

*И. Н. Чебурахин, А. А. Трофимов, Д. А. Ярославцева,
С. А. Здобнов, М. В. Тюрин*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

*I. N. Cheburakhin, A. A. Trofimov, D. A. Yaroslavtseva,
S. A. Zdobnov, M. V. Tyurin*

SIMULATION OF A HIGH-TEMPERATURE THIN-FILM SENSOR OF THE GAUGE PRESSURE MEASURING SYSTEM

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Имитационное моделирование рассматривается как начальный этап разработки датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) и систем на их основе, работающих в «жестких» условиях эксплуатации в агрегатах и системах ракетно-космической техники. Методы имитационного моделирования позволяют проанализировать поведение ДПА в «жестких» условиях эксплуатации. Целью имитационного моделирования является определение влияния внешних воздействующих факторов на работоспособность высокотемпературного тонкопленочного датчика измерительной системы избыточного давления (ИСИД) для подтверждения выбранных технических решений. **Материалы и методы.** Среди современных численных методов расчета температурных полей, распределения радиальных и тангенциальных деформаций, виброускорений и другого наиболее подходящим является метод конечных элементов, используемый в специализированном программном обеспечении SolidWorks с модулем Simulation, позволяющий снизить затраты на проведение дорогостоящих и длительных циклов «проектирование – изготовление – испытания». Исследуемый высокотемпературный тонкопленочный датчик заменяется моделью, на которой проводятся расчеты с целью получения информации об объекте, работающем в «жестких» условиях эксплуатации. **Результаты.** По результатам имитационного моделирования был проведен расчет температурных полей, определено распределение радиальных и тангенциальных деформаций тонкопленочного датчика. Выявлены возникающие напряжения и деформации в области проточки под воздействием виброускорений, а также определены резонансные частоты. Показана 3D-модель многоканального цифрового преобразователя ИСИД.

A b s t r a c t. Background. Simulation modeling is considered as the initial stage in the development of sensor-converting equipment (SCE) and systems based on it, operating in "harsh" operating conditions in units and systems of rocket and space technology. Simulation modeling methods allow analyzing the behavior of the SCE in "harsh" operating conditions. The purpose of simulation is to determine the influence of external influencing factors on the performance of a high-temperature thin-film gauge pressure measuring system (GPMS) sensor to confirm the selected technical solutions. **Materials and methods.** Among modern numerical methods for calculating temperature fields, distribution of radial and tangential deformations, vibration accelerations, etc., the most suitable is the finite element method used in the special-

ized SolidWorks software with the Simulation module, which makes it possible to reduce the cost of performing expensive and long cycles "design – manufacture – testing". The investigated high-temperature thin-film sensor is replaced by a model used for calculations in order to obtain information about an object operating in "harsh" operating conditions. **Results.** Based on the results of simulation, the calculation of the temperature fields was carried out, the distribution of the radial and tangential deformations of the thin-film sensor was determined. The arising stresses and deformations in the groove area under the influence of vibration accelerations are revealed, and the resonance frequencies are determined. Shown is a 3D model of a multi-channel digital converter GPMS.

К л ю ч е в ы е с л о в а: имитационное моделирование, тонкопленочный датчик, давление, внешние воздействующие факторы, температурное поле, вибрация.

Key words: simulation modeling, thin film sensor, pressure, the external influencing factors, a temperature profile, vibration.

Современная ДПА для измерения физических величин представляет собой сложные многокомпонентные динамические системы, в которых протекают взаимосвязанные физические процессы различной природы (тепловые, механические, упругие и термоупругие, электрические, оптические и др.).

Эти системы состоят из ряда подсистем, главными из которых являются информационная и энергетическая. Эти подсистемы взаимосвязаны и имеют свои особенности, существенно влияющие на работу ДПА.

Основной особенностью энергетической подсистемы является то, что значительная часть поступающей в ДПА энергии преобразуется в тепло. Кроме того, внешняя и измеряемая среды имеют существенно неоднородные и в общем случае нестационарные характеристики (в частности по температуре). И та часть сил и моментов, действующих на чувствительный элемент прибора, которая обусловлена неоднородным и нестационарным температурным полем, вибрационными и ударными нагрузками, вводит дополнительную погрешность. Тепловые процессы во многом определяют не только точность датчиков, но и такие важные характеристики, как долговечность и время готовности.

Как показывают проведенные ранее исследования [1], влияние на эффективность работы, надежность, долговечность, точность и время готовности современной ДПА оказывают существенные изменения температуры на уровне единиц градусов, внутренние градиенты температуры порядка $(0,1 \div 1)^\circ\text{C}$ и стабильность температур различных элементов на уровне $(0,01 \div 0,1)^\circ\text{C}$. Поэтому одной из важных и актуальных задач при построении и исследовании математических и имитационных моделей высокотемпературных тонкопленочных датчиков ИСИД является задача определения с высокой точностью температурного поля датчика.

Сложность, возникающая при расчетах и анализе нестационарного, трехмерного температурного поля тонкопленочного датчика (с учетом различных видов теплообмена, наличия несимметричных источников тепловыделения, разнородной многокомпонентной структуры, особенностей крепления и условий теплообмена с внешней средой и т.п.), не позволяет применить традиционные и точные аналитические методы, принятые в задачах теплопроводности [2]. Не удается решить эту задачу и приближенными численно-аналитическими методами.

В силу большой сложности задача расчета температурного поля рассматриваемых тонкопленочных датчиков избыточного давления может быть решена путем применения численных методов с использованием специального программного обеспечения SolidWorks с модулем Simulation.

Среди численных методов расчета температурных полей наиболее часто используемыми являются метод конечных элементов (МКЭ) и конечно-разностный метод (КРМ).

В «классических» КРМ дифференциальные уравнения и краевые условия аппроксимируются разностными соотношениями, на основе которых строятся алгоритмы обработки полученной информации.

МКЭ по существу является вариационным методом решения краевых задач, ибо он основан на альтернативной формулировке краевых задач не в виде системы дифференциальных

уравнений с краевыми условиями, а в виде некоторой вариационной задачи об экстремуме соответствующего функционала. Поэтому при решении стационарных задач указанного типа МКЭ находит достаточно широкое применение.

Однако, как показывают исследования [3–6], при решении нестационарных трехмерных задач предпочтительнее совместное использование МКЭ и КРМ.

Следует отметить, что при применении КРМ и МКЭ к многомерным задачам система разностных уравнений имеет большой порядок, и для ее решения в общем случае отсутствует эффективный алгоритм типа алгоритма прогонки, используемого для одномерных задач.

Это обстоятельство особенно осложняет решение нестационарных уравнений, поскольку при использовании неявных разностных схем приходится на каждом шаге по времени иметь дело с системой линейных уравнений (относительно искомых температур) большого порядка, а число шагов по времени в реальных задачах может достигать нескольких тысяч.

В настоящей работе для расчета неоднородных, трехмерных, нестационарных температурных полей тонкопленочного датчика ИСИД предлагается использовать метод конечных элементов с применением программного комплекса SolidWorks и модуля Simulation [7].

Выбор этого метода обусловлен сложностью поставленных и решаемых нестационарных многомерных температурных задач, многокомпонентностью конструкции тонкопленочного датчика, разнообразием и взаимосвязанностью физических явлений и процессов.

Целью проведения имитационного моделирования является определение влияния внешних воздействующих факторов на работоспособность высокотемпературного тонкопленочного датчика и разработка 3D-модели многоканального цифрового преобразователя ИСИД.

Имитационное моделирование позволит решить следующие задачи:

- распределение радиальных и тангенциальных деформаций на рабочей поверхности мембраны воспринимающего элемента при воздействии давления, для крайних значений допусков размеров при температурах минус 196, + 25, +250° С, при радиусе скругления 0; 0,1; 0,2; 0,3 мм;

- распределение температур и радиальных, тангенциальных деформаций на рабочей поверхности мембраны при воздействии на приемную полость жидкого азота с температурой минус 196, + 25, +250 °С через 1, 5, 10, 30, 60, 90, 120, 150, 180 с;

- распределение температур и радиальных деформаций на рабочей поверхности мембраны воспринимающего элемента при толщинах проточки $h = 0,9H; 1,0H; 1,1H; 1,2H$, где H – толщина мембраны при воздействии на приемную полость жидкого азота с температурой минус 196, + 25, +250 °С через 1, 5, 10, 30, 60, 90, 120, 150, 180 с;

- определение полного напряжения и деформации, возникающих в области проточки при воздействии виброускорений 25000 м/с^2 , направленных перпендикулярно оси упругого элемента для крайних значений допусков геометрических размеров при температурах минус 196, + 25, +250° С, при радиусе скругления 0; 0,1; 0,2; 0,3 мм;

- определение амплитуды виброперемещений упругого элемента при воздействии на него виброускорений 25000 м/с^2 с частотой 10-30000 Гц в направлении, перпендикулярном продольной оси упругого элемента для крайних значений допусков геометрических размеров, при температурах минус 196, + 25, +250° С, при радиусе скругления 0; 0,1; 0,2; 0,3 мм;

- определение собственной (резонансной) частоты упругого элемента;

- построение 3D-модели многоканального цифрового преобразователя ИСИД.

Для проведения имитационного моделирования была построена трехмерная твердотельная модель высокотемпературного тонкопленочного датчика (рис. 1).

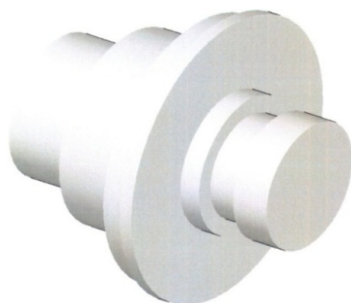


Рис. 1. Твердотельная модель высокотемпературного тонкопленочного датчика

Граничные условия для твердотельного моделирования изображены на рис. 2. В табл. 1 приведены физико-механические свойства используемых материалов, необходимых для проведения анализа в модуле Simulation.

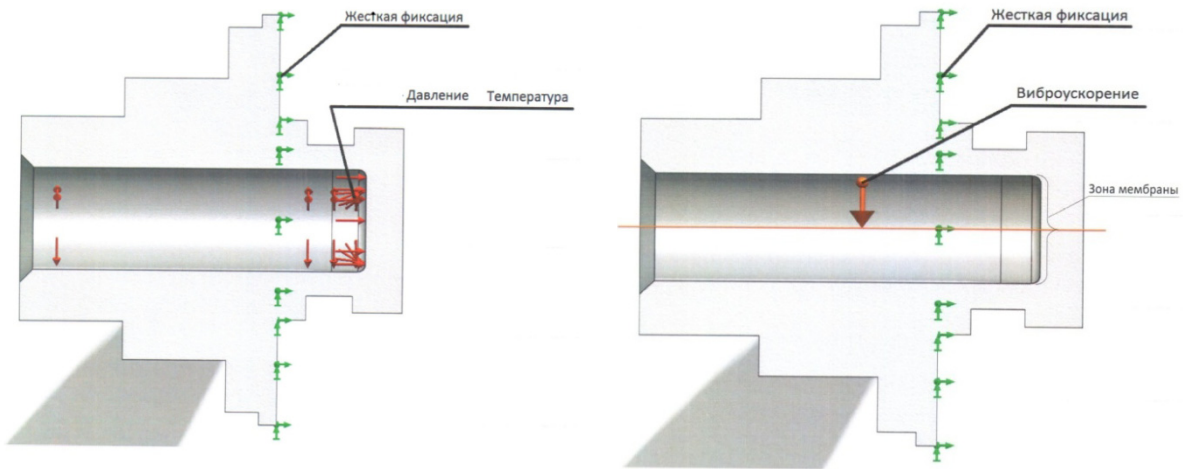


Рис. 2. Структура граничных условий

Таблица 1

Физико-механические свойства используемых материалов

Марка материала	Свойства материала	
	36НКВХБТЮ-ИД	36НХТЮ
Тип материала	Линейный-упругий-изотропный	Линейный-упругий-изотропный
Критерий прочности	Максимальное напряжение по Мизесу	Максимальное напряжение по Мизесу
Предел текучести, МПа	1100	850
Модуль упругости, ГПа	192	200
Коэффициент Пуассона	0,3	0,28
Массовая плотность, кг/м ³	7800	7900
Теплопроводность, Вт/м·К	При температурах: 200К– 13,5 250К – 14,0 273К– 14,1 300К– 14,5 400К–16,5 500К– 17,5	90
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	0,5	450

Результаты моделирования представлены в виде графиков распределения радиальной и тангенциальной деформации (рис. 3–5). Границы мембраны располагаются в точках 11–39.

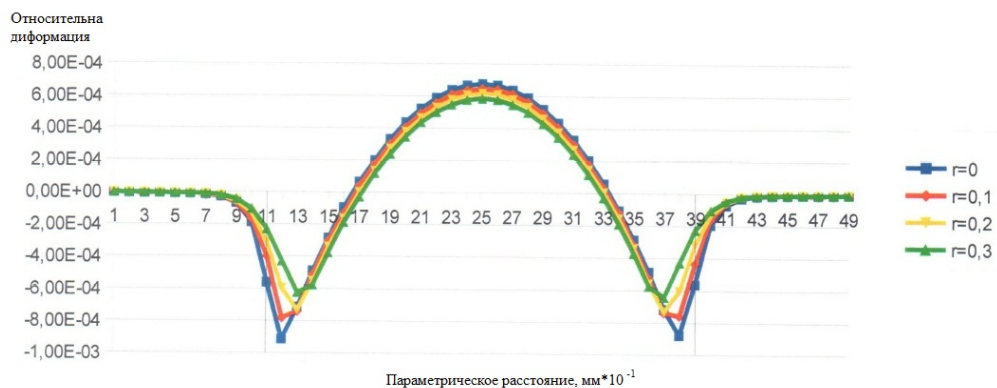


Рис. 3. График распределения радиальной деформации по поверхности мембраны при температуре +25 °С, где $r = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ радиус скругления мембраны

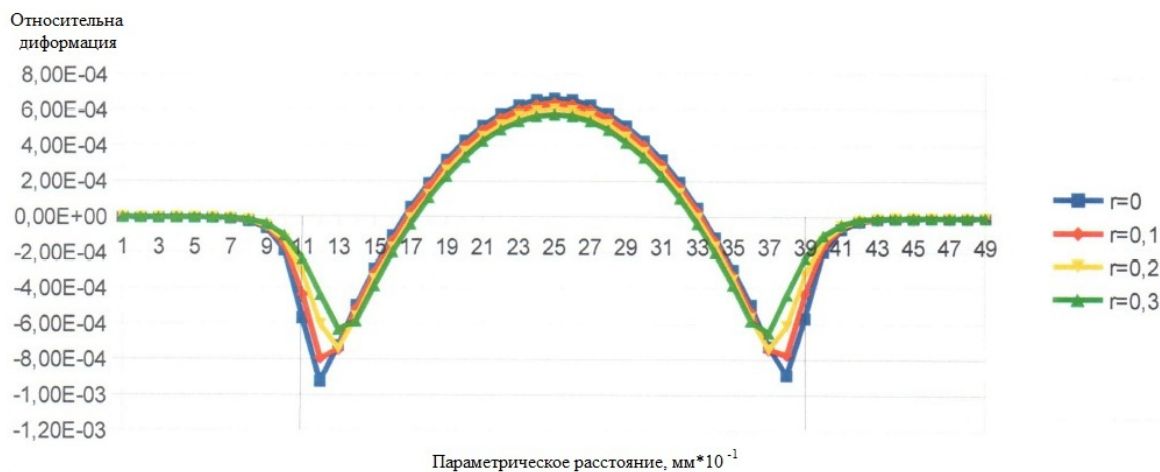


Рис. 4. График распределения радиальной деформации по поверхности мембраны при температуре +250 °C

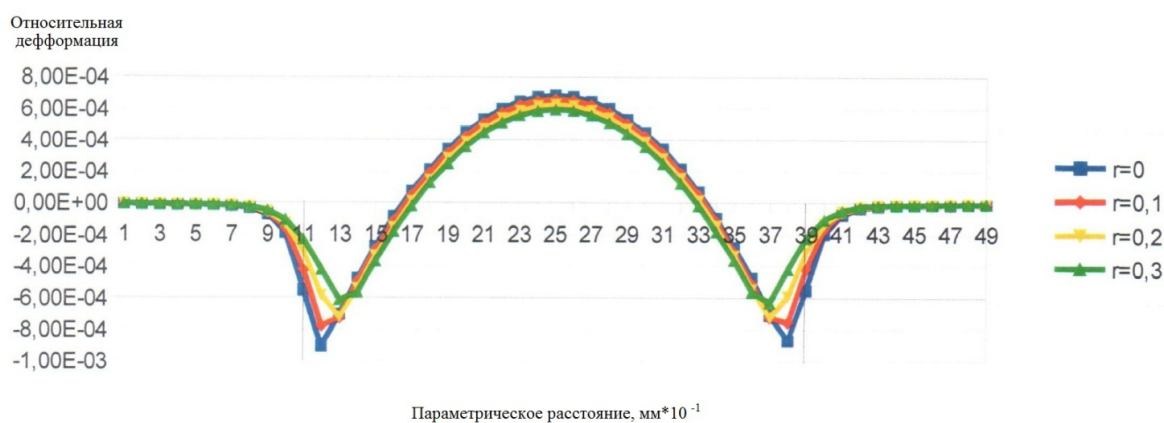


Рис. 5. График распределения радиальной деформации по поверхности мембраны при температуре минус 196 °C

Результатами имитационного моделирования являются эпюра распределения температур на поверхностях мембраны (рис. 6), а также диаграмма распределения радиальной деформации на рабочей поверхности мембраны (рис. 7).

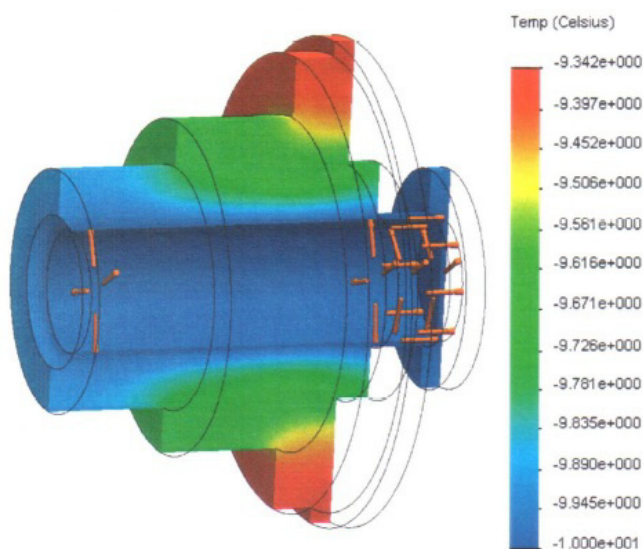


Рис. 6. Эпюра распределения температур

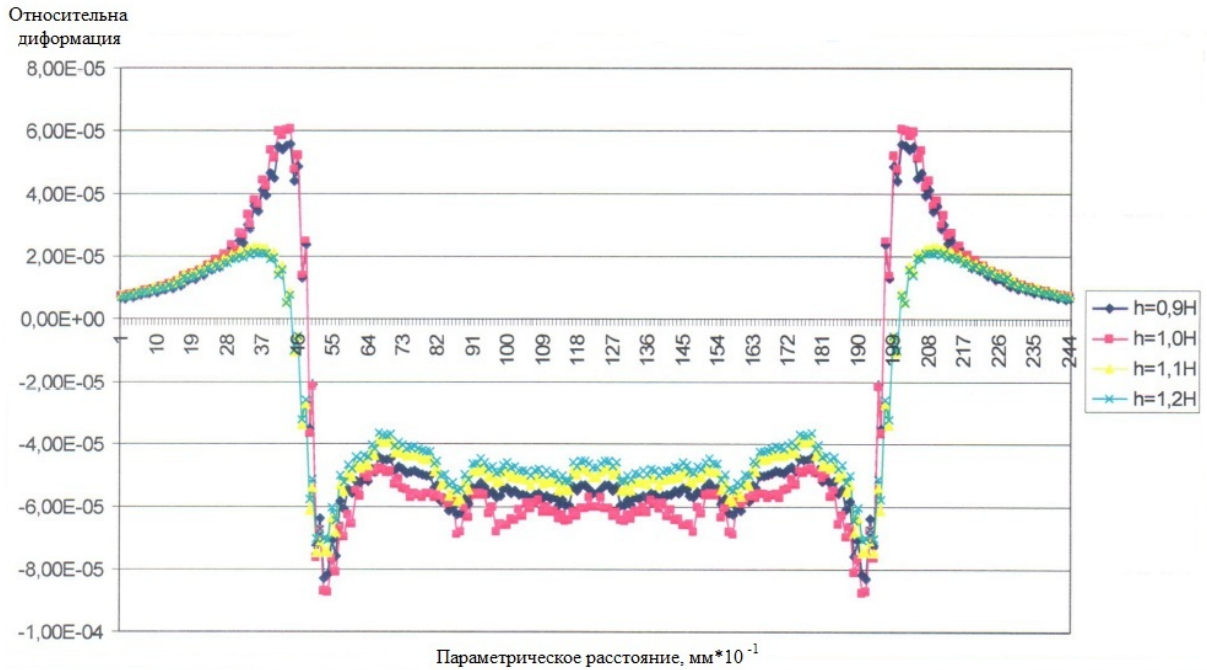


Рис. 7. График зависимости деформации рабочей поверхности мембраны от толщины проточки

При воздействии виброускорений $25\,000\text{ м/с}^2$ максимальные напряжения и деформации, возникающие в области проточки, а также эпюры распределения напряжения и деформации при температурах минус 196, +25, +250 °С, представлены на рис. 8, 9 и 10 соответственно.

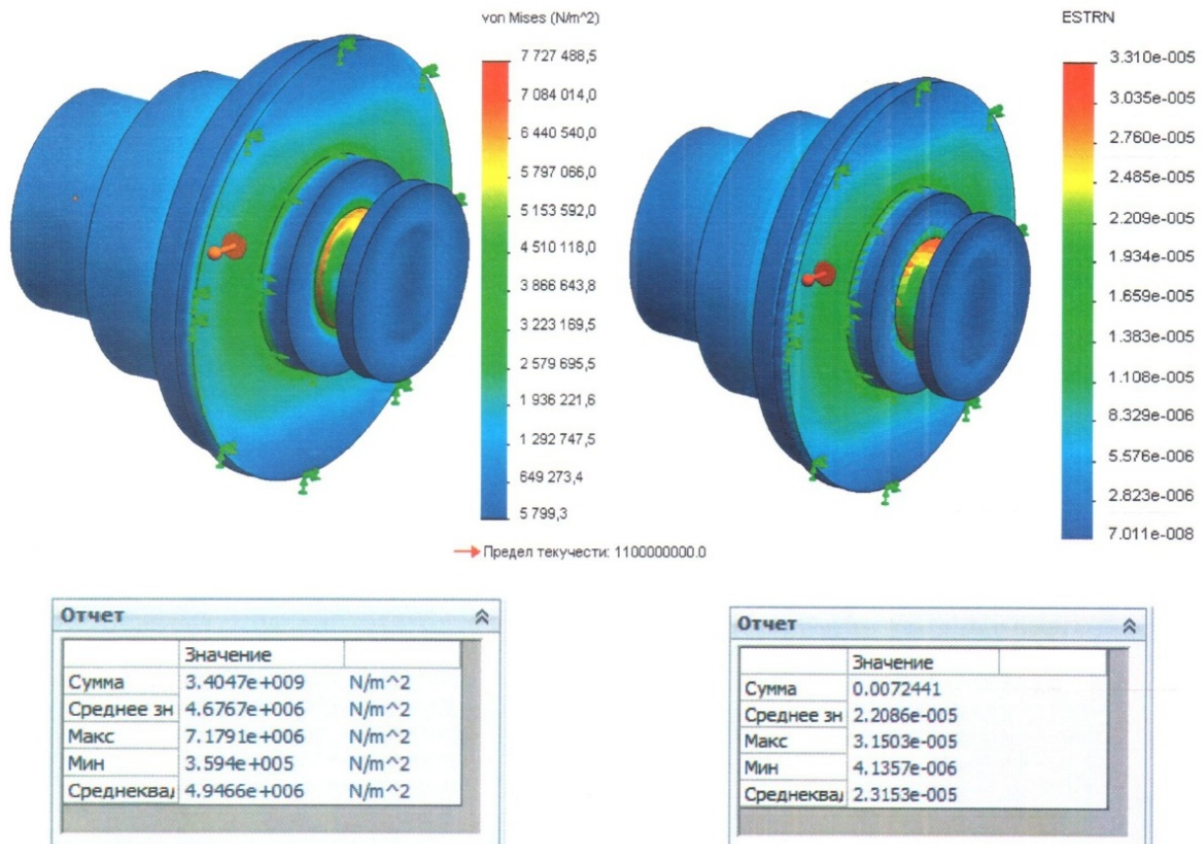


Рис. 8. Эпюры распределения напряжения и деформации при температуре +25 °С

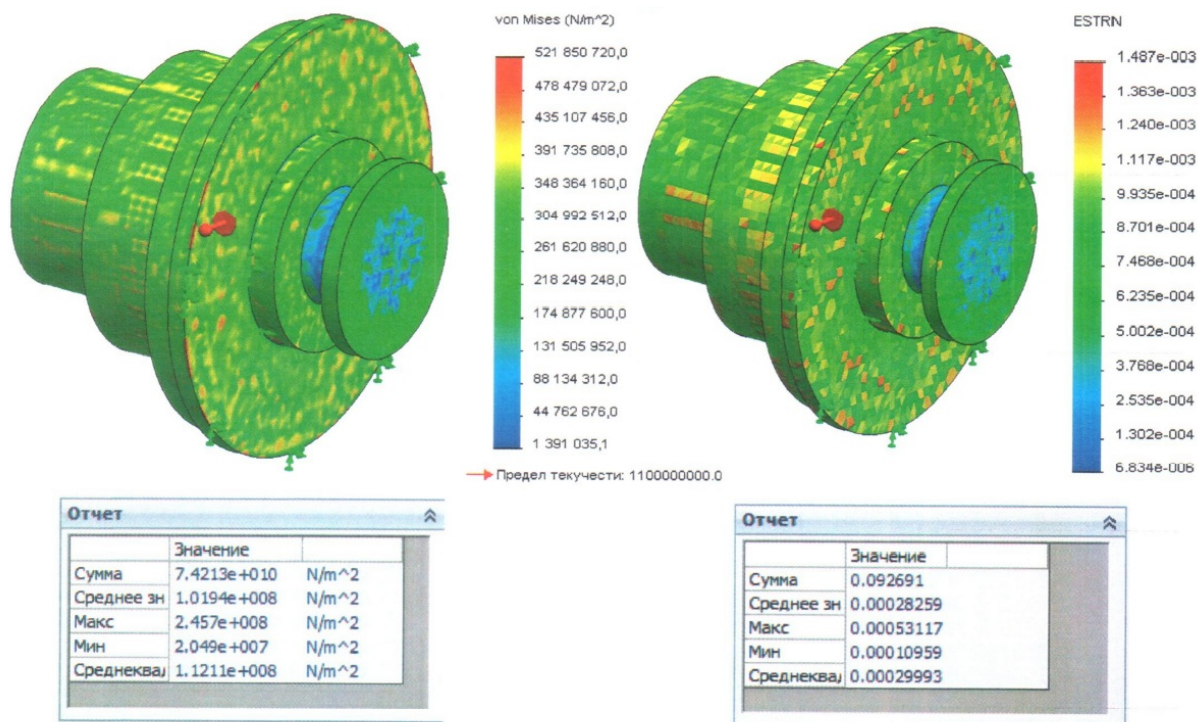


Рис. 9. Эпюры распределения напряжения и деформации при температуре минус 196 °С

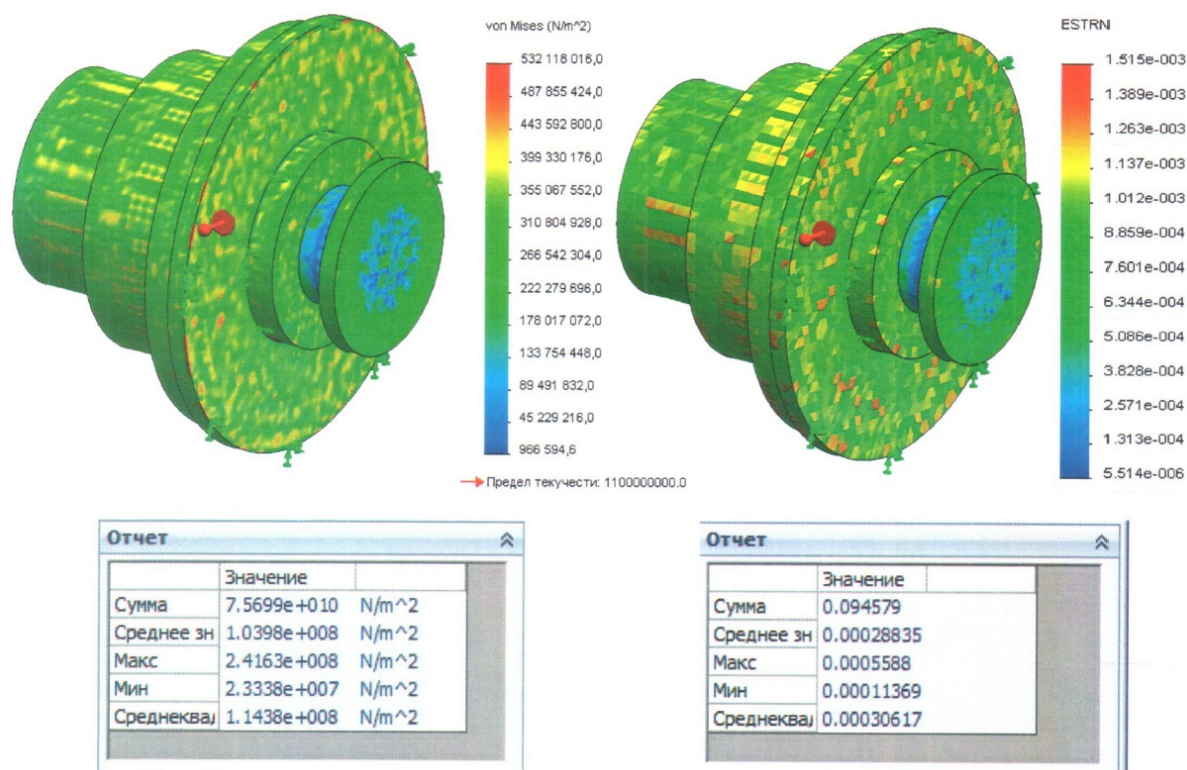


Рис. 10. Эпюры распределения напряжения и деформации при температуре +250 °С

В результате воздействия виброускорений 25 000 м/с² с частотой 10 – 30 000 Гц на упругий элемент была определена зависимость виброперемещений рабочей поверхности мембраны от частоты (рис. 11). В ходе исследования были определены формы продольных колебаний с собственной частотой (табл. 2).

Таблица 2

Собственная (резонансная) частота

Номер формы продольных колебаний	Резонансная частота, Гц	Номер формы продольных колебаний	Резонансная частота, Гц
1	61 291	11	100 630
2	61 312	12	110 390
3	73 546	13	135 370
4	73 549	14	135 390
5	78 424	15	144 240
6	87 187	16	144 250
7	87 989	17	146 870
8	88 020	18	156 950
9	99 576	19	157 090
10	99 636	20	183 250

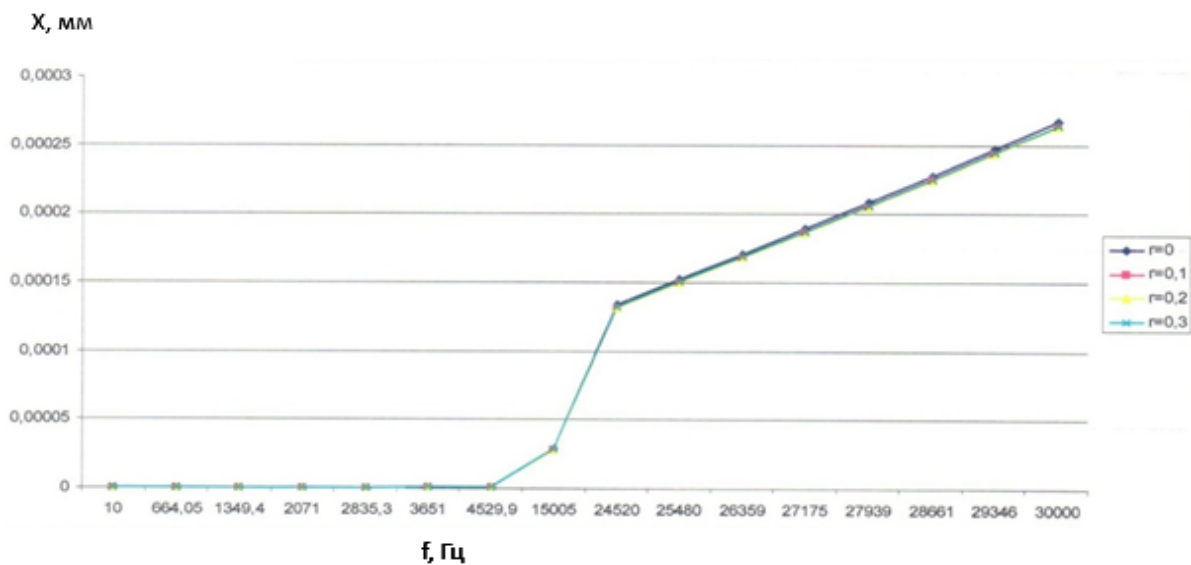


Рис. 11. График зависимости виброперемещений от частоты

3D-модель многоканального цифрового преобразователя ИСИД приведена на рис. 12.

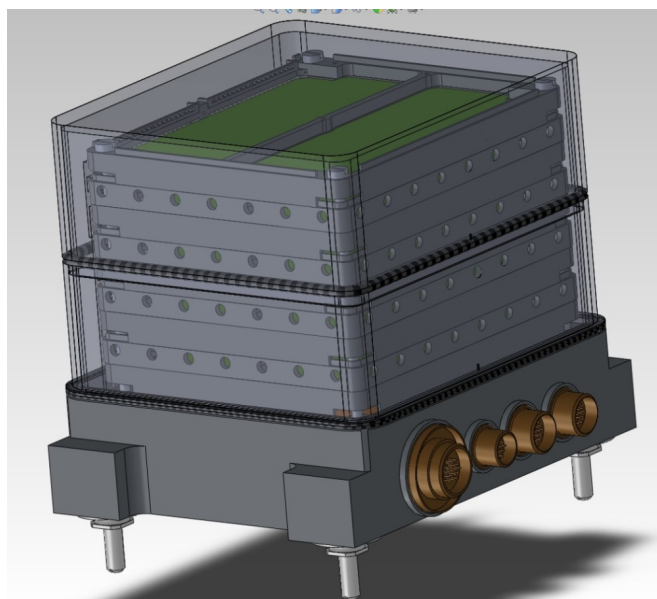


Рис. 12. 3D-модель многоканального цифрового преобразователя

Заклучение

- По результатам имитационного моделирования были решены поставленные задачи:
- рассчитаны радиальные и тангенциальные деформации, максимальное значение которых достигается при радиусе скругления равным нулю;
 - проанализировано распределение температуры по корпусу датчика, значение температур от минус 196 до + 250 °С;
 - выявлены возникающие напряжения и деформации в области проточки под воздействием виброускорений;
 - определены собственные (резонансные) частоты от 61,3 до 183,3 кГц;
 - построена 3D-модель многоканального цифрового преобразователя ИСИД.

Проведенное имитационное моделирование подтверждает правильность выбранных технических решений высокотемпературного тонкопленочного датчика ИСИД при воздействии на него температурных полей от минус 196 до + 250 °С и виброускорений амплитудой 25000 м/с² с частотой от 10 до 30000 Гц.

Библиографический список

1. *Джашиитов, В. Э.* Динамика температурно-возмущенных гироскопических приборов и систем / В. Э. Джашиитов, В. М. Панкратов. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1998. – 236 с.
2. *Лыков, А. В.* Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высш. шк., 1967. – 600 с.
3. *Мусаев, Р. Ш.* Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления / Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов, М. А. Фролов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 51–55.
4. *Фролов, М. А.* Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа / М. А. Фролов, Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2014. – № 7. – С. 22–25.
5. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления / К. И. Баstryгин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов, А. А. Громова, П. Н. Ефимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20–28.
6. *Мусаев, Р. Ш.* Применение CALS-технологий и систем автоматизированного проектирования при создании датчиков-преобразующей аппаратуры и систем для ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры / Р. Ш. Мусаев, А. В. Ляшенко, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 91–102.
7. *Алямовский, А. А.* Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

References

1. Dzhashitov V. E. *Dinamika temperaturno-vozmushchennykh giroskopicheskikh priborov i sistem* [Dynamics of temperature-perturbed gyroscopic devices and systems]. V. M. Pankratov. Saratov: Izd-vo Sarat. unta, 1998, 236 p. [In Russian]
2. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Vyssh. shk., 1967, 600 p. [In Russian]
3. Musaev R. Sh., Trofimov A. A., Frolov M. A. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurements. Monitoring. Management. Control]. 2012, no. 2, pp. 51–55. [In Russian]
4. Frolov M. A., Musaev R. Sh., Trofimov A. A. *Datchiki i sistema* [Sensors and systems]. 2014, no. 7, pp. 22–25. [In Russian]
5. Bastrygin K. I., Trofimov A. A., Baranov A. S., Gromova A. A., Efimov P. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 1 (19), pp. 20–28. [In Russian]
6. Musaev R. Sh., Lyashenko A. V., Tyurin M. V., Yaroslavtseva D. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 2 (26), pp. 91–102. [In Russian]
7. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye rascheti v SolidWorks Simulation* [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press, 2010, 464 p. [In Russian]

Чебурахин Игорь Николаевич

главный технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Cheburakhin Igor Nikolaevich

chief technologist,
Research and development institute
for physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Ярославцева Дарья Александровна

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский
институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского 8/10)
E-mail: levik_92@mail.ru

Здобнов Сергей Александрович

технический директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского 8/10)
E-mail: sa_zdobnov@mail.ru

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского 8/10)
E-mail: preobrazovatel@niifi.ru

Trofimov Alexei Anatol'evich

doctor of technical science, professor,
sub-department of information and measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yaroslavtseva Daria Alexandrovna

design engineer,
Research and development institute
for physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Zdobnov Sergey Aleksandrovich

technical director,
Research and development institute
for physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Tyurin Mikhail Vladimirovich

candidate of technical sciences,
senior researcher,
Research and development institute
for physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Имитационное моделирование высокотемпературного тонкопленочного датчика измерительной системы избыточного давления / И. Н. Чебурахин, А. А. Трофимов, Д. А. Ярославцева, С. А. Здобнов, М. В. Тюрин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 17–26. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-2.