

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРИВОДА ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ РАСКРЫТИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В.Н. Зимин

zimin@bmstu.ru

А.О. Шахвердов

shah@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрена концепция привода на основе материала с термомеханическим эффектом памяти формы для раскрытия крупногабаритных космических конструкций. Подобные приводы являются перспективными для использования в крупногабаритных космических конструкциях. Однако характеристики работы этих приводов имеют достаточно сложный и нелинейный характер. Для материалов с эффектом памяти формы управляющее воздействие — изменение температуры. В связи с этим целью работы является создание математической модели, с использованием которой можно точно описать изменения тепловой энергии и длины активного элемента привода. Проведены серии экспериментов по определению деформационно-силовых и температурных характеристик проволочных активных элементов различных диаметров. Разработана математическая модель для расчета изменения температуры активного элемента при нагреве пропусканием через него постоянного тока и изменением длины в соответствии с динамикой нагрева. Предложенная модель основана на уравнении энергетического баланса, фазовые превращения учитываются с помощью параметра состояния. Полученные результаты расчетов по математической модели хорошо согласуются с экспериментальными данными. Разработанная математическая модель может стать основой для дальнейших исследований в этой области, а также быть использована для проектирования более совершенных крупногабаритных космических конструкций

### Ключевые слова

*Эффект памяти формы, математическое моделирование, эксперимент, привод, тепловая энергия*

Поступила 21.08.2024

Принята 12.02.2025

© Автор(ы), 2025

---

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект № 0705-2023-0012)*

**Введение.** В последние десятилетия проводятся активные исследования космоса и разрабатываются крупногабаритные космические конструкции, такие как наборы солнечных панелей, орбитальные телескопы и антенны. В современном мире космическая техника активно развивается, что приводит к необходимости разработки инновационных систем. Существует множество вариантов крупногабаритных трансформируемых космических систем, достигнуты значительные успехи в оптимизации отношения массы рефлектора к его площади и коэффициента раскрытия [1–4]. Однако одной из основных проблем при создании таких объектов является не только их конструктивная сложность, но и приводы, которые обеспечивают их раскрытие и являются критически важной системой их функционирования.

Крупногабаритные трансформируемые космические конструкции доставляются на орбиту в сложенном виде. После достижения требуемой орбиты конструкция приводится в рабочее положение путем раскрытия или трансформации. Размеры трансформируемой системы могут значительно увеличиваться в процессе раскрытия. На орбите процесс раскрытия происходит с использованием приводов (пружин и электродвигателей). После завершения раскрытия конструкция фиксируется в рабочем состоянии, что может сопровождаться значительными ударными динамическими нагрузками [5–7].

Исследование приводов космических конструкций имеет большое значение для дальнейшего прогресса в исследовании космоса. Поэтому разработка новых и эффективных приводов является ключевым фактором для успешной реализации крупногабаритных космических проектов в будущем. Один из вариантов подобных приводов — привод с активным элементом из материала с эффектом памяти формы. Этот материал обладает свойством запоминать предыдущую форму и возвращаться к ней при появлении управляющего воздействия [8–11]. Управляющим воздействием на исследуемый материал с эффектом памяти формы является изменение температуры материала. При достижении определенной температуры в материале происходят фазовые превращения, вследствие которых значительно изменяется длина активного элемента. На таком эффекте построен принцип работы привода с активным элементом из материала с эффектом памяти формы. Одно из преимуществ подобного привода, кроме относительно малой массы и габаритов, — плавность его работы [12, 13], что позволяет отказаться от традиционно устанавливаемых на таких конструкциях систем сдерживания раскрытия, что в свою очередь может улучшить массовые характеристики.

Однако определяющие соотношения для указанного материала являются довольно сложными и существенно нелинейными, поэтому их математическое моделирование представляет собой нетривиальную задачу. Математическое моделирование приводов с активным элементом из материала с эффектом памяти формы является актуальной задачей при разработке крупногабаритных космических конструкций. Рассмотрено моделирование температуры и динамики изменения длины таких приводов с учетом их специфических характеристик и особенностей в условиях космического пространства. Проведенные исследования позволяют приблизиться к оптимизации процесса создания и эксплуатации конструкций с подобными приводами, что важно для улучшения характеристик перспективных крупногабаритных космических конструкций и их надежности в экстремальных условиях космической среды.

**Материалы и методы решения задач, принятые допущения.** Рассмотрим элементарный привод с активным элементом из материала с эффектом памяти формы. Активный элемент привода представляет собой отрезок проволоки из никелида титана NiTi. В качестве исходных данных для построения математической модели работы привода использованы результаты экспериментальных исследований [14, 15]. В качестве базового принципа для построения математической модели выбран закон сохранения энергии. В расчетах приняты допущения о том, что нагрев активного элемента привода происходит одинаково по всей его толщине, тепловые потоки в местах закрепления пренебрежимо малы и не влияют на динамику нагрева активного элемента [16].

**Результаты.** Математическая модель основана на экспериментально полученных данных, поэтому проведены серии экспериментов с проволочными элементами из никелида титана с эффектом памяти формы.

Для проведения экспериментов использовали две установки. Первая установка предназначена для подготовки активного элемента привода к работе. В этой установке проволочный элемент фиксировали в неподвижной заделке специальным зажимом, предотвращающим выскользывание проволоки при сильном нагружении. Другой конец закрепляли в аналогичном зажиме, но с возможностью перемещения зажима в продольном направлении. Затем активный элемент привода подвергали продольному растяжению. Изменение длины фиксировали с использованием проволочного датчика перемещения с точностью до 0,01 мм. Изменение нагрузки, прикладываемой к активному элементу привода, измеряли цифровым динамометром с точностью до 0,2 Н. Все данные записывали с частотой 10 Гц на персональный компьютер для последующей обработки.

Число испытаний образцов различных диаметров, средние значения удлинения и максимального усилия приведены ниже:

Диаметр, мм .....	0,5	1,5	2,1
Число испытаний .....	6	9	10
Удлинение, % .....	10	10,1	9,1
Максимальное усилие при растяжении, кН .....	0,145	0,95	1,55

На второй установке проводили эксперименты по срабатыванию активных элементов привода с эффектом памяти формы. Управляющим воздействием на материал с эффектом памяти формы является температурный градиент, поэтому для срабатывания активного элемента привода его необходимо нагреть выше температуры начала фазовых превращений ( $A_n$ ) [17, 18]. В условиях космического пространства наиболее простым и удобным способом нагрева является пропускание через активный элемент электрического тока, что вызывает его нагрев. Такой вид нагрева технически достаточно легко осуществим, хорошо предсказуем и довольно точно может быть рассчитан с использованием математической модели. Поэтому при экспериментальной отработке нагрев активного элемента привода выполняли подачей на концы проволоки постоянного электрического напряжения. Значение проходящего через активный элемент тока фиксировали цифровым мультиметром, подключенным в электрическую цепь в качестве амперметра с точностью 0,001 А. Динамику нагрева активного элемента измеряли двумя независимыми способами: 1) контактным (датчиком термпары, прикрепленным к проволоке); 2) бесконтактным (тепловизором, измеряющим излучение проволоки в ИК-диапазоне.) Измерения бесконтактным способом дают более точные показания динамики нагрева проволоки, так как ее диаметр сравним с габаритами термпары [19]. Изменение длины и приложенную нагрузку активного элемента измеряли аналогично измерениям при подготовке привода.

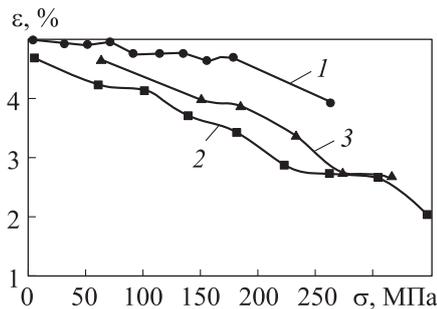
В каждой серии экспериментов к предварительно растянутому активному элементу привода подвешивали набор грузов, который имитировал нагрузку на привод космической конструкции в процессе раскрытия. Результаты проведенных серий испытаний с активными элементами различных диаметров приведены на рис. 1. По вертикальной оси отложено относительное уменьшение длины проволочного элемента привода, по горизонтальной — напряжения, возникающие в сечении активного элемента.

Максимальное перемещение, создаваемое активным элементом, линейно зависит от приложенной к нему нагрузки. Таким образом, основны-

ваясь на полученных экспериментальных данных, можно вывести формулу для расчета относительного изменения длины активного элемента привода исходя из приложенной к нему нагрузки:

$$\varepsilon_{\max} = a\sigma + b, \quad (1)$$

где  $a = -7,5 \cdot 10^{-5}$ ;  $b = 0,0473$  — коэффициенты, полученные для активного элемента диаметром 1,5 мм (см. рис. 1).

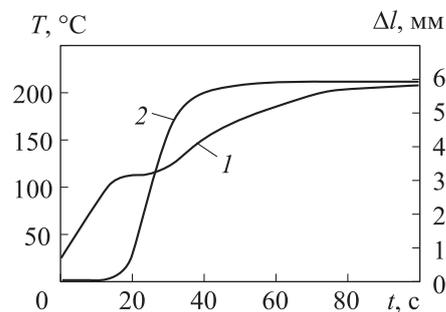


**Рис. 1.** Зависимость максимального перемещения от приложенной нагрузки для значений диаметра 2,1 (1), 1,5 (2) и 0,5 мм (3)

Изменения температуры и перемещения во времени, полученные в эксперименте, показаны на рис. 2. В эксперименте использовали активный элемент длиной 173,1 мм и диаметром 1,5 мм, к нему прикреплен груз весом 0,3192 кН, для нагрева подведено постоянное напряжение 2,2 В. Установлено, что процесс фазовых превращений, который является основой эффекта памяти формы, происходит со значительными затратами энергии. Практически неизменяющаяся температура с начала превращений на 15-й секунде и до 30-й секунды при активном изменении длины привода свидетельствует о том, что большая часть энергии нагрева в этот период идет именно на фазовые превращения. Однако с 30-й до 50-й секунды также наблюдаются фазовые превращения, но они замедляются и возобновляется нагрев активного элемента.

**Рис. 2.** Изменения температуры (1) и перемещения (2) активного элемента

Подобные изменения можно учитывать при моделировании поведения активного элемента с эффектом памяти формы с помощью параметра состояния  $\chi$ . За параметр можно принять отношение части материала, которая совершила фазовый переход, к общему количеству материала. Посколь-



ку энергия, необходимая для фазового перехода, известна [20, 21], рассчитать параметр состояния можно с использованием полной энергии  $Q$ , необходимой для фазового перехода всего материала, и количества энергии  $Q_1$ , потраченной на фазовый переход в текущий момент времени:  $\chi = Q_1 / Q$ ,  $0 \leq Q_1 \leq Q$ ,  $0 \leq \chi \leq 1$ .

Для моделирования работы активного элемента привода в условиях наземных испытаний с присутствием конвективного теплообмена можно использовать уравнение энергетического баланса [22]. Изменение внутренней энергии активного элемента будет равно разности количества теплоты, поступившей за счет нагрева от пропускания электрического тока, тепловых потерь от естественной конвекции и энергии, затраченной на фазовые превращения [23]:

$$cm(T_2 - T_1) = \frac{U^2}{R(\chi)} \Delta t - \alpha S(T_1 - T_{cp}) \Delta t - Q. \quad (2)$$

Здесь  $c$  — удельная теплоемкость активного элемента;  $m$  — масса активного элемента;  $T_1, T_2$  — температура активного элемента;  $U$  — электрическое напряжение, подаваемое на активный элемент при испытаниях;  $R(\chi)$  — сопротивление материала активного элемента;  $\Delta t$  — время;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $S$  — площадь поверхности теплообмена;  $T_{cp}$  — температура окружающей среды.

Сопротивление разных фаз материала отличается, поэтому определять его будем с учетом изменяющегося фазового соотношения проводника. Это необходимо учитывать, так как изменение фазового состава будет влиять на динамику нагрева активного элемента:

$$R(\chi) = (\rho_M(1 - \chi) + \rho_A\chi)l / F,$$

где  $\rho_M$  — удельное сопротивление мартенситной фазы;  $\rho_A$  — удельное сопротивление аустенитной фазы;  $l$  — длина активного элемента;  $F$  — площадь сечения активного элемента.

Расчет выполняли методом шагов по времени. На каждом шаге рассчитывали энергию  $Q'$ , потраченную на фазовое превращение за время  $\Delta t$ :

$$Q' = \frac{-\chi^2 + k}{k} \left( \frac{U^2}{R(\chi)} \Delta t - \alpha S(T_1 - T_{cp}) \Delta t \right).$$

Здесь значение  $k = 1,1$  получено из экспериментальных данных. Множитель с параметром состояния определяет, какая часть тепловой энергии

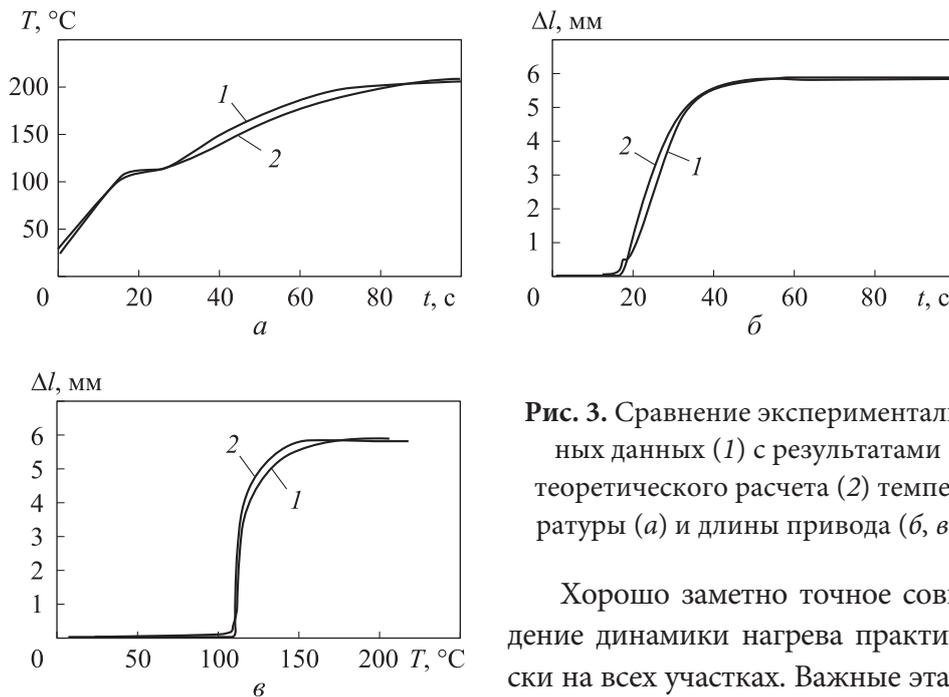
уходит на фазовые превращения, а какая — на нагрев. Поскольку затраты энергии на фазовое превращение происходят только после достижения активным элементом температуры начала фазовых превращений  $A_H$  и до момента полного фазового превращения, из (2) можно получить следующую систему для расчета температуры активного элемента привода:

$$T_2 = \frac{(U^2 / R(\chi))\Delta t - \alpha S(T_1 - T_{cp})\Delta t}{cm} + T_1, T_2 < A_H, \chi < 1;$$

$$T_2 = \frac{(U^2 / R(\chi))\Delta t - \alpha S(T_1 - T_{cp})\Delta t - Q'}{cm} + T_1, T_2 \geq A_H, \chi < 1;$$

$$T_2 = \frac{(U^2 / R(\chi))\Delta t - \alpha S(T_1 - T_{cp})\Delta t}{cm} + T_1, T_2 \geq A_H, \chi = 1.$$

Расчет по предложенной модели позволил получить зависимость температуры от времени. Результаты сравнения изменения температуры, полученной в процессе эксперимента и при расчете, приведены на рис. 3, а.



**Рис. 3.** Сравнение экспериментальных данных (1) с результатами теоретического расчета (2) температуры (а) и длины привода (б, в)

Хорошо заметно точное совпадение динамики нагрева практически на всех участках. Важные этапы функционирования привода —

нагрев до температуры начала фазовых превращений (этап с 0-й до 15-й секунды), основная часть фазовых превращений с максимальной затратой энергии (этап после 15-й до 30-й секунды) и установившаяся температура привода (этап после 80-й секунды) — совпадают очень точно. Это свиде-

тельствует о том, что предложенная модель расчета температуры подобрана успешно.

Параллельно с расчетом температуры выполнен и расчет изменения длины активного элемента привода, поскольку этот параметр необходим при проектировании. Исходя из изменения длины привода (см. рис. 2, кривая 2) и принципа работы привода предложено рассчитывать изменение длины привода, основываясь на параметре состояния, который показывает количество материала, совершившего фазовый переход. Расчет проводили по следующей формуле, учитывая данные о максимальном относительном изменении длины, полученные по (1):  $h = \chi \varepsilon_{\max} l$ .

Данные расчета изменения длины активного элемента привода представлены на рис. 3, б, выполнено сравнение с экспериментально полученными данными. Момент начала превращений совпадает достаточно точно, но форма зависимости немного различается. Это связано с существенной нелинейностью процессов в начале фазовых превращений. Однако это различие не вносит значительных изменений в характеристику работы привода, так как значение максимальной длины срабатывания совпадает с экспериментальным. Основной этап работы привода также достаточно близко совпадает с практическими результатами.

Основной параметр работы привода — изменение его длины. Как уже было отмечено, для привода с активным элементом из материала с эффектом памяти формой управляющим воздействием является изменение температуры. Таким образом, важной характеристикой является зависимость изменения длины привода от его температуры (рис. 3, в). Расчетные данные совпадают с экспериментальными. Расчет по представленной модели хорошо описывает не только момент начала и конца превращений, но и процесса в целом.

**Обсуждение полученных результатов.** Результаты расчета по предложенной математической модели работы привода хорошо совпадают с экспериментальными данными во всех аспектах функционирования привода. Несмотря на то что математическая модель в большей части опирается на экспериментальные данные, полученные результаты возможно использовать при проектировании перспективных приводов для крупногабаритных космических конструкций.

**Заключение.** Крупногабаритные космические конструкции являются очень сложными техническими устройствами и требуют постоянного нахождения новых решений для совершенствования характеристик. Один из важнейших этапов работы подобных конструкций — их раскрытие на орбите из транспортного положения в рабочее, которое происходит

под действием силовых приводов. Одним из перспективных направлений развития методов раскрытия является использованием привода из материала с эффектом памяти формы. Однако основные рабочие характеристики указанного материала довольно сложны и существенно нелинейны. Для расширения сферы применения подобных материалов в крупногабаритных космических конструкциях необходимо создание точных математических моделей поведения этих приводов во время работы. Предложена математическая модель, описывающая изменение температуры и длины активного элемента привода. Результаты расчета по предложенной математической модели совпадают с экспериментальными данными. Разработанная математическая модель может стать основой для дальнейших исследований в этой области, а также проектирования более совершенных крупногабаритных космических конструкций

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лопатин А.В., Рутковская М.А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (Часть 1). *Вестник СибГАУ им. академика М.Ф. Решетнева*, 2007, № 2, с. 51–57. EDN: INMASX
- [2] Лопатин А.В., Рутковская М.А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (Часть 2). *Вестник СибГАУ им. академика М.Ф. Решетнева*, 2007, № 3, с. 78–81. EDN: IPIYZJ
- [3] Баничук Н.В., Карпов И.И., Климов Д.М. и др. Механика больших космических конструкций. М., Факториал, 1997.
- [4] Im E., Thomson M., Fang H., et al. Prospects of large deployable reflector antennas for a new generation of geostationary Doppler weather radar satellites. *AIAA SPACE*, 2007, art. 9917. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2007-9917>
- [5] Zheng F. Affordable system conceptual structure design of new deployable spaceborne antenna. *33rd AIAA Int. Communications Satellite Systems Conf. and Exhibition*, 2015, art. 4343. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2015-4343>
- [6] Hasanzade V., Sedighy S.H., Shahravi M. Compact deployable umbrella antenna design with optimum communication properties. *J. Spacecr. Rockets*, 2017, vol. 54, no. 3, pp. 782–788. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.A33710>
- [7] Footdale J.N., Banik J. System design study of a deployable reflector antenna with flexible shell segments. *3rd AIAA Spacecraft Structures Conf.*, 2016, art. 0698. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2016-0698>
- [8] Барвинок В.А., Богданович В.И., Грошев А.А. и др. Методика проектирования силовых приводов из материала с эффектом памяти формы для ракетно-космической техники. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2013, т. 15, № 6, с. 272–277. EDN: RSFDRJ

- [9] Likhachev V.A., Razov A.I., Cherniavsky A.G., et al. Truss mounting in space by shape memory alloys. *Proc. SMST-94*, 1994, pp. 245–248.
- [10] Мишустин И.В. Трехуровневая модель сплава с памятью формы и ее применение к описанию эффекта реверсивной памяти формы. *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2012, т. 18, № 4, с. 463–474. EDN: PTUYBZ
- [11] Schiedeck F., Hemsel T., Wallaschek J. The use of shape memory alloy wires in actuators. *Solid state Phenom.*, 2006, vol. 113, pp. 195–198.  
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.113.195>
- [12] De Laurentis K.J., Fisch A., Nikitzuk J., et al. Optimal design of shape memory alloy wire bundle actuators. *Proc. 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2002, vol. 3, pp. 2363–2368. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013585>
- [13] Kalra S., Bhattacharya B., Munjal B.S. Design of shape memory alloy actuated intelligent parabolic antenna for space applications. *Smart Mater. Struct.*, 2017, vol. 26, no. 9, art. 095015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa7468>
- [14] Зимин В.Н., Крылов А.В., Кувыркин Г.Н. и др. Привод из материала с эффектом памяти формы для раскрытия трансформируемой космической конструкции. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2021, № 4, с. 97–102. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2021-348-4-97-102>
- [15] Zimin V.N., Krylov A.V., Kuvyrkin G.N., et al. Development of a mathematical model of a force actuator for the opening of a space structure with transformable configuration. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2231, art. 012029.  
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2231/1/012029>
- [16] Зимин В.Н., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. и др. Моделирование температурного режима привода из материала с эффектом памяти формы. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2023, т. 19, № 4, с. 7–15.  
DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.19.4.001>
- [17] Riad A., Ainamany A., Benzohra M. The shape memory alloy actuator controlled by the Sun's radiation. *Mater. Res. Express*, 2017, vol. 4, no. 7, art. 075701.  
DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa75bb>
- [18] Liang C., Rogers C.A. Design of shape memory alloy actuators. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 1997, vol. 8, no. 4, pp. 303–313.  
DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389x9700800403>
- [19] Зимин В.Н., Крылов А.В., Филиппов В.С. и др. Привод из материала с эффектом памяти формы для трансформируемых космических конструкций. *Сибирский аэрокосмический журнал*, 2022, т. 23, № 1, с. 73–80. EDN: OUCZJI.  
DOI: <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-1-73-80>
- [20] Zimin V.N., Krylov F.V., Shakhverdov A.O. Development of the mathematical model of the force actuator for deployment of large-sized space structures. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1902, art. 012115.  
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012115>

[21] Zimin V.N., Zikun Z., Krylov A.V., et al. Mathematical modelling of the deployment of a large transformable space structure. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, art. 030002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5133168>

[22] Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Mathematical modeling of gas-solid two-phase flows: problems, achievements and perspectives (a review). *Mathematics*, 2023, vol. 11, iss. 15, art. 3290. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11153290>

[23] Кувыркин Г.Н., Родикова И.С. Оценка термомеханических свойств металлов и сплавов в зоне фазового превращения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2006, № 2 (21), с. 31–44. EDN: HUBVDH

**Зимин Владимир Николаевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Шахвердов Артур Олегович** — ассистент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Зимин В.Н., Шахвердов А.О. Моделирование работы привода из материала с эффектом памяти формы для раскрытия крупногабаритных космических конструкций. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 3 (120), с. 48–61. EDN: MRKEYY

**SIMULATION THE OPERATION OF AN ACTUATOR MADE OF A MATERIAL WITH A SHAPE MEMORY EFFECT FOR THE DEPLOYMENT OF LARGE-SIZED SPACE STRUCTURES**

V.N. Zimin

[zimin@bmstu.ru](mailto:zimin@bmstu.ru)

A.O. Shakhverdov

[shah@bmstu.ru](mailto:shah@bmstu.ru)

**BMSTU, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The article discusses the concept of an actuator based on a material with a thermomechanical shape memory effect for opening large-sized space structures. Such actuators are promising for use in large space structures. However, the actuators characteristics of these actuators are quite complex and nonlinear. For materials with the shape memory effect, the controlling effect is a change in temperature. In this regard, the aim of

**Keywords**

*Shape memory effect, mathematical simulation, experiment, actuator, thermal energy*

the work is to create a mathematical model, using which it is possible to accurately describe the changes in thermal energy and the length of the active element of the actuator. A series of experiments have been carried out to determine the deformation, force and temperature characteristics of wire active elements of various diameters. The article develops a mathematical model for calculating the temperature change of an active element when heated by passing direct current through it and changing the length in accordance with the dynamics of heating. The proposed model is based on the energy balance equation; phase transformations are taken into account using the state parameter. The results of calculations based on the mathematical model are in good agreement with experimental data. The developed mathematical model can become the basis for further research in this area, as well as be used to design more advanced large-sized space structures

Received 21.08.2024

Accepted 12.02.2025

© Author(s), 2025

---

*The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. 0705-2023-0012)*

## REFERENCES

- [1] Lopatin A.V., Rutkovskaya M.A. The review of designs of modern transformed space antennas (part 1). *Vestnik SibGAU im. akademika M.F. Reshetneva* [Vestnik SIBSAU. Aerospace Tehnologies and Control Systems], 2007, no. 2, pp. 51–57 (in Russ.). EDN: INMASX
- [2] Lopatin A.V., Rutkovskaya M.A. The review of designs of modern transformed space antennas (part 2). *Vestnik SibGAU im. akademika M.F. Reshetneva* [Vestnik SIBSAU. Aerospace Tehnologies and Control Systems], 2007, no. 3, pp. 78–81 (in Russ.). EDN: IPIYZJ
- [3] Banichuk N.V., Karpov I.I., Klimov D.M., et al. *Mekhanika bolshikh kosmicheskikh konstruktsiy* [The mechanics of large space structures]. Moscow, Faktorial Publ., 1997.
- [4] Im E., Thomson M., Fang H., et al. Prospects of large deployable reflector antennas for a new generation of geostationary Doppler weather radar satellites. *AIAA SPACE*, 2007, art. 9917. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2007-9917>
- [5] Zheng F. Affordable system conceptual structure design of new deployable spaceborne antenna. *33rd AIAA Int. Communications Satellite Systems Conf. and Exhibition*, 2015, art. 4343. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2015-4343>
- [6] Hasanzade V., Sedighy S.H., Shahravi M. Compact deployable umbrella antenna design with optimum communication properties. *J. Spacecr. Rockets*, 2017, vol. 54, no. 3, pp. 782–788. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.A33710>

- [7] Footdale J.N., Banik J. System design study of a deployable reflector antenna with flexible shell segments. *3rd AIAA Spacecraft Structures Conf.*, 2016, art. 0698.  
DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2016-0698>
- [8] Barvinok V.A., Bogdanovich V.I., Groshev A.A., et al. Design method of power drives from material shape memory effect for rocket and space technology. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 6, pp. 272–277 (in Russ.). EDN: RSFDRJ
- [9] Likhachev V.A., Razov A.I., Cherniavsky A.G., et al. Truss mounting in space by shape memory alloys. *Proc. SMST-94*, 1994, pp. 245–248.
- [10] Mishustin I.V. Three-level model of shape memory alloy with application to reversing shape memory effect simulation. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy* [Mechanics of Composite Materials and Structures], 2012, vol. 18, no. 4, pp. 463–474 (in Russ.). EDN: PTUYBZ
- [11] Schiedeck F., Hemsel T., Wallaschek J. The use of shape memory alloy wires in actuators. *Solid state Phenom.*, 2006, vol. 113, pp. 195–198.  
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.113.195>
- [12] De Laurentis K.J., Fisch A., Nikitzuk J., et al. Optimal design of shape memory alloy wire bundle actuators. *Proc. 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2002, vol. 3, pp. 2363–2368. DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013585>
- [13] Kalra S., Bhattacharya B., Munjal B.S. Design of shape memory alloy actuated intelligent parabolic antenna for space applications. *Smart Mater. Struct.*, 2017, vol. 26, no. 9, art. 095015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa7468>
- [14] Zimin V.N., Krylov A.V., Kuvyrkin G.N., et al. Actuator made of material with shape memory effect for deployment of transformable space structure. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2021, no. 4, pp. 97–102 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2021-348-4-97-102>
- [15] Zimin V.N., Krylov A.V., Kuvyrkin G.N., et al. Development of a mathematical model of a force actuator for the opening of a space structure with transformable configuration. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2022, vol. 2231, art. 012029.  
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2231/1/012029>
- [16] Zimin V.N., Kuvyrkin G.N., Savelyeva I.Yu., et al. Study of the temperature condition of an actuator made of a material with a shape memory effect. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2023, vol. 19, no. 4, pp. 7–15 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.19.4.001>
- [17] Riad A., Ainamany A., Benzohra M. The shape memory alloy actuator controlled by the Sun's radiation. *Mater. Res. Express*, 2017, vol. 4, no. 7, art. 075701.  
DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa75bb>
- [18] Liang C., Rogers C.A. Design of shape memory alloy actuators. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 1997, vol. 8, no. 4, pp. 303–313.  
DOI: <https://doi.org/10.1177/1045389x9700800403>

- [19] Zimin V.N., Krylov A.V., Filippov V.S., et al. Actuator made of a material with a shape memory effect for transformable space structures. *Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal* [Siberian Aerospace Journal], 2022, vol. 23, no. 1, pp. 73–80. EDN: OUCZJI. DOI: <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-1-73-80>
- [20] Zimin V.N., Krylov F.V., Shakhverdov A.O. Development of the mathematical model of the force actuator for deployment of large-sized space structures. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1902, art. 012115. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012115>
- [21] Zimin V.N., Zikun Z., Krylov A.V., et al. Mathematical modelling of the deployment of a large transformable space structure. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, art. 030002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5133168>
- [22] Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Mathematical modeling of gas-solid two-phase flows: problems, achievements and perspectives (a review). *Mathematics*, 2023, vol. 11, iss. 15, art. 3290. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11153290>
- [23] Kuvyrkin G.N., Rodikova I.S. Estimation of thermo-mechanical properties of metals and alloys in area of phase transformation. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2006, no. 2 (21), pp. 31–44 (in Russ.). EDN: HUBVDH

**Zimin V.N.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Spacecraft and Launch Vehicles, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Shakhverdov A.O.** — Assistant Lecturer, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Zimin V.N., Shakhverdov A.O. Simulation the operation of an actuator made of a material with a shape memory effect for the deployment of large-sized space structures. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 3 (120), pp. 48–61 (in Russ.). EDN: MRKEYY