

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 681.586.773

doi: 10.21685/2307-5538-2026-1-10

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДАТЧИКА КОНТАКТНОГО ДАВЛЕНИЯ

А. А. Трофимов¹, П. Д. Головин², Д. А. Гулиева³, Н. А. Кривцун⁴

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

¹alex.t1978@mail.ru, ²GPD75@yandex.ru, ³dashuliy2308@yandex.ru, ⁴iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Разработка и создание датчиков контактного давления (ДКД) для работы в тяжелых условиях эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники является актуальной научно-практической задачей. Применение имитационного моделирования позволит на этапе проектирования получить оптимальное проектно-конструкторское решение, провести анализ и оценить функционирование объекта с учетом внешних воздействий. *Целью работы* является создание имитационной модели ДКД для исследования и оценки влияния механических нагрузок при воздействии изгибающих и скручивающих моментов на конструкцию датчика. *Материалы и методы.* С помощью программного комплекса Solidworks, обеспечивающего разработку и анализ датчиков-преобразующей аппаратуры, позволяющего уменьшить время и исключить ошибки на начальных стадиях проектирования с учетом воздействия механических нагрузок, проведены эксперименты на модели, являющейся симуляцией реального объекта. *Результаты и выводы.* В результате моделирования было определено влияние изгибающих и скручивающих механических нагрузок на метрологические и эксплуатационные характеристики ДКД.

Ключевые слова: датчик давления, твердотельная модель, граничные условия, относительная деформация, имитационная модель

Финансирование: исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и устройств электроники» (№ 124041700069-0).

Для цитирования: Трофимов А. А., Головин П. Д., Гулиева Д. А., Кривцун Н. А. Моделирование работы датчика контактного давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2026. № 1. С. 79–84. doi: 10.21685/2307-5538-2026-1-10

SIMULATION CONTACT PRESSURE SENSOR OPERATION

A.A. Trofimov¹, P.D. Golovin², D.A. Gulieva³, N.A. Krivtsun⁴

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

¹alex.t1978@mail.ru, ²GPD75@yandex.ru, ³dashuliy2308@yandex.ru, ⁴iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The development and creation of contact pressure sensors (DKD) for operation in difficult operating conditions of aviation and rocket and space technology is an urgent scientific and practical task. The use of simulation modeling will allow at the design stage to obtain an optimal design solution, analyze and evaluate the functioning of the object, taking into account external influences. The purpose of the work is to create a DKD simulation model to study and evaluate the effect of mechanical loads under the influence of bending and bending moments on the sensor design. *Materials and methods.* Experiments were carried out on a model, which is a simulation of a real object, with the help of the Solidworks software complex, which provides the development and analysis of sensor-converting equipment, which reduces the time and eliminates errors at the initial stages of design, taking into account the impact of mechanical loads. *Results and conclusions.* As a result of modeling, the effect of bending and twisting mechanical loads on the metrological characteristics of the DCD was determined.

Keywords: pressure sensor, solid model, boundary conditions, relative deformation, simulation model

Financing: the research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the project "Synthesis and research of promising nanomaterials, coatings and electronics devices" (№ 124041700069-0).

For citation: Trofimov A.A., Golovin P.D., Gulieva D.A., Krivtsun N.A. Simulation contact pressure sensor operation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2026;(1):79–84. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2026-1-10

Серийно выпускаемые датчики, применяемые в изделиях ракетно-космической техники, измеряют давление от сотен тысяч паскалей до нескольких десятков мегапаскалей и имеют размеры в пределах десятков миллиметров [1].

Однако в связи с развитием новых технологий, увеличением числа элементов и усложнением процессов проектирования и производства перед разработчиками все чаще встает задача дальнейшего развития и совершенствования датчиков давления на основе разработки и внедрения прогрессивных конструкторско-технических решений [2–5].

Сутью контактных задач является определение усилий взаимодействия двух контактируемых тел – контактных реакций и области (зоны) контакта, если она известна [6].

Одним из возможных вариантов реализации такой задачи является использование конструкторско-технологических решений, позволяющих повысить метрологические и эксплуатационные характеристики (например, расширить температурный диапазон датчика, уменьшить основную погрешность измерений).

В ходе имитационного моделирования [7], в зависимости от вида и направления возмущающей силы, будет использоваться одна твердотельная модель ДКД, показанная на рис. 1, и три вида граничных условий, изображенных на рис. 2.

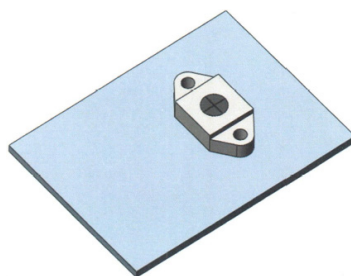


Рис. 1. Твердотельная модель ДКД

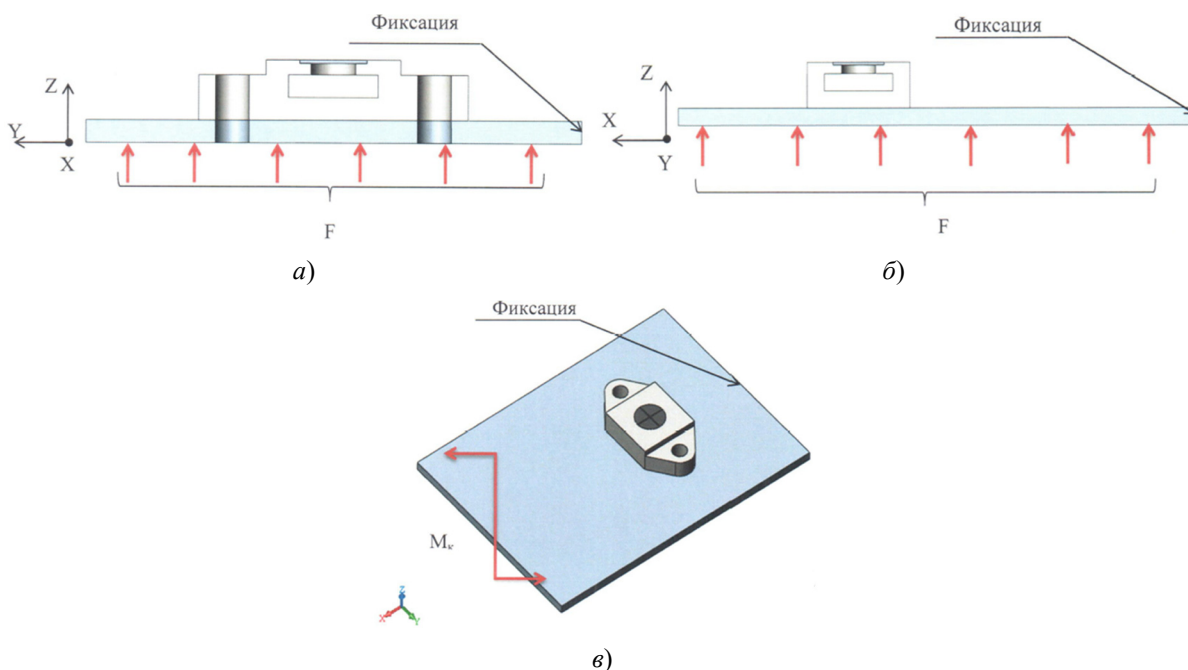


Рис. 2. Схемы граничных условий

Моделирование проводилось при условии, что при воздействии механических нагрузок все детали были жестко связанными без деформации.

Результаты моделирования с наложенными граничными условиями, согласно рис. 2,а, показали, что если приложить силу в 1090 Н, то деформация по оси Y составляет $\sim 0,003$, а максимальные напряжения, возникающие при действии данной силы, составят 900 МПа.

Нужно отметить, что максимальная деформация возникает вблизи места фиксации расчетной модели. На поверхности, прилегающей к поверхности корпуса, относительная деформация имеет на несколько порядков меньшее значение относительной деформации. На рис. 3 показана эпюра относительной деформации, а на рис. 4 изображен график ее изменения по оси Y .

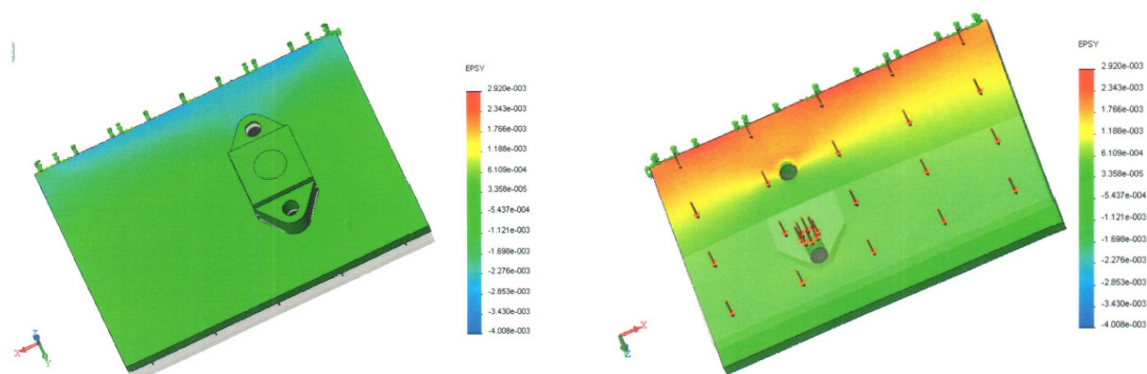


Рис. 3. Эпюра относительной деформации по оси Y

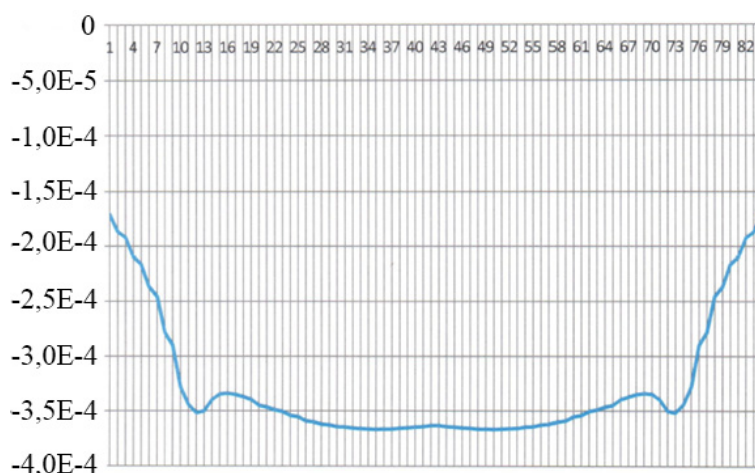


Рис. 4. График изменения относительной деформации по оси Y

Результаты моделирования с наложенными граничными условиями (рис. 2,б) показали, что при приложении силы в 600 Н на элементе базовой несущей конструкции будет возникать относительная деформация – 0,003. Максимальные напряжения при воздействии данной силы будут составлять порядка 650 МПа. На рис. 5 изображена эпюра относительной деформации, а на рис. 6 изображен график изменения относительной деформации по оси X .

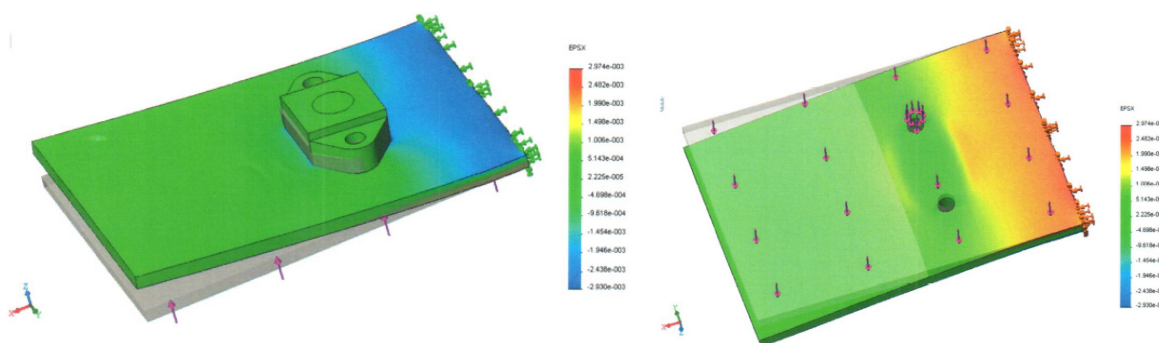
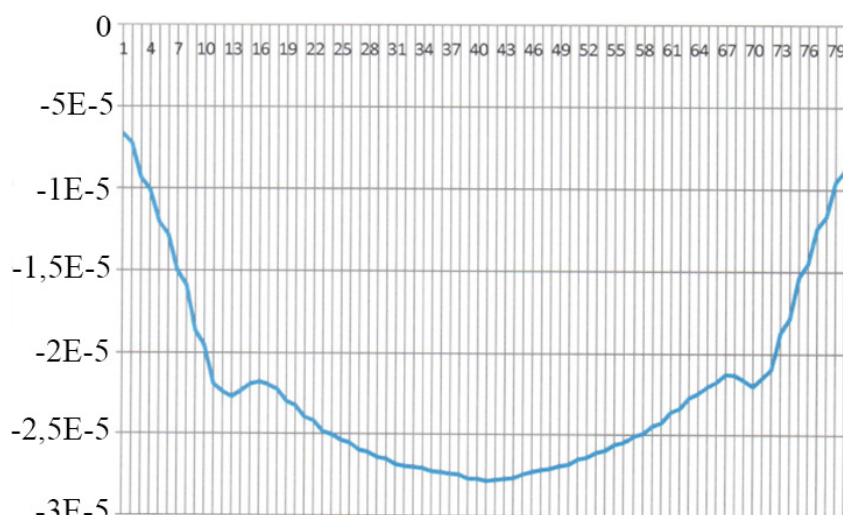
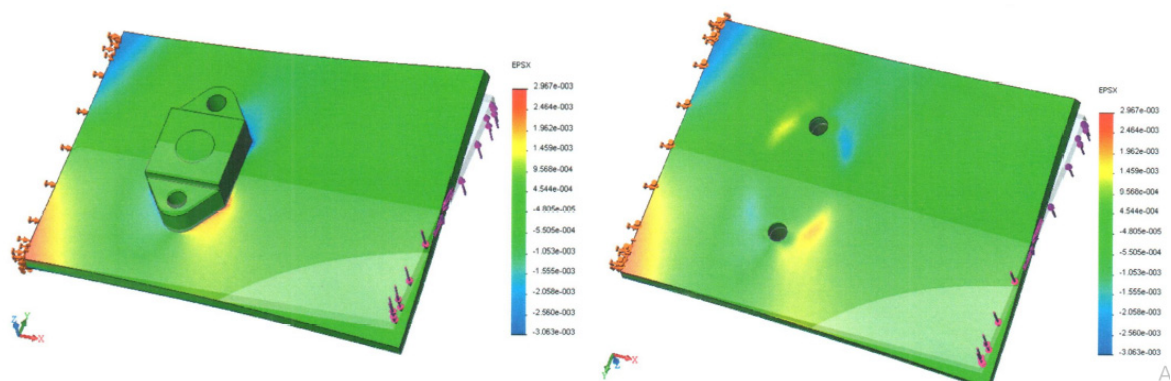
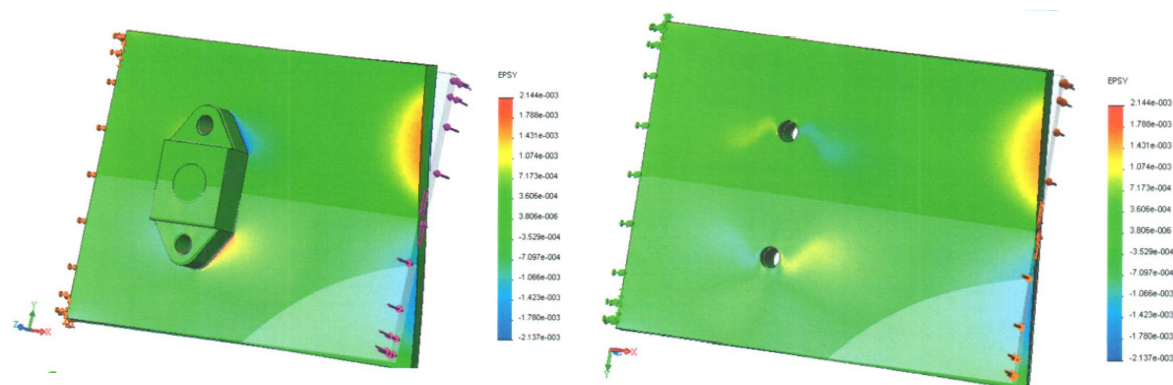


Рис. 5. Эпюра относительной деформации по оси X

Рис. 6. График изменения относительной деформация по оси X

Как и в первом случае, максимальная деформация возникает вблизи места фиксации расчетной модели. На поверхности, прилегающей к поверхности корпуса, относительная деформация имеет на несколько порядков меньшее значение. Согласно рис. 2, в к одной из граней прикладывается крутящий момент с величиной в 18 Н·м. Под его действием деформация по оси X составит $\sim 0,003$, а по оси $Y \sim 0,002$. Эпюра деформации по оси X изображена на рис. 7, а по оси Y – на рис. 8. На рис. 9 изображены графики деформация по осям X и Y . Как и в предыдущих случаях, максимальная деформация возникает в зоне фиксации модели.

Рис. 7. Эпюра относительной деформации по оси X Рис. 8. Эпюра перемещения по оси Y

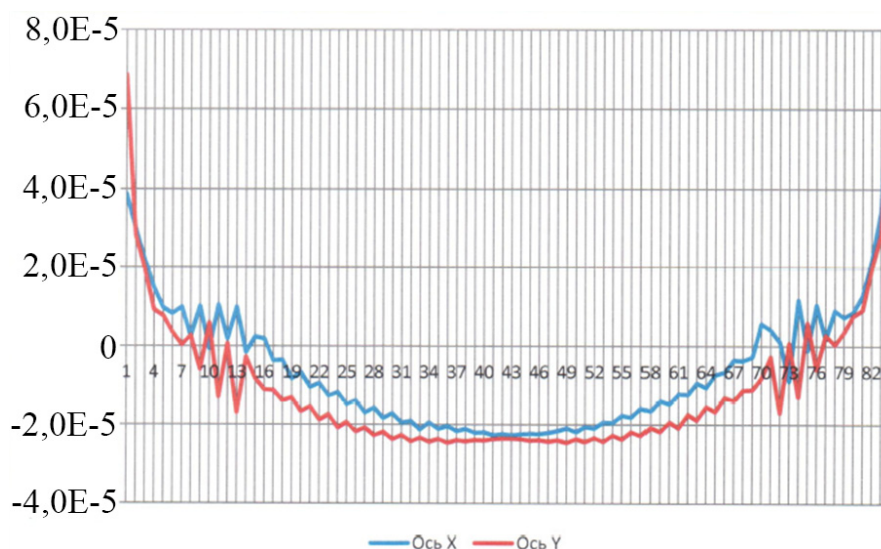


Рис. 9. График изменения относительной деформации по осям X и Y

Заключение

В ходе моделирования было определено влияние изгибающих и скручивающих механических нагрузок на предложенную модель ДКД. В результате деформация по соответствующим осям лежит в зоне допустимых значений.

Результаты проведенного моделирования предложенной конструкции ДКД необходимо использовать на следующих этапах работы.

Список литературы

1. Трофимов А. А., Печерская Е. А., Здобнов С. А. Исследование технологии создания чувствительных элементов датчиков давления для системы ракетного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 4. С. 191–200.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Логинова Л. В., Трофимов А. А., Печерская Е. А. [и др.]. Моделирование высокотемпературных датчиков давления на базе технологических структур «поликремний-диэлектрик» // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 85–95.
6. Кузнецов С. А. Механика контактного взаимодействия : конспект лекций. Изд. 2-е, испр. и доп. Казань : Казан. ун-т, 2020. 77 с.
7. 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.

References

1. Trofimov A.A., Pecherskaya E.A., Zdobnov S.A. Research of technology of creation of sensitive elements of pressure sensors for a rocket engine system. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye* = *Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology, and mechanical engineering*. 2024;23(4):191–200. (In Russ.)
2. Musayev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation of a sensitive element of a string-type pressure sensor. *Datchiki i sistemy* = *Sensors and systems*. 2014;(7):22–25. (In Russ.)
3. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. et al. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'* = *Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1): 20–28. (In Russ.)
4. Musayev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a sensor element of a strain-resistant absolute pressure sensor. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'* = *Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2012;(2):51–55. (In Russ.)

5. Loginova L.V., Trofimov A.A., Pecherskaya E.A. et al. Modeling of high-temperature pressure sensors based on polysilicon-dielectric technological structures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):85–95. (In Russ.)
6. Kuznetsov S.A. *Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya: konspekt lektsiy = Mechanics of contact interaction : lecture notes*. 2nd ed., revised and expanded. Kazan: Kazan. un-t, 2020:77. (In Russ.)
7. Fokina E.A., Trofimov A.A., Ponomarev V.N., Zdobnov S.A. Designing a simulation model of a temperature sensor under the influence of critical temperatures and sinusoidal vibration. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(3):66–72. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

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)

Павел Дмитриевич Головин

ведущий инженер кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: GPD75@yandex.ru

Pavel D. Golovin

Leading engineer of the sub-department of design
and production of radio equipment,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дарья Александровна Гулиева

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Darya A. Gulieva

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николай Алексеевич Кривцун

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

Nikolay A. Krivtsun

Master degree 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 08.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 06.10.2025

Принята к публикации / Accepted 29.10.2025