

УДК 624.046

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-20-31](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-20-31)

EDN: APUHRI

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УКЛАДКИ СЛОЕВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Л.А. АДЕГОВА, канд. техн. наук

М.В. БОБРЫШЕВА

А.Е. ЩЕРБИНИНА 

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
Ленинградская ул., д. 113, г. Новосибирск, 630008, Российская Федерация*

Аннотация

Введение. Использование композиционных материалов в конструкциях и деталях востребовано. Актуальность работы определяется исследованием устойчивости оболочечной конструкции из углепластика. Задача анализа на механическое поведение расположения слоев намотки оболочки остается недостаточно исследованной, хотя имеется опыт в создании геометрических моделей конечно-элементных сеток и исследовании потери устойчивости конструкции, выполненной из оболочки. Поэтому вопрос влияния на форму потери устойчивости при варьировании расположения слоев намотки актуален для их регламентации при различной комбинации углов, так как нет полных данных.

Цель исследования – выявление расположения слоев намотки, при котором будут действовать максимальная и минимальная критические силы.

Материалы и методы. Объект исследования – цилиндрическая оболочка радиусом 300 мм, высотой 600 мм и толщиной стенки 1,56 мм из восьми слоев углеродного волокна различной ориентации, пропитанного эпоксидной смолой. Моделирование конструкции проводилось с помощью метода конечных элементов. Стенки цилиндрической оболочки моделировались плоскими элементами типа Laminate, учитывающими слои укладки композита. По нижнему торцу цилиндр имел жесткое защемление, по верхнему – прикладывалась осевая сжимающая сила 100 кН. С использованием программного комплекса получены различные варианты потери устойчивости для дальнейшего анализа.

Результаты. Методом конечных элементов получены данные, описывающие потерю устойчивости цилиндрической оболочки, – коэффициент критической нагрузки при первой форме потери устойчивости, также приведены графики зависимости критической силы от вариантов укладок слоев. В зависимости от величины критической силы и формы потери устойчивости выбраны наиболее и наименее благоприятные варианты укладок слоев в пакете композиционного материала.

Выводы. Установлено, что ориентация слоев в пакете композиционного материала влияет на форму потери устойчивости и величину критической силы. Зная условия нагружения и закрепления конструкции, можно рационально выбирать ориентацию слоев, что увеличивает критическую силу в 2,25 раза.

Ключевые слова: устойчивость, композиционный материал, критическая сила, цилиндрическая оболочка, углепластик

Для цитирования: Адегова Л.А., Бобрышева М.В., Щербинина А.Е. Оценка влияния укладки слоев композиционного материала на потерю устойчивости цилиндрической оболочки. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022;33(2):20–31. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-20-31](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-20-31)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.02.2022

Поступила после рецензирования 19.05.2022

Принята к публикации 24.05.2022

EFFECTS OF COMPOSITE MATERIAL LAYERING ON THE BUCKLING MODE OF A CYLINDRICAL SHELL

L.A. ADEGOVA, Cand. Sci. (Engineering)

M.V. BOBRY SHEVA

A.E. SHCHERBININA✉

*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),
Leningradskaya str., 113, Novosibirsk, 630008, Russian Federation*

Abstract

Introduction. At present, composite materials are widely used in building structures and their components. The relevance of the work is determined by the buckling study of a shell structure made of a carbon fiber reinforced polymer. Despite the available experience in creating geometric models of finite element grids and studying the buckling of shell structures, the task of analyzing the mechanical behavior of shell layers remains insufficiently investigated. Therefore, research into the effects caused by polymer layering variations on a buckling mode appears to be urgent for regulating the layering process at various angle combinations due to a lack of sufficient data.

Aim. The study was aimed at identifying a layering pattern, under which maximum and minimum critical forces operate.

Materials and methods. The object of the study involves a cylindrical shell with a radius of 300 mm, a height of 600 mm, and a wall thickness of 1.56 mm made of eight variously-oriented carbon fiber layers impregnated with epoxy resin. The design modeling was performed using the finite element method. The cylindrical shell walls were modeled in terms of Laminate type flat elements, taking into account the composite layers. At the lower end, the cylinder was rigidly fixed and 100 kN axial compressive force was applied to the upper end of the cylinder. Using a software package, the variants of buckling modes were obtained for further analysis.

Results. The data, describing the buckling of a cylindrical shell, including the critical load coefficient at the first buckling mode were obtained by the finite element method. In addition, the dependence of a critical force on layering patterns was determined. Depending on the critical force value and the buckling mode, the most and least favorable patterns of layering in a package of a composite material were selected.

Conclusions. The orientation of layers in a composite material package affects the buckling mode and the value of critical force. An optimal selection of the layer orientation increases the critical force value by 2.25 times based on the information about the conditions of structural loading and fastening.

Keywords: buckling, composite material, critical force, cylindrical shell, carbon plastic

For citation: Adegova L.A., Bobrysheva M.V., Shcherbinina A.E. Effects of composite material layering on the buckling mode of a cylindrical shell. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022;33(2):20–31. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-20-31](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-20-31)

Author contribution statements

All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.02.2022

Revised 19.05.2022

Accepted 24.05.2022

Введение

В мире во многих сферах деятельности человека применяются композиционные материалы (КМ) благодаря их достоинствам и экономической целесообразности. Они обладают высокими характеристиками усталостной прочности и устойчивости к циклическому растрескиванию по сравнению с монолитными сплавами, при этом композиционные материалы имеют низкую плотность и высокую стойкость [1, 2]. Композиционные материалы широко используются в строительстве зданий и сооружений, транспортной инфраструктуры, жилищно-коммунальном хозяйстве [3]. Наиболее часто используются в этих отраслях следующие материалы: стеклопластики, текстолиты, углепластики, полимерные бетоны, органопластические композиты [4–7].

В строительной отрасли композиционные материалы могут использоваться в создании несущих и ограждающих конструкций, при усилении конструкций, в отделке внутренних и внешних поверхностей, производстве строительного инвентаря и элементов территориального благоустройства.

Одним из преимуществ композиционных материалов является то, что строитель может адаптировать материал в соответствии с его требованиями к жесткости и прочности в определенном направлении [8–10].

В данной работе был рассмотрен углепластик, обладающий следующими достоинствами применения: толщина составляет несколько миллиметров, не создает дополнительной нагрузки, прочность на растяжение выше в 5–6 раз по сравнению с железобетонной арматурой, легкий и быстрый монтаж, высокая коррозионная стойкость [11–13].

Внедрение конструкции из композиционного материала с широким диапазоном механических и физических свойств зависит от назначения конструкции. Для каждой конструкции необходимо разрабатывать расчетную модель и методику, учитывающую особенности структуры и характеристик этого материала. Механические свойства композиционного материала зависят от расположения армирующих элементов, поэтому может быть получена конструкция с направленной анизотропией механических свойств.

Для конструкций, выполненных из композиционных материалов, проводятся расчеты потери устойчивости, анализа напряженно-деформированного состояния и растяжения

материала, влияния трещин на состояние этих конструкций. Также расчет конструкции из композитного материала с широким диапазоном механических и физических свойств зависит от назначения конструкции [14–16].

Ранее одним из авторов было проведено исследование конструкций из композиционного материала, в работе с использованием метода конечных элементов (МКЭ) проведено исследование влияния высоты цилиндрического конструктивного элемента на форму потери устойчивости. Для элементов рассмотрена зависимость критической силы от геометрических характеристик и материала [17].

В прошлом исследовании не рассмотрена зависимость критической силы от расположения углов укладок композиционного материала.

Новая работа отличается от ранее проведенного исследования тем, что рассмотрена зависимость критической силы от углов укладок композиционного материала при использовании цилиндрической оболочки из определенного материала – углепластика, с фиксированными геометрическими характеристиками, что позволяет использовать модель в реальных конструкциях.

Задача анализа на механическое поведение расположения слоев намотки оболочки остается недостаточно исследованной, хотя имеется опыт в создании геометрических моделей конечно-элементных сеток и исследовании потери устойчивости конструкции, выполненной из оболочки. К примеру, нет полных данных о влиянии на форму потери устойчивости при варьировании расположения слоев намотки для их регламентации под различной комбинацией углов [18, 19].

Основные цели работы:

- рассмотрение первой формы потери устойчивости цилиндрической оболочки и расчет величины критических сил в зависимости от расположения слоев намотки в пакете композиционного материала;
- выявление расположения слоев намотки, при котором будут действовать максимальная и минимальная критические силы.

Выбор расчетной схемы

В работе приведены результаты потери устойчивости короткого отсреза замкнутой цилиндрической оболочки высотой 600 мм и радиусом 300 мм (рис. 1).

Цилиндрическая оболочка из композиционного материала изготавливается методом непрерывной намотки. Согласно этому методу ленту, образованную системой нитей или волокон, пропитывают клеем и помещают на вращающуюся оправку под определенным углом. По достижении заданной толщины и структуры материала производится полимеризация связующего и удаление

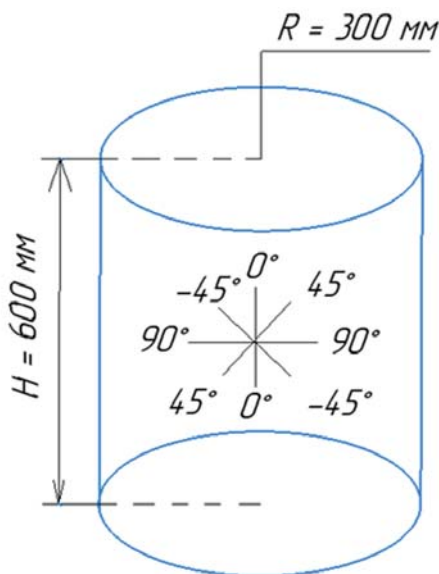


Рис. 1. Параметры оболочки и ориентация слоев намотки материала

Fig. 1. Shell parameters and material layering orientation

правки. Таким образом можно получить конструкцию с необходимой схемой армирования [20, 21].

Свойства композиционного материала соответствуют свойствам пластины, пропитанной эпоксидной смолой и выполненной из однонаправленного восьмислойного углеродного волокна с толщиной каждого слоя 0,195 мм. Рассматриваемый композиционный материал имеет следующие характеристики:

- продольный модуль упругости, $E_1 = 147000$ МПа;
- поперечные модули упругости, $E_2 = E_3 = 7580$ МПа;
- модуль сдвига в плоскости пластинки, $G_{12} = 3960$ МПа;
- межслоевой модуль сдвига, $G_{13} = 3960$ МПа;
- межслоевой модуль сдвига, $G_{23} = 3000$ МПа;
- коэффициент Пуассона в плоскости пластинки, $\mu_{12} = 0,33$;
- коэффициент Пуассона в межслоевом направлении, $\mu_{13} = 0,33$;
- коэффициент Пуассона в межслоевом направлении, $\mu_{23} = 0,38$;
- продольное растягивающее напряжение, $X_t = 2860$ МПа;
- продольное сжимающее напряжение, $X_c = 2860$ МПа;
- поперечное растягивающее напряжение, $Y_t = 1550$ МПа;
- поперечное сжимающее напряжение, $Y_c = 1550$ МПа;
- напряжение сдвига, $S = 104$ МПа.

Анализ устойчивости с использованием пакета конечно-элементного анализа

Для исследования потери устойчивости цилиндрической оболочки был проведен расчет конструкции с использованием пакета конечно-элементного анализа [22–24].

Для моделирования характеристик композита использовался двумерный ортотропный материал, с помощью которого заданы свойства слоев композита в двух ортогональных направлениях на плоскости. Нулевой угол укладки слоя композита совпадает с направлением продольной оси цилиндра.

Стенки цилиндрической оболочки смоделированы плоскими четырехугольными элементами типа Laminate, определяющими слои укладки композита. Элементы типа Laminate учитывают все внутренние силовые факторы и воспринимают мембранные, сдвиговые, поперечные и изгибные нагрузки.

Условия нагружения и закрепления модели реализуются с помощью двух Rigid элементов по торцам цилиндра. Независимые узлы Rigid элементов располагаются на оси цилиндра, зависимые узлы – на дуге верхнего и нижнего оснований цилиндра. Независимые узлы связываются с зависимыми по поступательным степеням свободы. Этим достигается условие сохранения формы торцов цилиндра при возможных деформациях.

По нижнему торцу цилиндра независимый узел закрепляется по шести степеням свободы. Этим обеспечивается закрепление оболочки.

Распределение сжимающей нагрузки выполнено с учетом гипотезы плоских сечений. Для этого по верхнему торцу цилиндра к независимому узлу прикладывается произвольная нагрузка, равномерно распределенная по верхнему торцу оболочки, в виде осевой сжимающей силы $F = 100$ кН (рис. 2).

В модели оболочки заданы 8 слоев намотки, для каждого слоя создано направление, выбранное из углов намотки материала -45° , 0° , 90° , 45° . Общая толщина оболочки составила 1,56 см.

С использованием метода комбинаторики было определено количество вариантов намоток композита с различными углами ориентации слоев по формуле:

$$P_8(2,2,2,2) = \frac{8!}{2! \cdot 2! \cdot 2! \cdot 2!}, \quad (1)$$

где 8 – количество укладок слоев, 2 укладки с углом 0° , 2 укладки с углом 90° , 2 укладки с углом 45° , 2 укладки с углом -45° .

Для композита, состоящего из 8 слоев, количество вариантов намоток составило 2520 вариаций.

В представленной работе было рассмотрено 200 вариантов, из которых 24 – с симметричной укладкой слоев и 176 – с несимметричной укладкой.

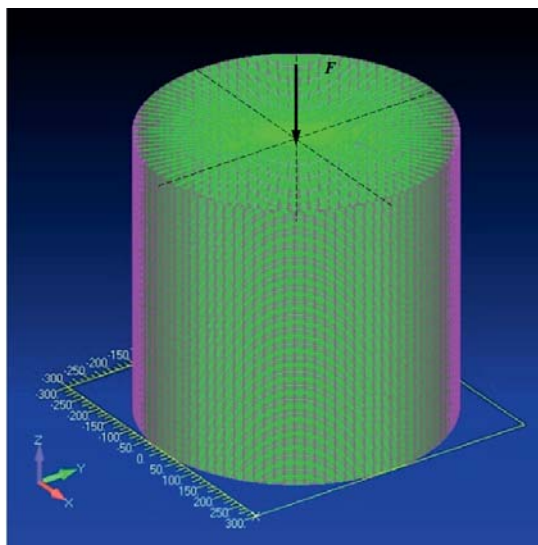


Рис. 2. Конечно-элементная модель
Fig. 2. Finite element model

Механическое поведение оболочки

В данной работе рассмотрена первая форма потери устойчивости цилиндрической оболочки и определена первая критическая сила в пакете конечно-элементного анализа [25].

Теоретическое значение критической нагрузки потери устойчивости цилиндрической оболочки при нагружении осевой силой определяется соотношением:

$$F_{cr} = \frac{2\pi E \delta^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости, МПа;
 δ – толщина стенки оболочки;
 ν – коэффициент Пуассона.

В данной работе расчет критической нагрузки, представленный по формуле выше, проводился не в теоретическом определении критических сил, а с помощью программного комплекса метода конечных элементов. Также при моделировании конструкции в данном комплексе автоматически учитываются такие параметры, как размеры поперечного сечения, изменение длины и упругие характеристики материала [26].

Критическая сила, при которой происходит потеря устойчивости, с использованием программного комплекса определялась соотношением:

$$F_{cr} = F \times \lambda, \quad (3)$$

где $F = 100\,000$ Н – сжимающая сила;

λ – коэффициент критической нагрузки при первой форме потери устойчивости, который равен собственному значению, вычисленному с помощью МКЭ.

Результаты

Методом конечно-элементного анализа были получены формы потери устойчивости при симметричной укладке и несимметричной укладке слоев в пакете композиционного материала. Благодаря использованному методу получена не только величина критической силы, при которой произойдет потеря устойчивости, но и форма потери устойчивости цилиндрической оболочки.

При разных вариантах укладки слоев композиционного материала оболочка имеет различную форму потери устойчивости и величину критической силы. Наибольшая критическая сила, равная 466,865 кН, достигается для симметричной укладки слоев композита: -45° ; 45° ; 0° ; 90° ; 90° ; 0° ; 45° ; -45° , схема расположения слоев представлена на рис. 3 и имеет деформацию скручивания, которая представлена на рис. 4 (а). Наименьшая критическая сила, равная 206,994 кН, выявлена при несимметричной укладке слоев композита: -45° ; -45° ; 0° ; 0° ; 90° ; 90° ; 45° ; 45° , и имеет также деформацию скручивания, которая показана на рис. 4 (b).

На рис. 5 и 6 показаны графики для симметричных и несимметричных укладок слоев, которые показывают зависимость изменения критической силы от вариантов намотки.

Графики начинаются с укладки, где критическая сила имеет максимальное значение, и заканчиваются, где критическая сила минимальна.

Заключение

Представленной работой доказано, что величина критической силы цилиндрической оболочки зависит от расположения углов укладки композиционного материала. Конечно-элементный анализ позволил оценить форму потери устойчивости. Зная условия нагружения

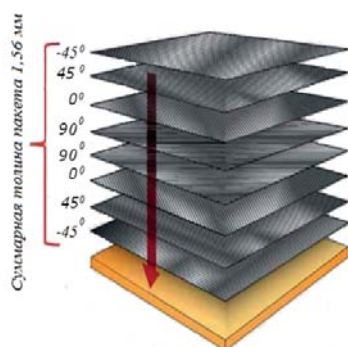
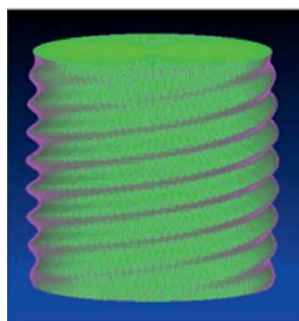
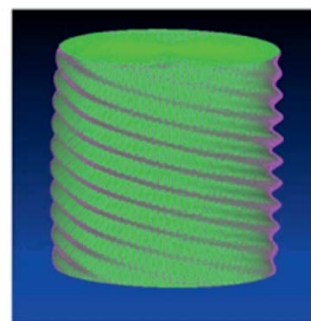


Рис. 3. Схема расположения слоев композиционного материала

Fig. 3. Layout of composite material layers



а



б

Рис. 4. Формы потери устойчивости при максимальной критической силе (а) и минимальной критической силе (б)

Fig. 4. Buckling modes at the maximum (a) and minimum critical force (b)

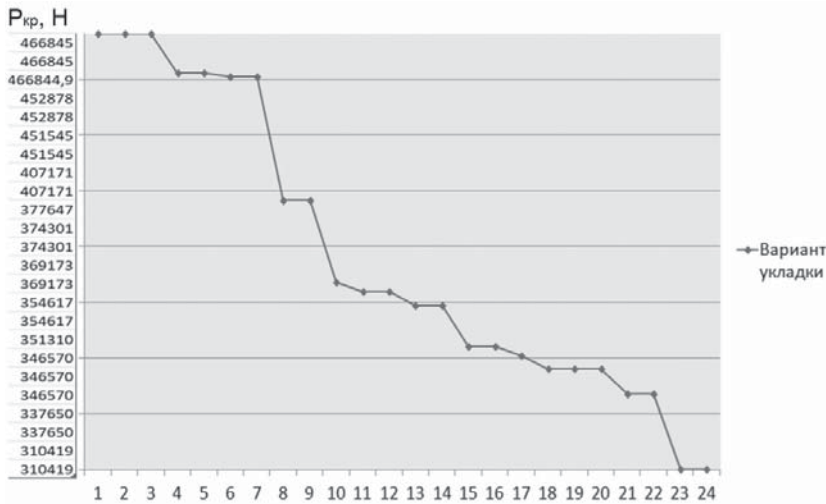


Рис 5. Зависимость критической силы от вариантов симметричных укладок слоев

Fig. 5. Dependence of the critical force on the variants of symmetrical layering

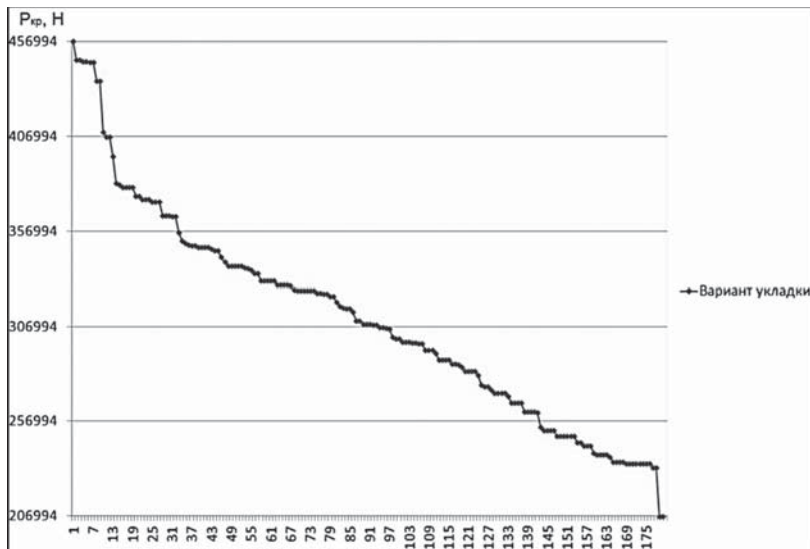


Рис. 6. Зависимость критической силы от вариантов несимметричных укладок слоев

Fig. 6. Dependence of the critical force on the variants of non-symmetrical layering

конструкции, выполненной из композиционного материала, необходимо рационально выбирать ориентацию слоев композита для получения наибольшей критической силы.

Результаты исследования помогут регламентировать допустимую осевую нагрузку в создании деталей с наиболее оптимальными показателями устойчивости для машиностроения и других областей, в которых используются цилиндрические оболочки.

Таким образом, у композиционного материала с одинаковым количеством слоев укладки можно увеличить величину критической силы в 2,25 раза за счет различного расположения углов укладок в пакете.

Список литературы

1. *Rah K., Van Paepegem W., Habraken A.M., Degrieck J.* A mixed solid-shell element for the analysis of laminated composites. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2012;89(7):805–828. <https://doi.org/10.1002/nme.3263>
2. *Sofiye A.H., Avcar M.* The stability of cylindrical shells containing an FDM layer subjected to axial load on the pasternak foundation. *Engineering*. 2010;02(04):228–236. <https://doi.org/10.4236/eng.2010.24033>
3. *Цыгвинцев И.В., Постникова П.И., Сенцов И.В.* Применение композитных материалов в строительстве. *Инновационное развитие*. 2017;(7):26–29.
4. *Корбова А.А.* Проектирование легкой катерной надстройки из полимерных композиционных материалов. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2020;(S2):242–249.
5. *Малаховский С.С., Панафидникова А.Н., Костромина Н.В., Осипчик В.С.* Углепластики в современном мире: их свойства и применения. *Успехи в химии и химической технологии*. 2019;33(6):62–64.
6. *Quintelier J., Samyn P., De Baets P., Tuzolana T., Van Paepegem W., Van den Abeele F., Vermeulen J.* Wear behavior of carbon fiber-reinforced poly (phenylene sulfide). *Polymer Composites*. 2006;27(1):92–98. <https://doi.org/10.1002/pc.20165>
7. *Samyn P., Van Schepdael L., Leendertz J.S., Gerber A., Van Paepegem W., De Baets Degrieck J.* Deformation of reinforced polymer bearing elements on full-scale compressive strength and creep tests under yielding conditions. *Polymer Testing*. 2006;25(2):230–245. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.10.004>
8. *Давлетчин Д.И.* Композиционные материалы для авиастроения, энергетики, машиностроения. *Наукоемкие технологии*. 2019;20(2):34–39.
9. *Aimenov Zh.T., Khudyakova T.M., Sarsenbayev B.K.* Composite cements production and their economic and technological advantages. In: *Industrial Technologies and Engineering (ICITE-2017): IV International Conference*, Shymkent, Kazakhstan, 26–27 октября 2017 года. Shymkent, Kazakhstan: Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения «Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова»; 2017. p. 301–306.
10. *Stepanova M.Y., Baurova N.I.* Analysis of methods for determining the biostability of polymer composite materials used in mechanical engineering. *Polymer Science. Series D*. 2020;13(3):345–348. <https://doi.org/10.1134/s1995421220030193>
11. *Lamberti M., Pedata P., Sannolo N., Porto S., Caraglia M., De Rosa A.* Carbon nanotubes: properties, biomedical applications, advantages and risks in patients and occupationally-exposed workers. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*. 2015;28(1):4–13. <https://doi.org/10.1177/0394632015572559>
12. *Neumeister J., Jansson S., Leckie F.* The effect of fiber architecture on the mechanical properties of carbon/carbon fiber composites. *Acta Materialia*. 1996;44(2):573–585. [https://doi.org/10.1016/1359-6454\(95\)00184-0](https://doi.org/10.1016/1359-6454(95)00184-0)
13. *Vasilescu A., Gáspár S., Hayat A., Marty J.-L.* Advantages of carbon nanomaterials in electrochemical aptasensors for food analysis. *Electroanalysis*. 2018;30(1):2–19. <https://doi.org/10.1002/elan.201700578>
14. *Аношкин А.Н., Федоровцев Д.И., Писарев П.В., Осокин В.М.* Расчет напряженно-деформированного состояния фланца из полимерных композиционных материалов с дефектом в виде расслоения. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2015;(43):116–130.
15. *Карташова Е.Д., Муйземнек А.Ю.* Расчет межслойных напряжений в композиционных оболочках с двоякой положительной кривизной. *Вестник Пензенского государственного университета*. 2017;(2):105–111.
16. *Кудряшов А.Б., Кутышов В.Ф.* Методика расчета и проектирования створок люков летательных аппаратов из композиционных материалов. *Ученые записки ЦАГИ*. 1985;16(5):74–83.
17. *Адегова Л.А., Голдаева А.В., Паршин И.В.* Исследование потери устойчивости конструктивных элементов. В: *Интеллектуальный потенциал Сибири: сборник научных трудов*. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет; 2018. с. 155–157.
18. *Артемова А.А., Баранова М.С., Кибец А.И., Романов В.И., Рябов А.И., Шошин Д.В.* Конечно-элементный анализ устойчивости упругопластической сферической оболочки при всестороннем сжатии. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011;(3):158–162.
19. *Косицын С.Б., Акулич В.Ю.* Определение критической нагрузки потери устойчивости стержневой и плоской моделей круговой цилиндрической оболочки, взаимодействующей с основанием. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019;15(4):291–297.

20. Гумерова Х.С. Модель потери устойчивости термочувствительной оболочки вращения, полученной путем намотки. Вестник Технологического университета. 2019;22(4):122–124.
21. Рач В.А., Могильный Г.А., Малков И.В. Способ изготовления сложнопрофильных изделий из композиционных материалов методом непрерывной намотки: Патент № 2089444 С1 Российская Федерация. Опубл. 10.09.1997.
22. Попова А.П. Исследование устойчивости сжатой анизотропной цилиндрической оболочки. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018;1(14):266–268.
23. Рытова Т.Г. К вопросу потери устойчивости предварительно-напряженных тонкостенных цилиндрических оболочек. Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2019;(4):111–118.
24. Li C., Liu Z.-H., Zheng Y.-P. Effect of anisotropy of composite material plate on hole-edge stresses of rectangle hole. Jilin Daxue Xuebao (Gongxueban). 2007;37(6):1327–1331.
25. Васильев В.В. К задаче устойчивости цилиндрической оболочки при осевом сжатии. Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2011;(2):5–15.
26. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. Москва.: ДМК Пресс; 2013. 784 с.: ил.

References

1. Rah K., Van Paepegem W., Habraken A.M., Degrieck J. A mixed solid-shell element for the analysis of laminated composites. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2012;89(7):805–828. <https://doi.org/10.1002/nme.3263>
2. Sofiyev A.H., Avcar M. The stability of cylindrical shells containing an FDM layer subjected to axial load on the pasternak foundation. Engineering. 2010;02(04):228–236. <https://doi.org/10.4236/eng.2010.24033>
3. Tsygvintsev I.V., Postnikova P.I., Sentsov I.V. The use of composite materials in construction. Innovatsionnoe razvitie [Innovative development]. 2017;(7):26–29 (in Russian).
4. Korbova A.A. Designing a light boat superstructure made of polymer composite materials. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra = Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020;(S2):242–249 (in Russian).
5. Malakhovsky S.S., Panafidnikova A.N., Kostromina N.V., Osipchik V.S. Carbon fiber plastics in the modern world: their properties and applications. Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii = Advances in chemistry and chemical technology. 2019;33(6):62–64 (in Russian).
6. Quintelier J., Samyn P., De Baets P., Tuzolana T., Van Paepegem W., Van den Abeele F., Vermeulen J. Wear behavior of carbon fiber-reinforced poly (phenylene sulfide). Polymer Composites. 2006;27(1):92–98. <https://doi.org/10.1002/pc.20165>
7. Samyn P., Van Schepdael L., Leendertz J. S., Gerber A., Van Paepegem W., De Baets Degrieck J. Deformation of reinforced polymer bearing elements on full-scale compressive strength and creep tests under yielding conditions. Polymer Testing. 2006;25(2):230–245. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.10.004>
8. Davletchin D.I. Composite materials for aircraft construction, power engineering, mechanical engineering. Naukoemkie tekhnologii Science Intensive Technologies. 2019;20(2):34–39 (in Russian).
9. Aimenov Zh.T., Khudyakova T.M., Sarsenbayev B.K. Composite cements production and their economic and technological advantages. In: Industrial Technologies and Engineering (ICITE-2017): IV International Conference, Shymkent, Kazakhstan, October 26–27, 2017. Shymkent, Kazakhstan: Republican state Enterprise on the right of economic management “M. Auezov South Kazakhstan State University”; 2017. p. 301–306.
10. Stepanova M.Y., Baurova N.I. Analysis of methods for determining the biostability of polymer composite materials used in mechanical engineering. Polymer Science. Series D. 2020;13(3):345–348. <https://doi.org/10.1134/s1995421220030193>
11. Lamberti M., Pedata P., Sannolo N., Porto S., Caraglia M., De Rosa A. Carbon nanotubes: properties, biomedical applications, advantages and risks in patients and occupationally-exposed workers. International Journal of Immunopathology and Pharmacology. 2015;28(1):4–13. <https://doi.org/10.1177/0394632015572559>
12. Neumeister J., Jansson S., Leckie F. The effect of fiber architecture on the mechanical properties of carbon/carbon fiber composites. Acta Materialia. 1996;44(2):573–585. [https://doi.org/10.1016/1359-6454\(95\)00184-0](https://doi.org/10.1016/1359-6454(95)00184-0)

13. Vasilescu A., Gáspár S., Hayat A., Marty J.-L. Advantages of carbon nanomaterials in electrochemical aptasensors for food analysis. *Electroanalysis*. 2018;30(1):2–19. <https://doi.org/10.1002/elan.201700578>
14. Anoshkin A.N., Fedorovtsev D.I., Pisarev P.V., Osokin V.M. Calculation of the stress-strain state of a flange made of polymer composite materials with a defect in the form of a bundle. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika = PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2015;43:116–130 [in Russian].
15. Kartashova E.D., Muyzemnek A.Yu. Calculation of interlayer stresses in composite shells with double positive curvature. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Penza state university*. 2017;(2):105–111 [in Russian].
16. Kudryashov A.B., Kutyshev V.F. Methodology of calculation and design of hatch doors of aircraft made of composite materials. *Uchenye zapiski TsAGI [Scientific notes of TsAGI]*. 1985;16(5):74–83 [in Russian].
17. Adegova L.A., Goldaeva A.V., Parshin I.V. Study of structural elements stability loss. In: *Intellectual potential of Siberia: Collection of scientific papers*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2018. p. 155–157 [in Russian].
18. Artemyeva A.A., Baranova M.S., Kibets A.I., Romanov V.I., Ryabov A.I., Shoshin D.V. Finite element analysis of the stability of an elastic-plastic spherical shell under comprehensive compression. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im N.I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011;(3):158–162 [in Russian].
19. Kositsyn S.B., Akulich V.Yu. Determination of the critical load of the loss of stability of the rod and plane models of a circular cylindrical shell interacting with the base. *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2019;15(4):291–297 [in Russian].
20. Gumerova H.S. Model loss of stability of the thermosensitive shell of rotation obtained by winding. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2019;22(4):122–124 [in Russian].
21. Rach V.A., Mogilny G.A., Malkov I.V. Method of manufacturing composite products from composite materials by continuous winding: Patent No. 2089444 C1 Russian Federation. Publ. date 10 September 1997 [in Russian].
22. Popova A.P. Investigation of the stability of a compressed anisotropic cylindrical shell. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики [Actual problems of aviation and cosmonautics]*. 2018;1(14):266–268 [in Russian].
23. Rytova T.G. On the issue of loss of stability of prestressed thin-walled cylindrical shells. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya = Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*. 2019;(4):111–118 [in Russian].
24. Li C., Liu Z.-H., Zheng Y.-P. Effect of anisotropy of composite material plate on hole-edge stresses of rectangle hole. *Jilin Daxue Xuebao (Gongxueban)*. 2007;37(6):1327–1331.
25. Vasiliev V.V. To the problem of stability of a cylindrical shell under axial compression. *Mechanics of Solids*. 2011;46(2):161–169 [in Russian]. <https://doi.org/10.3103/s0025654411020026>
26. Rychkov S.P. Modeling of structures in the Femap environment with NX Nastran. Moscow: DMK Press Publ.; 2013 [in Russian].

Информация об авторах / Information about the authors

Людмила Алексеевна Адегова, канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительная механика» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет», Новосибирск
Scopus Author ID: 57213838719
ORCID ID: 0000-0003-3234-0977
e-mail: l.adegova@sibstrin.ru

Lyudmila A. Adegova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Constructional Mechanics, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk
Scopus Author ID: 57213838719
ORCID ID: 0000-0003-3234-0977
e-mail: l.adegova@sibstrin.ru

Мария Викторовна Бобрышева, студент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет», Новосибирск

ORCID ID: 0000-0002-3565-7294

e-mail: m.bobrysheva@edu.sibstrin.ru

Maria V. Bobrysheva, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk

ORCID ID: 0000-0002-3565-7294

e-mail: m.bobrysheva@edu.sibstrin.ru

Александра Евгеньевна Щербинина✉, студент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет», Новосибирск

ORCID ID: 0000-0002-8813-0912

e-mail: shherbinina-sash@mail.ru

Alexandra E. Scherbinina✉, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk

ORCID ID: 0000-0002-8813-0912

e-mail: shherbinina-sash@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author