

УДК: 004.942

**Численно-экспериментальное исследование
деформирования и устойчивости цилиндрической оболочки ячеистой
структуры при осевом сжатии**

Нуштаев Д.В.^{1,*}, Жаворонок С.И.², Клышников К.Ю.³, Овчаренко Е.А.³

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва 125993, Россия*

²*Институт прикладной механики РАН, Ленинградский проспект, 7,
Москва, 125040, Россия*

³*Научно-исследовательский институт «Комплексных проблем
сердечно-сосудистых заболеваний» СО РАМН, Сосновый бульвар, 6, Кемерово,
650002, Россия*

*e-mail: nyshtaev.vfb@rambler.ru

Аннотация

Исследуется деформированное состояние, потеря устойчивости и закритическое поведение тонкостенной цилиндрической ячеистой оболочки с низкой радиальной и осевой интегральной жесткостью. Экспериментально определена зависимость осевой силы от продольной деформации, соответствующей сближению торцов оболочки при кинематическом нагружении. Определена критическая сила потери устойчивости исходной формы равновесного состояния оболочки с прямолинейной осью и предельная несущая способность ячеистой структуры. Методом конечных элементов построено численное решение задачи о докритическом и закритическом состоянии оболочки при учете нелинейного

поведения материала и контактного взаимодействия с сухим трением ячеек, входящих в соприкосновение при деформировании. Проанализировано развитие пластических и фазово – структурных деформаций в ячейках, изучено влияние трения в областях контакта на величину критической силы потери устойчивости. Получено вполне удовлетворительное соответствие результатов численного решения задачи и экспериментальных данных.

Результаты работы имеют прикладное значение как для разработки методов расчета конструктивных элементов ячеистой структуры при контактном взаимодействии с трением для упруго-пластических материалов и материалов с более сложным законом состояния (например, сплавы с эффектом памяти формы), расчета цилиндрических ячеистых оболочек малой жесткости (специальных элементов энергоустановок аэрокосмической техники), а также элементов медицинской техники (коронарных и иных стентов).

Ключевые слова: оболочка цилиндрическая, структура ячеистая, пластичность, фазово–структурные деформации, контактное взаимодействие, трение сухое, устойчивость, метод конечных элементов.

Введение

Тонкостенные каркасные периодические структуры на уровне элементарной ячейки представляют собой стержневые системы. Классические сетчатые оболочки, применяемые в аэрокосмической отрасли, образованы жесткими ячейками [1], однако в некоторых случаях стержневая система может быть статически определима, и при образовании пластического шарнира в ячейке конструкция становится механизмом. Данное свойство позволяет создавать конвертируемые

конструкции с широким диапазоном изменения размеров, а в случае изготовления из материалов, обладающих эффектом памяти формы [2] либо сверхупругости [3] – и системы с обратимой деформацией, обладающие гистерезисной характеристикой. Практический расчет подобных механических систем в случае простого деформирования (например, однородное радиальное расширение – обжатие ячеистой цилиндрической оболочки) допускает аналитические решения [4], однако при сложном нагружении и неоднородной глобальной деформации конструкции существенно нелинейное поведение системы (пластическое деформирование либо фазово-структурные переходы в материале, большие перемещения) приводит к необходимости применения численных методов. В некоторых случаях возникновение контактного взаимодействия с сухим трением смежных ячеек, входящих в соприкосновение в процессе деформирования, дополнительно усложняет поведение системы настолько, что использование стандартных алгоритмов решения задачи, входящих в состав программных комплексов на базе метода конечных элементов, может быть связано с неудовлетворительной сходимостью решения. Ситуация такого рода может возникнуть, в частности, при глобальной потере устойчивости тонкостенной ячеистой структуры. При необходимости учета взаимодействия структуры с внешней средой численное решение задачи еще более усложняется.

Одним из примеров применения каркасированных цилиндрических оболочек малой жесткости в медицине являются коронарные и сосудистые стенты, армирующие стенки сосуда с поддержанием нормального физиологического просвета. Основной причиной применения ячеистой структуры в данном случае

является необходимость раскрытия стента в сосуде с увеличением диаметра от транспортного до рабочего; применяются различные механизмы раскрытия – баллонный [5], где оболочка расширяется давлением наддува, приложенным ко внутренней поверхности со стороны специального баллона, при этом необратимая деформация развивается за счет пластичности, или безбаллонный [6] – развертывание за счет эффекта сверхупругости при применении в качестве конструкционного материала никелида титана. В рабочем состоянии стент нагружен главным образом внешним контактным давлением со стороны сосуда. При движении человека происходит деформирование сосуда, что создаёт дополнительную нагрузку, в том числе и осевую [7]. Известно, что осевая жесткость сосудов достаточно невелика и возрастает локально в месте установки стента, что, в свою очередь, увеличивает нагрузку и может привести к большим изгибным деформациям и разрушению стента [8, 9].

Проведение натуральных экспериментальных исследований стентированного участка весьма затруднительно, и численное решение задачи становится необходимым как для планирования и подготовки физического эксперимента, так и для исследования влияния конструктивных параметров стента на его функциональные свойства. При этом требуется верификация модели, положенной в основу численного решения, на базе некоторой системы простых экспериментов, не требующих длительной подготовки.

Ниже приводятся результаты решения задачи о деформированном состоянии цилиндрической ячеистой оболочки стента при осевом сжатии с развивающейся потерей устойчивости прямолинейного равновесного состояния, локальными

пластическими либо фазовыми деформациями и нестационарным контактным взаимодействием между ячейками при наличии сил сухого трения. Выбор схемы нагружения продиктован простотой его реализации в лабораторных условиях и возможностью оценки влияния нескольких факторов на характер деформирования исследуемой структуры. Точность модели, положенной в основу численного решения, и выбор параметров алгоритма обоснованы сравнением численных результатов с экспериментальными данными. Предложена методика решения практических задач об осевом сжатии конструкций такого типа в программном комплексе SIMULIA Abaqus [10]. Основные результаты могут быть использованы для моделирования более сложных способов нагружения, включая контактное взаимодействие структуры с внешней средой.

Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований была создана опытная партия баллонно-расширяемых стентов. Исходный материал цилиндрических трубок – кобальт-хромовый сплав марки L-605 [11]. Механические характеристики сплава представлены в таблице 1. Образцы образованы системой открытых ячеек с несимметричным расположением перемычек. Общий вид изготовленных образцов показан на рис. 1, а их основные геометрические характеристики приведены в таблице 2.

Таблица 1

Свойства материала L-605

Модуль Юнга, МПа	243 000
Коэффициента Пуассона	0,33
Предел текучести, МПа	500
Предел прочности, МПа	900
Плотность, кг /м ³	9230

Таблица 2

Геометрические характеристики

Длина стента, мм	12,55
Внешний диаметр, мм	1,12
Внутренний диаметр, мм	0,94
Количество секций в окружном направлении	10
Количество секций в продольном направлении	12



Рис. 1 Общий вид образцов стентов

Натурные испытания проводились на одноколонной испытательной машине Instron 3345. Для фиксации образцов созданы две оправки цилиндрической формы. Оправка №1, имеющая посадочное отверстие для установки образца, жестко связана с неактивной траверсой испытательной машины, оправка №2 – с активной траверсой (скоростью вертикального смещения активной траверсы – 0,2 мм\мин.). Испытываемый образец устанавливается в вертикальном положении в посадочное

отверстие оправки №1 на глубину одной ячейки (Рис. 3). Установка производилась с натягом, вследствие чего радиальные и осевые перемещения точек внешней поверхности торцевой секции ограничены. На другом торце обеспечивается условие свободного опирания (Рис. 2). Передача усилий осуществляется за счет контактного взаимодействия верхнего торца с горизонтальной плоскостью оправки №2. Общая схема эксперимента представлена на рис. 4.



Рис. 2 Positionирование верхнего торца образца относительно оправки №2

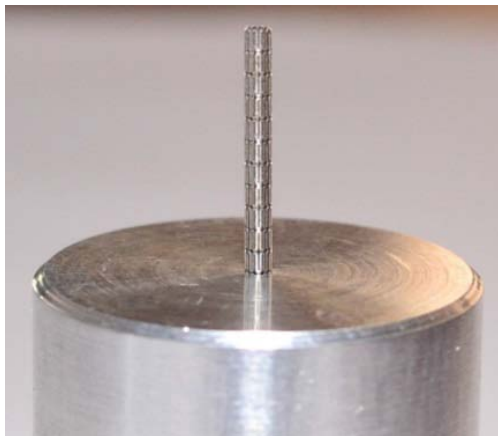


Рис. 3 Установка нижней секции образца в посадочное отверстие оправки №1

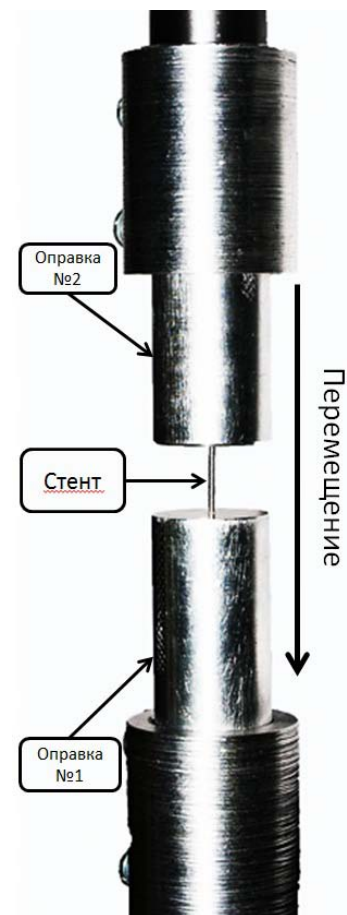


Рис. 4 Схема эксперимента

По результатам эксперимента построены диаграммы деформирования образцов в системе координат «Сила – Перемещение активной траверсы». Проведена статистическая обработка экспериментальных данных. Определено среднее арифметическое экспериментальных данных и найдены границы доверительного

интервала эксперимента с принятой доверительной вероятностью 95% (Рис. 5). Среднее арифметическое значение предельной несущей способности конструкции составило 25,9 Н с доверительным интервалом 3,17 Н.

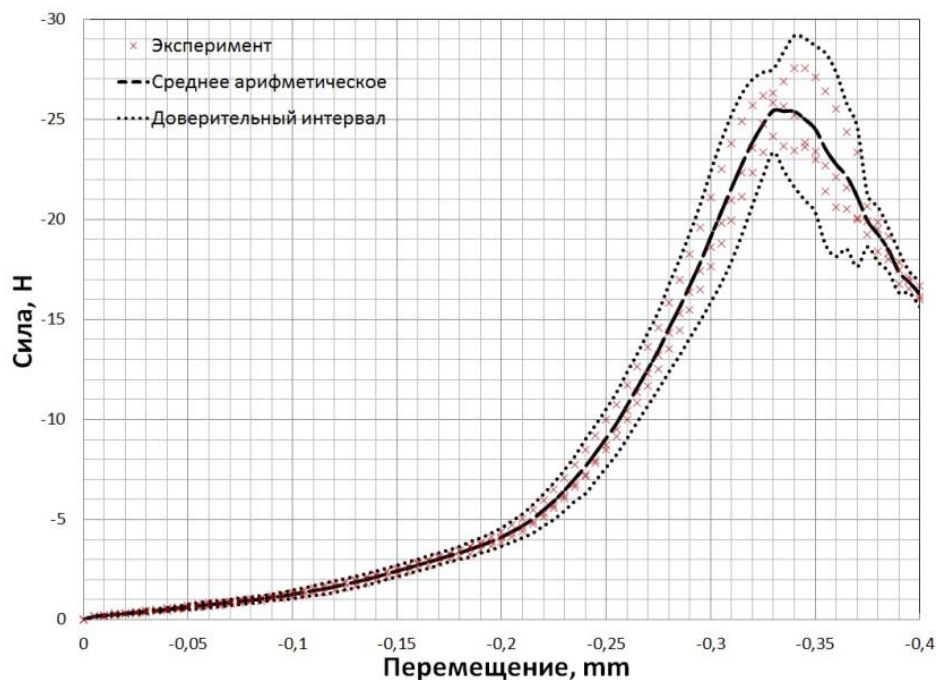


Рис. 5 Экспериментальные кривые равновесных состояний.

Представлены экспериментальные данные, среднее арифметическое значений и границы доверительного интервала

Численное моделирование

Конечно-элементная модель цилиндрической ячеистой оболочки в трехмерной постановке создана на базе 8-ми узловых призматических элементов с первым порядком интерполяции и редуцированной схемой интегрирования – C3D8R [12]. Представленная на рис. 6 конечно-элементная модель использована без изменений на всех этапах решения поставленной задачи.

Решение задачи об устойчивости в линеаризованной постановке

На начальном этапе рассматривалась линеаризованная постановка задачи устойчивости – задача на собственные значения. Линеаризованная постановка используется для определения точки бифуркации и форм потери устойчивости с учетом выполнения предположения о линейном оклике системы. Таким образом, расчет производится с использованием упругой модели материала в геометрически линейной постановке и отсутствием контактных взаимодействий.

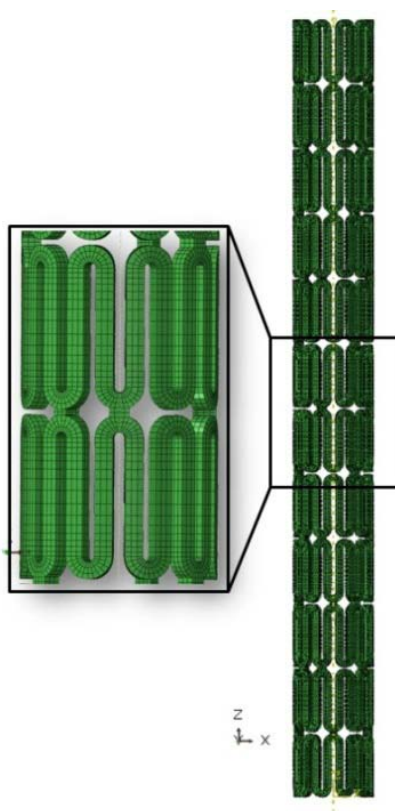


Рис. 6 Конечно-элементная модель

Общее количество конечных элементов – 60300

На рис. 7 приведена расчетная схема нагружения линеаризованной постановки задачи. На узлы торцевых секций наложено кинематическое ограничение по всем степеням свободы. Перемещения данных узлов определяются перемещениями двух референсных точек.

В рамках данной постановки граничные условия и нагрузки применяются к референсным точкам и через созданное кинематическое ограничение передаются на узлы торцевых секций. Для точки №1 запрещено движение по всем степеням свободы:

$$U_i = 0, i = 1...6. \quad (1)$$

Движение референсной точки №2 ограничено по всем степеням свободы, кроме вертикального перемещения U_3 вдоль оси z . Также к этой точке прикладывается продольная сосредоточенная сила F_3 .

$$U_i = 0, i = 1,2,4,5,6; F_3 = -1 \quad (2)$$

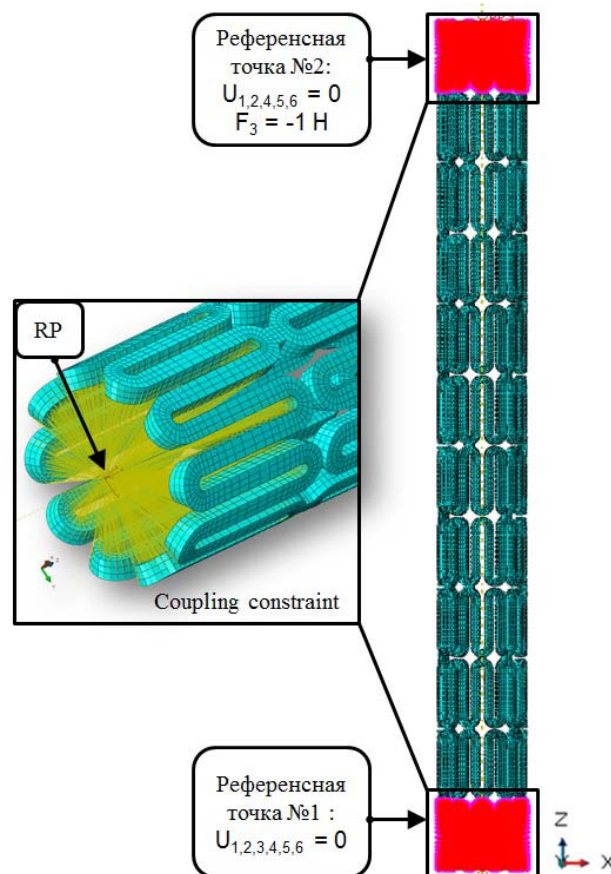


Рис. 7 Расчетная схема линейризованной постановки. Определение кинематических связей между узлами торцевых секций и референсных точек.

Задание граничных условий через референсные точки.

На рис. 8 показаны первые три собственные формы и приведены соответствующие им собственные значения: $\lambda_1 = 5,52$; $\lambda_2 = 5,59$; $\lambda_3 = 7,55$. Характер собственных форм, полученных при решении линеаризованной задачи, качественно соответствует виду деформированного состояния стентов, наблюдаемому при проведении эксперимента. Тем не менее, для вычисления предельной несущей способности требуется исследование поведения конструкции с учетом возможного упруго-пластического поведения материала и контактных взаимодействий между ячейками оболочки в нелинейной постановке задачи с учетом больших перемещений точек оболочки.



Рис. 8 Визуализация результатов, полученных в рамках линеаризованной постановки. Показаны первые три формы колебаний и собственные значения

Решение задачи о закритическом деформировании ячеистой оболочки в нелинейной постановке

Современные программные комплексы позволяют получать решение задач об устойчивости и закритическом состоянии в нелинейной постановке на базе метода Ньютона – Рафсона, модифицированного метода Рикса, либо на основе явных методов динамики. Применительно к данной задаче, при задании возможных контактных взаимодействий между ячейками оболочки, использование метода Ньютона-Рафсона и модифицированного метода Рикса неэффективно, а в некоторых расчетных случаях – невозможно. Это объясняется существенными проблемами численного характера, возникающими при проведении анализа закритического поведения конструкции с использованием данных подходов.

Для построения нелинейного решения был выбран метод явной динамики, реализованный в рамках алгоритма Abaqus\Explicit [13]. Выбранный метод основан на явной схеме интегрирования уравнений движения во времени. Производится решение уравнения динамики с диагональной матрицей масс элементов:

$$\ddot{u} = M^{-1}(P - I) \quad (3)$$

Здесь \ddot{u} – ускорения узлов модели; M – диагональная матрица масс элементов; P – внешние силы; I – внутренние силы.

Метод является условно устойчивым. Предел устойчивости ограничен размером приращения временной переменной, которое равно времени прохождения волны упругой деформации через один конечный элемент:

$$\Delta t = L^e \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (4)$$

Здесь L^e - текущий характерный размер элемента; ρ - плотность материала; E – модуль Юнга.

На рис. 9 представлена общая расчетная схема задачи. Для полного удовлетворения экспериментальным условиям нагружения в расчетную область введены геометрические модели оправок, моделируемые как абсолютно жесткие трехмерные тела. Передача нагрузок и наложение кинематических связей осуществляется через контакт в системе «оправка-образец», что соответствует условиям нагружения при экспериментальном исследовании.

Оправка №1 жестко зафиксирована по всем степеням свободы:

$$U_i = 0, \quad i = 1...6. \quad (5)$$

Движение оправки №2 ограничено по всем степеням свободы, кроме вертикального перемещения вдоль оси $Oz - U_3$. Задается кинематическое нагружение – вертикальное перемещение оправки №2:

$$U_i = 0, \quad i = 1, 2, 4, 5, 6; \quad U_3 = -0,5 \text{ мм} \quad (6)$$

Поведение материала описывается упруго – пластической моделью с изотропным упрочнением с условием текучести Мизеса, реализованной в варианте [14].

Моделирование квазистатических задач с использованием метода явной динамики в реальных временных рамках не представляется возможным ввиду небольшого размера приращения по времени и, как следствие, больших временных

затрат на проведение анализа. В рассматриваемом нашем случае размер явного шага по времени составляет – $\Delta t \approx 10^{-9}$.

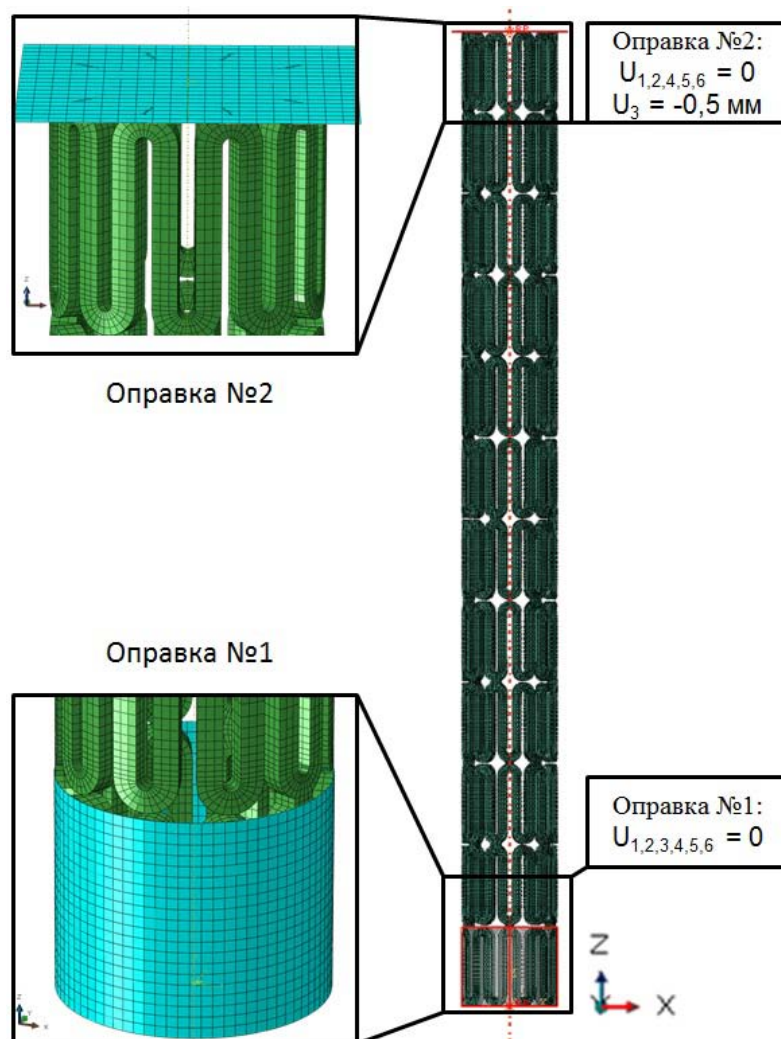


Рис. 9. Расчетная схема задачи в нелинейной постановке. Установка нижней торцевой секции образца в абсолютно жесткую оправку №1 с нулевым зазором. Контактрование верхней торцевой секции образца с абсолютно жесткой поверхностью оправки №2

Для получения экономичного численного решения производилось искусственное увеличение скорости нагружения за счёт уменьшения общего времени моделирования. Однако, при больших скоростях нагружения инерционная составляющая нагрузки становится доминирующей. Для получения

квазистатического отклика системы необходимо обеспечение выполнения следующего соотношения на всём протяжении расчета [15]:

$$\frac{T}{W} \leq 0,05 \quad (7)$$

Здесь W - потенциальная энергия модели; T - кинетическая энергия модели.

Для определения скорости нагружения, удовлетворяющей условию квазистатического отклика (7), был проведен частотный анализ. На основе первой собственной частоты ($f = 2587.6$ Гц) вычислен период колебаний конструкции ($t = 3,86 \times 10^{-4}$ сек) по первой собственной форме. Исходя из размера максимального вертикального перемещения оправки №2 и найденного периода колебаний, величина скорости нагружения составила 1,3 м\с. Полученная скорость нагружения обеспечивает решение задачи в квазистатической постановке с минимальными временными затратами на проведение анализа.

В модели определены возможные контактные взаимодействия между всеми ячейками образца с использованием технологии автоматического поиска контактных пар [14]. Для обеспечения реализации условий контактных взаимодействий был использован метод штрафа с формированием контактной жесткости на основе жесткости контактирующих элементов [16]. Учтено фрикционное взаимодействие контактирующих поверхностей в рамках модели трения Кулона с наличием начального «упругого» сдвига [17]. Проскальзывание контактирующих поверхностей друг относительно друга возможно при превышении величины эквивалентных касательных напряжений τ_{eq} критического значения τ_{crit} , определяемого формулой (8) :

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (8)$$

где μ – коэффициент трения, p – контактное давление.

Для окончательной постановки задачи была проведена серия тестовых расчетов. Оценивалась степень влияния на результаты моделирования учета геометрической нелинейности, упруго-пластической модели материала, контактных взаимодействий с различными коэффициентами трения. В таблице 3 приведено описание расчетных случаев и полученная на их основе величина критической нагрузки. В доверительный интервал экспериментальных данных попали результаты, полученные в РС №5, 6, 7.

На основе результатов проведенного исследования были сформированы окончательные требования к расчетной модели: учет геометрической нелинейности; учет нелинейного поведения материала; учет фрикционного контактного взаимодействия ячеек образца с коэффициентом трения - $\mu = 0,2...0,3$.

На основе разработанной расчетной методики была проведена серия тестов по оценке осевой жесткости самораскрывающихся стентов, выполненных из сплава с памятью формы. В сплавах с памятью формы при прохождении фазово – структурных превращений в режиме изотермического нагружения с происходит накопление обратимой фазово – структурной деформации [3]. Активация прямого фазового превращения происходит при достижении действующих пороговых напряжений – σ_s^1 . Полный переход аустенита в мартенсит завершится при величине напряжений – σ_f^1 . При разгрузке падение напряжений до σ_s^2 вызывает обратное

фазовое превращение, которое заканчивается при σ_f^2 . Характер поведения сплавов с памятью формы при изотермическом нагружении схематично показан на рис. 10.

Таблица 3

Результаты тестирования расчетной модели

P\C		1	2	3	4	5	6	7	8
Учет геометрической нелинейности		-	-	+	+	+	+	+	+
Учет упруго-пластических свойств материала		-	+	-	+	+	+	+	+
Контакт, Коэффициент трения	0								
	0,2					+			
	0,25		+	+			+		
	0,3							+	
	0,5								+
Сила потери устойчивости, Н		6,14	83,51	54,60	6,71	25,63	26,46	27,46	30,61
Эксперимент		25,9 ± 3,17 Н							
Линеаризованная постановка		5,52 Н							

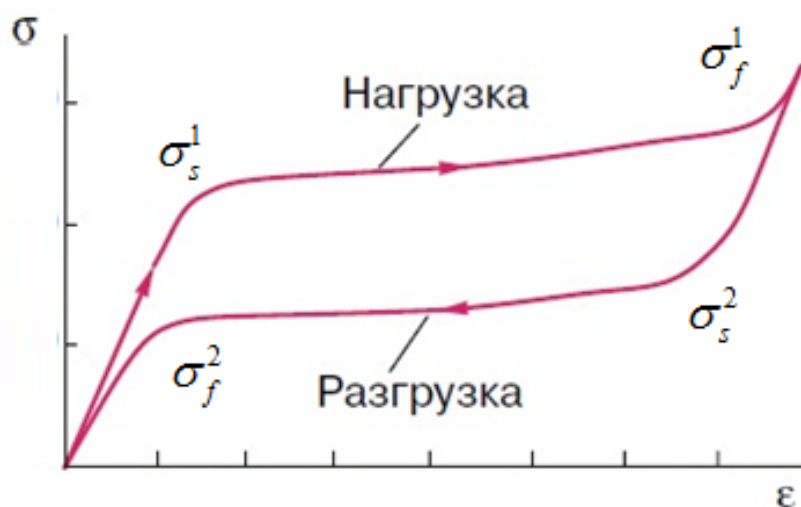


Рис.10. Характер поведения сплавов с памятью формы при изотермическом нагружении

Для описания подобного поведения материала использовалась модель сверхупругости, основанная на теории [3, 18] и реализованная в виде дополнительного модуля к основному коду SIMULIA Abaqus [19]. Свойства материала приведены в таблице 4.

Таблица 4

Параметры модели сверхупругого поведения СПФ

Обозначение	Описание	Значение
E_A	Модуль Юнга аустенита	70 000 МПа
E_M	Модуль Юнга мартенсита	30 000 МПа
ν	Коэффициента Пуассона	0,33
σ_s^1	Напряжение начала прямого превращения	489 МПа
σ_f^1	Напряжение окончания прямого превращения	572 МПа
σ_s^2	Напряжение начала обратного превращения	230 МПа
σ_f^2	Напряжение окончания обратного превращения	147 МПа

Основные результаты

В результате проведения нелинейного анализа осевого сжатия стентов с использованием метода явной динамики произведена оценка напряженно-деформированного состояния конструкции, построены кривые равновесных состояний и получены значения предельных нагрузок в закритическом состоянии.

Кривая равновесных состояний, полученная с использованием коэффициента трения $\mu = 0,2$, представлена на рис. 10. На начальном этапе наблюдается упругое деформирование стента с линейным увеличением осевой жесткости. Точка А соответствует началу образования необратимых пластических деформаций. Происходит локализация пластических деформаций в перемычках стента с

образованием пластических шарниров (Рис. 12). После точки В наблюдается резкое увеличение осевой жесткости стента. Это объясняется полной выработкой начального осевого зазора между ячейками и началом их контактирования. Из анализа характера контактных взаимодействий, представленного на рис. 13, следует, что на данном этапе стент работает, как замкнутая оболочка. В точке С происходит потеря устойчивости с выходом ячеек стента из контакта и последующим падением несущей способности конструкции (Рис. 14). При этом наблюдается значительный рост кинетической энергии модели.

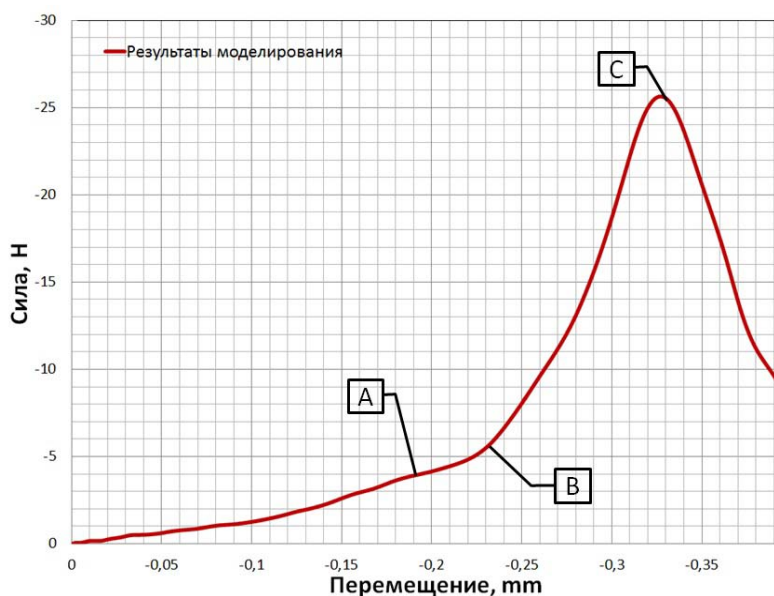


Рис. 11. Кривая равновесных состояний ($\mu = 0,2$)

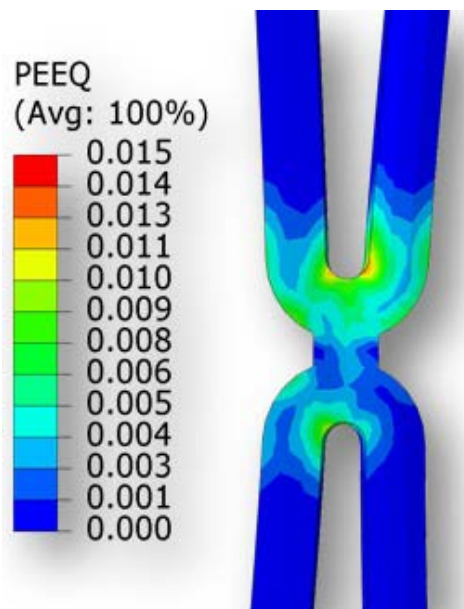


Рис. 12. Локализация пластических деформаций в перемычках стента.

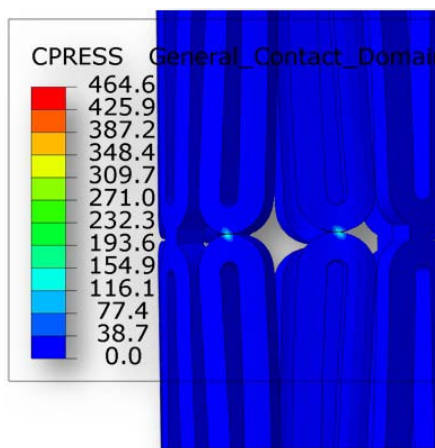


Рис. 13. Контактное давление в ячейках центральной секции стента (точка В), МПа

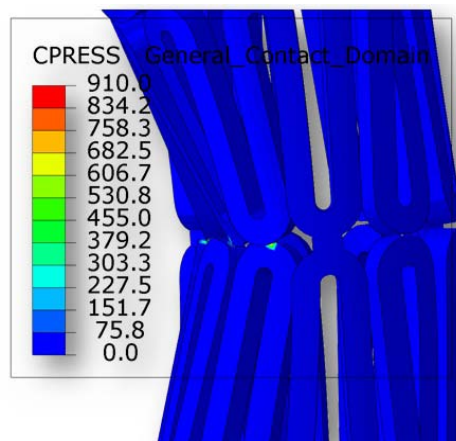


Рис. 14. Контактное давление в ячейках стента при выходе из контакта (точка С), МПа

Выявлено значительное влияние коэффициента трения на величину предельной несущей способности стента (Рис. 15).

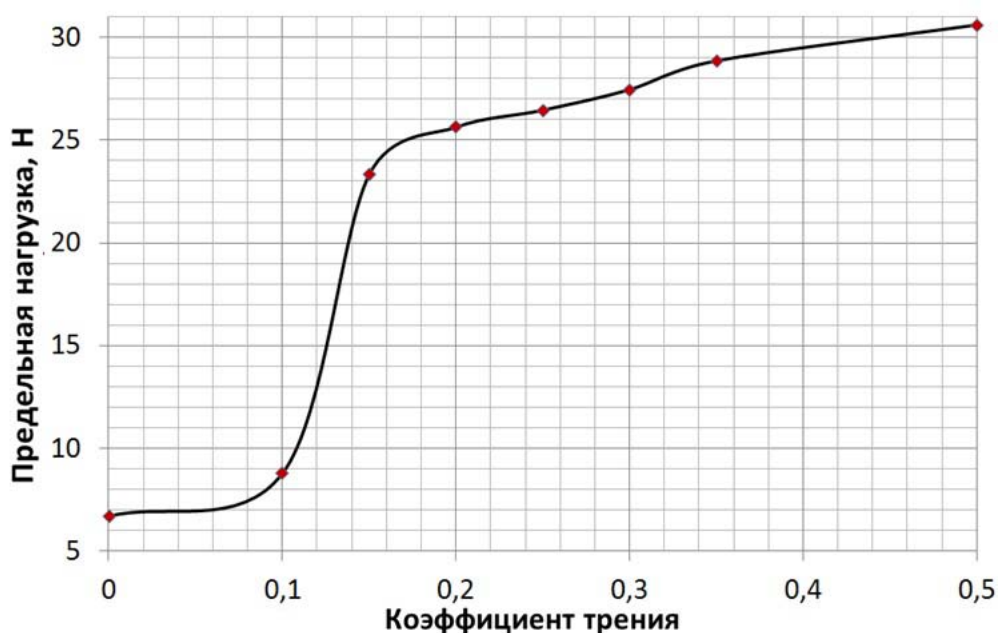


Рис. 15. Зависимость предельной нагрузки от величины коэффициента трения между ячейками стента

Использование бесфрикционной модели контакта или задание небольших значений коэффициента трения ($\mu < 0,15$) приводит к более раннему выходу ячеек

стента из контакта и, как следствие, к заниженному значению предельной нагрузки по сравнению с наблюдаемой в эксперименте.

Полученная в рамках расчета кривая равновесных состояний хорошо согласуется с экспериментальными данными вплоть до потери устойчивости конструкции. В закритической области наблюдается выход расчетной кривой из доверительного интервала экспериментальных данных.

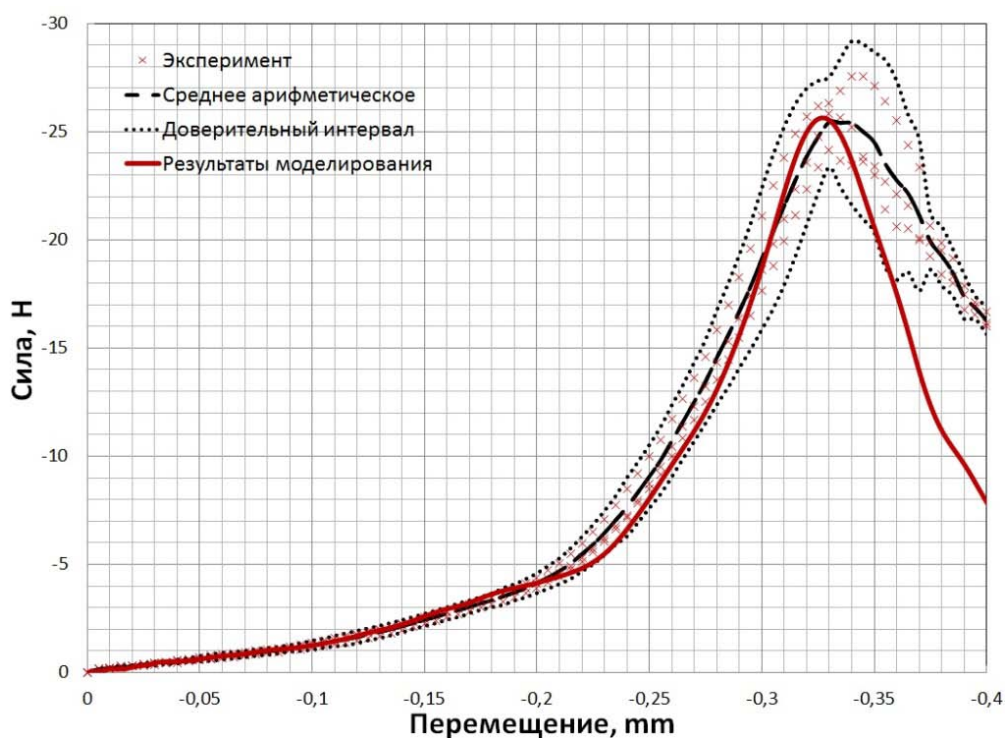


Рис. 16. Кривые равновесных состояний. Приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

На рисунке 17 приведено сравнение форм потери устойчивости образца, полученных в рамках численного анализа и эксперимента. Получено хорошее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными. Стоит отметить, что при увеличении коэффициента трения ($\mu = 0,25$) реализуется более высокоэнергетическая форма потери устойчивости с образованием двух полуволн.

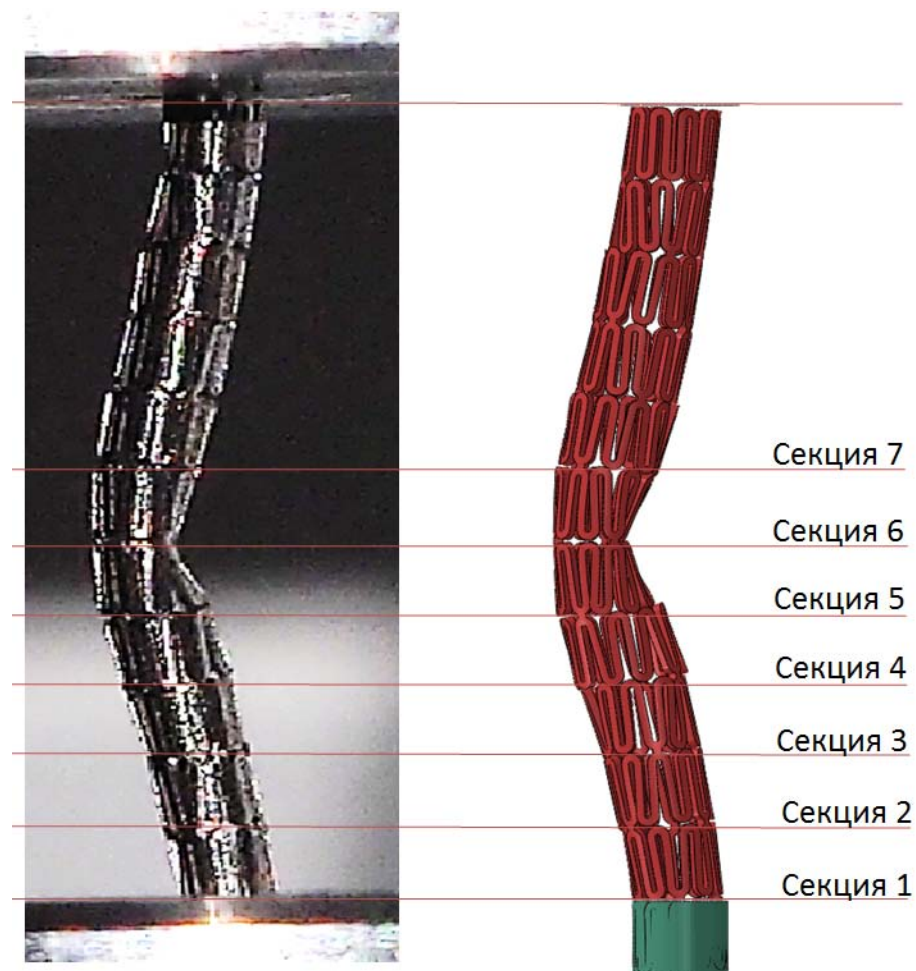


Рис. 17. Сравнение форм потери устойчивости стента

При схожем дизайне ячеек для стентов на основе сплавов с памятью формы была получена аналогичная форма кривых равновесных состояний, как и для случая упруго – пластической модели поведения материала (Рис. 18). Найдена предельная несущая способность конструкции – 12,8 Н.

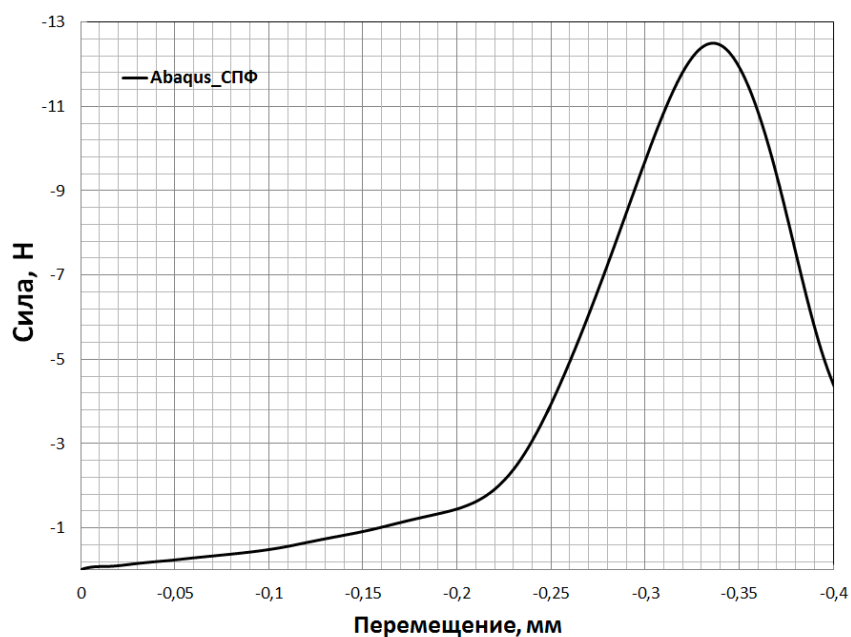


Рис. 18. Кривая равновесных состояний для стента на основе СПФ

В докритическом состоянии область прохождения прямого мартенситного превращения локализована в центральных перемычках, о чем свидетельствует параметр мартенситной фазы сплава (Рис. 19) и накопленная фазовая деформация (Рис. 20). Закритическое поведение характеризуется частичным распространением области фазовых превращений.

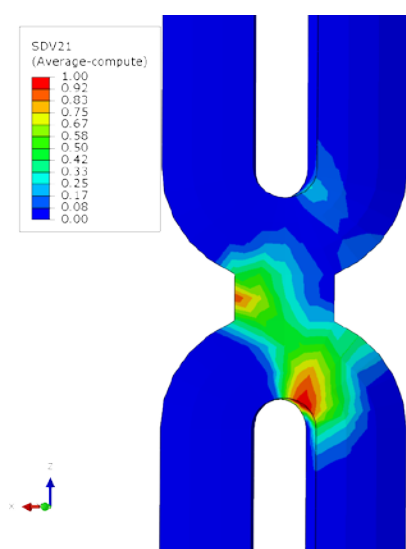


Рис. 19. Параметр мартенситной фазы

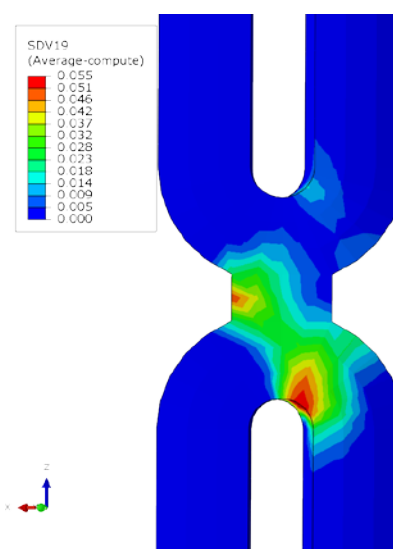


Рис. 20. Фазово – структурная деформация

Заключение

Рассмотрен процесс деформирования цилиндрического стента при заданной скорости сближения торцов, допускающий экспериментальную реализацию на стандартных разрывных машинах и не приводящий к катастрофическому характеру потери устойчивости - «хлопком». Последнее особо важно для малоразмерных тонкостенных элементов, в том числе и для стентов. Численное моделирование осуществлено стандартными средствами программного комплекса SIMULIA Abaqus в рамках модели упруго-пластического поведения материала в трехмерной постановке задачи. Показано, что оценка критической осевой силы при сжатии в полностью линеаризованной постановке при неучете самоконтакта элементов структуры приводит к заниженному значению силы. Построено численное решение задачи в квазистатической постановке с использованием явной схемы интегрирования уравнений движения. Построены кривые равновесных состояний стента и получены значения предельных нагрузок в закритическом состоянии. Путем сравнительного анализа экспериментальных и теоретических кривых равновесных состояний показано, что наибольшее влияние на величину предельной нагрузки оказывает величина коэффициента сухого трения и величины областей самоконтакта элементов структуры. Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 13-01-00446_а, № 14-01-00488_а, № 14-01-00890_а).

Библиографический список

1. Пшеничников Г. И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластин. – М.: Наука, 1982. – 352 с.
2. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л.: ЛГУ, 1987. - 216 с.
3. Auricchio F., Taylor R.L., Lubliner J. Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior // Computer methods in applied mechanics and engineering. 1997. Vol. 146. P. 281 – 312.
4. Craig L.B. Open Stent Design: Design and analysis of self expanding cardiovascular stents. – CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. – 94 P.
5. Dumoulin C., Cochelin B. Mechanical behavior modelling of balloon-expandable stents // Journal of Biomechanics. 2000. No. 33. C. 1461–1470.
6. Kim J.H., Kang T.J., Yu W.R. Mechanical Modeling of Self-Expandable Stent Fabricated Using Braiding Technology // Journal of Biomechanics. 2008. Vol. 41, No. 15. P. 3202–3212.
7. Smouse H.B., Nikanorov A., LaFlash D. Biomechanical forces in the femoropopliteal arterial segment. What happens during extremity movement and what is the effect on stenting? // Endovascular Today. 2005. No. 4. P. 60 – 66.
8. Scheinert D, Scheinert S, Sax J. Prevalence and clinical impact of stent fractures after femoropopliteal stenting // Journal of the American College of Cardiology. 2005. No. 45. P. 312 – 315.

9. Duda S.H., Wiskirchen J, Tepe G. Physical properties of endovascular stents: an experimental comparison // Journal of Vascular & Interventional Radiology. 2000. No. 11. P. 645 – 654.
10. Рыжов С.А. ABAQUS – многоцелевой конечно-элементный комплекс для инженерного анализа // САПР и графика. 2003, №1: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=6736&iid=275>
11. CO-alloy L-605 tubing for surgical implants. – Режим доступа: <http://www.euroflex.de/>
12. Belytschko T., Bindeman L.P. Assumed strain stabilization of the eight node hexahedral element // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1993. Vol. 105. P. 225–260.
13. Belytschko T., Lin J.I., Tsay C.S. Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1984. Vol. 43. P. 251–276.
14. Abaqus User Manual: Abaqus Theory Guide. Version 6.14. – USA.: Dassault Systemes Simulia Corp., 2014.
15. Zahedmanesh H., Kelly D., Lally C. Simulation of a balloon expandable stent in a realistic coronary artery. Determination of the optimum modeling strategy // Journal of Biomechanics. 2010. Vol. 43. P. 2126 – 2132.
16. Vulovic S., Zivkovic M., Grujovic N. Contact Problems Based on the Penalty Method // Scientific Technical Review. 2008. Vol. 63. No.3-4. 2126 – 2132.

17. Zhong Z.H. Contact Problems with Friction // Proceedings of Numiform. 1989. Vol. 89. P. 599–606.
18. Auricchio F., Taylor R.L., Lubliner J. Shape-memory alloys: modelling and numerical simulations of the finite-strain superelastic behavior // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1997. Vol. 143. P. 175 – 194.
19. Нуштаев Д.В., Жаворонок С.И. Расширение возможностей моделирования процессов деформирования сплавов с памятью формы // Труды международного форума «Инженерные системы». Москва, 15-16 апреля 2011, URL: http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_es11_tes.pdf