

УДК 681.586.2

doi:10.21685/2307-5538-2021-1-2

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА СИСТЕМЫ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ

И. Н. Чебурахин¹, И. В. Ползунов², А. А. Трофимов³,
Д. А. Ярославцева⁴, М. В. Тюрин⁵

^{1,2,4,5} Научно-исследовательский институт физических измерений, г. Пенза, Россия

³ Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

^{1,2} info@niifi.ru, ³ alex.t1978@mail.ru, ⁴ levik_92@mail.ru, ⁵ preobrazovatel@niifi.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В условиях быстроразвивающихся информационно-измерительных технологий необходимо оперативно и наиболее точно подходить к процессу проектирования и разработки современной датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА). Определение метода измерения того или иного параметра является актуальной и не тривиальной задачей. Использование современных методов компьютерного моделирования позволяет предварительно оценить работоспособность ДПА, отсеять нерациональные варианты и приступить к разработке будущего изделия. Цель компьютерного моделирования тензорезистивного датчика абсолютного давления – выбор оптимальных конструктивных решений для дальнейшего проектирования системы абсолютного давления. *Материалы и методы.* В качестве метода исследования применялось компьютерное моделирование с использованием программного обеспечения SolidWorks с модулем Simulation, что позволило избежать дорогостоящих и длительных циклов проектирования и получить приемлемые схемно-конструктивные решения для дальнейшего изготовления опытных образцов тензорезистивных датчиков давления и системы на их основе. *Результаты.* В результате компьютерного моделирования выбраны конструктивные параметры чувствительного элемента при воздействии номинального давления 1,6 кгс/см², определены перемещения мембраны и балки при приложении к штоку сосредоточенной нагрузки 2,1 кг в зависимости от значений допусков геометрических размеров чувствительного элемента.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, тензорезистивный датчик абсолютного давления, система абсолютного давления

Для цитирования: Чебурахин И. Н., Ползунов И. В., Трофимов А. А., Ярославцева Д. А., Тюрин М. В. Компьютерное моделирование тензорезистивного датчика системы абсолютного давления // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 17–24. doi:10.21685/2307-5538-2021-1-2

COMPUTER SIMULATION OF A STRAIN-RESISTIVE SENSOR OF AN ABSOLUTE PRESSURE SYSTEM

I.N. Cheburakhin¹, I.V. Polzunov², A.A. Trofimov³,
D.A. Yaroslavtseva⁴, M.V. Tyurin⁵

^{1,2,4,5} Research and Development Institute for Physical Measurements, Penza, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

^{1,2} info@niifi.ru, ³ alex.t1978@mail.ru, ⁴ levik_92@mail.ru, ⁵ preobrazovatel@niifi.ru

Abstract. *Background.* In the conditions of rapidly developing information-measuring technologies, it is necessary to quickly and most accurately approach the design and development process of modern sensor-converting equipment (SCE). Determination of a method for measuring a particular parameter is an urgent and not a trivial task. The use of modern methods of computer modeling makes it possible to preliminarily assess the operability of the SCE, cut off irrational options and start developing a future product. The purpose of computer simulation of a strain-gauge absolute pressure sensor is the selection of optimal design solutions for further design of an absolute pressure system. *Materials and methods.* As a research method, computer modeling was applied using the SolidWorks software with the Simulation module, which made it possible to avoid expensive and lengthy design cycles and obtain acceptable schematic and design solutions for the further manufacture of prototypes of strain-gauge pressure sensors and systems based on them. *Results.* As a result of computer modeling, the design parameters of the sensitive element under the influence of a nominal pressure of 1.6 kgf/cm² were selected, the displacements of the membrane and the beam were determined when a concentrated load of 2.1 kg was applied to the rod, depending on the tolerance values of the geometric dimensions of the sensitive element.

Keywords: computer modeling, strain-gauge absolute pressure sensor, absolute pressure system

For citation: Cheburakhin I.N., Polzunov I.V., Trofimov A.A., Yaroslavtseva D.A., Tyurin M.V. Computer simulation of a strain-resistive sensor of an absolute pressure system. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2021;1:17–24. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-1-2

Введение

Датчики физических величин являются важнейшими элементами информационно-измерительных систем, систем контроля, мониторинга, управления и технической диагностики [1–4].

В последнее время в связи с интенсивным развитием отраслей техники, таких как авиационная, космическая, автомобильная и другие, была выявлена актуальная задача повышения точности измерения тензорезистивных датчиков абсолютного давления.

Основным узлом тензорезистивного металлопленочного датчика абсолютного давления, определяющим технические характеристики, является чувствительный элемент [5]. Он представляет собой, как правило, воспринимающий давление элемент (мембрана с балкой) из упругого материала, на котором сформирована тензочувствительная схема, состоящая из тензорезисторов, соединенных в мостовую схему.

В связи с превалирующим значением чувствительного элемента особое внимание должно быть уделено его конструкции. При этом основной задачей является максимальная минимизация температурных и механических воздействий в жестких условиях эксплуатации, что выявляет необходимость учета взаимосвязи температурных и механических воздействий, проявляющихся во взаимном влиянии этих воздействий друг на друга. Например, воздействие температуры приводит к появлению в зонах размещения тензорезисторов не только температурного поля, но и поля температурных деформаций, а механические воздействия, в частности вибрации, помимо механических деформаций вызывают дополнительное изменение температуры упругого элемента.

Требование к конструктивному исполнению, в части выбора конфигурации и геометрического исполнения элементов конструкции датчика, может быть сформулировано как обеспечение идентичности температурных полей и полей температурных деформаций в зонах установки тензорезисторов на мембрану. Решение вопроса обеспечения идентичности температурных полей и полей температурных деформаций в зонах установки тензорезисторов на мембране для каждой выбранной конструкции должно осуществляться индивидуально, в зависимости от конструктивных особенностей. На основании изложенного проведем компьютерное моделирование [6, 7] конструкции мембраны тензорезистивного датчика абсолютного давления, выполненного по тонкопленочной технологии.

Основная часть

Задачами компьютерного моделирования являются:

1. Определение значения перемещения балки, распределение деформации по рабочей поверхности балки под действием сосредоточенной нагрузки на шток с учетом значений допусков геометрических размеров.

2. Определение значения перемещения мембраны под действием номинального давления с учетом значений допусков геометрических размеров и разброса значения модуля упругости сплава 36НХТЮ.

3. Определение значения перемещения и распределение деформации на поверхности балки под воздействием на мембрану номинального давления с учетом значений допусков геометрических размеров и разброса значения модуля упругости, сплава 36НХТЮ.

4. Моделирование влияния момента затяжки винтов на перемещение балки.

5. Определение значений температуры на тензорезисторах при расстояниях 800 и 500 мкм между ними с учетом времени непрерывной работы датчика 16 ч при температуре окружающей среды +25 °С для балки из сплава 36НХТЮ.

Для реализации поставленных задач были созданы компьютерные модели балки, мембранного блока чувствительного элемента. Модель построена в программной среде SolidWorks, а самый прочностной расчет осуществлялся методом конечных элементов с применением модуля Simulation [8]. Модель мембранного блока представляет собой сварную конструкцию мембраны, подушки и балки (рис. 1); модель чувствительного элемента представляет собой сварную конструкцию мембранного блока и балки с расположенной на ней тензорезистивной схемой (рис. 2).

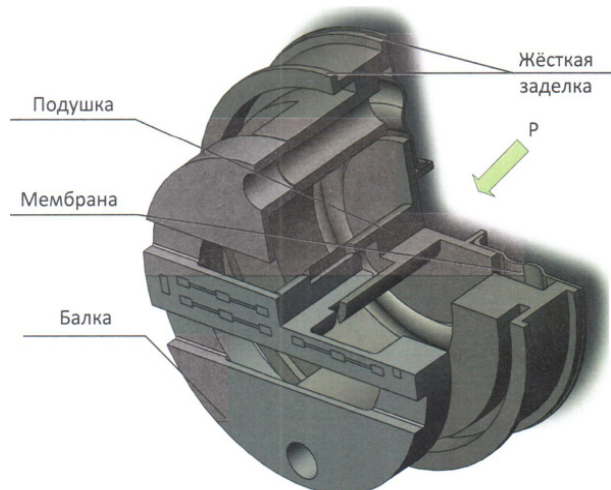


Рис. 1. Мембранный блок, представляющий собой сварную конструкцию мембраны, подушки и балки

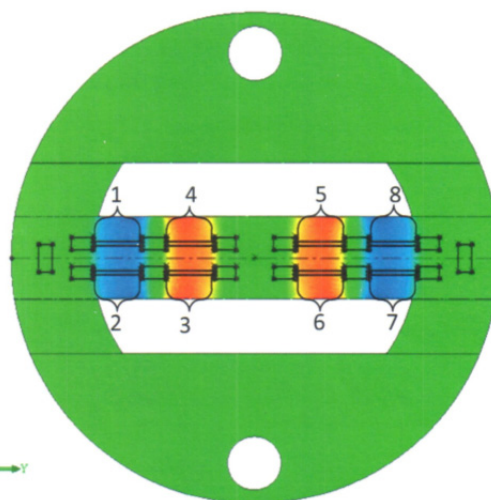


Рис. 2. Балка с тензорезистивной измерительной схемой (1–8 тензорезисторы)

Для проведения расчетов методом конечных элементов необходимо выполнение граничных условий, задаваемых исходя из принципа работы датчика.

Граничные условия для определения значения перемещения балки и распределение деформации на ее поверхности изображены на рис. 3, а. Данная схема граничных условий удовлетворяет требованиям первой задачи.

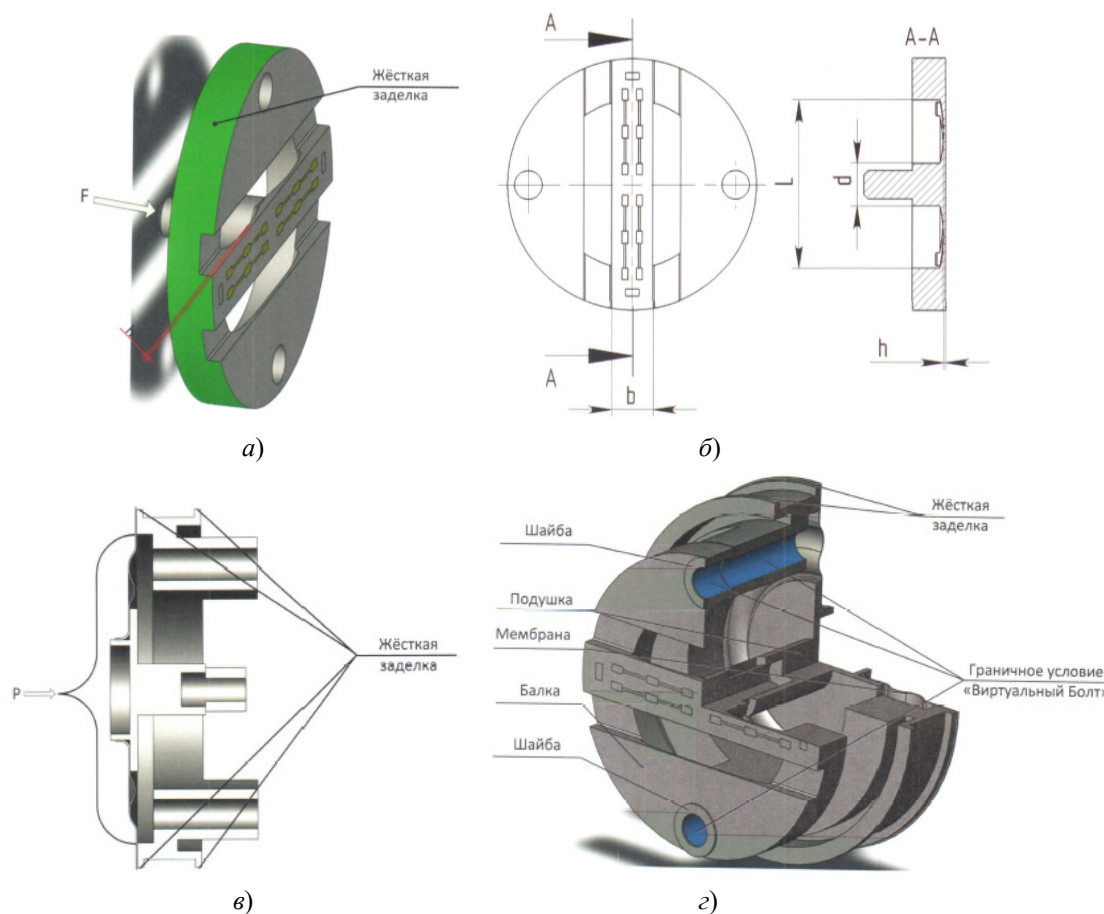


Рис. 3: Схемы: а – граничных условий для определения значения перемещения балки и распределения деформации на ее поверхности; б – конструктивных элементов балки, непосредственно влияющих на прогиб; в – граничных условий для определения перемещения мембраны под действием номинального давления; г – граничных условий для оценки влияния момента затяжки винтов на прогиб балки

Граничные условия для определения перемещения мембраны под действием номинального давления изображены на рис. 3,в. Данная схема граничных условий удовлетворяет требованиям второй задачи.

Граничные условия для определения перемещения и распределение деформации на рабочей поверхности балки под действием на мембрану номинального давления изображены на рис. 1. Данная схема граничных условий удовлетворяет требованиям третьей задачи.

Граничные условия для оценки влияния момента затяжки ($0,2 \pm 0,04 \text{ Н}\cdot\text{м}$) винтов на прогиб балки, будут использоваться согласно схеме, изображенной на рис. 3,г.

В результате расчетов были определены перемещения балки, имеющей различную толщину рабочей части (размер h , рис. 3,б). Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения перемещения балки под действием сосредоточенной нагрузки

h , мкм	Действующая сосредоточенная нагрузка, Н	Перемещение балки, мкм
135	21	108
155		85
160		79
165		75

На рис. 2 изображена балка с тензорезистивной измерительной схемой, разбитой на 8 областей, показывающей качественную характеристику распределения относительной деформации по оси Y . Значения относительной деформации в каждой области, в зависимости от толщины h , приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения относительной деформации оси Y при воздействии на шток сосредоточенной нагрузки 2,1 кг

Области деформации	Относительная деформация в зависимости от минимальной толщины рабочей части балки (h)			
	$h = 135 \text{ мкм}$	$h = 155 \text{ мкм}$	$h = 160 \text{ мкм}$	$h = 165 \text{ мкм}$
1	$-2,57 \cdot 10^{-3}$	$-2,14 \cdot 10^{-3}$	$-1,98 \cdot 10^{-3}$	$-1,89 \cdot 10^{-3}$
2	$-2,55 \cdot 10^{-3}$	$-2,06 \cdot 10^{-3}$	$-1,97 \cdot 10^{-3}$	$-1,89 \cdot 10^{-3}$
3	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$2,06 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-3}$
4	$2,56 \cdot 10^{-3}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$
5	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$
6	$2,56 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-3}$
7	$-2,54 \cdot 10^{-3}$	$-2,12 \cdot 10^{-3}$	$-1,98 \cdot 10^{-3}$	$-1,89 \cdot 10^{-3}$
8	$-2,54 \cdot 10^{-3}$	$-2,09 \cdot 10^{-3}$	$-1,98 \cdot 10^{-3}$	$-1,90 \cdot 10^{-3}$

В результате расчетов были определены перемещения мембраны под действием номинального давления в зависимости от исполнения мембраны с учетом допусков геометрических размеров и разбросом значения модуля упругости сплава 36НХТЮ. Результаты моделирования мембранного блока сведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения величин перемещений мембраны под действием номинального давления 0,16 МПа

Толщина мембраны, мкм	Модуль упругости, ГПа	Перемещение мембраны, мкм
100	180	108
	200	95
80	180	163
	200	140

При решении третьей задачи были получены значения перемещения и распределения относительной деформации на рабочей поверхности балки с учетом допусков геометрических

размеров и разбросом значения модуля упругости сплава 36НХТЮ. Моделирование проводилось при воздействии на мембрану номинального давления 0,16 МПа. Результаты моделирования с полученным значением перемещения приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения величины перемещений балки под действием номинального давления 0,16 МПа

Толщина мембраны, мкм	Толщина рабочей части балки (h), мкм	Модуль упругости, ГПа	Перемещение балки, мкм
100	155	200	49
		180	54
	135	200	55
		180	60
80	155	200	60
		180	66
	135	200	68
		180	75

В табл. 5 и 6 приведены значения относительной деформации по оси Z в зависимости от толщины мембраны и рабочей части балки.

Таблица 5

Значения относительной деформации по оси Y и толщиной мембраны 100 мкм под действием номинального давления 0,16 МПа

Области деформации	Относительная деформация в зависимости от минимальной толщины рабочей части балки (h) с учетом разброса значения модуля упругости, сплава 36НХТЮ, $\times 10^{-3}$			
	$h = 135$ мкм		$h = 155$ мкм	
	Модуль упругости, ГПа		Модуль упругости, ГПа	
	200	180	200	180
1	-1,26	-1,40	-1,20	-1,33
2	-1,27	-1,41	-1,18	-1,35
3	1,29	1,43	1,20	1,33
4	1,28	1,43	1,20	1,34
5	1,28	1,42	1,19	1,34
6	1,28	1,43	1,20	1,34
7	-1,27	-1,41	-1,20	-1,33
8	-1,26	-1,40	-1,22	-1,31

Таблица 6

Значения относительной деформации по оси Y и толщиной мембраны 80 мкм под действием номинального давления 0,16 МПа

Области деформации	Относительная деформация в зависимости от минимальной толщины рабочей части балки (h) с учетом разброса значения модуля упругости, сплава 36НХТЮ, $\times 10^{-3}$			
	$h = 135$ мкм		$h = 155$ мкм	
	Модуль упругости, ГПа		Модуль упругости, ГПа	
	200	180	200	180
1	-1,57	-1,73	-1,45	-1,62
2	-1,56	-1,73	-1,42	-1,58
3	1,58	1,76	1,45	1,61
4	1,58	1,76	1,45	1,61
5	1,58	1,76	1,42	1,58
6	1,58	1,76	1,45	1,62
7	-1,55	-1,74	-1,44	-1,60
8	-1,56	-1,74	-1,47	-1,63

Результаты моделирования влияния момента затяжки винтов на перемещение балки приведены на рис. 4.

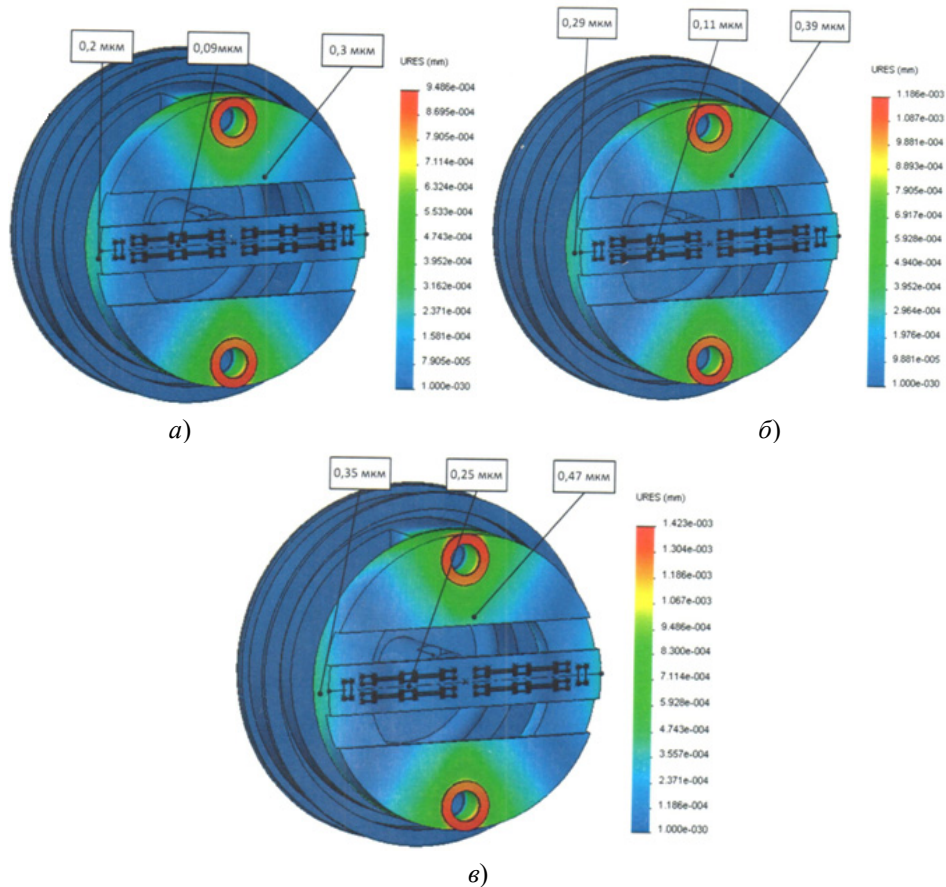


Рис. 4. Значение перемещения балки под действием момента затяжки винтов: а – перемещение балки 0,2 мкм; б – перемещение балки 0,29 мкм; в – перемещение балки 0,35 мкм

В ходе компьютерного моделирования было выявлено, что значение нагрева тензорезисторов не зависит от расстояния между ними. На рис. 5,а изображены эпюры распределения температурных полей при температуре окружающей среды +25 °С, расстоянием между резисторами 800 мкм под воздействием мощности рассеяния 0,02 мВт. На рис. 5,б изображены эпюры распределения температурных полей при температуре окружающей среды +25 °С, расстоянием между резисторами 500 мкм под воздействием мощности рассеяния 0,02 мВт.

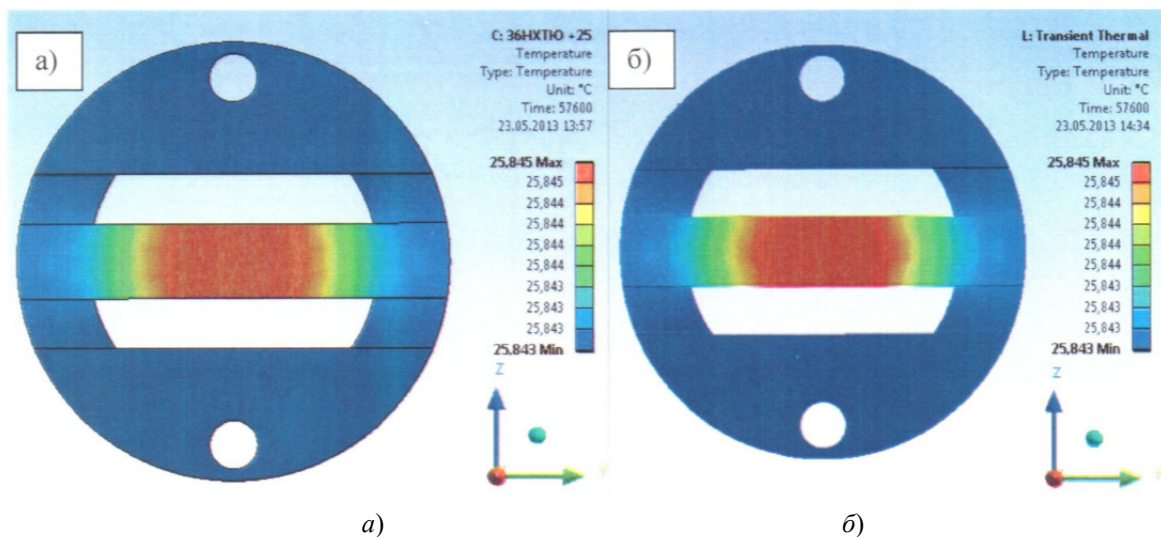


Рис. 5. Распределения температурных полей в зависимости от расстояния между тензорезисторами: а – 800 мкм; б – 500 мкм

На рисунках видно, что в обоих случаях значения максимальных температур совпадают.

Заключение

В результате моделирования балки были определены значения перемещения при приложении к ее штоку сосредоточенной нагрузки 2,1 кг для предела измерения 1,6 кгс/см² в зависимости от значений допусков геометрических размеров.

Для мембранного блока были определены значения перемещения мембраны под воздействием номинального давления 1,6 кгс/см², которые в зависимости от толщины мембраны и с учетом разброса характеристик сплава 36НХТЮ составили 95–156 мкм.

При моделировании использовались граничные условия, которые исключают перемещения: приспособления и штучера, а также исключают перемещения в резьбовых соединениях. Результаты моделирования подтверждены полученными экспериментальными данными.

По результатам моделирования выходной сигнал датчика составляет 20±32 мВ. Значение выходного сигнала, полученного в результате экспериментальных исследований, составляет 21–28 мВ.

Для воспринимающего элемента были определены значения перемещения упругого элемента при воздействии на мембрану номинального давления 1,6 кгс/см² с учетом допусков геометрических размеров балки и мембраны, а также с учетом разброса характеристик сплава 36НХТЮ, оно составило 49–75 мкм. Значения относительной деформации, возникающей при данных перемещениях, сведены в табл. 5 и 6.

Моделирование влияния затяжки резьбового соединения показало, что при воздействии момента затяжки 0,2±0,4 Н·м значение перемещения рабочей части балки составляет 0,09–0,25 мкм.

Список литературы

1. Мусаев Р. Ш., Ляшенко А. В., Тюрин М. В., Ярославцева Д. А. Применение CALS-технологий и систем автоматизированного проектирования при создании датчко-преобразующей аппаратуры и систем для ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 91–28.
2. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
3. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18–21.
4. Трофимов А. А., Бастрыгин К. И. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 17–25.
5. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 2. С. 51–55.
6. Фролов М. А., Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа // Датчики и системы. 2014. № 7. С. 22–25.
7. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.
8. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation. М. : ДМК Пресс, 2010. 464 с.

References

1. Musaev R.Sh., Lyashenko A.V., Tyurin M.V., Yaroslavtseva D.A. Application of CALS technologies and computer-aided design systems in the creation of sensor-conversion equipment and systems of rocket and space technology and ground-based space infrastructure. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2019;1:91–28. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, converters and systems based on them for measuring, monitoring and controlling technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;9:4–6. (In Russ.)
3. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Development of unified sensor designs for advanced measurement and control systems for special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;10:18–21. (In Russ.)

4. Trofimov A.A., Bastrygin K.I. System for measuring, monitoring, monitoring and diagnostics of rocket engine parameters. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2017;3:17–25. (In Russ.)
5. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation of the sensor element of a strain-resistant absolute pressure sensor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2012;2:51–55. (In Russ.)
6. Frolov M.A., Musaev R.Sh., Trofimov A.A. Simulation of a string-type pressure sensor sensing element. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2014;7:22–25. (In Russ.)
7. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. [et al.]. Simulation of a piezoelectric pressure sensor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2017;1:20–28. (In Russ.)
8. Alyamovskiy A.A. *Inzhenernyye raschety v SolidWorksSimulation = Engineering calculations in SolidWorks-Simulation*. Moscow: DMK Press, 2010:464. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Николаевич Чебурахин

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

Igor' N. Cheburakhin

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

Иван Владимирович Ползунов

главный конструктор направления –
начальник центра №2,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Ivan V. Polzunov

Chief designer of the direction –
head of the center № 2,
Research and development institute
for physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksey A. Trofimov

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

Дарья Александровна Ярославцева

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

Dar'ya A. Yaroslavtseva

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

Михаил Владимирович Тюрин

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

Mikhail V. Tyurin

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