

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.586.2

doi:10.21685/2307-5538-2022-4-1

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЯ

В. Н. Пономарев¹, А. А. Трофимов², К. И. Бастрыгин³, И. Е. Смирнов⁴, Д. М. Марков⁵

^{1,3} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

^{2,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ revik2296@gmail.com, ² alex.t1978@mail.ru, ³ sensor@niifi.ru, ^{4,5} iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Характерной чертой мирового развития информационных и управляющих систем конца XX – начала XXI в. является все более широкое применение во всех сферах жизнедеятельности датчиков давления. Датчики применяются в промышленных отраслях, в автоматизации производственных процессов, в автомобильном, авиационном и железнодорожном транспорте, ракетно-космической и авиационной технике. В связи со сложностью и трудоемкостью технологического процесса изготовления датчиков давления особую роль в процессе их проектирования приобретают методы имитационного моделирования, применение которых позволяет существенно сократить сроки и затраты на разработку датчиков давления. *Материалы и методы.* В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование, при котором изучаемый датчик заменяется его моделью, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этом объекте. В эксперименте применялось специализированное программное обеспечение Solidworks, позволяющее избежать дорогостоящих и длительных циклов «проектирование–изготовление–испытания». *Результаты.* В результате моделирования мембраны датчика для повышения ее чувствительности к перепадам давления были определены толщина мембраны и диапазон прогиба мембраны. А также выявлена зависимость значения прогиба от толщины мембраны.

Ключевые слова: имитационное моделирование, тензорезисторный датчик, давление, прогиб мембраны, внешние воздействующие факторы

Для цитирования: Пономарев В. Н., Трофимов А. А., Бастрыгин К. И., Смирнов И. Е., Марков Д. М. Имитационное моделирование датчика разности давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 7–15. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-1

SIMULATION OF THE PRESSURE DIFFERENCE SENSOR

V.N. Ponomarev¹, A.A. Trofimov², K.I. Bastrygin³, I.E. Smirnov⁴, D.M. Markov⁵

^{1,3} Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

^{2,4,5} Penza State University, Penza, Russia

¹ revik2296@gmail.com, ² alex.t1978@mail.ru, ³ sensor@niifi.ru, ^{4,5} iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* A characteristic feature of the global development of information and control systems in the late XX – early XXI century is the increasingly widespread use of pressure sensors in all spheres of life. Sensors are used in industrial branches, in automation of production processes, in automobile, aviation and railway transport, rocket-space and aviation engineering. Due to the complexity and labor intensity of the technological process of pressure sensors, a special role in the process of their design methods of simulation, the use of which can significantly reduce the time and cost of developing pressure sensors. *Materials and methods.* As a method of research, simulation modeling was used, in which the sensor under study is replaced by its model, with which experiments are conducted in order to obtain information about the object. The specialized software Solidworks was used in the experiment to avoid expensive and

time-consuming cycles of design-build-testing. *Results.* As a result of modeling the sensor membrane to increase its sensitivity to pressure drop, the membrane thickness and the diaphragm deflection range were determined. And also the dependence of the deflection value on the thickness of the membrane was determined.

Keywords: simulation modeling, strain gauge, pressure, membrane deflection, external influencing factors

For citation: Ponomarev V.N., Trofimov A.A., Bastrygin K.I., Smirnov I.E., Markov D.M. Simulation of the pressure difference sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):7–15. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-1

Введение

В информационно-измерительных и управляющих системах, используемых при испытаниях и эксплуатации изделий авиационной и космической техники, в ряду измеряемых физических параметров доля параметра «давление» занимает 40–60 % от их общего числа. По этой причине задача проектирования новых или модернизации существующих датчиков давления встречается достаточно часто [1, 2].

Необходимость проведения больших объемов математических расчетов, разработки схемы электрической принципиальной, расчета вариантов исполнения конструкции чувствительных элементов для заданных условий эксплуатации подразумевает привлечение MCAD, ECAD систем [3, 4].

Задачу проектирования в заданных условиях можно решить двумя способами. Первый – используя стандартные средства САПР, разработать макет датчика давления с необходимым первичным преобразователем, провести испытания и обработать полученные результаты. Достоинства данного способа: достоверный результат с требуемой точностью. Недостатки: дороговизна, требуется наличие сложного оборудования, длительное время разработки макета и проведения испытаний. Второй способ – имитационное моделирование. В этом случае можно сократить время на проектирование за счет свободного выбора параметров моделирования и уменьшить временные затраты на проведение испытаний. Недостатки: модель разрабатывается с определенными допущениями, необходимость подтверждения адекватности разрабатываемой модели, точность результатов математического моделирования определяется степенью проработанности модели.

Основная часть

Задачей моделирования является количественная и качественная оценка поведения мембраны датчика разности давления, имеющего диапазон измерения 0–0,3 кгс/см (0–0,03 МПа). Задача сводится к определению значения прогиба мембраны под действием номинального давления (P_n), а также нахождения значения толщины мембраны.

При моделировании датчика было принято значение температуры окружающей среды +25 °С. В соответствии с формулировкой задачи выбран статический тип расчета без учета внешних сторонних сил. Номинальное давление $P_n = 0,03$ МПа.

Схема нагружения номинальным давлением (P_n) соответствует реальным условиям работы датчика на объекте эксплуатации. Давление на мембрану подается как в прямом (P_1), так и в обратном направлении (P_2). Номинальное давление $P_n = P_1 = P_2$. Жесткая фиксация наложена в местах сварки. На рис. 1 приведен внешний вид датчика.

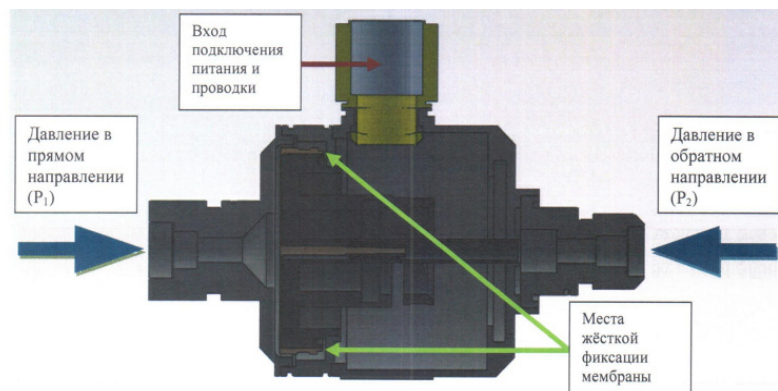


Рис. 1. Внешний вид датчика

Схемы нагружения номинальным давлением и жесткая фиксация мембраны представлены на рис. 2, 3.

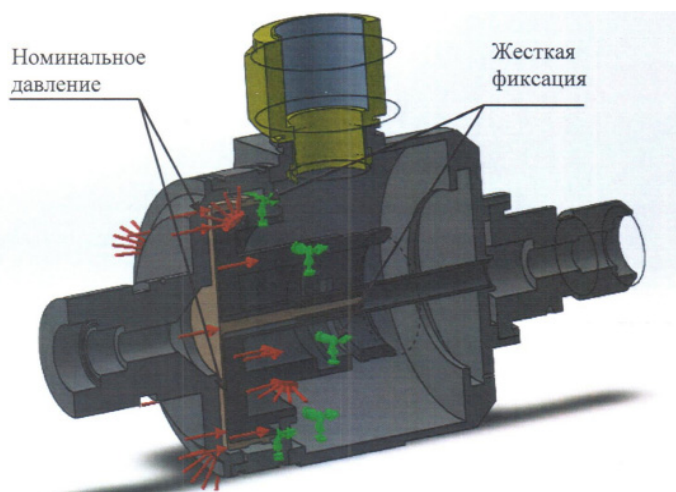


Рис. 2. Схема нагружения и жесткой фиксации мембраны в прямом направлении

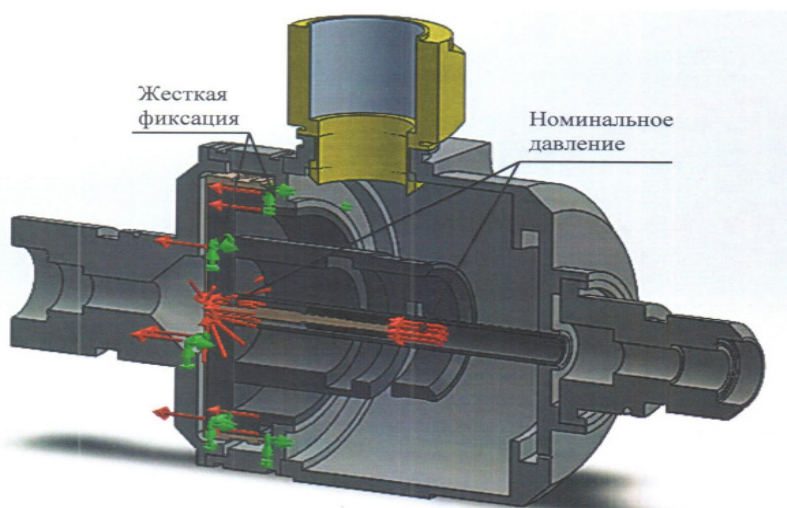


Рис. 3. Схема нагружения и жесткой фиксации мембраны в обратном направлении

В табл. 1 приведены физико-механические свойства используемого материала, необходимого для проведения анализа в модуле Simulation.

Таблица 1

Физико-механические свойства материала 36НХТЮ ГОСТ 14119-85

Марка материала	36НХТЮ ГОСТ 14119-85
Тип материала	Линейный – упругий – изотропный
Критерий прочности	Максимальное напряжение по Мизесу
Предел текучести	$7,5 \cdot 10^8$ Па
Предел прочности	$3 \cdot 10^7$ Па
Модуль упругости	$1,8 \cdot 10^{11}$ Па
Коэффициент Пуассона	0,28
Массовая плотность	7800 кг/м^3
Коэффициент теплового расширения	$1,25 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$

Сетка конечных элементов строится исходя из параметров геометрической формы модели и ее размеров. Внешний вид сетки конечных элементов изображен на рис. 4. Основные характеристики сетки конечных элементов приведены в табл. 2.

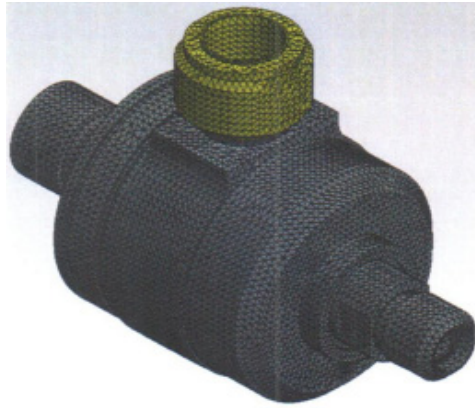


Рис. 4. Разбиение модели на конечные элементы

Таблица 2

Основные характеристики сетки конечных элементов

Используемое разбиение	Сетка на основе кривизны
Максимальный размер элемента	1,14085 мм
Качество сетки	Высокое
Всего узлов	281384
Всего элементов	171533
Максимальное соотношение сторон	48,74

Результаты исследования

Результаты исследования по определению значения прогиба мембраны, толщиной $h = 0,26$, представлены на рис. 5.

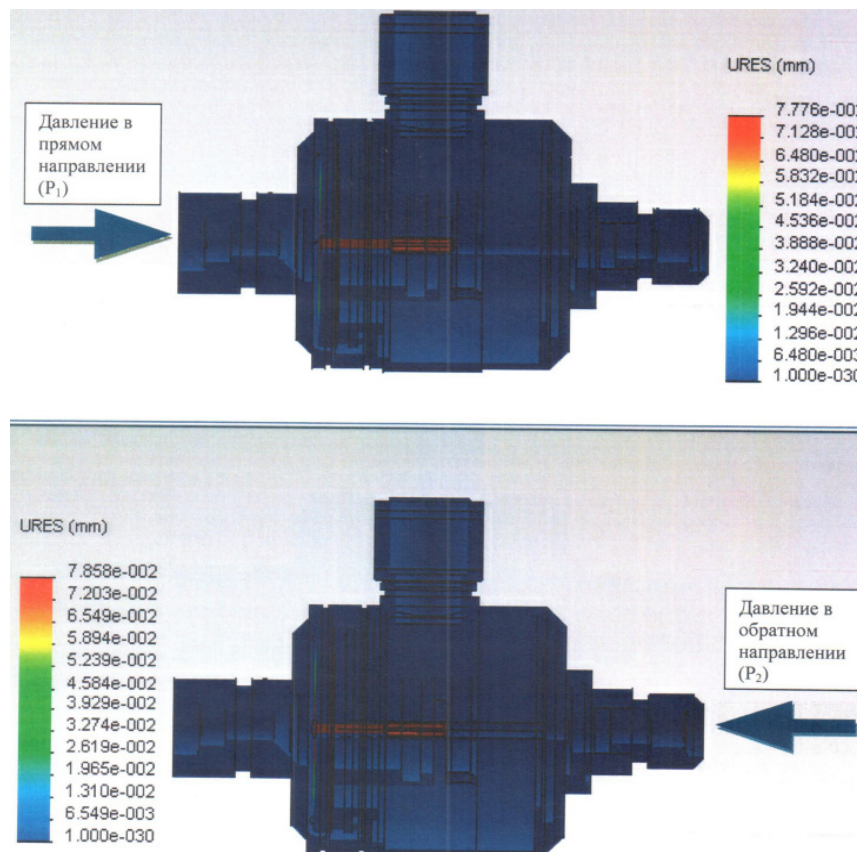


Рис. 5. Эпюра перемещения мембраны датчика в прямом и обратном направлении

Выявлено, что при давлении $P_n = 0,03\text{МПа}$, подаваемом в приемные полости, прогиб мембраны составил $77,6\text{ мкм}$ в прямом направлении и $78,5\text{ мкм}$ в обратном направлении. По картине распределения перемещений на плоскости мембраны (рис. 6) видно, что прогиб мембраны равномерный, без видимых перепадов и резких скачков, возникающие перемещения штока мембраны входят в допустимые значения.

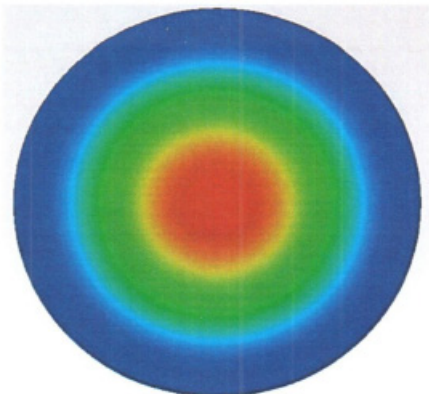


Рис. 6. Эпюра возникающих перемещений

Произведем исследование с минимально возможной толщиной мембраны исходя из допуска на размер, толщина составляет $0,23\text{ мм}$ (рис. 7).

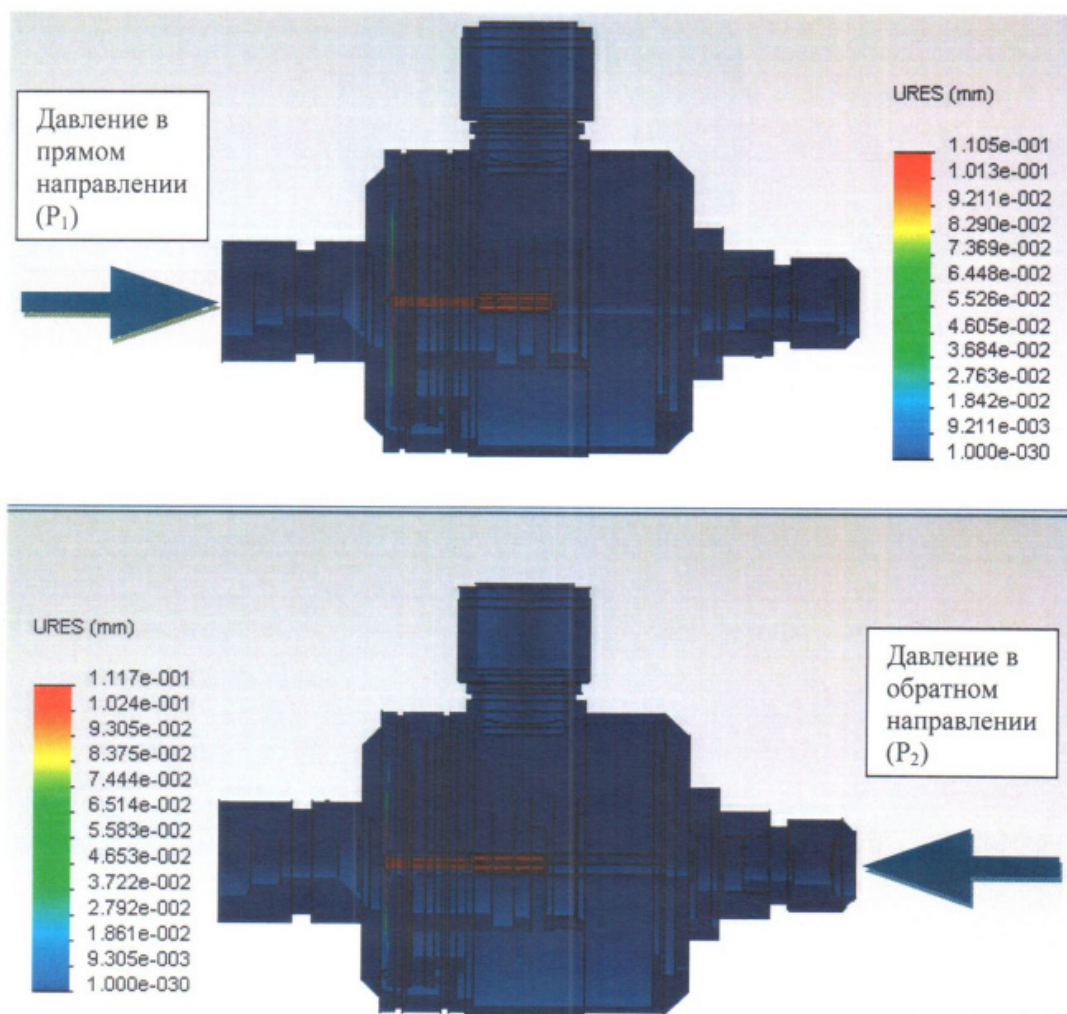


Рис. 7. Эпюра перемещения с учетом допусков в прямом и обратном направлении

Изменив мембрану, по нижнему допуску 0,23 мм получились результаты 110,5 мкм в прямом направлении и 111,7 мкм в обратном. По результатам проведенных исследований для мембран 0,25; 0,24; 0,22 мм, при номинальном давлении 0,03 МПа построен график зависимости прогиба мембраны от ее толщины (рис. 8).

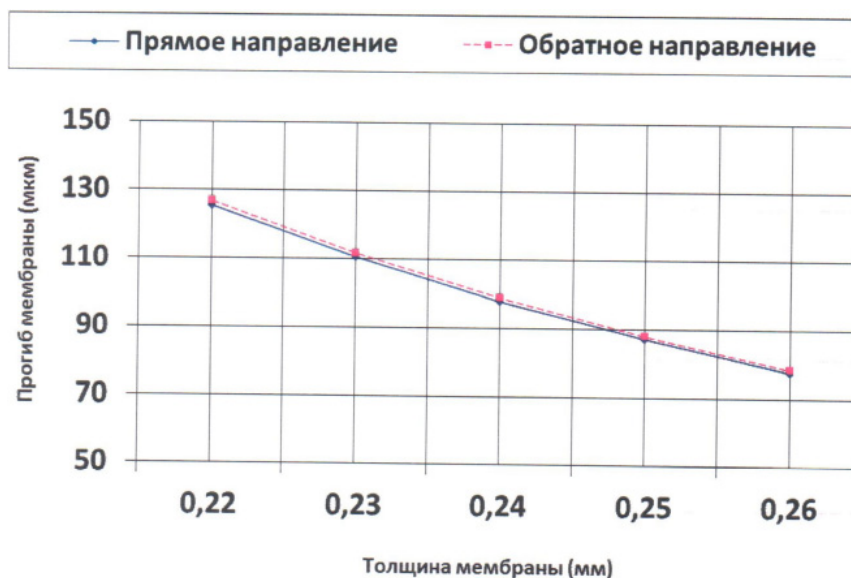


Рис. 8. Зависимости прогиба мембраны от ее толщины

В результате исследования выявлена зависимость изменения значения прогиба, он увеличивается с уменьшением толщины мембраны. Все значения прогиба мембраны лежат в пределах от 70 до 150 мкм. При номинальной толщине мембраны 0,26 мм перемещения мембраны близки к нижнему значению диапазона 70 мкм и составляют 77–78 мкм. Данные перемещения мембраны могут привести к выходу за допустимые значения величины давлений при подстройке.

Различие между прямым и обратным ходом объясняется асимметрией мембраны, различным значением площади контакта с рабочей средой из-за наличия жесткого центра со стороны обратного хода.

Проверка адекватности построенной модели

Рассмотрим упрощенную идеализированную модель тонкостенной круглой пластины, жестко заделанной по краям и имеющей в центре цилиндрический жесткий центр. Схожим образом закреплена мембрана датчика (рис. 9), для которого жестким центром является шток.

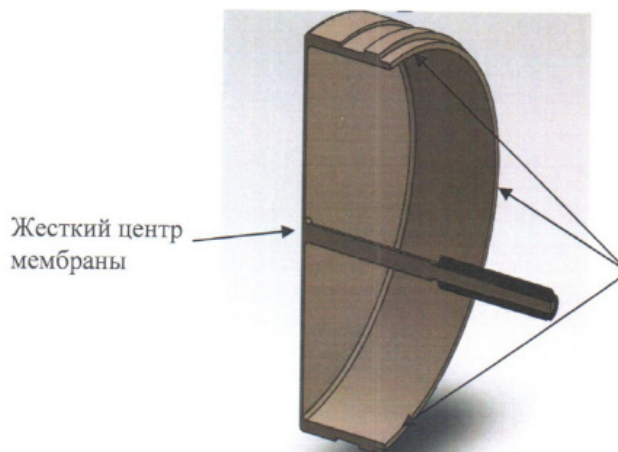


Рис. 9. Внешний вид мембраны

Аналитически максимальный прогиб тонкостенной круглой пластины можно выразить следующей формулой [5]:

$$w_{\max}(h) = \frac{3P(1-\nu^2)}{16Eh^3} \left[R^4 - 3a^4 - 4R^2a^2 \left(1 + \ln \frac{R}{a} \right) + \frac{16R^2a^4}{R^2 - a^2} \left(\ln \frac{R}{a} \right)^2 \right],$$

где P – равномерное давление по всей поверхности пластины; h – толщина пластины; ν – коэффициент Пуассона; R – радиус пластины; a – радиус жесткого центра.

При построении кривой зависимости (рис. 10) использованы следующие параметры: $P = 0,03$ МПа, $E = 1,8 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,28$, $R = 16$ мм, $a = 0,95$ мм.

График зависимости максимального прогиба от толщины пластины представлен на рис. 10.

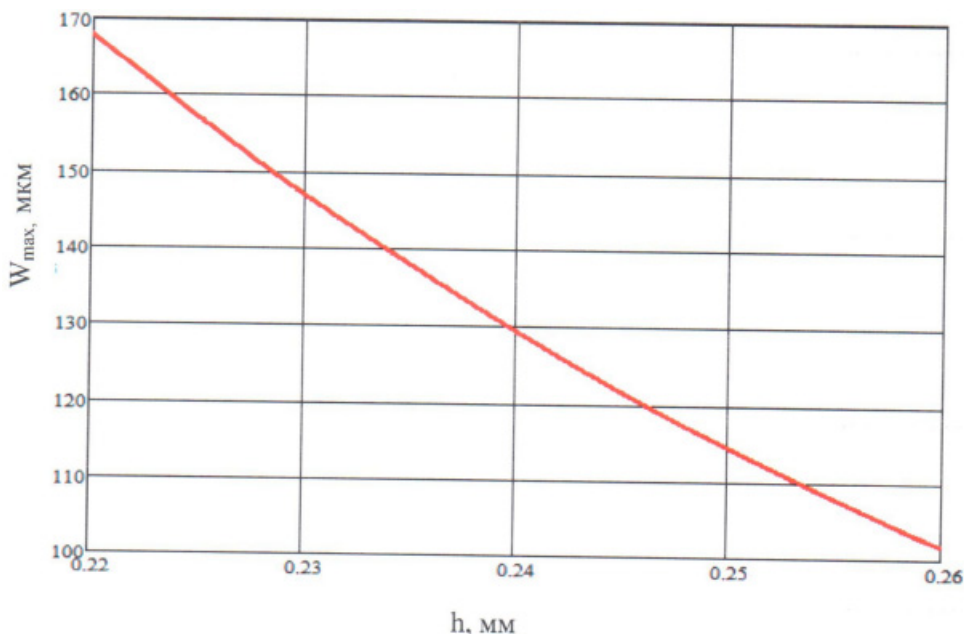


Рис. 10. Зависимость максимального прогиба от толщины пластины

Сравнение диаграмм, приведенных на рис. 8 и 10, показало совпадение форм кривых (монотонность, кривизна и т. д.), подтверждающее верность использованного приближения и численного результата.

Заключение

Проанализировав данные, можно утверждать, что для повышения чувствительности мембраны к перепадам давления ее толщина должна составлять 0,22–0,25 мм. В этом диапазоне прогиб мембраны лежит в пределах от 90 до 120 мкм. Для обеспечения оптимальной работы датчика с мембраной и расчетным давлением 0,03 МПа следует ужесточить размер толщины мембраны до 0,25_{-0,03}.

Список литературы

1. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа // Датчики и системы. 2014. № 7. С. 22–25.
2. 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.
3. 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.
4. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 18–25.

5. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 2. С. 51–55.

References

1. Musaev R. Sh., Trofimov A. A., Frolov M. A. Imitatsionnoe modelirovanie chuvstvitel'nogo elementa datchika davleniya strunnogo tipa // Datchiki i sistemy. 2014. № 7. S. 22–25.
2. Bastrygin K. I., Trofimov A. A., Baranov A. S. [i dr.]. Imitatsionnoe modelirovanie p'ezoelektricheskogo datchika davleniya // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. 2017. № 1. S. 20–28.
3. Dmitrienko A. G., Blinov A. V., Trofimov A. N., Trofimov A. A. Tendentsii razvitiya datchikov, preobrazovateley i na ikh osnove sistem izmereniya, monitoringa i kontrolya tekhnicheski slozhnykh ob"ektov raketno-kosmicheskoy tekhniki // Datchiki i sistemy. 2012. № 9. S. 4–6.
4. Bastrygin K. I., Trofimov A. A. Sistema izmereniya, monitoringa, kontrolya i diagnostiki parametrov raketnogo dvigatelya // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. 2017. № 3. S. 18–25.
5. Musaev R. Sh., Trofimov A. A., Frolov M. A. Imitatsionnoe modelirovanie chuvstvitel'nogo elementa tenzorezistivnogo datchika absolyutnogo davleniya // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'. 2012. № 2. S. 51–55.

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Николаевич Пономарев

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский
институт физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: revik2296@gmail.com

Vladislav N. Ponomarev

Design engineer,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky 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 the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кирилл Игоревич Бастрыгин

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

Kirill I. Bastrygin

Chief specialist,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Иван Евгеньевич Смирнов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Ivan E. Smirnov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Максимович Марков

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Dmitriy M. Markov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 29.03.2022

Поступила после рецензирования/Revised 29.04.2022

Принята к публикации/Accepted 30.05.2022