

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 681.586.326.773.001.63

DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-8

*Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов, К. И. Бастрыгин,
П. Н. Ефимов, А. Э. Шуртин, А. А. Тугускин*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ

*R. Sh. Musaev, A. A. Trofimov, K. I. Bastrygin,
P. N. Efimov, A. E. Shurtin, A. A. Tuguskin*

SIMULATION OF HIGH TEMPERATURE PIEZOELECTRIC SENSOR OF RAPIDLY VARYING PRESSURES

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Имитационное моделирование является неотъемлемой частью процесса разработки всех датчиков, работающих в жестких условиях эксплуатации. Методы имитационного моделирования позволяют получать необходимую информацию о процессах, протекающих в датчиках на предварительном дорогостоящем этапе макетирования, не прибегая к натурным испытаниям. Целью представленного имитационного моделирования является определение влияния воздействия внешних факторов на работоспособность высокотемпературного пьезоэлектрического датчика давления, разработку которого проводит АО «НИИФИ», для подтверждения правильности выбранных конструктивных решений. *Материалы и методы.* В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование, при котором изучаемый объект (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 влияния внешних факторов на работоспособность датчика определены максимальные напряжения, возникающие при воздействии статических давлений на мембрану датчика; максимальные напряжения при воздействии синусоидальной вибрации и механического удара; построены эпюры распределения температурных полей при воздействии температуры 3000 °С в течение 6 с. *Выводы.* Заложенные конструктивные решения датчика быстропеременных давлений обеспечивают стойкость датчика к влияющим величинам, температуре, статическому давлению, высоким уровням вибрационных и ударных нагрузок.

A b s t r a c t. *Background.* The simulation modeling is an integral part of process of development of all sensors working in rigid conditions of operation. Methods of a simulation modeling allow to obtain necessary information on the processes proceeding in sensors at a preliminary expensive stage of prototyping without resorting to field tests. The purpose of the presented simulation modeling is definition of influence of impact of external factors on operability of a high-temperature piezoelectric transducer of pressure which JSC «NIIFI», for confirmation of a regularity of the chosen design decisions develops. *Materials and methods.* As a research technique the simulation modeling at which the studied object (sensor) is replaced with its

model with which experiments for the purpose of obtaining information on this object are made was used. In an experiment the specialized software of Solidworks allowing to avoid the expensive and long-lived cycles «projection–manufacture–test» was applied. **Results.** As a result of model operation of influence of external factors on operability of the sensor the maximal tension arising at impact of static pressures on a sensor membrane is determined; the maximal tension at impact of sinusoidal vibration and mechanical blow; epyura of distribution of temperature profiles at influence of temperature of 3000 °C within 6 seconds are constructed. **Conclusions.** The put design solutions of the sensor of fast-live pressure provide resistance of the sensor to destabilizing factors, temperature, static pressure, high levels of vibration and shock loads.

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

К e y w o r d s: simulation modeling, piezoelectric transducer, pressure, the external influencing factors, a temperature profile, vibration.

Введение

В большинстве случаев при измерении давлений на датчик воздействуют нестационарные температурные процессы вследствие существенного различия температуры датчика и измеряемой среды, синусоидальная вибрация, механические удары, статические давления. Отличительной особенностью защиты от нестационарного воздействия температуры (от минус 196 до 800 °C) являются серьезные затруднения как по защите от его воздействия, так и определению напряжений, возникающих в элементах конструкций. В этой связи актуальными задачами построения и исследования математических моделей датчиков давления и приборов на их основе является достоверное определение температурного поля датчика и оценка его влияния на работоспособность и метрологические характеристики.

В общем случае при расчетах и анализе нестационарного трехмерного температурного поля датчиков давления невозможно применение традиционных аналитических методов, принятых в задачах теплофизики, и приближенных численно-аналитических методов [1].

Задача расчета температурного поля рассматриваемых приборов решена путем применения метода конечных элементов с использованием имитационного моделирования [2–4] в программном комплексе «Solid Works» [5].

Целью проведения имитационного моделирования является определение влияния воздействия внешних факторов на работоспособность высокотемпературного пьезоэлектрического датчика давления, предназначенного для преобразования в электрический сигнал быстропеременных давлений с амплитудой от 0,12 до 5,6 МПа, статического давления от 22,4 до 125 МПа и давления перегрузки 156,3 МПа, температуры минус 196 °C и 800 °C, синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения до 500 g, механических ударов однократного действия с амплитудой ускорения 400 g.

Для проведения имитационного моделирования была построена трехмерная твердотельная модель датчика (рис. 1). Граничные условия были приняты исходя из реальных условий работы датчика и крепления его на объекте в зависимости от решаемой задачи (рис. 2–4).

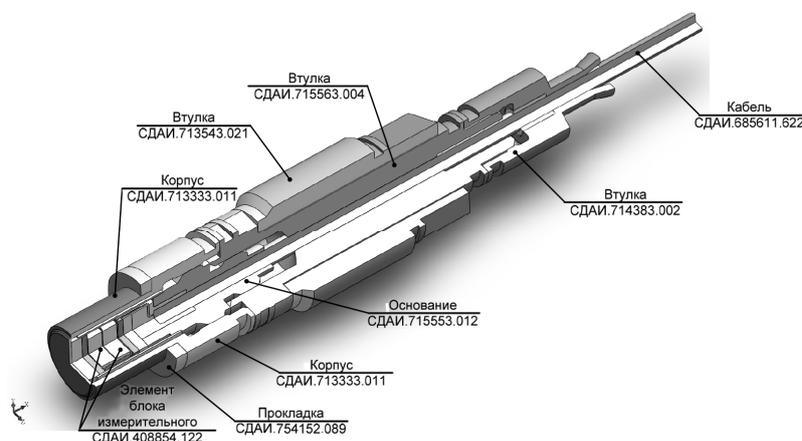


Рис. 1. Расчетная модель датчика

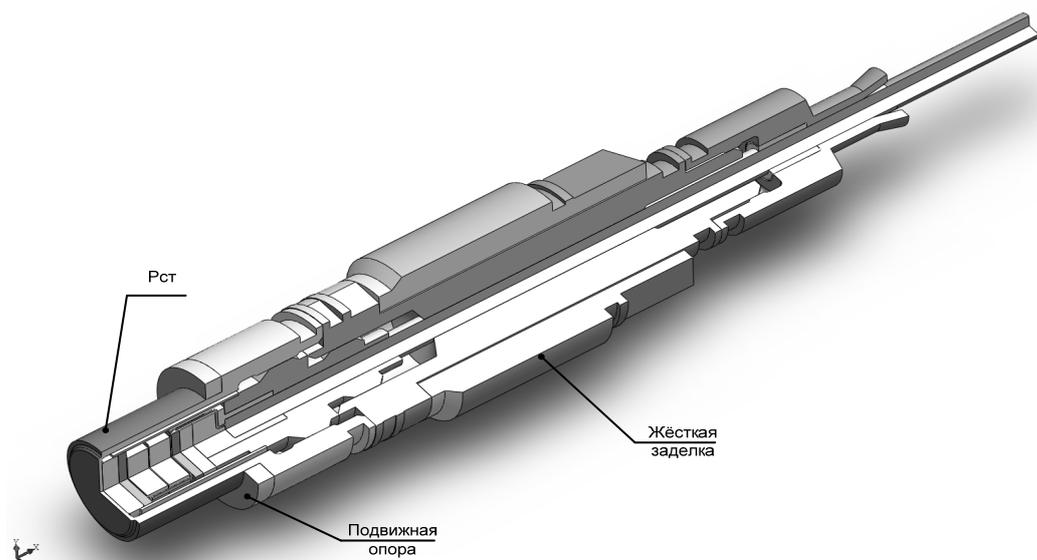


Рис. 2. Схема граничных условий для определения максимальных напряжений, возникающих при воздействии на датчик статических давлений, синусоидальной вибрации и механических ударов

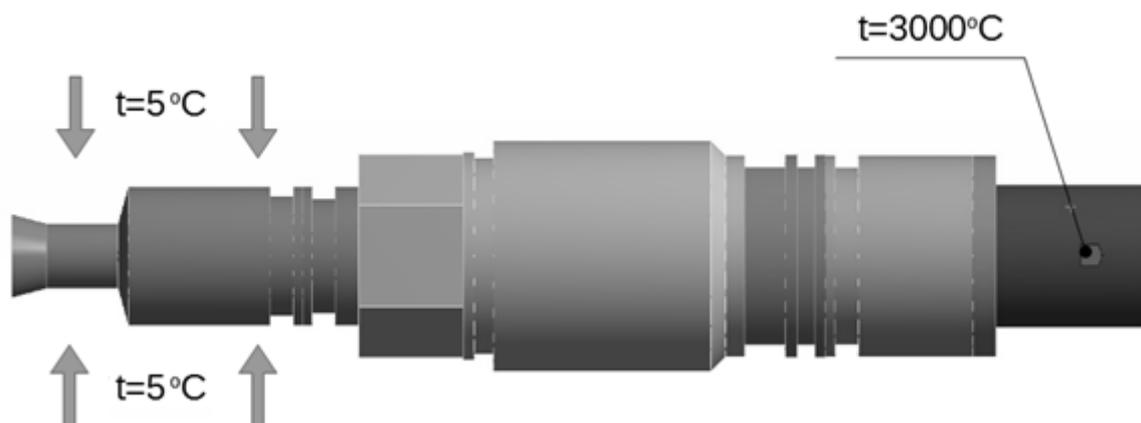


Рис. 3. Схема граничных условий для определения влияния на датчик температуры 3000 °С

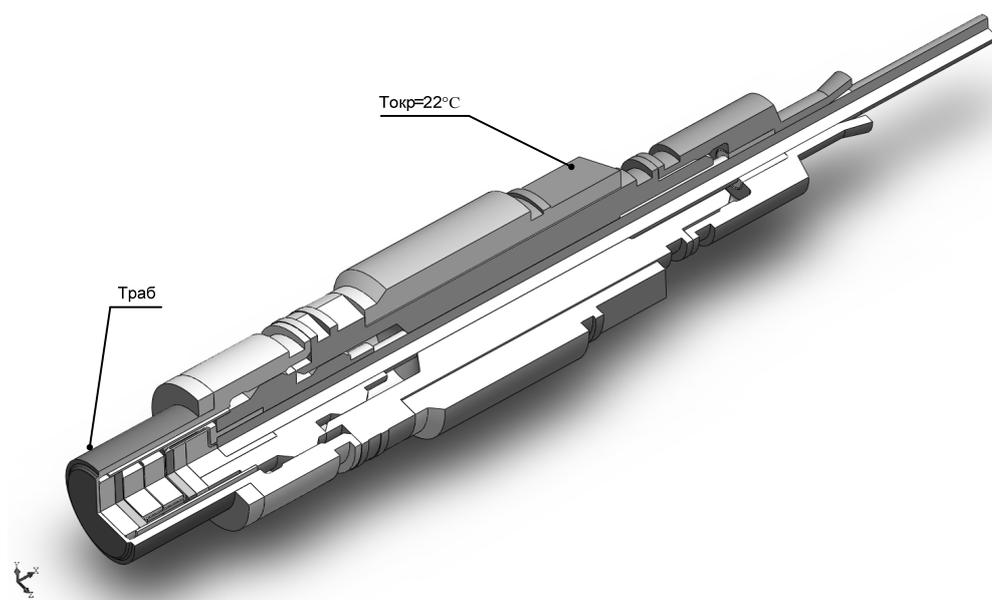


Рис. 4. Схема граничных условий для определения влияния на датчик рабочих температур (T_p) минус 196 и 800 °С

Основная часть

В результате имитационного моделирования воздействия статического давления 22,4, 125 МПа и давления перегрузки 156,3 МПа на мембрану датчика были получены эпюры распределения напряжений, представленные на рис. 5–7 соответственно.



Рис. 5. Эпюра распределения напряжений при воздействии давления 22,4 МПа



Рис. 6. Эпюра распределения напряжений при воздействии давления 125 МПа

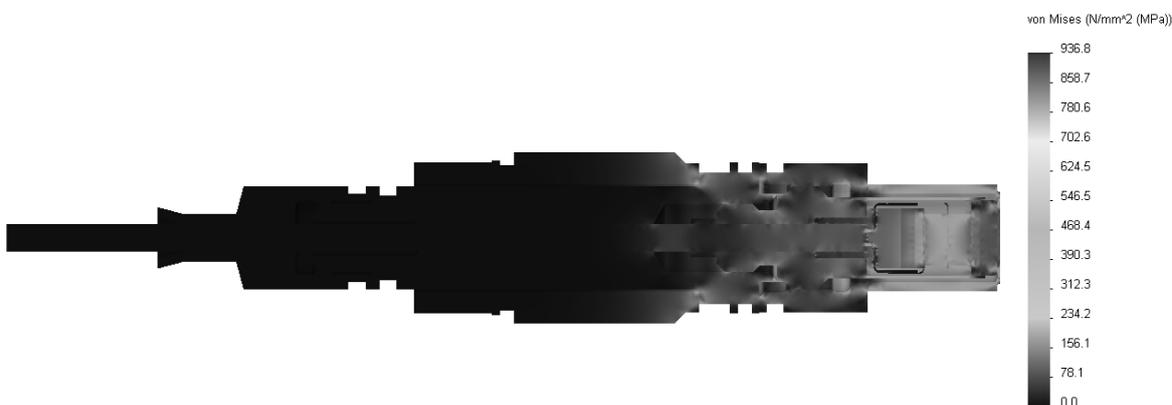


Рис. 7. Эпюра распределения напряжений при воздействии давления 156,3 МПа

При воздействии на датчик давления перегрузки 156,3 МПа максимальные напряжения, возникающие в конструкции, составляют 937 МПа (см. рис. 7). Представленные значения максимальных напряжений на рис. 7 носят локальный характер (находятся в одной точке на цилиндрической грани) и поэтому исключены. Значения напряжения, возникающего на деталях, изготовленных из данного сплава, составляют 700 МПа (см. рис. 7). Предел текучести сплава ХН67МВТЮ-ВД составляет 1070 МПа [6]. При воздействии статического давления перегрузки 156,3 МПа коэффициент запаса прочности составляет 1,53.

В результате определения влияния воздействия рабочих температур при имитационном моделировании были получены эпюры распределения температурных полей при воздействии температуры минус 196 °С (рис. 8) и 800 °С (рис. 9) в течение времени 3600 с.



Рис. 8. Эпюра распределения температурных полей при воздействии температуры минус 196 °С



Рис. 9. Эпюра распределения температурных полей при воздействии температуры 800 °С

Для определения момента времени, в который происходит выравнивание температурных полей и наблюдается тепловое равновесие между датчиком и окружающей средой, были получены зависимости распределения максимальных и минимальных температур в датчике от времени (рис. 10 и 11).

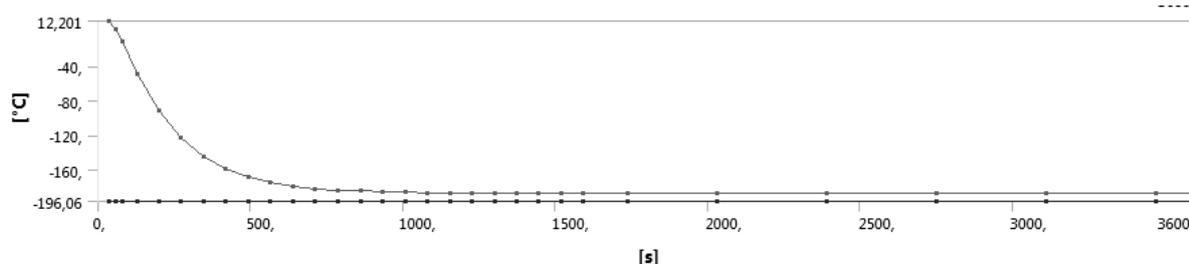


Рис. 10. Зависимость распределения температур, возникающих в датчике, при воздействии рабочей температуры минус 196 °С

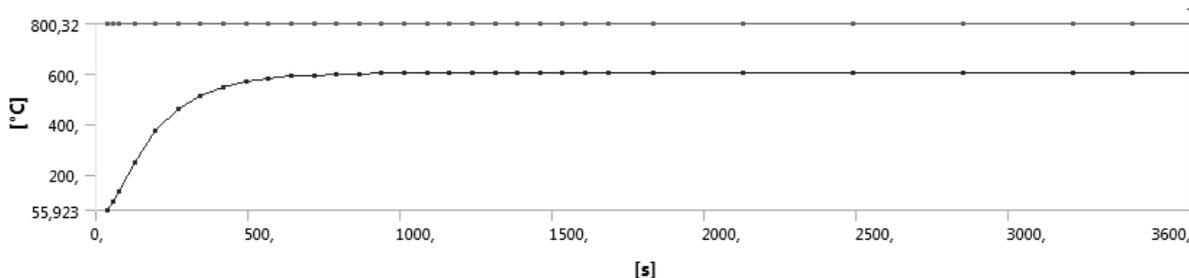


Рис. 11. Зависимость распределения температур, возникающих в датчике, при воздействии рабочей температуры 800 °С

Как видно из рис. 10 и 11, выравнивание температурных полей происходит в промежутках времени между 1500 и 2000 с. С данного временного интервала температуры остаются постоянными и не меняются с течением времени.

На рис. 12 изображена эпюра распределения температурных полей при воздействии температуры 3000 °С в течение 6 с на мембрану датчика.

На основании данных рис. 12 можно сделать вывод, что мембрана за временной интервал 6 с нагревается до температуры 300 °С. Температура на пьезоэлементах меняется в зависимости от их расположения относительно мембраны от 285 до 112 °С.

На рис. 13 изображена эпюра распределения температурных полей в датчике в интервале времени от 1 до 6 с (вдоль линии 1–2, проходящей через ось вращения).

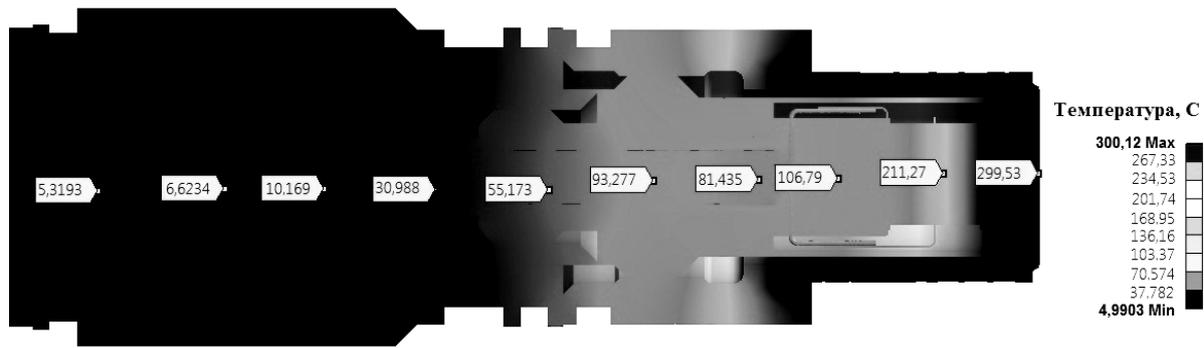


Рис. 12. Эпюра распределения температурных полей датчика при воздействии температуры 3000 °С в течение 6 с

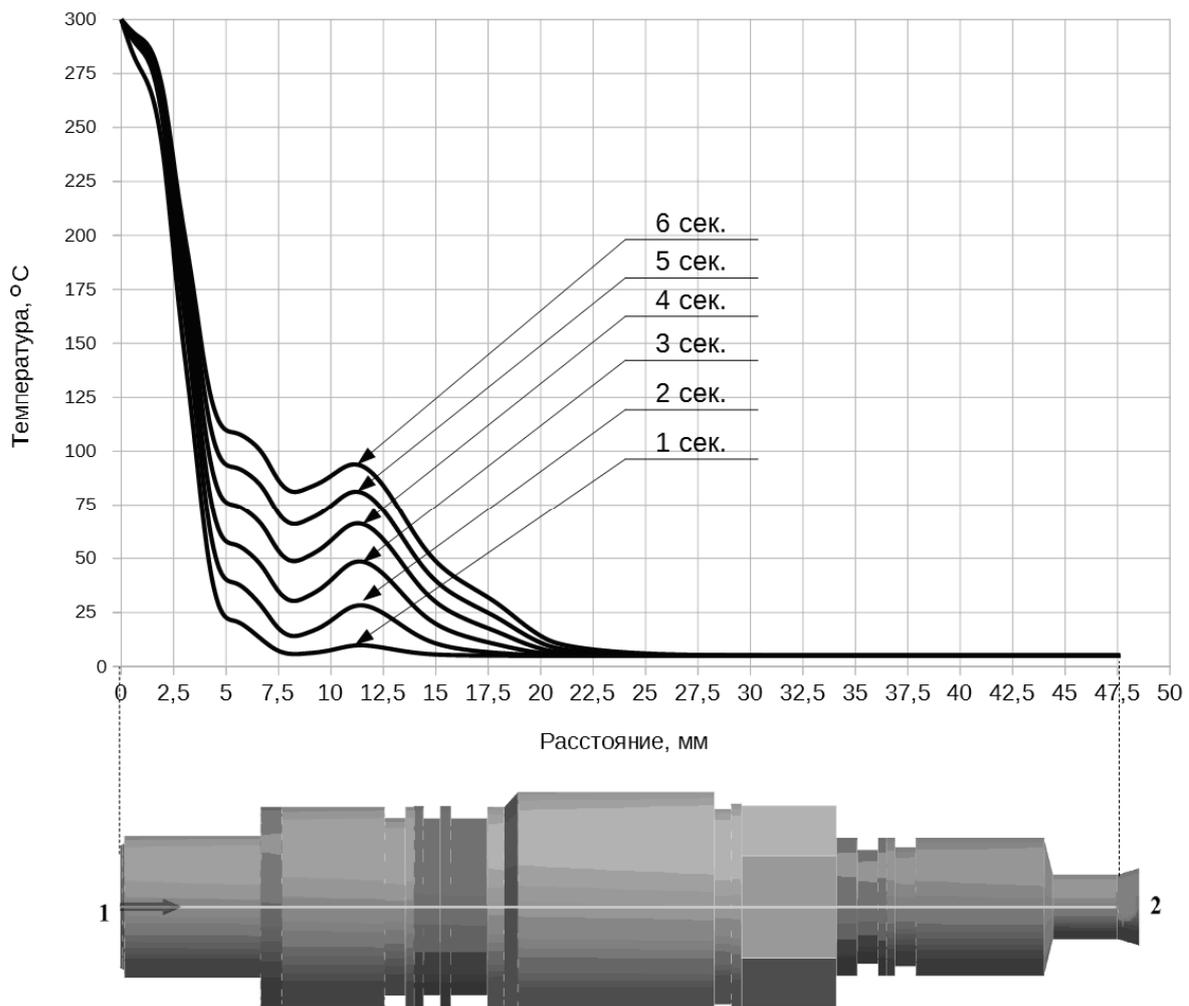


Рис. 13. Эпюра распределения температурных полей в датчике в различные промежутки времени

Проведено имитационное моделирование влияния синусоидальной вибрации 500g, результаты которого представлены в виде эпюр распределения напряжений в зависимости от плоскости воздействия.

Проведено имитационное моделирование влияния механического удара 400 g, результаты которого представлены в виде эпюр распределения напряжений в зависимости от плоскости воздействия.

Под действием механического удара 400 g длительностью 3 мс возникают напряжения, величина которых незначительна и намного меньше напряжений, возникающих под действием синусоидальной вибрации с амплитудой 500 g.

Заключение

В результате имитационного моделирования было определено влияние внешних воздействующих факторов на датчик давления, в частности:

– определены максимальные напряжения (700 МПа), возникающие при воздействии статических давлений на ПИП датчика. Значения напряжений не превышают предел текучести материала (1070 МПа);

– определено влияние рабочих температур -196 и 800 °С. При воздействии температуры -196 °С минимальная температура в датчике в момент времени 3600 с составляет минус 186 °С; при воздействии температуры 800 °С максимальная температура составляет 603 °С. Выравнивание температурных полей происходит в промежуток времени с $1000 \div 1500$ с;

– получены эпюры распределения температурных полей при воздействии температуры 3000 °С в течение 6 с. Максимальная температура на пьезоэлементах составляет 285 °С (минимальное значение 112 °С), температура на поверхности мембраны 300 °С;

– определены максимальные напряжения при воздействии синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения 500 g. Максимальные напряжения возникают при воздействии вибрации в направлении оси Z и составляют 140 МПа. Значения напряжений не превышают предел текучести материала (1070 МПа);

– определены максимальные напряжения при воздействии механического удара 400 g длительностью 3 мс. Максимальные напряжения возникают при ударе в направлении оси Z и составляют 7 МПа. Значения напряжений не превышают предел текучести материала (1070 МПа).

Проведенное имитационное моделирование подтверждает правильность заложенных конструктивных решений высокотемпературного датчика быстропеременных давлений при воздействии на него дестабилизирующих факторов, таких как резкий перепад температур, перепады давлений, высокие уровни вибрационных и ударных нагрузок.

Библиографический список

1. *Богущ, М. В.* Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / М. В. Богущ. – М. : Техносфера, 2014. – 316 с.
2. *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.
3. *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.
4. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов, А. А. Громова, П. Н. Ефимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20–28.
5. *Алямовский, А. А.* Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
6. *Керамические материалы* / под ред. Г. Н. Масленниковой. – М. : Стройиздат, 1991. – 320 с.

Мусаев Руслан Шабанович

кандидат технических наук, главный конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: polim@mail.ru

Musaev Ruslan Shabanovich

candidate of technical sciences, chief designer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук,
заместитель начальника УНЦ-37,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: umc37@mail.ru

Trofimov Aleksey Anatol'evich

doctor of technical sciences,
deputy chief of UNC-37,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Бастрыгин Кирилл Игоревич

начальник лаборатории конструкторского бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Bastrygin Kirill Igorevich

head of laboratory of design bureau,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Ефимов Павел Николаевич

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

Efimov Pavel Nikolaevich

head of laboratory of design bureau,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Шуртин Андрей Эдуардович

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

Shurtin Andrey Eduardovich

engineer-adjuster,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Тугускин Александр Андреевич

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

Tuguskin Aleksandr Andreevich

engineer-adjuster,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.586.326.773.001.63

**Имитационное моделирование высокотемпературного пьезоэлектрического датчика
быстропеременных давлений** / Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов, К. И. Бастрыгин, П. Н. Ефимов,
А. Э. Шуртин, А. А. Тугускин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). –
С. 59–66. DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-8.