

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-618-627

УДК 539.3+624.046.3+004.94

Анализ устойчивости ортотропной цилиндрической оболочечной конструкции в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL

Дмитрий Сергеевич Петров¹, Алексей Александрович Семенов²✉

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

¹ gsm1990@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4730-3469>

² sw.semenov@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-9490-7364>

Аннотация

Введение. Большепролетные оболочечные конструкции широко используют в различных областях промышленности. Для обеспечения безопасных режимов их работы возникает необходимость разработки расчетных методик и исследования оболочечных конструкций на устойчивость под действием прикладываемой нагрузки. Традиционно эти данные получают с использованием аналитических и полуаналитических методов. Описан процесс определения критических нагрузок потери устойчивости и получения зависимостей «нагрузка–прогиб» с учетом больших деформаций. Предложена методика анализа устойчивости ортотропных оболочечных конструкций на основе функциональных возможностей конечноэлементных программных комплексов. **Метод.** Расчетная модель цилиндрической оболочечной конструкции представлена на основе метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL 2020. Проведены вычислительные эксперименты и сравнение устойчивости конструкций из различных материалов: сталь С345, оргстекло (полиметилметакрилат), углепластик М60J/Ероху, стеклопластик Т-10/УПЭ22-27. **Основные результаты.** Показано, что программный комплекс ANSYS Mechanical APDL 2020 позволяет получить необходимые данные для построения зависимостей «нагрузка–прогиб». Для анализа больших деформаций комплекс можно использовать только при достаточно детальном описании параметров расчета и сделанных допущений для разных материалов. Получены значения критической равномерно распределенной нагрузки. Представлены графики зависимости прогиба от нагрузки. Исследован процесс деформирования с учетом геометрической нелинейности и собственного веса оболочечных конструкций. **Обсуждение.** Результаты расчетов могут быть применены для автоматизации расчетов оболочечных конструкций как альтернатива аналитическим методам.

Ключевые слова

цилиндрическая оболочка, ортотропный материал, устойчивость, метод конечных элементов, ANSYS, геометрическая нелинейность, пошаговое приложение нагрузки, критическая нагрузка

Ссылка для цитирования: Петров Д.С., Семенов А.А. Анализ устойчивости ортотропной цилиндрической оболочечной конструкции в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 618–627. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-618-627

Buckling analysis of an orthotropic cylindrical shell structure in the ANSYS Mechanical APDL software package

Dmitriy S. Petrov¹, Alexey A. Semenov²✉

^{1,2} Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

¹ gsm1990@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4730-3469>

² sw.semenov@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-9490-7364>

Abstract

Long-span shell structures are widely used in various industries. To ensure safe modes of operation, it becomes necessary to develop calculation methods and study shell structures for buckling under the applied load. Traditionally, these data are

© Петров Д.С., Семенов А.А., 2023

obtained using analytical and semi-analytical methods. This paper presents a description of the process of determining the critical buckling loads and obtaining the “load-deflection” dependences, taking into account large deformations. For this purpose, a method for analyzing the buckling of orthotropic shell structures based on the functionality of finite element software systems is proposed. The computational model of a cylindrical shell structure is presented based on the finite element method in the ANSYS Mechanical APDL 2020 software package. Computational experiments and a comparison of the buckling of structures made of various materials were carried out: steel S345, plexiglass (PMMA), CFRP M60J/Epoxy, GFRP T-10/UPE22-27. It is shown that the ANSYS Mechanical APDL 2020 software package makes it possible to obtain the necessary data for obtaining the “load-deflection” dependencies. For the analysis of large deformations, it can be used only with a sufficiently detailed description of the calculation parameters and the assumptions made for different materials. The values of the critical uniformly distributed load are obtained. Graphs of the dependence of the deflection on the load are presented. The process of deformation is studied, taking into account the geometric nonlinearity and the self-weight of shell structures. The calculation results can be used to automate the calculations of shell structures as an alternative to analytical methods.

Keywords

cylindrical shell, orthotropic material, buckling, finite element method, ANSYS, geometric nonlinearity, step-by-step load application, critical buckling load

For citation: Petrov D.S., Semenov A.A. Buckling analysis of an orthotropic cylindrical shell structure in the ANSYS Mechanical APDL software package. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 618–627 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-618-627

Введение

Большепролетные оболочечные конструкции широко используют в различных областях промышленности, например, в строительстве. Благодаря особенностям формы и параметрам применяемых материалов, они позволяют перекрывать большие пространства при относительно низком расходе ресурсов. Существуют различные типы оболочек, применяемых на практике, например, в строительстве используются конические, сферические, цилиндрические, пологие двоякой кривизны, торообразные и другие.

Развитие современных технологий и достижения в различных областях науки и техники расширяют область применения тонкостенных конструкций, перекрывающих большие пространства. Такие конструкции должны выполняться из легкого материала, имеющего высокую прочность.

Оболочечные конструкции имеют специфическое пространственное напряженно-деформированное состояние (НДС) под действием нагрузки [1]. Повышенные требования к прочности и надежности при уменьшении материалоемкости создают проблемы анализа НДС тонкостенных элементов в зоне концентрации напряжений. В связи с этим одной из главных задач механики тонкостенных конструкций является совершенствование методов расчета и проектирования пластин и оболочек сложной формы и структуры [2] под различными видами нагрузок [3–8].

В некоторых случаях потеря устойчивости оболочечной конструкции происходит раньше, чем превышение внутренними напряжениями предельно допустимых значений, полученных при расчетах согласно исходной расчетной схеме.

В процессе увеличения нагрузки на оболочку ее поверхность деформируется. При достижении критического значения оболочечная конструкция может потерять устойчивость вследствие того, что перемещение точек поверхности переходит границу допустимых деформаций и скачкообразно увеличивается. В результате данного процесса реальная геометрическая форма конструкции под действием нагрузки перестает

соответствовать исходной расчетной схеме. Вследствие изменения расчетной схемы происходит перераспределение усилий, не соответствующее первоначальным расчетам. Концентрация напряжения в элементе может привести к превышению предела прочности материала и разрушить элемент, что повлечет за собой дальнейшие разрушения.

Таким образом, возникает необходимость исследования оболочечных конструкций на устойчивость и учета изменения геометрической формы под действием прикладываемой нагрузки.

Современные программные комплексы на основе метода конечных элементов позволяют проводить исследования различных конструкций. На практике наиболее часто используются программные комплексы NASTRAN [9, 10], ABAQUS [11–13], ANSYS [14, 15].

Одним из наиболее распространенных типов оболочечной конструкции, применяемых в строительной отрасли, является цилиндрическая оболочка. Это обусловлено ее конструктивными, монтажными и эксплуатационными преимуществами [16].

В последнее время все чаще применяются оболочечные конструкции, выполненные из композиционных материалов [17–21].

Целью данной работы является апробация методики исследования устойчивости и НДС цилиндрической оболочечной конструкции, выполненной из ортотропного материала, под действием распределенных нагрузок в программном комплексе ANSYS.

Материалы и методы

В качестве метода исследования в работе принят метод вычислительного эксперимента с помощью функциональных возможностей программного комплекса ANSYS Mechanical APDL 2020 (ANSYS 2020). Вычислительное ядро комплекса базируется на методе конечных элементов.

С точки зрения вычислительной математики, идея метода конечных элементов заключается в минимизации функционала вариационной задачи. Задача осуществлена на совокупности функций, каждая из кото-

рых определена на своей подобласти, что соответствует одной из конкретных ветвей диакоптики — общего метода исследования систем путем их расчленения [5]. Для моделирования и расчета тонкостенных оболочечных конструкций в ANSYS 2020 использованы элементы категории SHELL, которые учитывают такие внутренние силовые факторы, как мембранное растяжение–сжатие и изгиб [6, 22–26].

Форму конструкции зададим геометрически, по точкам, с помощью встроенных инструментов программного комплекса. Сформированную геометрическую модель оболочечной конструкции разделим на сетку конечных элементов и выберем тип элемента Shell 181. Данный элемент оболочки с конечными деформациями имеет четыре узла, в каждом из которых определены шесть степеней свободы, и позволяет учитывать полный набор нелинейных эффектов, включая большие деформации [6].

Сетка конечных элементов выбрана регулярной. Элементы имеют прямоугольную форму. Создадим связи элементов, соответствующие выбранному способу закрепления контура конструкции. Зададим нагрузку от собственного веса и прикладываемые внешние нагрузки.

Выполним расчет конструкции по следующему алгоритму:

- расчет усилий в конструкции от единичной силы (Static), с учетом малых перемещений (Small Displacement Static);
- расчет коэффициента собственного значения устойчивости конструкции (Eigenvalue Buckling);
- расчет усилий в конструкции от силы, умноженной на полученный коэффициент (Static), с учетом больших перемещений (Large Displacement Static) и анализа поведения конструкции;
- подбор нагрузки, при которой конструкция теряет устойчивость, путем поэтапного увеличения прикладываемой нагрузки и расчета усилий в конструкции (Static), с учетом больших перемещений (Large Displacement Static) и анализа поведения конструкции по графику нагрузка–перемещение.

Результаты исследования

Модель цилиндрической оболочки. Рассмотрим цилиндрические панели толщиной h , находящиеся под действием внешней равномерно распределенной поперечной нагрузки и шарнирно закрепленные по всему контуру (рис. 1). Данный вид оболочек широко применяется в строительстве. Срединную поверхность оболочки примем за координатную.

Для проведения вычислительных экспериментов выберем цилиндрическую панель с параметрами: пролетностью $a = 16$ м, радиусом кривизны $R_2 = 16$ м, толщиной $h = 0,08$ м, углом разворота $b = 1$ рад ($57^\circ 18'$). Расчеты выполним для четырех материалов: стали С345, оргстекла (полиметилметакрилат, ПММА), углепластика М60J/Ероху, стеклопластика Т-10/УПЭ22-27.

Создадим компьютерную модель с помощью инструментов проектирования в конечно-элементном программном комплексе ANSYS 2020.

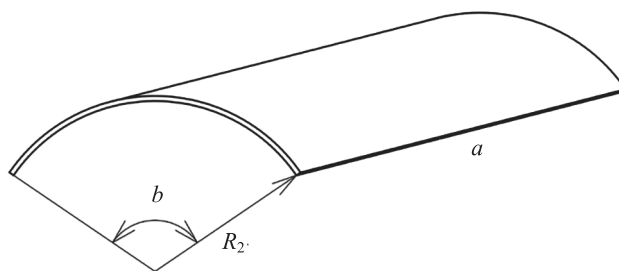


Рис. 1. Схематическое изображение панели цилиндрической оболочки

Fig. 1. Schematic representation of a cylindrical shell panel

Для конечных элементов конструкции зададим параметры физического нагружения от ускорения свободного падения: назначим плотность материала, из которого состоит оболочечная конструкция, и значение ускорения свободного падения. Настроим тип расчета: выберем расчет с учетом больших перемещений и математический инструмент расчета — метод длины дуги. Данные параметры позволят произвести анализ НДС оболочечной конструкции с учетом геометрической нелинейности.

Пошагово добавим нагрузку, позволив программному комплексу рассчитать напряжения в конструкции и перемещения узлов элементов отдельно для каждого шага загрузки. Для выполнения пошагового расчета зададим общий шаг загрузки, равный единице. Таким образом, получим, что максимальное значение загрузки рассчитываемой конструкции равно приложенной на оболочку нагрузке. Назначим количество подшагов: для получения значений расчета в каждом шаге (доля значения прикладываемой на оболочечную конструкцию нагрузки в рамках одного шага). Значение количества подшагов подберем вручную, с целью уточнения промежуточных, полученных в результате расчета, значений перемещений анализируемых узлов. В результате значение количества подшагов в проведенном расчетном эксперименте принято равным 150.

В начале расчета приложим нагрузку, превышающую несущую способность оболочечной конструкции. По результатам расчетов в программном комплексе проведем анализ величины нагрузки, при которой конструкция теряет устойчивость. Исходную приложенную нагрузку зададим равной нагрузке потери устойчивости. Повторно выполним расчет — получим значения перемещений узлов оболочечной конструкции до и во время потери устойчивости. Корректируя количество подшагов, подберем точность определения поведения оболочечной конструкции в условиях потери устойчивости.

В зависимости от варианта расчета конечно-элементной модели присвоим значения материала в соответствии с табл. 1. Волокна ортотропных материалов, обладающих наибольшим модулем Юнга, направлены в поперечном направлении, формируя конструкцию условной арки.

Полученную геометрическую модель оболочечной конструкции разделим на сетку конечных элементов 16×32 (обоснование данного выбора будет приведен

Таблица 1. Параметры материалов
Table 1. Material parameters

Характеристика	Изотропный материал		Ортотропный материал	
	Сталь С345	Оргстекло (ПММА)	Углепластик М60J/Ероху [27]	Стеклопластик Т-10/УПЭ22-27 [28]
Модуль упругости E_1 , МПа	$2,1 \cdot 10^5$	$0,03 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^5$	$0,294 \cdot 10^5$
Модуль упругости E_2 , МПа	$2,1 \cdot 10^5$	$0,03 \cdot 10^5$	$0,59 \cdot 10^4$	$1,78 \cdot 10^4$
Коэффициент Пуассона μ_{12}	0,3	0,35	0,32	0,123
Плотность ρ , кг/м ³	7800	1190	1500	1800

подразделе «Результаты вычислительного эксперимента» при расчете конструкции из стали С345). В качестве исходных нагрузок, для учета собственного веса конструкции, зададим параметр гравитации: ускорение свободного падения по вертикальной оси Z (глобальная система координат). Для ускорения свободного падения примем значение $9,8065$ Н/кг.

Результаты вычислительного эксперимента.

В результате проведения вычислительного эксперимента получены данные о потере устойчивости и, в одном случае, прочности цилиндрических оболочечных конструкций. Анализ поведения проведен на основе значений прикладываемой к поверхности равномерной распределенной нагрузки и перемещения характерных узловых точек оболочечной конструкции: узла в центре ($x = a/2, y = b/2$) и узла в четверти конструкции ($x = a/4, y = b/4$).

В соответствии с табл. 1 сформированы и рассчитаны четыре модели цилиндрических оболочек, имеющих одинаковые геометрические параметры, но выполненные из различных материалов.

Модель цилиндрической оболочки, выполненной из изотропного материала (сталь С345). Пошагово повысим значение приложенной равномерно распределенной нагрузки (q) по поверхности оболочки до $0,8$ МПа. Этапы увеличения нагрузки приведены на рис. 2 — график зависимости «нагрузка–прогиб».

По графику в центре конструкции (рис. 2), видно, что при нагрузке до $0,4$ МПа перемещение исследуемых узлов носит практически линейный характер.

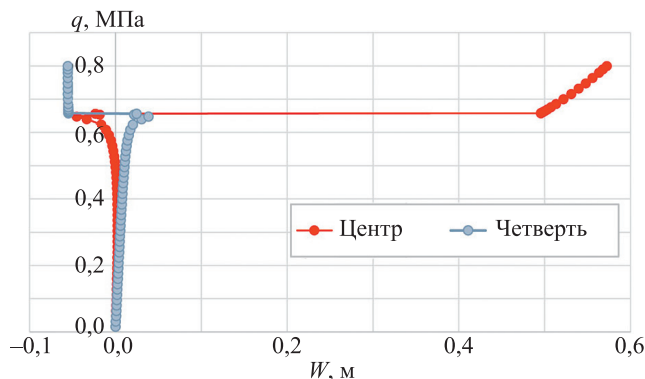


Рис. 2. График «нагрузка–прогиб» для конструкции из материала Сталь С345

Fig. 2. Graph “load-deflection” for a structure made of Steel S345 material

При дальнейшем увеличении нагрузки коэффициент наклона касательной к графику начинает интенсивно меняться. При достижении значения $0,6562$ МПа выбранные узлы получают скачкообразное перемещение, исходя из чего можно сделать вывод о потере конструкцией устойчивости.

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к увеличению перемещения точек и последующему разрушению конструкции. При этом направления перемещения выбранных узлов на первом этапе нагружения постепенно смещаются в противоположные направления. При потере устойчивости перемещение узлов носит скачкообразный характер, а затем постепенно узлы начинают смещаться в одном направлении — вся конструкция проседает вниз под действием возрастающей распределенной нагрузки.

Выполним анализ влияния выбора разбиения области конструкции конечными элементами на получаемые значения критических нагрузок.

В результате получим, что для малого числа конечных элементов (4×8) значение критической нагрузки получить не удалось (вычислительный процесс прерывается раньше). При увеличении числа элементов значение критической нагрузки достигается, а кривые зависимостей «нагрузка–прогиб» носят схожий характер, аналогичный представленному на рис. 2. При выборе сеток элементов $8 \times 16, 16 \times 32, 32 \times 64, 64 \times 128$ значения критической нагрузки потери устойчивости имеют уже близкие значения ($0,729, 0,656, 0,634, 0,641$ МПа соответственно), что позволяет для дальнейших расчетов конструкций данного вида выбрать сетку элементов 16×32 .

Отметим, что закритическое поведение цилиндрических панелей (т. е. после потери устойчивости) при выборе разных сеток разбиения в ряде случаев значительно различалось.

На рис. 3, а представлен результат приложения нагрузки в $0,6562$ МПа для стали С345. Заметен существенный прогиб центральной части оболочки, образовавшийся в результате потери устойчивости. Поле интенсивности распределения внутренних напряжений в оболочечной конструкции после потери устойчивости, в момент приложения нагрузки $0,6562$ МПа, показан на рис. 3, б.

Модель цилиндрической оболочки, выполненной из изотропного материала (оргстекло (ПММА)). Повысим значение приложенной равномерно распределенной нагрузки до $0,011$ МПа. Согласно графику

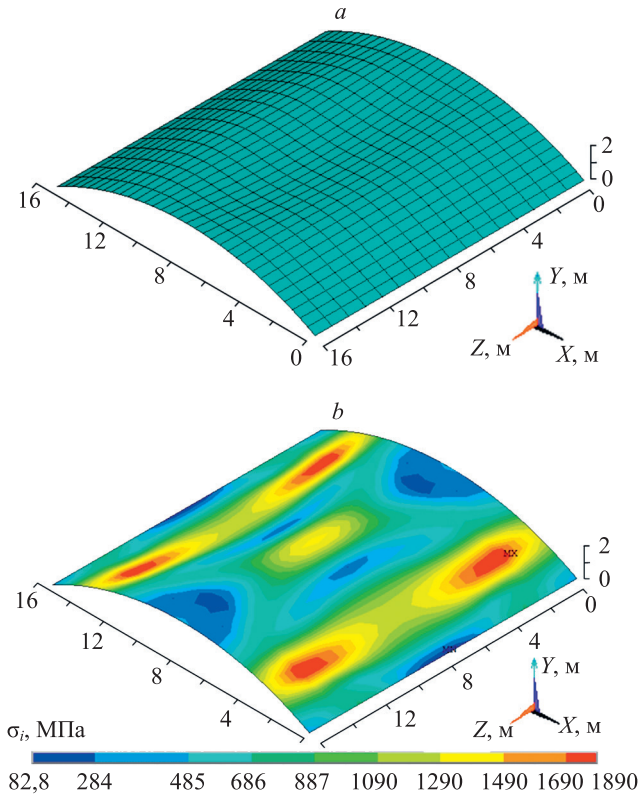


Рис. 3. Схема деформирования при нагрузке 0,6562 МПа (а) и поле интенсивности напряжений (b) для оболочки из стали С345

Fig. 3. Deformation scheme at 0.6562 MPa load (a) and stress intensity field (b) for the Steel S345 shell

зависимости «нагрузка–прогиб» (рис. 4) при нагрузке до 0,002 МПа перемещение исследуемых узлов носит практически линейный характер.

При дальнейшем увеличении нагрузки видно, что коэффициент наклона касательной к графику начинает интенсивно меняться. При достижении значения 0,0105 МПа выбранные узлы получают скачкообразное

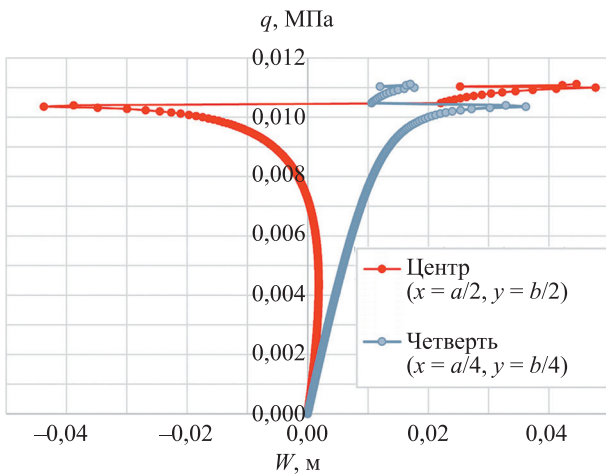


Рис. 4. График «нагрузка–прогиб» для конструкции из оргстекла (ПММА)

Fig. 4. “Load–deflection” dependence for the panel of plexiglass shell (PMMA)

перемещение, исходя из чего можно сделать вывод о потере конструкцией устойчивости.

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к увеличению перемещения точек и последующему разрушению. На графиках можно увидеть, что при увеличении действующей нагрузки узлы в центре оболочечной конструкции и в ее четверти имеют в проекции на вертикальную ось разнонаправленное движение. После потери устойчивости происходит скачкообразное перемещение, и затем направление движения совпадает — узлы смещаются вниз, по направлению действия силы тяжести и приложенной нагрузки. Таким образом, график, полученный в результате вычислительного эксперимента, подтверждает ситуацию, реализуемую на практике: при увеличении нагрузки конструкция прогибается вниз.

На рис. 5, а представлен результат приложения нагрузки в 0,0105 МПа. Заметен седлообразный вид деформации конструкции: два прогиба сбоку от центральной части оболочки и выгиб вверх центральной части оболочки, образовавшиеся в результате потери устойчивости. Поле интенсивности напряжений при приложении нагрузки 0,0105 МПа показано на рис. 5, b.

Модель цилиндрической оболочки, выполненной из ортотропного материала (углепластик М60J/Ероху). Увеличим значение приложенной равномерно распре-

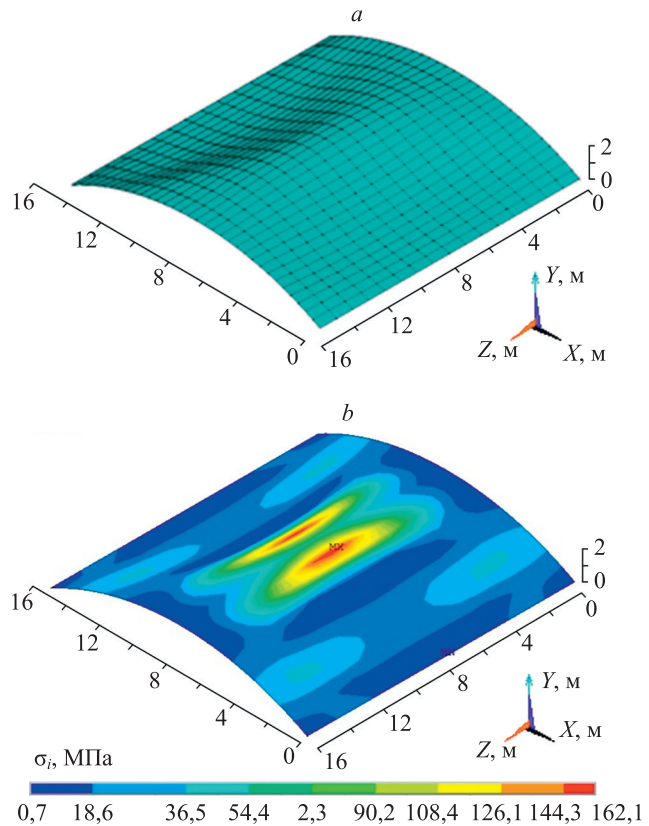


Рис. 5. Схема деформирования при нагрузке 0,0105 МПа (а) и поле интенсивности напряжений (b) для оболочки из оргстекла (ПММА)

Fig. 5. Deformation scheme at 0.0105 MPa load (a) and stress intensity field (b) for plexiglass shell (PMMA)

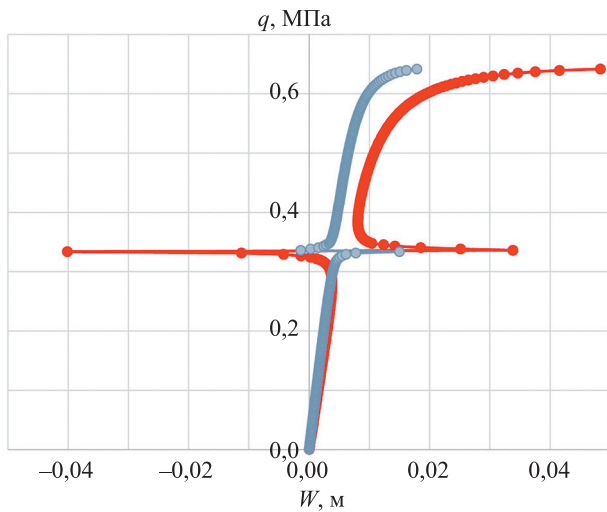


Рис. 6. График «нагрузка–прогиб» для конструкции из углепластика М60J/Эпоху
 Fig. 6. “Load – deflection” dependence for the panel of CFRP M60J/Epoxy

деленной нагрузки до 0,642 МПа. Согласно графику зависимости «нагрузка–прогиб» (рис. 6), при нагрузке до 0,26 МПа перемещение исследуемых узлов носит линейный характер.

При дальнейшем увеличении нагрузки характер графика интенсивно меняется. При достижении значения 0,3151 МПа выбранные узлы получают скачкообразное перемещение, исходя из чего можно сделать вывод о потере конструкцией устойчивости. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к увеличению перемещения точек и последующему разрушению конструкции, при этом направление перемещения для центрального узла после потери устойчивости меняется на противоположное, а для узла четверти сохраняется.

Рассмотрим результаты приложения нагрузки в моменты времени 0,99 и 1,00 при величине нагрузки в 0,64 МПа. В момент времени 0,99 (рис. 7, а) оболочка начинает разрушение в соответствии с ортотропными свойствами материала: в поперечном направлении формируются арки жесткости, в продольном направлении происходит разнонаправленное смещение узлов, произошедшее в результате потери устойчивости. В момент времени 1,00 (рис. 7, б) можно наблюдать разрушение оболочечной конструкции.

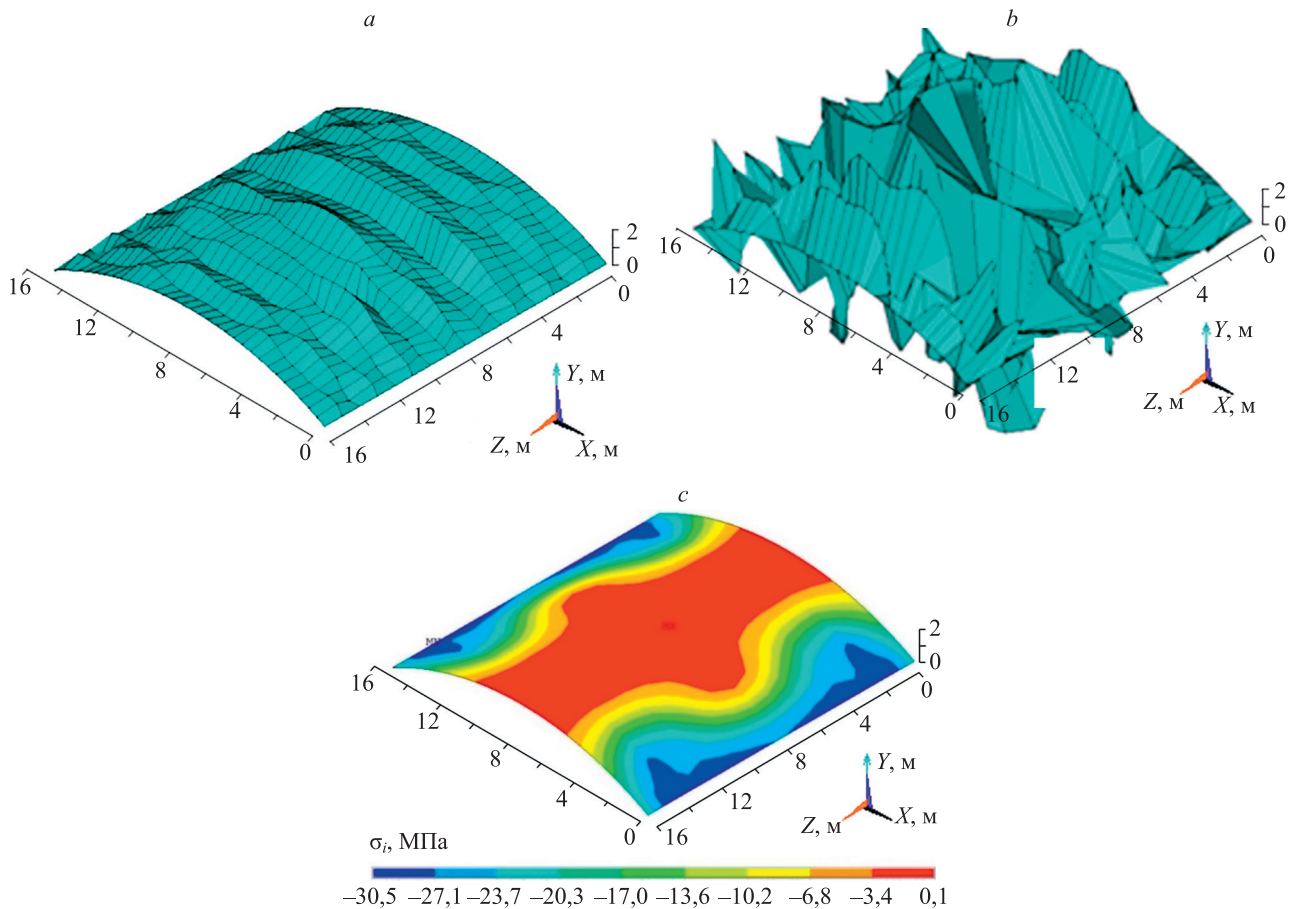


Рис. 7. Схема деформирования при нагрузке 0,64 МПа в моменты времени 0,99 (а) и 1,00 (б) и поле интенсивности напряжений (с) для оболочки из углепластика М60J/Эпоху
 Fig. 7. The scheme of deformation at a load of 0.64 MPa at times 0.99 (a) and 1.00 (b) and the stress intensity field (c) for the shell of carbon fiber M60J/Epoxy

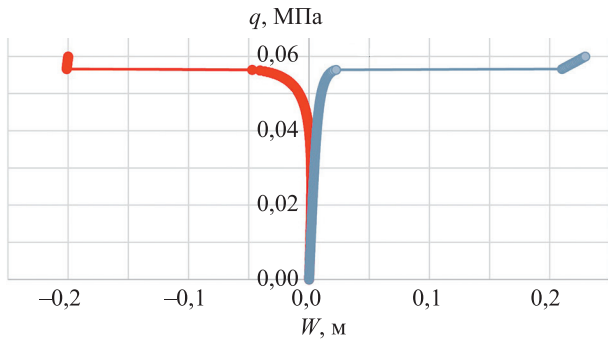


Рис. 8. График «нагрузка–прогиб» для конструкции из стеклопластика Т-10/УПЭ22-27

Fig. 8. “Load – deflection” dependence for the panel of GFRP T-10/UPE22-27

Поле интенсивности внутренних напряжений, возникающих в оболочечной конструкции в момент времени 0,99 показано на рис. 7, с.

Модель цилиндрической оболочки, выполненной из ортотропного материала (стеклопластик Т-10/УПЭ22-27). Повысим значение приложенной равномерно распределенной нагрузки до 0,060 МПа. Согласно графику зависимости «нагрузка–прогиб» (рис. 8), перемещение исследуемых узлов носит линейный характер при нагрузке до 0,03 МПа.

При дальнейшем увеличении нагрузки кривизна графика увеличивается. При достижении значения 0,0571 МПа центральный узел и узел в четверти получают скачкообразное перемещение, исходя из чего можно сделать вывод о потере устойчивости оболочечной конструкции.

Дальнейшее повышение нагрузки приводит к увеличению перемещения точек и последующему разрушению конструкции. При этом направление перемещения для центрального узла после потери устойчивости меняется на противоположное, а для узла четверти сохраняется.

На рис. 9, а представлен результат приложения распределенной нагрузки в 0,0571 МПа. При деформации конструкция приобретает седлообразный вид: два прогиба сбоку от центральной части оболочки, и выгиб вверх центральной части оболочки образовавшиеся в результате потери устойчивости. Поле интенсивности напряжений при приложении нагрузки 0,0571 МПа показано на рис. 9, b.

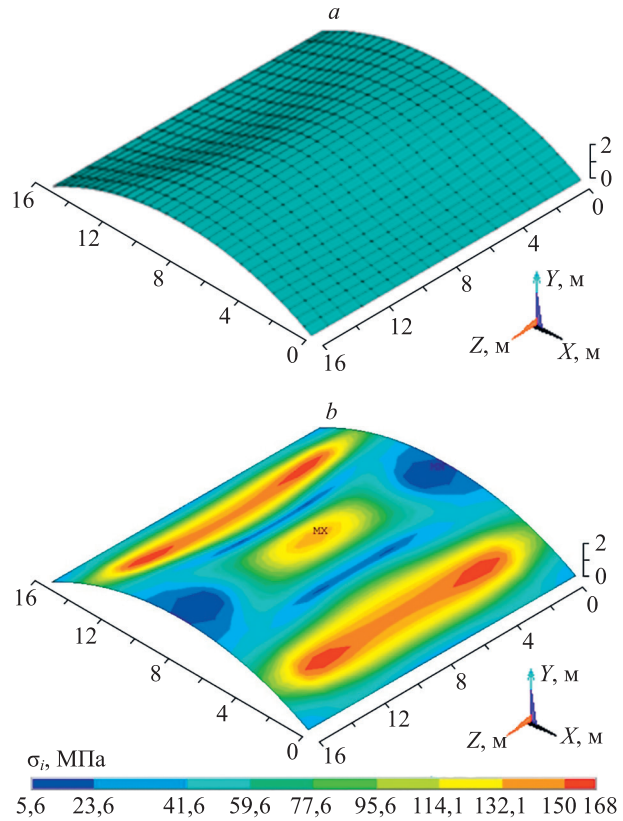


Рис. 9. Схема деформирования при нагрузке 0,0571 МПа (а) и поле интенсивности напряжений (b) для оболочки из стеклопластика Т-10/УПЭ22-27

Fig. 9. Scheme of deformation at a load of 0.0571 MPa (a) and the stress intensity field (b) for the fiberglass shell T-10/UPE22-27

В табл. 2 показаны значения нагрузок потери устойчивости q_{cr} , значения прогибов и интенсивности напряжений, выявленные при максимальной расчетной нагрузке. Значение максимальной расчетной нагрузки подобрано в процессе эксперимента. Около данного значения оболочечная конструкция теряет устойчивость, стремясь к ней, но не доходя до нее. Значение нагрузки подбирается итерационно, как можно ближе к критической нагрузке. Как видно из полученных данных, для оболочек, выполненных из различных материалов, значения максимальных внутренних напряжений значительно различаются.

Таблица 2. Результаты расчетов
Table 2. Numerical results

Материал	q_{cr} , МПа	Максимальная расчетная нагрузка, МПа	Прогиб конструкции, м		Максимальное напряжение, МПа
			Центр ($x = a/2, y = b/2$)	Четверть ($x = a/4, y = b/4$)	
Сталь С345	0,6562	0,800	0,5725	0,0555	1892,0
Оргстекло (ПММА)	0,0105	0,011	0,0457	0,0372	144,0
Углепластик М60J/Ероху	0,3151	0,642	0,0412	0,0156	3,4
Стеклопластик Т-10/УПЭ22-27	0,0571	0,060	0,2021	0,2715	168,0

Заключение и обсуждение

Проведенный вычислительный эксперимент с помощью функциональных возможностей программного комплекса ANSYS Mechanical APDL 2020 позволил проанализировать поведение цилиндрической оболочечной конструкции в процессе повышения приложенной нагрузки.

В соответствии с полученными результатами, можно сделать следующие выводы.

Предложенная методика исследования устойчивости и напряженно-деформированного состояния может быть использована для анализа процесса деформирования цилиндрических оболочечных конструкций, выполненных из различных материалов, под действием равномерно распределенной нагрузки.

При расчетах моделей всех вариантов выявлена потеря устойчивости цилиндрических оболочечных конструкций и получены значения критической равномерно распределенной нагрузки.

Программный комплекс ANSYS Mechanical APDL 2020 позволил получить необходимые данные для построения зависимостей «нагрузка–прогиб», однако, возникают сложности с получением значений в закритической области. Участки кривых после критической нагрузки существенно меняются при незначительных изменениях в параметрах расчета, например: при изменении сетки разбиения, шага по нагрузке и т. д. В связи с этим данный вопрос требует отдельного исследования. Исходя из этого, предложенный подход для анализа больших деформаций можно использовать только с достаточно детальным описанием параметров расчета и сделанных допущений.

Для всех рассматриваемых вариантов конструкций получены графики зависимости прогиба от нагрузки. Исследован процесс деформирования с учетом геометрической нелинейности и собственного веса оболочечных конструкций.

Результаты расчетов могут быть использованы для дальнейшего сравнения с результатами, полученными аналитическими и полуаналитическими методами.

Литература

1. Наширалиев Ж.Т., Каргаева А.Т. Трудности проектирования и строительства пространственных тонкостенных оболочек // *Academy*. 2019. № 1(40). С. 17–19.
2. Антипов А.А., Артемьева А.А., Баженов В.Г., Жестков М.Н., Кибец А.И. Численное моделирование задачи устойчивости перфорированных оболочек // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2015. № 1. С. 21–30. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.1.02>
3. Шклярчук Ф.Н. О задачах устойчивости упругих оболочек под действием гидростатического давления // *Материалы XXI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова*. 2015. С. 208–211.
4. Паймушин В.Н. О формах потери устойчивости цилиндрической оболочки при внешнем боковом давлении // *Материалы XXI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова*. 2015. С. 157–159.
5. Дубровин В.М., Бутина Т.А. Моделирование динамической устойчивости цилиндрической оболочки при действии осевой сжимающей нагрузки // *Математическое моделирование и численные методы*. 2015. № 2(6). С. 46–57.
6. Петров М.В., Федорова Т.Г., Гоник Е.Г. Экспериментальное исследование потери устойчивости тонкостенных оболочек при чистом изгибе // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2015. № 2(24). С. 119–125.
7. Бахтиева Л.У., Тазюков Ф.Х. Об устойчивости цилиндрической оболочки при осевом сжатии // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2015. № 1. С. 85–88.
8. Митрофанов О.В. Оценка устойчивости цилиндрических композитных оболочек при кручении с учетом использования гипотез модифицированной полубезмоментной теории // *Актуальные проблемы современной науки*. 2018. № 5(102). С. 267–271.
9. Ashok R.B., Srinivasa C.V., Suresh Y.J., Prema Kumar W.P. Buckling behaviour of cylindrical panels // *Nonlinear Engineering*. 2015. V. 4. N 2. P. 67–75. <https://doi.org/10.1515/nleng-2014-0019>
10. Li D., Qing G., Liu Y. A layerwise/solid-element method for the composite stiffened laminated cylindrical shell structures // *Composite Structures*. 2013. V. 98. P. 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.013>
11. Calladine C.R. Shell buckling, without ‘imperfections’ // *Advances in Structural Engineering*. 2018. V. 21. N 16. P. 2393–2403. <https://doi.org/10.1177/1369433217751585>

References

1. Nashiraliev Zh.T., Kargaeva A.T. Difficulties in designing and building spatial thin-walled shells. *Academy*, 2019, no. 1(40), pp. 17–19. (in Russian)
2. Antipov A.A., Artemyeva A.A., Bazhenov V.G., Zhestkov M.N., Kibec A.I. Numerical modelling of perforated shells stability. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 21–30. (in Russian). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.1.02>
3. Shkliarchuk F.N. On stability problems for elastic shells under hydrostatic pressure. *Proc. of the XXI International symposium «Dynamic and technological problems of a mechanics of constructions and continuous mediums» Dedicated to A.G. Gorshkov*, 2015, pp. 208–211. (in Russian)
4. Paimushin V.N. On the forms of stability loss of a cylindrical shell under external lateral pressure. *Proc. of the XXI International symposium «Dynamic and technological problems of a mechanics of constructions and continuous mediums» Dedicated to A.G. Gorshkov*, 2015, pp. 157–159. (in Russian)
5. Dubrov V.M., Butina T.A. Modeling of the dynamic stability of a cylindrical shell under the axial compressive load. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2015, no. 2(6), pp. 46–57. (in Russian)
6. Petrov M.V., Fedorova T.G., Gonic E.G. Experimental study of the buckling of thin-walled shells under pure bending. *Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*, 2015, no. 2(24), pp. 119–125. (in Russian)
7. Bakhtieva L.U., Tazyukov F.Kh. Stability of a cylindrical shell under axial compression. *Russian Aeronautics*, 2015, vol. 58, no. 1. pp. 106–111. <https://doi.org/10.3103/S1068799815010171>
8. Mitrofanov O.V. Estimation of the cylindrical composite shells stability in torsion, taking into account the use of hypotheses of the modified semi-membrane theory. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki*, 2018, no. 5(102), pp. 267–271. (in Russian)
9. Ashok R.B., Srinivasa C.V., Suresh Y.J., Prema Kumar W.P. Buckling behaviour of cylindrical panels. *Nonlinear Engineering*, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 67–75. <https://doi.org/10.1515/nleng-2014-0019>
10. Li D., Qing G., Liu Y. A layerwise/solid-element method for the composite stiffened laminated cylindrical shell structures. *Composite Structures*, 2013, vol. 98, pp. 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.013>
11. Calladine C.R. Shell buckling, without ‘imperfections’. *Advances in Structural Engineering*, 2018, vol. 21, no. 16, pp. 2393–2403. <https://doi.org/10.1177/1369433217751585>
12. Blachut J. Buckling of externally pressurized steel toriconical shells. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2016, vol. 144, pp. 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.05.002>

12. Błachut J. Buckling of externally pressurized steel toriconical shells // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2016. V. 144. P. 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.05.002>
13. Feng K., Xu J. Buckling analysis of composite cylindrical shell panels by using Legendre polynomials hierarchical finite-strip method // *Journal of Engineering Mechanics*. 2017. V. 143. N 4. P. 04016121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001181](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001181)
14. Qu Y., Chen Y., Long X., Hua H., Meng G. A modified variational approach for vibration analysis of ring-stiffened conical-cylindrical shell combinations // *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2013. V. 37. P. 200–215. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2012.06.006>
15. Trushin S., Goryachkin D. Numerical evaluation of stress-strain state of bending plates based on various models // *Procedia Engineering*. 2016. V. 153. P. 781–784. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.242>
16. Petrov D., Semenov A. Buckling of cylindrical shell panels in ANSYS // *AIP Conference Proceedings*. 2020. V. 2315. N 1. P. 020032. <https://doi.org/10.1063/5.0036813>
17. Куимова Е.В., Труфанов Н.А. Численное прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленного волокнистого композита с вязкоупругими компонентами // *Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия*. 2009. № 4(70). С. 129–148.
18. Соловьев А.Н., Зиборов Е.Н., Шевцов С.Н. Определение упругих свойств армированных композиционных материалов на основе конечно-элементного моделирования // *Наука Юга России*. 2016. Т. 12. № 2. С. 3–10.
19. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Многоуровневый подход к исследованию влияния объемного соотношения компонентов волокнистого однонаправленного углепластика на его механические характеристики // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2014. № 2(28). С. 77–89.
20. Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. 605 с. <https://doi.org/10.15372/MULTILEVEL2019TPV>
21. Швейкин А.И., Шарифуллина Э.Р., Трусов П.В., Пушков Д.А. Об оценке чувствительности статистических многоуровневых моделей поликристаллических металлов к возмущениям параметров // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2018. Т. 11. № 2. С. 214–231. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2018.11.2.17>
22. Вольнин А.Р. Сравнительный расчет прочности и устойчивости подкрепленных оболочек в программных комплексах «Оболочка» и ANSYS // *Вестник гражданских инженеров*. 2010. № 2(23). С. 38–43.
23. Молчанов А.И., Молчанова Е.А. Решение инженерно-технических задач средствами ANSYS // *Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова*. 2012. № 1. С. 114–120.
24. Мануйлов Г.А., Косицын С.Б., Бегичев М.М. Исследования устойчивости упругих пластин и оболочек при помощи конечно-элементного моделирования // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2011. № 1. С. 58–65.
25. Баранова Д.А., Вольнин А.Л., Карпов В.В. Сравнительный анализ расчета прочности и устойчивости подкрепленных оболочек на основе ПК оболочка и ПК ANSYS // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика*. 2010. Т. 10. № 4. С. 23–27. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2010-10-4-23-27>
26. Колесников М.В. Численный анализ напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки при неоднородном в окружном направлении продольном сжатии // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2011. № 11-12(164-165). С. 66–72.
27. Смердов А.А., Буянов И.А., Чуднов И.В. Анализ оптимальных сочетаний требований к разрабатываемым углепластикам для крупногабаритных ракетно-космических конструкций // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2012. № 8. С. 70–77.
28. Тышкевич В.Н. Выбор критерия прочности для труб из армированных пластиков // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2011. № 5(78). С. 76–79.
13. Feng K., Xu J. Buckling analysis of composite cylindrical shell panels by using Legendre polynomials hierarchical finite-strip method. *Journal of Engineering Mechanics*, 2017, vol. 143, no. 4, pp. 04016121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001181](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001181)
14. Qu Y., Chen Y., Long X., Hua H., Meng G. A modified variational approach for vibration analysis of ring-stiffened conical-cylindrical shell combinations. *European Journal of Mechanics — A/Solids*, 2013, vol. 37, pp. 200–215. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2012.06.006>
15. Trushin S., Goryachkin D. Numerical evaluation of stress-strain state of bending plates based on various models. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 153, pp. 781–784. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.242>
16. Petrov D., Semenov A. Buckling of cylindrical shell panels in ANSYS. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2315, no. 1, pp. 020032. <https://doi.org/10.1063/5.0036813>
17. Куимова Е.В., Труфанов Н.А. The numerical prediction of effective thermoviscoelastic properties of unidirectional fiber composite with the viscoelastic components. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2009, no. 4(70), pp. 129–148. (in Russian)
18. Soloviev A.N., Ziborov E.N., Shevtsov S.N. Determination of elastic properties of reinforced composite materials based on finite element modeling. *Science in the South Russia*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 3–10. (in Russian)
19. Sovetova Yu.V., Sidorenko Yu.N., Skripnyak V.A. The multilevel approach to studying the influence of the volumetric ratio in components of unidirectional carbon fiber composite on its mechanical properties. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2014, no. 2(28), pp. 77–89. (in Russian)
20. Trusov P.V., Shveikin A.I. *Multilevel models of mono- and polycrystalline materials: theory, algorithms and applied examples*. Novosibirsk, SBRAS, 2019, 605 p. (in Russian). <https://doi.org/10.15372/MULTILEVEL2019TPV>
21. Shveikin A.I., Sharifullina E.R., Trusov P.V., Pushkov D.A. About estimation of sensitivity of statistical multilevel polycrystalline metal models to parameter variations. *Computational Continuum Mechanics*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 214–231. (in Russian). <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2018.11.2.17>
22. Volynin A.L. Comparative calculation of strength and stability of reinforced shells with PC Obolochka and PC ANSYS. *Bulletin of Civil Engineers*, 2010, no. 2(23), pp. 38–43. (in Russian)
23. Molchanov A.I., Molchanova E.A. Olution of engineering problems by means of ANSYS. *Vestnik Hakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.F. Katanova*, 2012, no. 1, p. 114–120. (in Russian)
24. Manuylov G.A., Kositsyn S.B., Begichev M.M. The investigation of stability of elastic plates and shells with the help of FE modeling. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2011, no. 1, pp. 58–65. (in Russian)
25. Baranova D.A., Volynin A.L., Karpov V.V. The comparative analysis of calculation of durability and stability of the supported shells on the basis of the PC Obolochka and PC ANSYS. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2010, vol. 10, no. 4, pp. 23–27. (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2010-10-4-23-27>
26. Kolesnikov M. Numerical strain-stress state analysis of cylindrical shell undergoing periodical in circumferential direction axial loading. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii' budivnyctva ta arhitektury*, 2011, no. 11-12(164-165), pp. 66–72. (in Russian)
27. Smerdov A.A., Buyanov I.A., Chudnov I.V. Analysis of optimal combinations of requirements to developed CFRP for large space-rocket designs. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2012, no. 8, pp. 70–77. (in Russian)
28. Tyshkevich V.N. Choice of the strength criterion for reinforced plastic pipes. *Izvestia VSTU*, 2011, no. 5(78), pp. 76–79. (in Russian)

Авторы

Петров Дмитрий Сергеевич — старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, [sc 57221258432](https://orcid.org/0000-0002-4730-3469), gsm1990@mail.ru

Семенов Алексей Александрович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация, [sc 56460436800](https://orcid.org/0000-0001-9490-7364), sw.semenov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10.01.2023
Одобрена после рецензирования 05.04.2023
Принята к печати 27.05.2023

Authors

Dmitriy S. Petrov — Senior Lecturer, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, [sc 57221258432](https://orcid.org/0000-0002-4730-3469), gsm1990@mail.ru

Alexey A. Semenov — PhD, Associate Professor, Head of Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation, [sc 56460436800](https://orcid.org/0000-0001-9490-7364), sw.semenov@gmail.com

Received 10.01.2023
Approved after reviewing 05.04.2023
Accepted 27.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»