvitiya MEMS* [Trends in the development of MEMS]. Moscow, Amiant Publ., 2010. 274 p. (In Russian).

4. *Gasket design for optimal acoustic performance in MEMS microphones*. Available at: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/e9/86/75/b2/8e/fd/48/69/DM00103201.pdf/files/DM00103201.pdf/jcr:content/translations/en.DM00103201.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/e9/86/75/b2/8e/fd/48/69/DM00103201.pdf/files/DM00103201.pdf/jcr:content/translations/en.DM00103201.pdf), 2016 (accessed: 9.10.2017).

5. Gruca G. L. Ferrule-top micromachined devices: A universal platform for optomechanical sensing. Doctor's thesis. Amsterdam, VrijeUniversiteit, 2014, 160 p.

6. Greywall D. S. Micromachined optical-interference microphone. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1999, vol. 75, no. 3, pp. 257–268.

7. *ANSYS Parametric Design Language Guide*. Canonsburg, ANSYS Inc., 2013. 110 p.

8. Czarny J. Conception, fabrication and characterization of a MEMS microphone. Doctor's thesis. Lyon. INSA, 2015, 128 p.

9. Baltes H., Brand O., Fedder G. K., Hierold C., Korvink J. G., Tabata O. *CMOS-MEMS: Advanced Micro and Nanosystems*, John Wiley & Sons, 2008. 608 p.

10. Ziebart V., Paul O., Baltes H. Strongly buckled square micromachined membranes. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1999, vol. 8, no. 4, pp. 423–432.

11. Waitz R., Lutz C., Nossner S., Hertkorn M., Scheer E. Spatially resolved measurement of the stress tensor in thin membranes using bending waves. *Physical Review Applied*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 044002-1–044002-7.

Submitted 13.11.2017; Accepted 27.02.2018.

***Information about the authors:***

***Vladimir V. Amelichev*** – Cand. Sci. (Tech.), Head of Department, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), V.Amelichev@tcen.ru

***Dmitry M. Grigor'ev*** – Junior Researcher, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), D.Grigorev@tcen.ru

***Alexey A. Reznev*** – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Deputy Head, FGKU «Vojskovaja chast' 68240» (Russia, 101000, Moscow, FGKU «V/Ch 68240»), village@dol.ru