

Journal Article

Calculations of actuator promising designs

Gavryushin, S.S., McMillan, A.J., Nikolaeva, A.S. and Podkopaeva, T.B.

This article is published by Bauman Moscow State Technical University. The definitive version of this article is available at
<http://izvuzmash.bmstu.ru/catalog/tpmachines/hidden/1201.html>

Recommended citation:

Gavryushin, S.S., McMillan, A.J., Nikolaeva, A.S. and Podkopaeva, T.B. (2015), 'Calculations of actuator promising designs', *Proceedings of Higher Educational Institutions, Machine Building*, No.8 (665), pp.73-78. ISSN 0536-1044

УДК.539.3

*С.С. Гаврюшин,
д.т.н., профессор кафедры «Прикладная механика», МГТУ им. Н.Э.Баумана*

*Alison McMillan
Ph.D., профессор кафедры «Engineering and Applied Physics», Glyndwr University*

*А.С. Николаева
аспирант,
кафедра «Прикладная механика», МГТУ им. Н.Э.Баумана*

*Т.Б. Подкопаева
ст. преподаватель кафедры «Прикладная механика», МГТУ им. Н.Э.Баумана*

Расчет перспективных конструкций актюаторов

Actuator promising designs calculation

Биметаллические актюаторы активно используются в электротехнических, регулирующих, предохранительных и других системах. Расчет актюаторов представляет собой актуальную задачу. Требуется создание новых конструкций актюаторов с улучшенными характеристиками. Для расчета актюатора сложной формы использован метод конечных элементов. Решение выполнено в среде конечно-элементного программного комплекса Abaqus. Результатами расчета являются упругая характеристика актюатора и его деформированная форма. Проведено сравнение результатов расчета для актюаторов различных размеров. Предложена новая конструкция термобиметаллического актюатора в виде осесимметричного пологого купола с язычком U-образной формы, прохлопывающая при достижении критической температуры. Слои биметалла у пологого купола и язычка расположены с противоположных сторон, что позволяет увеличить полезное перемещение характерных точек актюатора. Описанная конструкция актюатора и разработанная методика расчета рекомендуются для внедрения в практику расчета и проектирования актюаторной элементной базы.

Bimetallic actuators are widely used in electro-technical, adjusting, safety and other systems. Actuator calculation is a problem of current interest. It is required to develop new actuator designs with better performance. Finite element method was used for complex shape bimetallic actuator calculation. The algorithm is implemented in Abaqus finite element software. Actuator elastic characteristic and deformed shape are the results of the calculation. Calculation results for different actuators were compared. New design of thermo-bimetallic actuator consisting of a shallow dome and an U-shaped tongue with was described. It deforms with a "snap-through" when the heat is applied. The layers of shallow dome and tongue are placed on opposite sides, making possible the maximization of actuator

characteristic points displacement. The proposed actuator design and the developed calculation methodology can be recommended to the implementation to the calculation practice and actuator element base development.

Ключевые слова: актюатор, тонкостенная оболочка, большие перемещения, нелинейное деформирование, прохлопывание

Keywords: actuator, thin-walled shell, large deformation, nonlinear deformation, snap-through

Биметаллические актюаторы активно используются в электротехнических, регулирующих, предохранительных и других системах [1]. Для эффективной работы актюатор должен быть спроектирован так, чтобы совершать большие перемещения при невысоких затратах энергии, должен быть низко инерционным. Он должен перемещаться из одного состояния в другое с минимальной задержкой в промежуточных состояниях. Указанными свойствами обладают упругие оболочечные актюаторы с эффектом «прохлопывания»: у них два (или более) устойчивых состояния, переход от одного из которых к другому осуществляется при небольших внешних воздействиях. Анализ механического поведения таких актюаторов является сложной задачей, потому что небольшие изменения в нагрузке вызывают большие перемещения: поведение таких оболочек является нелинейным.

Целью данной статьи является разработка новой конструкции терробиметаллического актюатора.

Упругая характеристика осесимметричного актюатора показана на рис.1. При нагревании центральная точка актюатора перемещается согласно ветви упругой характеристики, ограниченной точкой А, далее происходит скачкообразное изменение деформированной формы (до точки В). При охлаждении центральная точка актюатора перемещается согласно ветви ВС упругой характеристики, в точке С происходит скачкообразное изменение деформированной формы (до точки D).

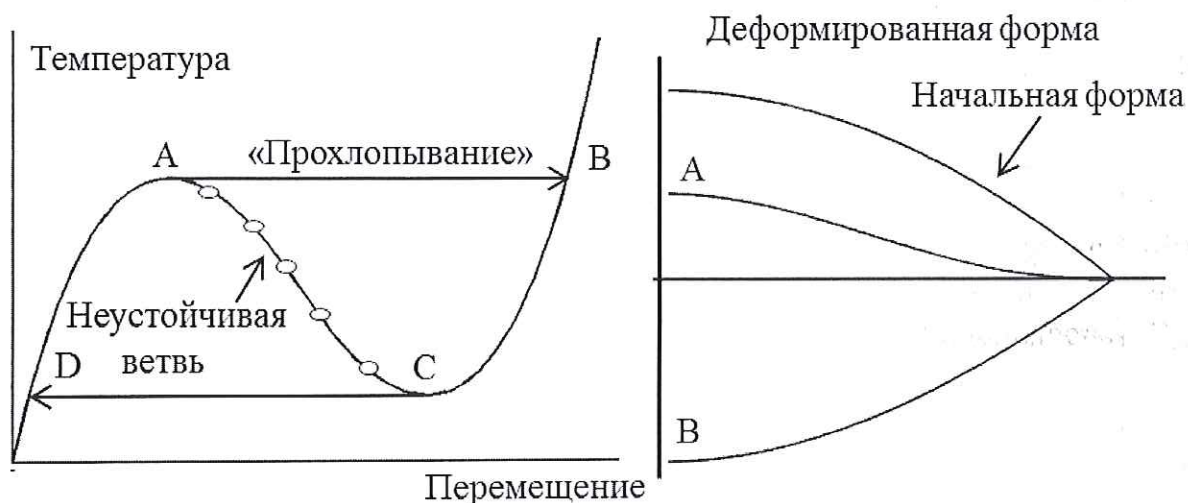


Рис. 1. Схематичное изображение дискретной упругой характеристики и деформированной формы осесимметричного актюатора

Теория нелинейного деформирования тонкостенных механических конструкций значительно развита. Нелинейное поведение тонкостенных оболочек с эффектом «прохлопывания» описывается в работах [2]-[3]. Недавние исследования [4]-[6] описывают численные алгоритмы для анализа нелинейного деформирования.

Данная работа посвящена расчету актюаторов, основанных на биметаллическом эффекте [6]. Такие актюаторы состоят из двух слоев, выполненных из материалов с различными коэффициентами линейного теплового расширения (КЛТР) и прочно соединенных друг с другом. Слой биметалла с большим КЛТР называют активным, с меньшим – пассивным. При нормальной температуре слои имеют одинаковую длину. При воздействии температуры слои удлиняются. Активный слой удлиняется интенсивнее, чем пассивный. Поэтому слой с большим КЛТР подвергается сжимающим усилиям, а слой с меньшим КЛТР – растягивающим. Возникающие в сечении биметалла напряжения распределяются неравномерно, возникают деформации и конструкция изгибается.

Алгоритм расчета математической модели осесимметричного актюатора дискретного действия в виде полусферической оболочки постоянной толщины, основанная на теории упругих тонкостенных оболочек Рейсснера, был реализован в виде авторской программы на языке С [7]. Для решения нелинейной задачи был использован метод смены подпространства управляющих параметров, разработанный Гаврюшиным С.С. [8] и метод продолжения по параметру, разработанный Валишвили Н.В. [9].

В данной статье представлена методика расчета биметаллического актюатора сложной формы (рис.2) с целью определения его упругой характеристики и деформированной формы. Актюатор состоит из двух слоев, характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики слоев биметаллического диска сложной формы

Номер слоя	1	2
Материал	24ХН	36Х
Толщина, мм	0.1	0.1
Модуль упругости, ГПа	190	150
Коэффициент Пуассона	0.3	0.3
КЛТР, * 10 ⁶ , 1/°С	18	1

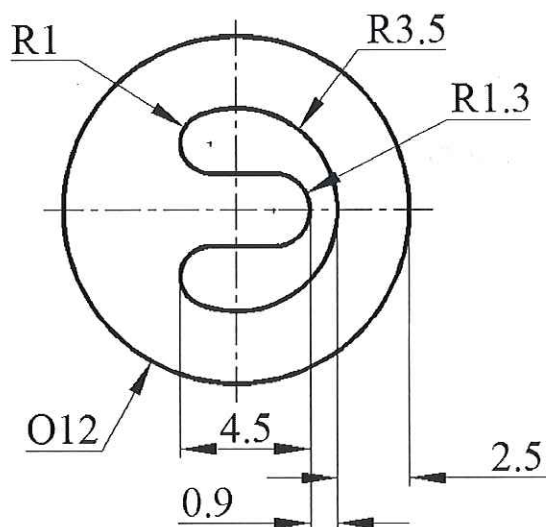


Рисунок 2. Геометрические размеры биметаллического диска сложной формы

Расчет выполнен с использованием метода конечных элементов [10] в среде конечно-элементного программного комплекса Abaqus. В силу симметрии рассматривалась половина актюатора. Граничные условия показаны на рис. 3.

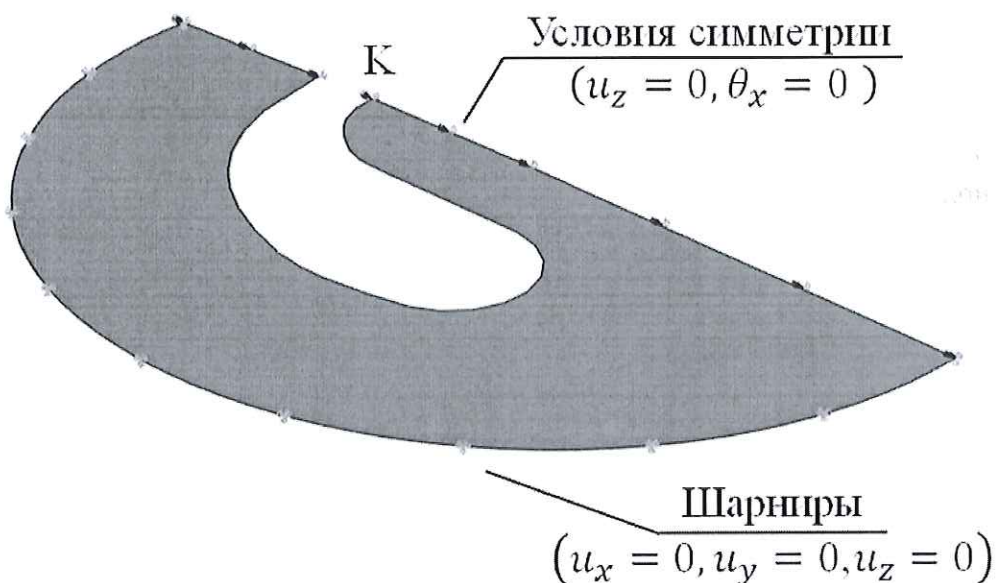


Рисунок 3. Математическая модель актюатора сложной формы

Модель была разбита на четырехузловые двухслойные оболочечные конечные элементы с шестью степенями свободы в каждом узле (рис. 4). Выбранные элементы позволяют учитывать влияние температуры на деформацию. Конечная модель состоит из 930 элементов и содержит 2967 узлов.

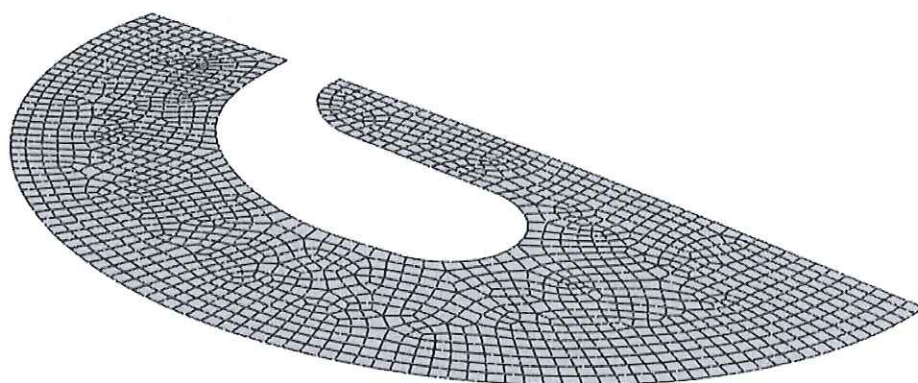


Рисунок 4. Конечно-элементная модель актюатора сложной формы

Нелинейная задача решалась итерационным методом Ньютона с линейризацией на каждом шаге. В качестве параметра продолжения была выбрана температура. В результате расчета получена упругая характеристика актюатора, то есть зависимость перемещения точки К язычка актюатора (эта точка совершает наибольшее перемещение) от температуры (рис. 5). Участок АВ соответствует «прохлопыванию» оболочки: при температуре 35°C перемещение точки К составляет 0.206 мм (рис. 6). При температуре 124°C язычок актюатора начинает перемещаться вверх, что сокращает полезное перемещение точки К.

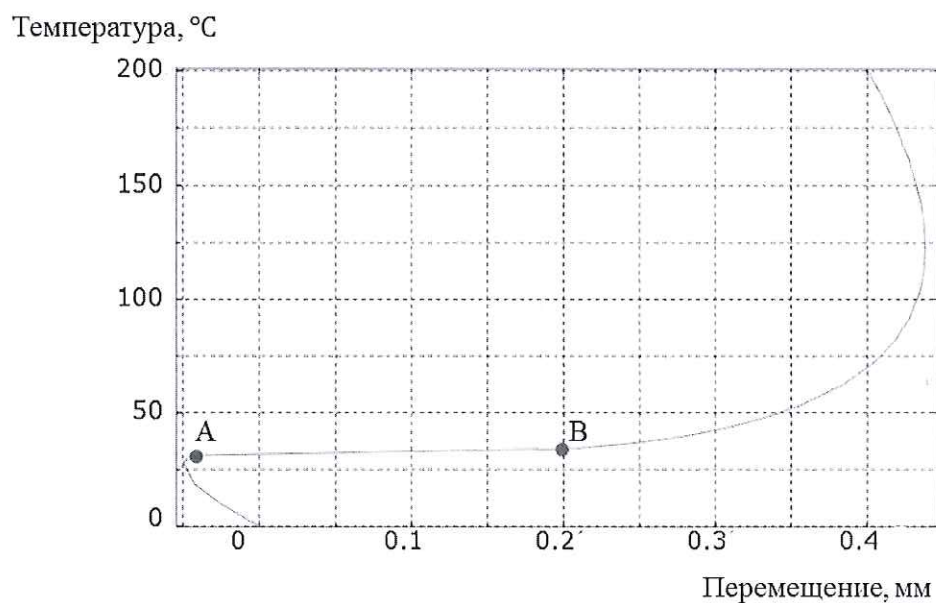


Рисунок 5. Упругая характеристика актюатора

Было произведено сравнение результатов расчета для актюаторов различной толщины. На рис. 7 приведен график зависимости наибольшего перемещения актюатора (перемещения точки К) от его толщины при температуре 80°C. Значение перемещения уменьшается с увеличением толщины оболочки.

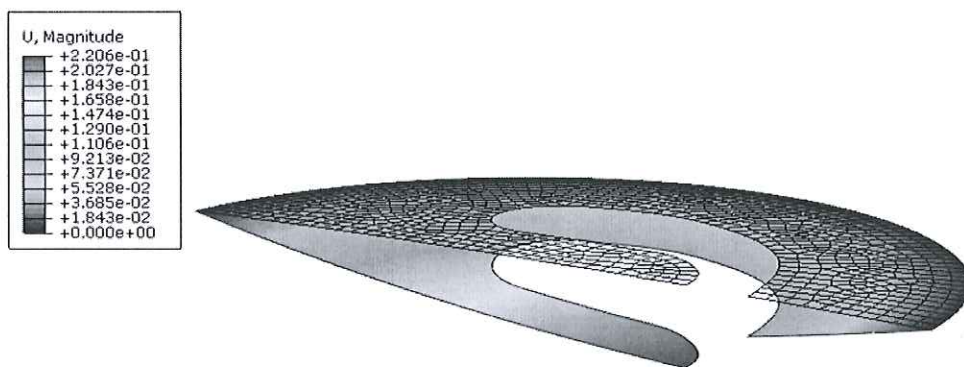


Рисунок 6. Цвето-графическая диаграмма перемещений при температуре 35°C

Таким образом, данная методика позволяет получать упругие характеристики и деформированные формы актюаторов сложной формы и может быть эффективно использована для анализа актюаторной элементной базы.

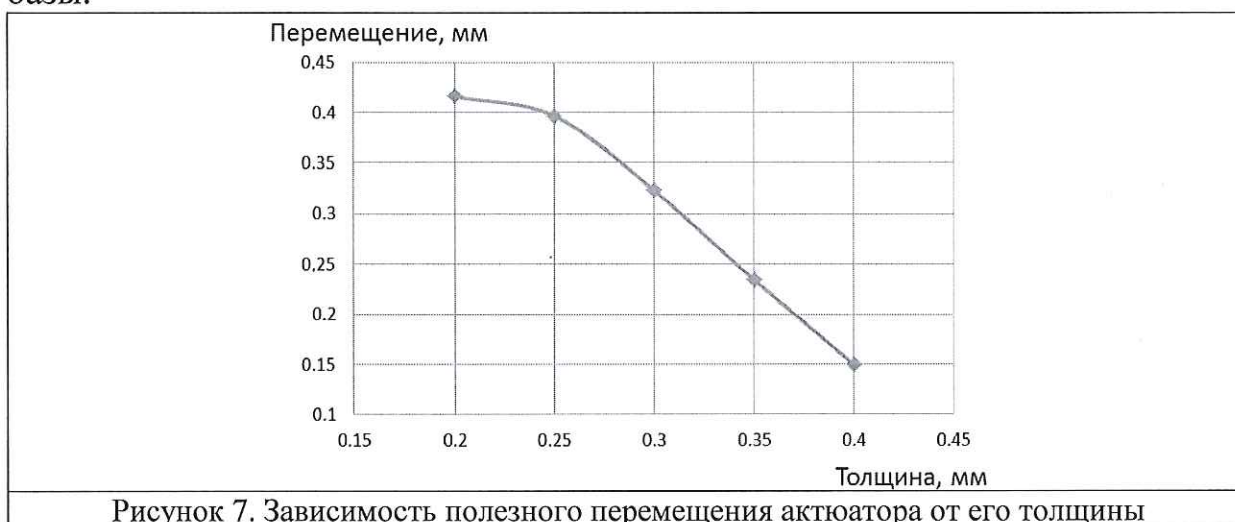


Рисунок 7. Зависимость полезного перемещения актюатора от его толщины

Устройства с терробиметаллическими осесимметричными актюаторами обладают рядом недостатков:

- ограниченная величина реализуемых перемещений (в том числе полезных перемещений, реализуемых при хлопке);
- нестабильная температура срабатывания из-за высоких периферийных напряжений, в отдельных случаях превышающих предел упругости;
- появление трещин на периферии актюатора при многократных переключениях;
- актюаторы со временем перестают обеспечивать требуемые контактные усилия;
- возникновение явления дребезга (многократные неконтролируемые замыкания и размыкания контактов).

Для устранения недостатков были предложены следующие способы:

- создание актюаторов с усложненной геометрией (сферические терробиметаллические диски [11,12] с выпуклой щелкающей лопастью с П-образным выступом и U-образным язычком);

- создание актюаторов с прорезями, предназначенными для снижения напряжений в локальных зонах диска и увеличения эффективного перемещения его характерных точек [13].

Предложена новая конструкция термобиметаллического актюатора с эффектом «прохлопывания», с помощью которой становится возможным варьировать величины полезного перемещения свободного края щелкающего язычка и контактного усилия, а также устранить явление дребезга. Эта конструкция состоит из двух сегментов, соединенных друг с другом сваркой или клепкой: осесимметричного пологого купола с отверстием и пластинки продолговатой формы (язычка). Активные слои сегментов расположены с противоположенных сторон, что позволяет существенно увеличить полезные перемещения характерных точек актюатора. Проведено сравнение работоспособности предложенной конструкции с существующими переключателями. Значения полезных перемещений характерных точек актюатора новой конструкции превышает значения полезных перемещений актюаторов существующих конструкций [13](рис.8).

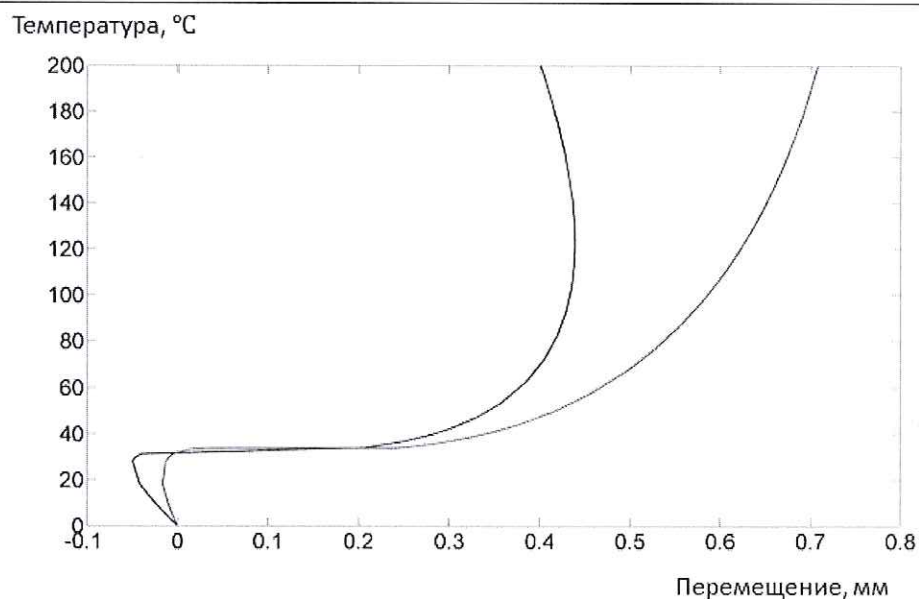


Рисунок 8. Сравнение упругих характеристик актюатора (синяя линия – существующая конструкция, красная линия – предложенная конструкция)

Деформированные формы конструкций показаны на рис.9. В предложенной конструкции значение полезного перемещения выше, так как перемещения купола и «язычка» складываются, а не вычитаются, как в существующей конструкции.

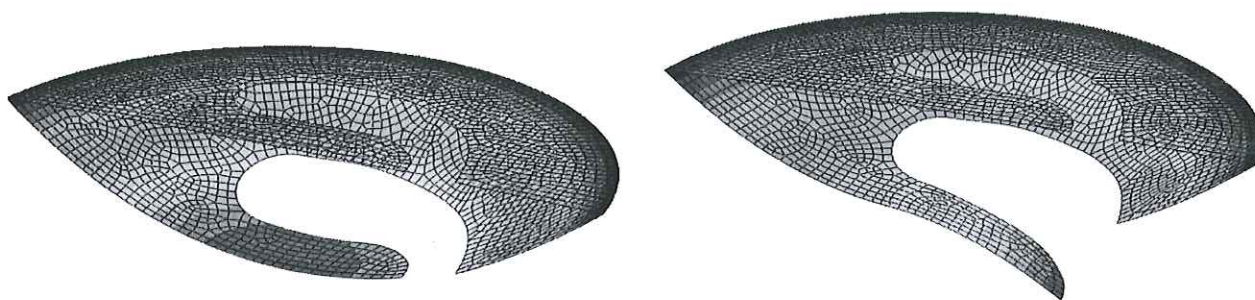


Рисунок 9. Деформированные формы актюатора (слева - существующая конструкция, справа – предложенная конструкция)

Выводы

1. Предложена методика, позволяющая получать упругие характеристики и деформированные формы актюаторов сложной формы.
2. Показано, что значение перемещения характерной точки актюатора уменьшается с увеличением толщины оболочки.
3. Предложена новая конструкция терробиметаллического актюатора
4. Показано, что значения полезных перемещений характерных точек актюатора новой конструкции превышают значения полезных перемещений актюаторов существующих конструкций

Таким образом, предложенная конструкция актюатора и разработанная методика расчета рекомендуются для внедрения в практику расчета и проектирования актюаторной элементной базы.

Список литературы

- [1] Андреев К.А., Цыганков В.Ю., 2011, Анализ конструкций зарубежных прототипов датчиков давления *Наука и образование: электронное научно-техническое издание* 09
- [2] Григолюк Э.И., Лопаницын Е.А. Конечные прогибы, устойчивость и закритическое поведение тонких пологих оболочек. Москва, МГТУ «МАМИ», 2004, 162 с.
- [3] Попов Е.П., 1948, Явление большого перескока в упругих системах и расчет пружинных контактных устройств *Инженерный сборник* 5 62-92
- [4] Bich DH, Tung HV, 2011, Non-linear axisymmetric response of functionally graded shallow spherical shells under uniform external pressure including temperature effects *Int. J. Nonlinear Mechanics* 46(9) 1195-1204
- [5] Li QS, Liu J, Tang J, 2003, Buckling of shallow spherical shells including the effects of transverse shear deformation *Int. J. Mechanical Sciences* 45(9) 1519-1529
- [6] Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. *Численный анализ элементов конструкций машин и приборов* Москва, МГТУ им. Н.Э.

- Баумана, 2014, 479 с.
- [7] Подкопаева А.С., 2012, Анализ процесса деформирования микроактюатора *Известия ВУЗов Машиностроение* С 10-14
 - [8] Гаврюшин С. С. Численное моделирование процессов нелинейного деформирования тонких упругих оболочек //Математическое моделирование и численные методы. – 2014. – №. 1. – С. 115-130.
 - [9] Валишвили Н.В. *Методы расчета оболочек вращения на ЭЦВМ* Москва, Машиностроение, 1976, 278 с.
 - [10] Агапов, В. П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. 248 с.
 - [11] А.с. 2067783 (Российская Федерация). Терморегулятор / П.В.Ксенофонов, А.В. Акулов, А.В. Винницкий // Открытия, Изобретения.-1996.-№ 28.
 - [12] А.с. 2069024 (Российская Федерация). Термобиметаллическое реле / М.П.Григорьевич // Открытия, Изобретения.-1996.-№ 31.
 - [13] Patent (US) 4160226. Snap acting thermally responsive actuators / John C. Taylor.-1979.