

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.4>

УДК: 53.083.2; 53.082.73; 534.13

РЕЗОНАНСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОРБЦИОННОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ДАТЧИКА

А.А. Паньков, П.В. Писарев, С.Р. Баяндин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Пермь, Комсомольский пр-кт, д. 29

Статья поступила в редакцию 17 июня 2022 г.

Аннотация. Разработана математическая электро-механическая модель представительного фрагмента газоаналитического оптоволоконного пьезоэлектродлюминесцентного датчика с наличием специального внешнего абсорбционного слоя для мониторинга протяженных областей. Информативный световой сигнал генерируется в результате механолюминесцентного эффекта, обусловленного контактным взаимодействием пьезоэлектрического и электродлюминесцентного цилиндрических слоев (покрытий) оптоволоконна, при вынужденных электромеханических колебаниях датчика под действием приложенного гармонического управляющего электрического напряжения. Представлен алгоритм нахождения сорбционного спектра (изменений плотности абсорбционного слоя по длине датчика) через решение интегрального уравнения Фредгольма по результатам измерения информативного светового спектра интенсивности свечения на выходе из оптоволоконна датчика. Осуществлено численное решение связанной стационарной краевой задачи электроупругости для представительного фрагмента датчика. Найдены собственные частоты и формы колебаний датчика с учетом геометрической формы, взаимного расположения и анизотропии электроупругих свойств его структурных элементов, в том числе характеристик абсорбционного слоя. Выявлены

закономерности влияния диагностируемого значения плотности абсорбционного слоя на информативные значения резонансных частот различных форм колебаний датчика.

Ключевые слова: пьезоэластичность, механолюминесцентный эффект, оптоволокно, газоаналитический датчик, модальный анализ, численное моделирование.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-41-596010.

Автор для переписки: Паньков Андрей Анатольевич, a_a_pankov@mail.ru

Введение

Газоаналитические (химические) датчики диагностирования качественного и количественного химического состава газовой смеси находят применение в системах контроля технологических процессов и защиты окружающей среды [1-11]. В зависимости от характера и физической, химической или электрической природы первичного аналитического информативного сигнала - отклика, возникающего в чувствительном элементе (слое) датчика, выделяют, например, магнитные, термометрические, электрические (в том числе электрохимические, пьезоэлектрические), оптические и биосенсорный принципы действия [12-17].

Цель – нахождение резонансных характеристик: собственных форм и частот колебаний газоаналитического сорбционного оптоволоконного пьезоэлектрOLUMИнесцентного (PEL) датчика [18-20] в результате численного моделирования решения связанной стационарной краевой задачи электроупругости для представительного фрагмента датчика с наличием специального внешнего абсорбционного слоя.

1. Сорбционный оптоволоконный PEL-датчик

Газоаналитический (химический) оптоволоконный PEL-датчик (рис. 1) [18] состоит из оптоволоконна 1 с коаксиальными электрOLUMИнесцентным 2 и пьезоэлектрическим 3 цилиндрическими покрытиями (слоями), при этом

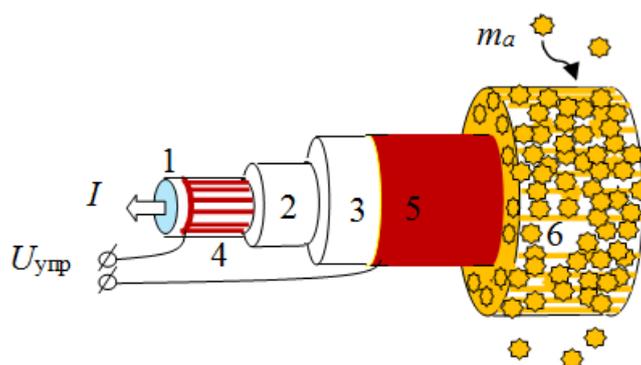


Рис. 1. Оптоволоконный PEL-датчик: 1 – оптоволокно, 2 – электролюминофор, 3-пьезоэлектрик, 4, 5 – электроды, 6 – абсорбционный слой

оптоволокно 1 и электролюминесцентный слой 2 разделены первым светопрозрачным управляющим электродом 4, а на поверхности пьезоэлектрического слоя 3 последовательно расположены второй управляющий электрод 5 и внешний селективный абсорбционный слой 6. Информативный световой сигнал генерируется в результате механолюминесцентного эффекта, обусловленного контактным взаимодействием пьезоэлектрического и электролюминесцентного цилиндрических слоев (покрытий) вокруг оптоволоконна, при вынужденных электромеханических колебаниях датчика под действием приложенного гармонического управляющего электрического напряжения $U_{упр}$. В результате абсорбции химических элементов массой m_a из внешней (диагностируемой) среды происходит изменение значения плотности абсорбционного слоя и, как следствие, имеем информативные изменения значения резонансной частоты колебаний датчика. Искомый «сорбционный спектр» распределения значений изменений плотности абсорбционного слоя по длине датчика находим через решение интегрального уравнения Фредгольма по результатам измерения информативного светового спектра интенсивности свечения I на выходе из оптоволоконна датчика (рис. 1) [18-20].

2. Результаты численного моделирования

Расчетная область (рис. 2) представительного осесимметричного фрагмента сорбционного оптоволоконного PEL-датчика (рис.1) длиной $l = 27.2$ мм состоит

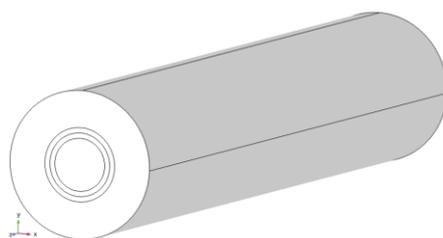
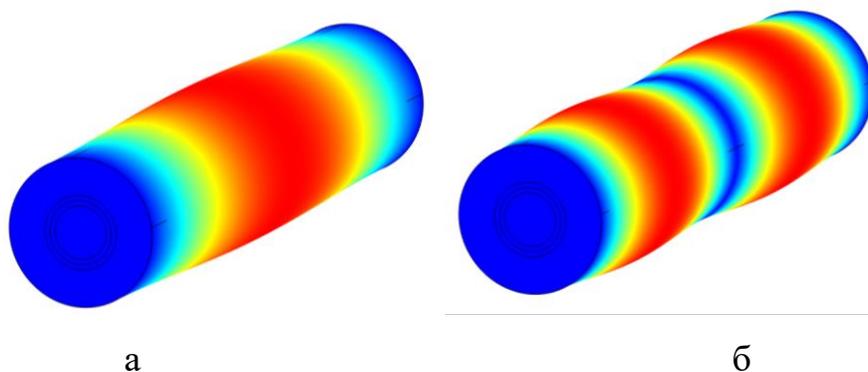


Рис. 2. Расчетная область сорбционного оптоволоконного PEL-датчика.

из оптоволоконна с цилиндрическими концентрическими электролюминесцентным, пьезоэлектрическим и внешним абсорбционным слоями с радиусами их межфазных поверхностей: $r_{(1)}=1\text{мм}$, $r_{(2)}=1.2\text{мм}$, $r_{(3)}=1.4\text{мм}$, $r_{(4)}=2.8\text{мм}$, объем абсорбционного слоя $V_a \approx 502\text{мм}^3$. Считаем, что торцы датчика неподвижны (закреплены), а внешняя боковая цилиндрическая поверхность (абсорбционного слоя) является свободной. Определим собственные формы и частоты $\nu_{1,\dots,4}$ колебаний сорбционного оптоволоконного

Таблица 1. Собственные частоты колебаний датчика

Параметр плотности абсорбционного слоя k_p	Первые четыре собственные частоты, Гц			
	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
0	4159.2	4599.0	4930.5	5314.4
0.05	4059.3	4488.2	4811.7	5186.3
0.10	3966.2	4385.0	4701.0	5067.1
0.15	3879.3	4288.7	4597.7	4955.7
0.20	3797.9	4198.4	4500.9	4851.4



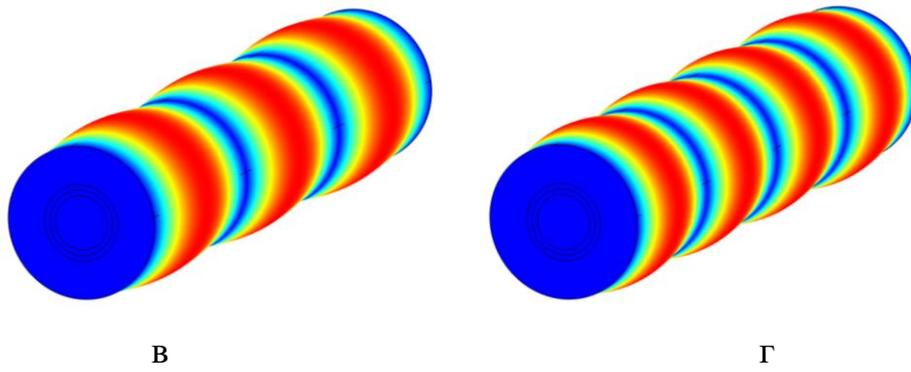


Рис. 3. Первые четыре собственные формы колебаний датчика

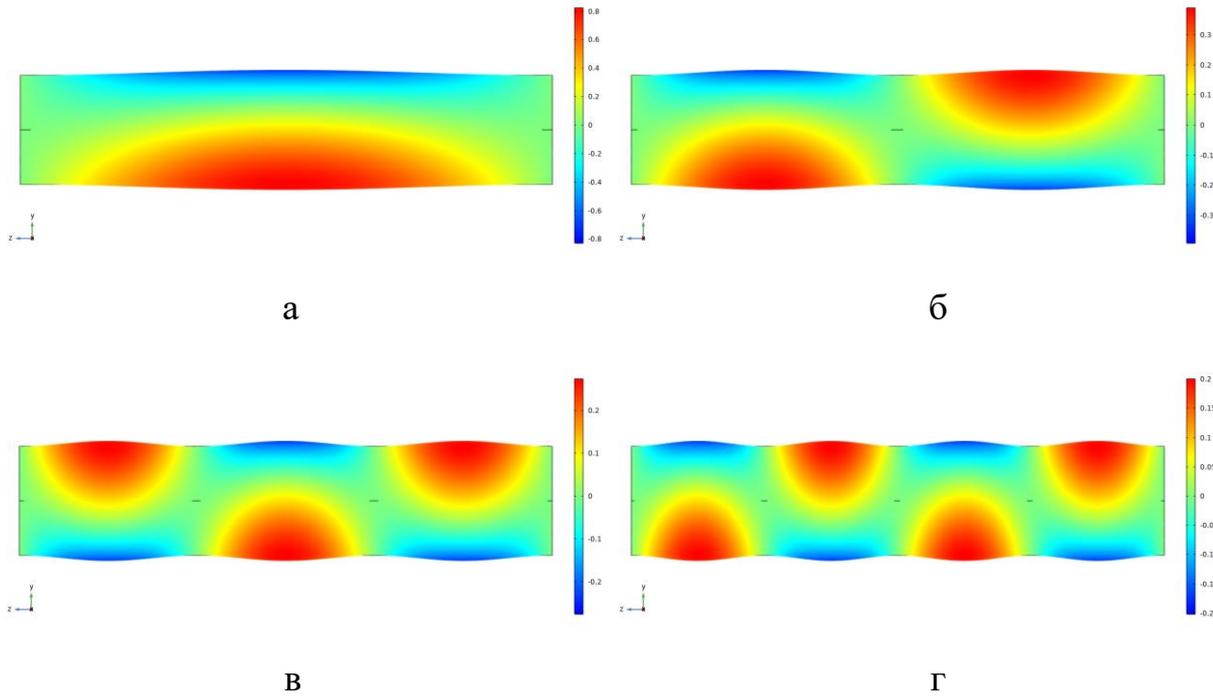
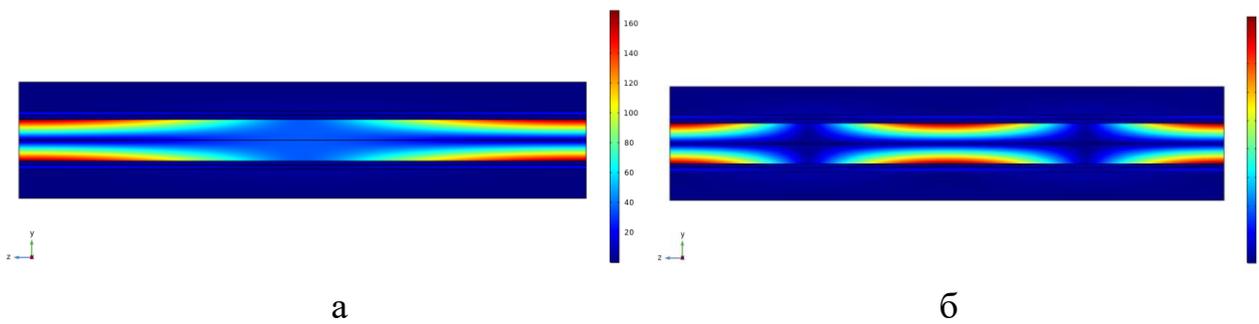


Рис. 4. Распределение компоненты перемещений u_x в продольном сечении датчика



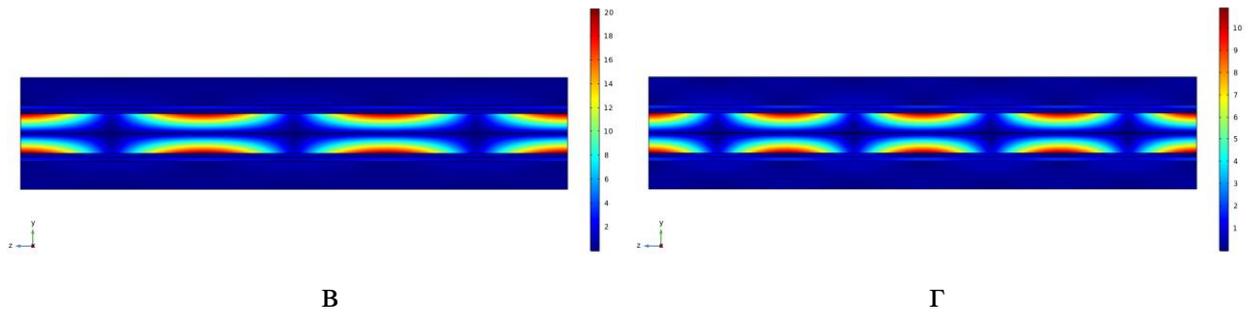


Рис. 5. Распределение напряжения σ_{mises} в продольном сечении датчика

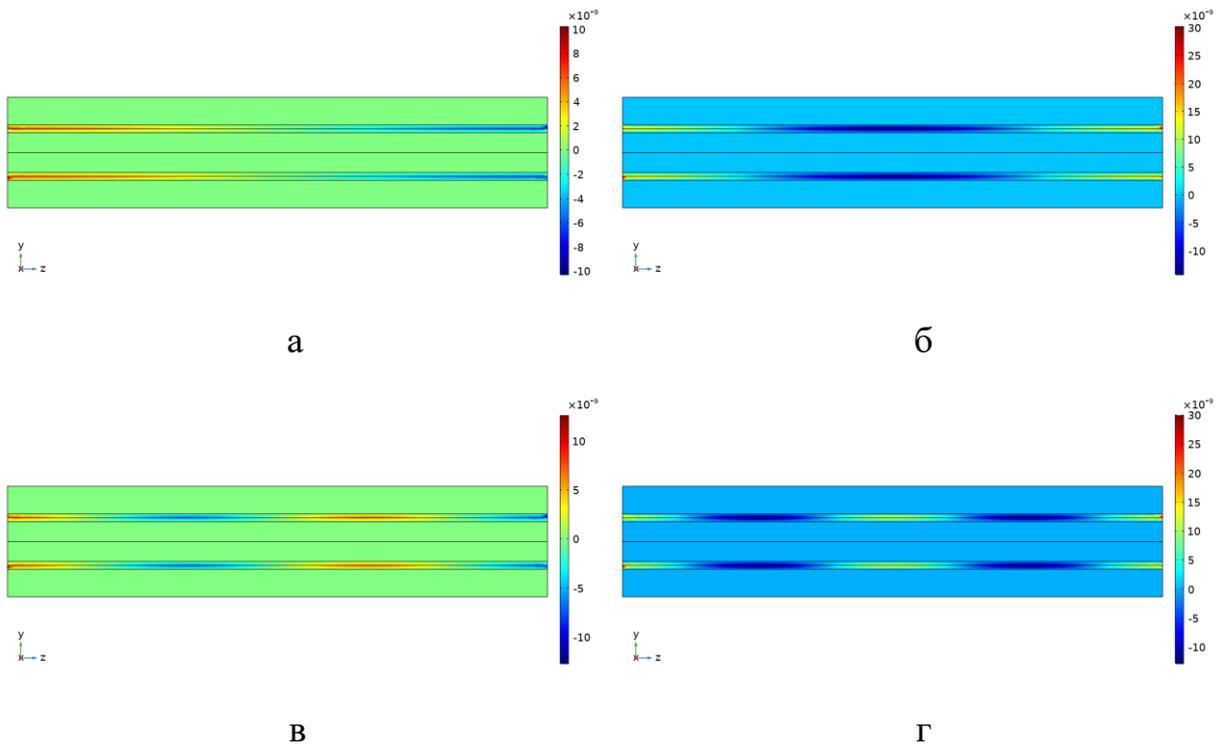
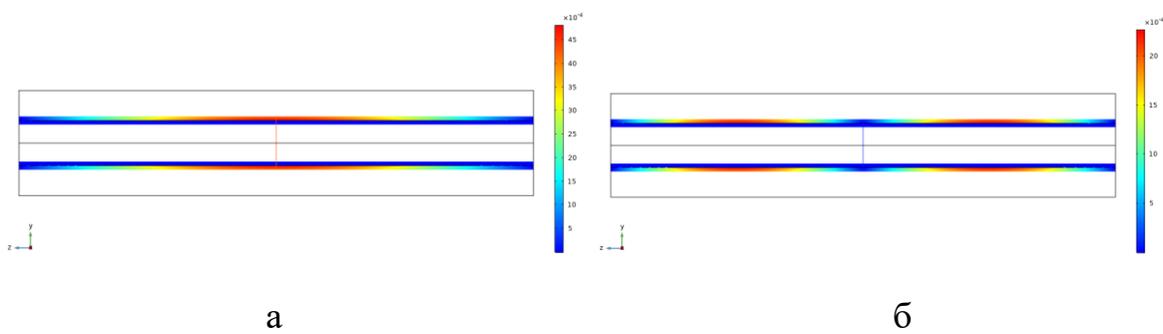


Рис. 6. Распределение электрического потенциала ϕ в продольном сечении датчика



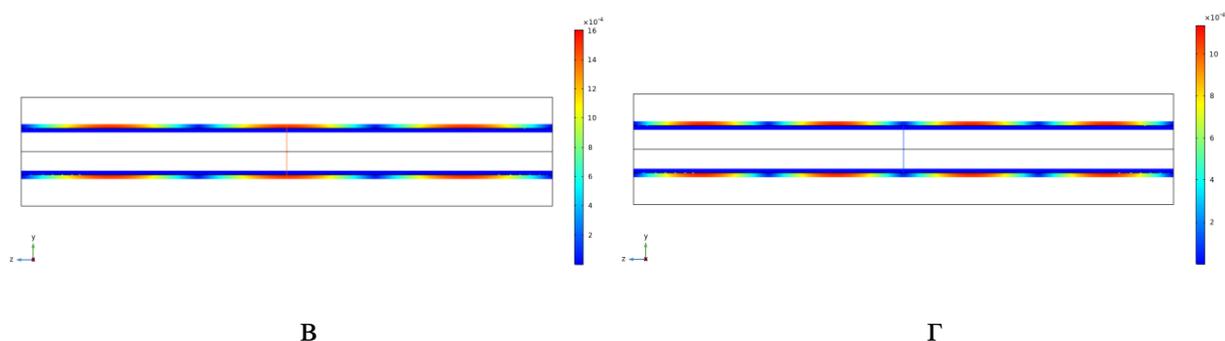


Рис. 7. Распределение поля электрической индукции \mathbf{D} в продольном сечении пьезоэлектрического и электролюминесцентного слоев датчика

PEL-датчика при различных относительных значениях параметра $k_p \equiv \Delta\rho/\rho_{a0}$ изменения плотности абсорбционного слоя, где $\Delta\rho$ - изменение, $\rho_{a0} = 1280.4 \text{ кг/м}^3$ - начальное значение (без абсорбированного в нем анализируемого вещества) плотности этого слоя. При численном моделировании не учитывались вязкость, электропроводность структурных элементов и, как следствие, энергетические потери датчика. Собственные частоты колебаний датчика даны в таблице 1 при значениях параметра увеличения плотности абсорбционного слоя $k_p = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$. Первые четыре собственные формы колебаний датчика представлены на рис.3 для случая, когда абсорбционный слой имеет начальное значение плотности ρ_{a0} , т.е. без наличия в слое анализируемого вещества; этим формам соответствуют частоты $\nu_{1,\dots,4}$ из первой строки таблицы 1 для случая $k_p = 0$. Рассматриваемые формы (рис.3) соответствуют реализациям различных сложных деформированных состояний датчика с элементами кручений, что подтверждается (рис.4) характером распределений компоненты u_x поля

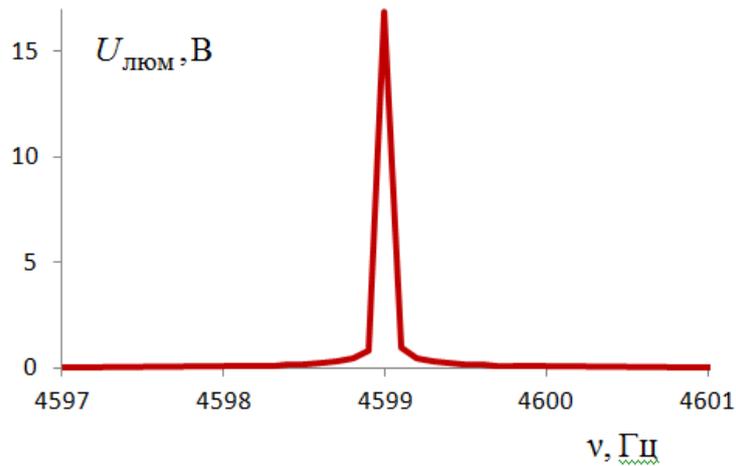


Рис. 8. Пример АЧХ электрического напряжения $U_{\text{ЛЮМ}}$ на люминесцентном слое датчика для второй формы колебаний

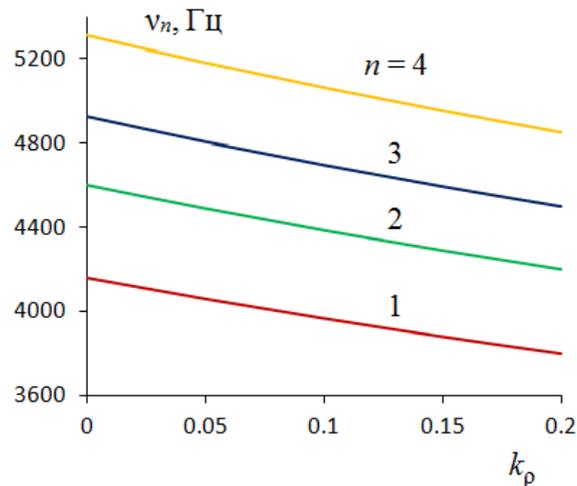


Рис. 9. Зависимости собственных частот $\nu_{1,\dots,4}$ колебаний датчика от параметра k_p увеличения плотности абсорбционного слоя

перемещения в плоскости yz продольного сечения датчика. Дополнительно на рис.5, рис.6 изображены поля напряжений σ_{mises} по Мизесу (рис.5) и электрического потенциала ϕ (рис.6) в продольном сечении датчика, на рис.7 - поле электрической индукции \mathbf{D} в продольном сечении пьезоэлектрического и электролюминесцентного слоев датчика для рассматриваемых форм колебаний. Пример амплитудно-частотной характеристики электрического напряжения $U_{\text{ЛЮМ}}$ на электролюминесцентном слое датчика дан на рис.8 для второй формы колебаний. Зависимости

собственных частот $\nu_{1,\dots,4}$ (табл.1) колебаний датчика от параметра k_p - относительного увеличения плотности абсорбционного слоя даны на рис.9. Анализ зависимостей на рис.9 показывает, что с увеличением плотности абсорбционного слоя наблюдаются уменьшения значений собственных частот $\nu_{1,\dots,4}$ практически по линейным законам.

Рассмотрим влияние величины объема $V'_a = (1 + k_V)V_a$ абсорбционного слоя на значения собственных частот колебаний датчика при различных значениях

Таблица 2. Собственные частоты $\nu_{1,\dots,4}$ колебаний датчика при $V'_a/V_a = 0.7$

Значение плотности, кг/м ³	Собственные частоты $\nu_{1,\dots,4}$, Гц			
	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
1280.40 ($k_p = 0$)	6797.0	7475.5	7764.4	8042.1
1344.42	6635.1	7295.6	7577.4	7848.3
1408.44	6484.3	7128.0	7403.2	7667.8
1472.46	6343.3	6971.5	7240.5	7499.3
1536.48	6211.1	6824.8	7088.1	7341.4

Таблица 3. Собственные частоты $\nu_{1,\dots,4}$ колебаний датчика при $V'_a/V_a = 1.3$

Значение плотности, кг/м ³	Собственные частоты $\nu_{1,\dots,4}$, Гц			
	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
1280.40 ($k_p = 0$)	3027.9	3433.7	3832.5	4304.2
1344.42	2955.1	3351.0	3740.2	4200.5
1408.44	2887.2	3273.9	3654.2	4103.9
1472.46	2823.9	3202.0	3573.8	4013.7
1536.48	2764.5	3134.6	3498.6	3929.2

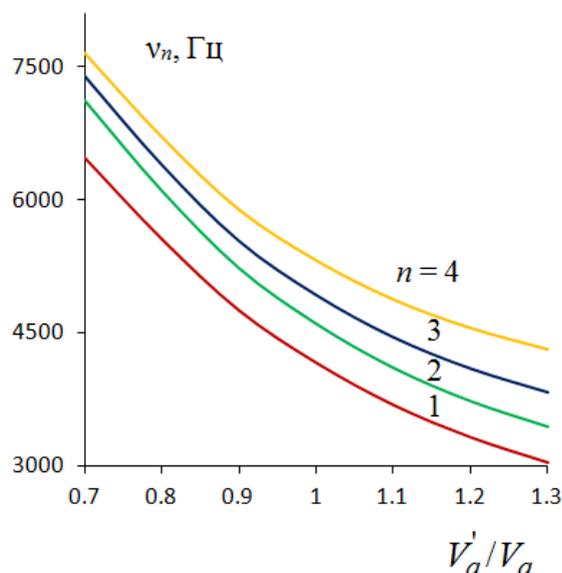


Рис. 10. Зависимости значений собственных частот $v_{1,\dots,4}$ колебаний датчика от объема V'_a абсорбционного слоя при плотности ρ_{a0}

параметра плотности $k_p \equiv \Delta\rho/\rho_0$ этого слоя (таблица 2 для случая $V'_a/V_a = 0.7$, таблица 3 для случая $V'_a/V_a = 1.3$) для случая $k_V = \pm 0.3$, где задаваемый параметр $k_V \equiv \Delta V_a/V_a$ - относительное приращение ΔV_a объема абсорбционного слоя от его номинального значения V_a . Из анализа результатов таблицы 2, таблицы 3 следует, что при увеличении объема абсорбционного слоя на 30% значение собственных частот колебаний датчика уменьшилось на 27.2%, а при уменьшении объема абсорбционного слоя датчика на 30% - увеличилось на 63.4%. На рис.10 при значении $V'_a = V_a$ ординаты точек - это значения соответствующих частот $v_{1,\dots,4}$ в первой строке таблицы 1 при $k_p = 0$.

Заключение

Разработана математическая электро-механическая модель представительного фрагмента газоаналитического оптоволоконного пьезоэлектrolюминесцентного датчика с наличием специального внешнего абсорбционного слоя. Представлен алгоритм нахождения сорбционного спектра $f_a(\zeta)$ через решение интегрального уравнения Фредгольма по результатам

измерения светового спектра интенсивности свечения на выходе из оптоволокна датчика. Использован резонансный метод диагностирования, который основан на рассмотрении вынужденных электромеханических колебаний датчика под действием гармонического управляющего электрического напряжения. В результате численного моделирования определены резонансные характеристики: собственные формы и частоты колебаний датчика по решению связанной стационарной краевой задачи электроупругости с учетом геометрической формы, взаимного расположения и анизотропии электроупругих свойств элементов датчика. Определен вид амплитудно-частотной характеристики (рис.8) электрического напряжения $U_{\text{люм}}$ на люминесцентном слое датчика. Выявлены закономерности влияния на собственные частоты ν_1, \dots, ν_4 колебаний датчика значений параметра плотности k_p (рис.9) и объема V_a' (рис.10) абсорбционного слоя.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-41-596010.

Литература

1. Уорк К., Уорнер С. *Загрязнение воздуха. Источники и контроль*. Москва, Мир. 1980. 539 с.
2. Виглеб Г. *Датчики*. Москва, Мир. 1989. 196 с.
3. Каттралл Роберт В. *Химические сенсоры*. Москва, Научный мир. 2000. 144 с.
4. Белянкин С.Е. Сенсоры контроля концентрации газовых компонентов. *Фундаментальные исследования*. 2006. №2. С.49-51.
5. Петрухин О.М., Максименко О.О. Сенсоры в аналитической химии. *Российский химический журнал*. 2008. Т.52. №2. С.3-6.
6. Чехлова Т.К., Тимакин А.Г., Попов К.А. Волноводные датчики концентраций веществ в газовых смесях и жидкостях. *Приборы и техника эксперимента*. 2002. Т.45. С.145-148.

7. Саввин С.Б., Кузнецов В.В., Шереметьев С.В., Михайлова А.В. Оптические химические сенсоры (микро- и наносистемы) для анализа жидкостей. *Российский химический журнал*. 2008. Т.52. №2. С.7-16.
8. Граттан К.Т.В. Волоконно-оптические датчики и измерительные системы. *Датчики и системы*. 2001. №3. С.46-50.
9. Казьмина И.Г., Рязанцева Л.Т., Федянин В.И. Химические сенсоры в системе экологического мониторинга. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011. Т.7. №2. С.144-146.
10. Kieu K.Q., Mansuripur M. Biconical fiber taper sensors. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2006. V.18. №21. P.2239-2241.
11. Linslal C.L., Syam Mohan P.M., Halder A., Gangopadhyay T.K. Eigenvalue equation and core-mode cutoff of weakly guiding tapered fiber as three layer optical waveguide and used as biochemical sensor. *Applied Optics*. 2012. V.51. №16. P.3445-3452.
12. Егоров А.А. Систематика, принципы работы и области применения датчиков. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2009. №3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar09/3/text.pdf>
13. Sun Y., Fan X. Optical ring resonators for biochemical and chemical sensing. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2011. V.399. P.205-211.
14. Yin M., Huang B., Gao S., Zhang A.P., Ye X. Optical fiber LPG biosensor integrated microfluidic chip for ultrasensitive glucose detection. *Biomedical Optics Express*. 2016. V.7. №5. P.2067-2077.
15. Luo B., Yan Z., Sun Z., Li J., Zhang L. Novel glucose sensor based on enzyme-immobilized 81° tilted fiber grating. *Optics Express*. 2014. V.22. №25. P.30571-30578.
16. Baldini F., Brenci M., Chiavaioli F., Giannetti A., Trono C. Optical fibre gratings as tools for chemical and biochemical sensing. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2012. V.402. №1. P.109-116.
17. Linslal C.L., Syam Mohan P.M., Halder A., Gangopadhyay T.K. Analysis and modeling of an optical fiber loop resonator and an evanescent field absorption

- sensor for the application for chemical detection. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013. V.194. P.160-168.
18. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. V.288. P.171-176.
19. Паньков А.А. Электро-механическая модель индикаторного полимерного оптоволоконного РЕЛ-покрытия механических воздействий. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.1>
20. Паньков А.А., Писарев П.В. Антиобледенительное индикаторное полимерное покрытие со встроенным оптоволоконным РЕЛ-датчиком для индикации, локации и очистки от обледенения аэродинамических поверхностей. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2021. №4. С.111-121.

Для цитирования:

Паньков А.А., Писарев П.В., Баяндин С.Р. Резонансные характеристики сорбционного оптоволоконного пьезоэлектролюминесцентного датчика. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.4>