

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 681.586.2

doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-7

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КРИТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР И СИНУСОИДАЛЬНОЙ ВИБРАЦИИ

Е. А. Фокина¹, А. А. Трофимов², В. Н. Пономарев³, С. А. Здобнов⁴

^{1, 2, 3, 4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ekaterina.isay1997@gmail.com, ²alex.t1978@mail.ru, ³revik2296@gmail.com, ⁴sa_zdobnov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Измерение вибрации – это один из самых популярных и экономичных методов диагностики общего состояния оборудования и имеет неоспоримое значение в современной технике. Благодаря этому процессу производители и потребители могут быть уверены в надежности и качестве технических систем, а также предотвращать возможные поломки и сбои. А широкий объем вибрационных измерений в различных областях подтверждает их универсальность и важность в современном техническом прогрессе. Цель измерения воздействия критических температур на датчик температуры заключается в определении того, как изменение критической температуры может повлиять на точность и надежность работы преобразователя. Это позволит улучшить качество измерения температуры, исключить погрешности и ошибки в работе оборудования, а также повысить эффективность его использования в различных условиях эксплуатации. *Материалы и методы.* Методом исследования в данной статье является имитационная модель датчика, с помощью которой производится испытание на вибрацию и воздействие критических температур. Для создания модели используются программные обеспечения Ansys и SolidWorks Simulation, позволяющие избежать дорогостоящих и длительных циклов испытаний. *Результаты.* В результате имитационного моделирования были построены эпюры распределения механических напряжений при воздействии синусоидальной вибрации и эпюры распределения температур при воздействии критических температур.

Ключевые слова: датчик, имитационная модель, вибрация, чувствительный элемент

Для цитирования: Фокина Е. А., Трофимов А. А., Пономарев В. Н., Здобнов С. А. Проектирование имитационной модели датчика температуры при воздействии критических температур и синусоидальной вибрации // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 66–72. doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-7

DESIGNING A SIMULATION MODEL OF A TEMPERATURE SENSOR UNDER CRITICAL TEMPERATURE AND SINUSOIDAL VIBRATION CONDITIONS

E.A. Fokina¹, A.A. Trofimov², V.N. Ponomarev³, S.A. Zdobnov⁴

^{1, 2, 3, 4} Penza State University, Penza, Russia

¹ekaterina.isay1997@gmail.com, ²alex.t1978@mail.ru, ³revik2296@gmail.com, ⁴sa_zdobnov@mail.ru

Abstract. *Background.* Vibration measurement is one of the most popular and cost-effective methods of diagnosing the overall condition of equipment and is of undeniable importance in modern technology. Thanks to this process, manufacturers and consumers can be sure of the reliability and quality of technical systems, as well as prevent possible breakdowns and failures. And the wide scope of vibration measurements in various fields confirms their versatility and importance in modern technical progress. The purpose of measuring the effects of critical temperatures on a temperature transducer is to determine how a change in critical temperature can affect the accuracy and reliability of the transducer. This will improve the quality of temperature measurement, eliminate inaccuracies and errors in equipment performance, and increase the efficiency of the equipment in various operating conditions. *Materials and methods.* The research method in this paper is a simulation model of the sensor, which is used to test for vibration and exposure to critical temperatures. Ansys and SolidWorks Simulation software are used to create the model to avoid costly and time-consuming test cycles. *Results.* As a result of the simulation modeling, the epuples of mechanical stress distribution under sinusoidal vibration and the epuples of temperature distribution under critical temperatures were constructed.

Keywords: sensor, imitation model, displacement, sensing element

For citation: Fokina E.A., Trofimov A.A., Ponomarev V.N., Zdobnov S.A. Designing a simulation model of a temperature sensor under critical temperature and sinusoidal vibration conditions. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(3):66–72. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-7

Имитационной моделью датчика является логико-математическое описание объекта, используемое для анализа и оценки функционирования объекта на основе компьютерной модели, которая воспроизводит процессы функционирования реальной структуры изучаемого объекта.

Имитационное моделирование играет ключевую роль в разработке и тестировании датчиков температуры в условиях критических температур и воздействия синусоидальной вибрации [1, 2]. Имитационной моделью датчика является логико-математическое описание объекта, используемое для анализа и оценки функционирования объекта на основе компьютерной модели, которая воспроизводит процессы функционирования реальной структуры изучаемого объекта. Это позволяет инженерам и разработчикам предсказать поведение датчика в различных ситуациях, оптимизировать его работу и повысить надежность.

Проектирование имитационной модели датчика температуры при воздействии критических температур и синусоидальной вибрации требует учета множества факторов, таких как материалы, конструкция, теплопроводность и механическая устойчивость. Особое внимание уделяется точности и стабильности измерений при изменяющихся условиях окружающей среды [3, 4].

В данной статье мы рассмотрим основные принципы проектирования имитационной модели датчика температуры, а также рассмотрим влияние критических температур и синусоидальной вибрации на его работу.

Синусоидальная вибрация – это периодическое движение, закон движения которого может быть выражен выражением функции синуса. Например, все вибрации, создаваемые вращением, пульсацией и колебанием, являются синусоидальными колебаниями. Важно определять влияние синусоидальной вибрации на объекты эксперимента, так как действие вибрации может приводить к трансформированию внутренней структуры материалов и поверхностных слоев, изменению условий трения и износа на контактных поверхностях деталей, нагреву конструкций.

Для определения влияния синусоидальной вибрации на конструкцию датчика температуры в среде SolidWorks Simulation построена расчетная модель и схема граничных условий (ГУ), приведенная на рис. 1 [5, 6].

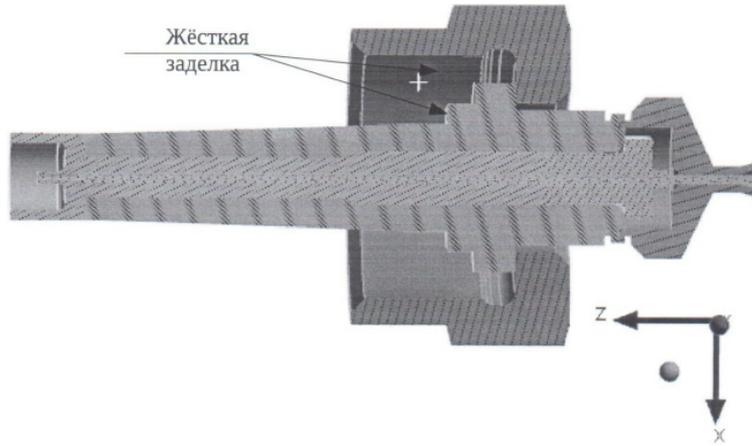


Рис. 1. Схема граничных условий

В ходе имитационного моделирования способность материалов рассеивать энергию определялась коэффициентом демпфирования (коэффициент демпфирования – это отношение внутреннего полного сопротивления усилителя к внутреннему полному сопротивлению системы колонок), который из-за отсутствия экспериментальных данных принимался равными 0,02–0,04. Также из-за отсутствия экспериментальных данных по усталостному разрушению материалов, входящих в состав сборки, не учитывалось время воздействия синусоидальной вибрации.

В результате имитационного моделирования была получена форма колебания резонансной частоты, попадающей в диапазон частот от 15 до 8000 Гц, представленная на рис. 2.

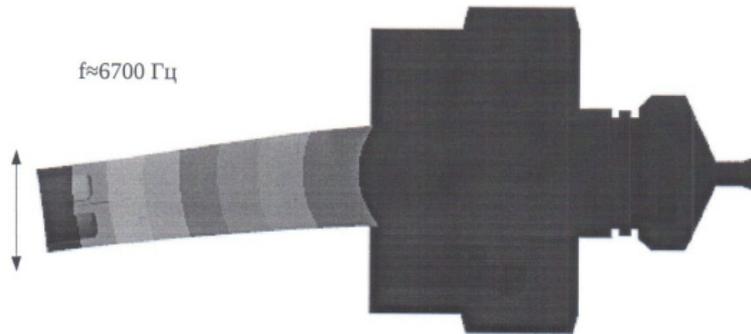


Рис. 2. Форма колебаний

Также были получены эпюры распределения механических напряжений при воздействии синусоидальной вибрации.

По данным рис. 3 видно, что максимальная величина механических напряжений варьируется в диапазоне от 406 до 780 МПа.

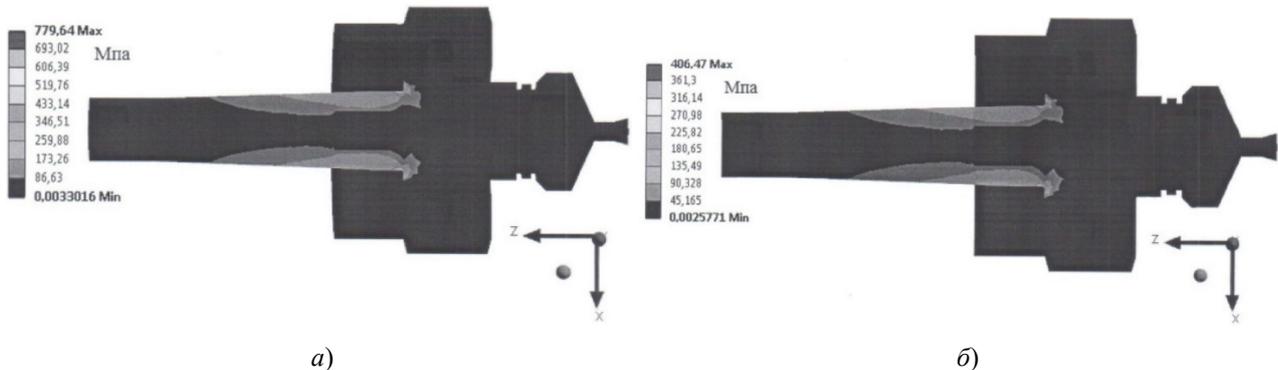


Рис. 3. Эпюры распределения механических напряжений:

а – при коэффициенте демпфирования 0,02; б – при коэффициенте демпфирования 0,04

Для определения теплопередачи при воздействии на датчик температуры критических температур и определения времени, за которое чувствительный элемент достигает измеряемой температуры, была построена 3D-модель датчика температуры в среде SolidWorks Simulation. 3D-модель и схема граничных условий для расчета представлены на рис. 4 [7].

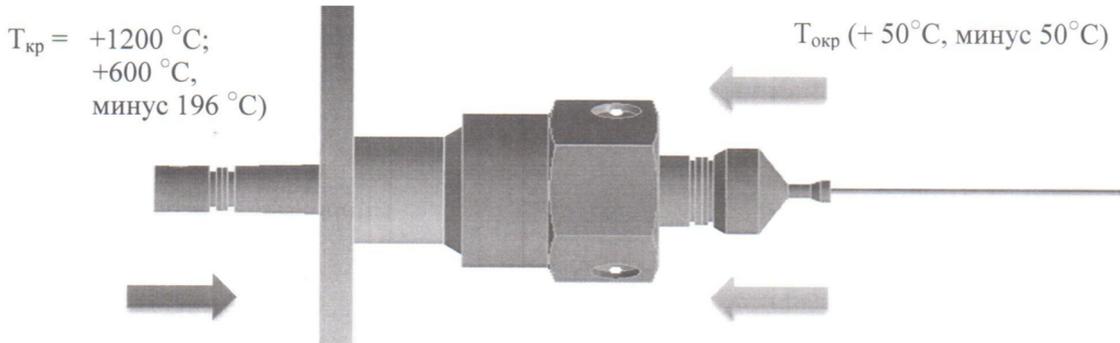


Рис. 4. 3D модель и схема граничных условий для датчика температуры

В результате моделирования воздействия температур 1200 °C, 600 °C и минус 196 °C в течение 500 с были получены эпюры распределения температур, представленные на рис. 5–7.

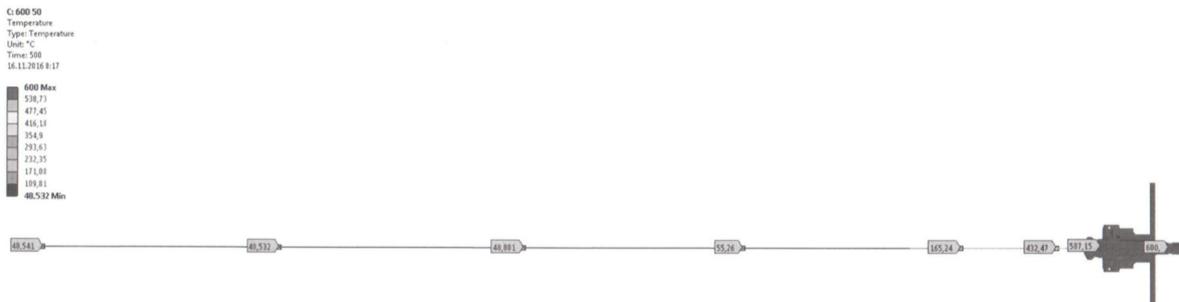


Рис. 5. Эпюра распределения температуры от 600 °C до плюс 50 °C в течение 500 с

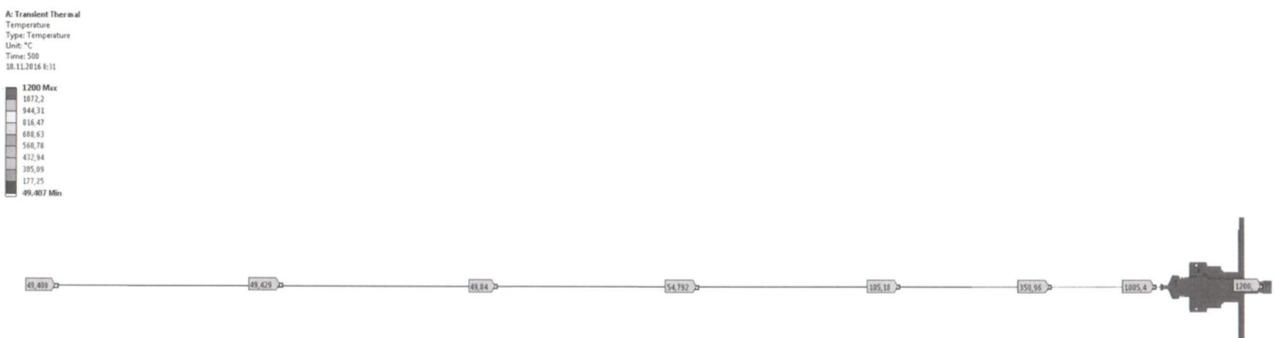


Рис. 6. Эпюра распределения температуры от 1200 °C до плюс 50 °C в течение 500 с

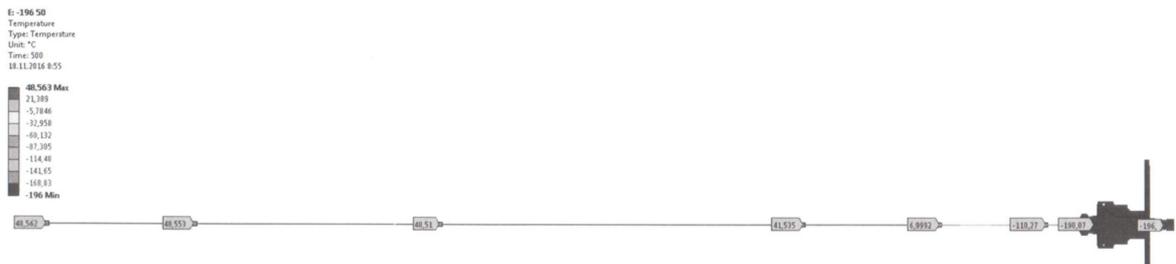


Рис. 7. Эпюра распределения температуры от минус 196 °C до плюс 50 °C в течение 500 с

Также был проведен анализ поведения модели при температуре измеряемой среды 300 °С. Температура окружающей среды составляет $t_{окр} = 22$ °С. Тип передачи тепла между окружающей средой и датчиком – конвекция. Данный тип передачи реализован соответствующим граничным условием. Его главной характеристикой является коэффициент конвективной теплоотдачи (рис. 8). Значения коэффициента конвективной отдачи взяты из стандартной базы данных программы Ansys для окружающей среды – воздух.

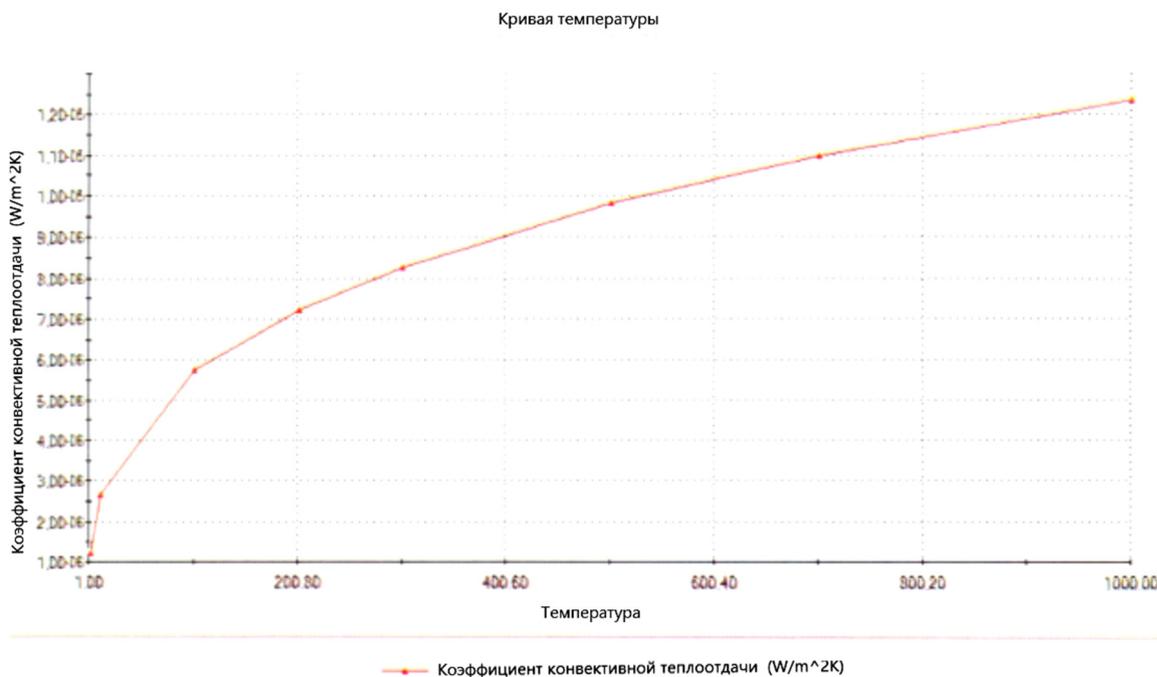


Рис. 8. Значения коэффициента конвективной теплоотдачи

Передача тепла осуществляется за счет конвекционных потоков от нагретой части датчика в окружающую среду и по средствам теплопроводности между деталями датчика. В момент времени 22 000 с наблюдается тепловое равновесие между датчиком и окружающей средой (выравнивание температурных полей).

Результаты моделирования показаны на эпюре распределения температурных полей в момент времени 22 000 (рис. 9).

В рамках данной работы была создана имитационная модель датчика температуры при воздействии критических температур и синусоидальной вибрации. Разработанная модель позволяет исследовать изменение характеристик датчика в условиях вибрации и воздействия критических температур.

В результате разработки имитационной модели воздействия синусоидальной вибрации на датчик температуры определена собственная резонансная частота конструкции датчика, входящая в диапазон 15–8000 Гц и равная 6700 Гц. Также из построенных эпюр выявлено максимальное механическое напряжение, которое образуется в конструкции датчика под воздействием синусоидальной вибрации от 0,8 до 1200 g в диапазоне частот от 15 до 8000 Гц, варьирующееся в диапазоне от 406 до 780 МПа.

По результатам моделирования имитационной модели воздействия критических температур на датчик температуры выявлено, что температура 1200 °С, 600 °С и минус 196 °С за время 500 с не оказывает влияния на соединитель. Основное влияние при воздействии критических температур на соединитель оказывает температура окружающей среды, которая за 500 с достигает соответственно плюс 50 °С и минус 50 °С.

Дополнительно по результатам моделирования имитационной модели воздействия критических температур на датчик температуры была определена максимальная температура, образующаяся на кабеле удлинителе и соединителе при воздействии на датчик температуры $t = 300$ °С. Температура на разъеме датчика составила 26 °С; на кабеле в месте крепления с печатной платой 180 °С.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения метрологических характеристик датчика температуры в условиях вибрации и воздействия критических температур.

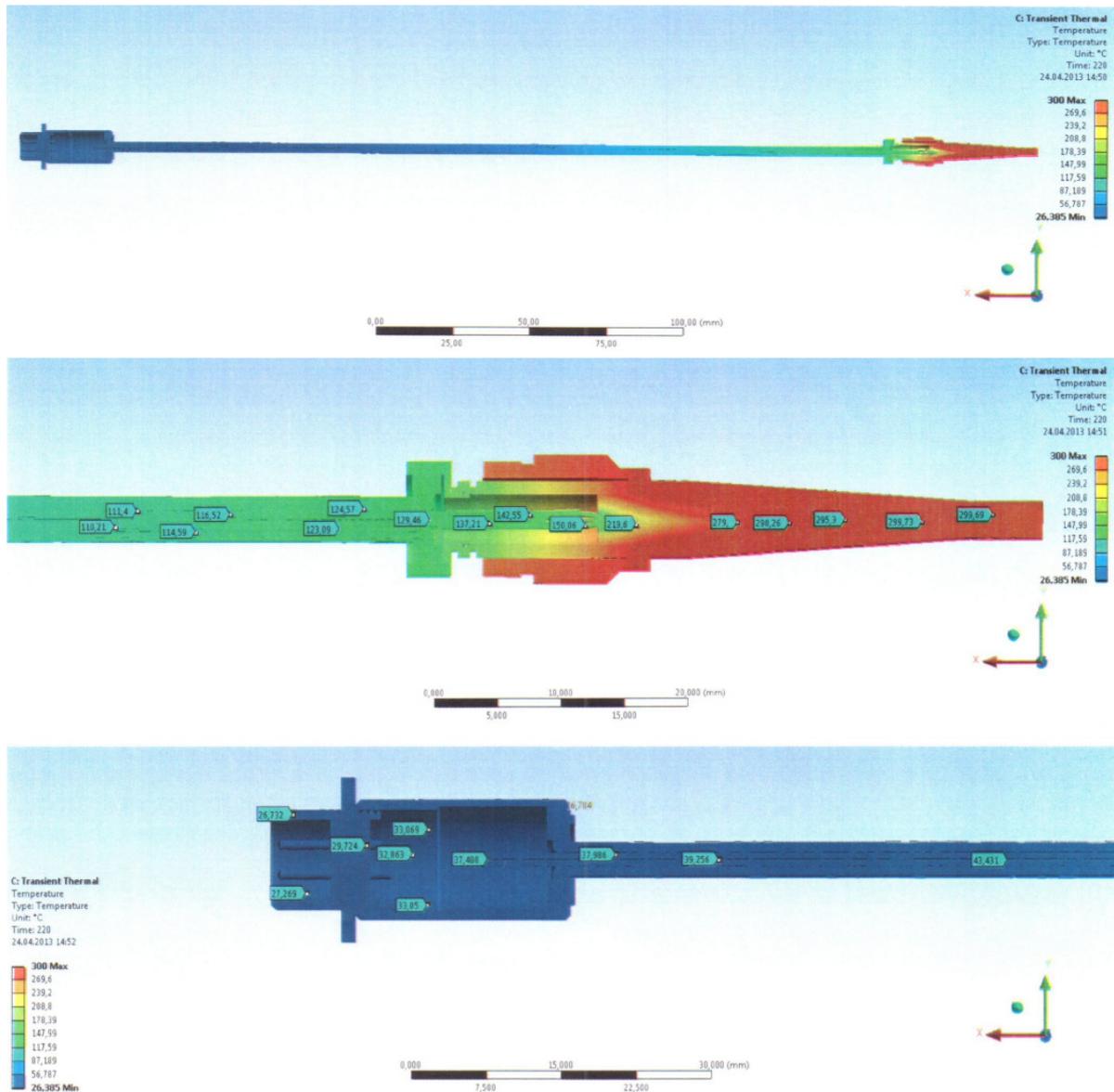


Рис. 9. Эпюра распределения температурных полей в момент времени $T = 22\ 000$ с

Список литературы

1. Трофимов А. А., Пономарев В. Н., Дерябин Д. В. [и др.]. Проектирование датчика температуры методом имитационного моделирования // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 54–61.
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. 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.
4. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование тензорезисторного датчика избыточных давлений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 56–63.
5. Рыбаков И. М. Модели и методы измерения электрических параметров в сложных системах электроники // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 44–50.
6. Рязанцев Д. А., Тимонин Р. М., Трофимов А. А. Имитационное моделирование датчика температуры // Датчики и системы. 2019. № 6. С. 11–14.
7. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М. : ДМК Пресс, 2010. 464 с.

References

1. Trofimov A.A., Ponomarev V.N., Deryabin D.V., et al. Designing a temperature sensor by simulation modeling. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):54–61. (In Russ.)

2. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. et al. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1):20–28. (In Russ.)
3. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a sensitive element of a string-type pressure sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2014;(7):22–25. (In Russ.)
4. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a tensoresistor overpressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(1):56–63. (In Russ.)
5. Rybakov I.M. Models and methods of measuring electrical parameters in complex electronics systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):44–50. (In Russ.)
6. Ryazantsev D.A., Timonin R.M., Trofimov A.A. Simulation modeling of a temperature sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2019;(6):11–14. (In Russ.)
7. Alyamovskiy A.A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation = Engineering calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press, 2010:464. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Александровна Фокина

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ekaterina.isay1997@gmail.com

Ekaterina A. Fokina

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya 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

Aleksei 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)

Владислав Николаевич Пономарев

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: revik2296@gmail.com

Vladislav N. Ponomarev

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

Сергей Александрович Здобнов

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

Sergey A. Zdobnov

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 11.06.2024

Поступила после рецензирования/Revised 02.08.2024

Принята к публикации/Accepted 03.09.2024