

УДК 624.046

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-342-350>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ВЫПОЛНЕННОЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Л.А. Адегова, М.В. Бобрышева, А.Е. Щербинина

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
г. Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Композиционные материалы применяются в строительстве объектов транспортной инфраструктуры, зданий и сооружений разного назначения, в жилищно-коммунальном хозяйстве. Расчёт конструкций из композиционных материалов используется в области: напряженно-деформированного состояния, потери устойчивости, анализа при растяжении материала, влияния трещин на состояние этих конструкций. Рассматриваются основные свойства композиционных материалов и способ изготовления конструкции цилиндрической оболочки из композиционного материала. Общее количество вариантов намоток вычисляется методом комбинаторики.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбрана композиционная цилиндрическая оболочка радиусом $R = 300$ мм и высотой $H = 600$ мм. Описано создание модели цилиндрической оболочки в пакете конечно-элементного анализа. Задана осевая сжимающая нагрузка, действующая на оболочку силой $F = 100$ кН. Определение соотношения критической силы.

Результаты. Получены результаты анализа потери устойчивости цилиндрической оболочки и приведены графики зависимости критической силы от вариантов укладки слоёв. В зависимости от величины критической силы и формы потери устойчивости определены наиболее и наименее благоприятные варианты укладки слоёв в пакете композиционного материала.

Обсуждение и заключение. Сделан вывод зависимости критической силы от комбинации укладки слоёв в композите.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композиционный материал, цилиндрическая оболочка, устойчивость, критическая сила, углепластик.

Поступила 23.05.21, принята к публикации 30.06.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Адегова, Л.А. Исследование потери устойчивости цилиндрической оболочки, выполненной из композиционного материала / Л.А. Адегова, М.В. Бобрышева, А.Е. Щербинина. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-342-350> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 3(79). – С. 342-350.

© Адегова Л.А., Бобрышева М.В., Щербинина А.Е., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-342-350>

STUDY OF STABILITY LOSS OF A CYLINDRICAL SHELL MADE OF COMPOSITE MATERIAL

*Ludmila A. Adegova, Maria V. Bobrysheva, Alexandra E. Scherbinina
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),
Novosibirsk, Russia*

ABSTRACT

Introduction. Composite materials are used in the construction of transport infrastructure facilities, buildings and structures for various purposes, in housing and communal services. Calculation of structures made of composite materials is used in the field of stress-strain state, buckling, analysis of material under tension, the effect of cracks on the state of these structures. The main properties of composite materials and a method of manufacturing a cylindrical shell structure from a composite material are considered. The total number of winding options is calculated using the combinatorial method.

Materials and methods. A composite cylindrical shell with a radius of $R = 300$ mm and a height of $H = 600$ mm was chosen as the object of research. The creation of a model of a cylindrical shell in a finite element analysis package is described. An axial compressive load acting on the shell with a force of $F = 100$ kN is specified. Determination of the critical force ratio.

Results. The results of the analysis of the loss of stability of the cylindrical shell are obtained and the graphs of the dependence of the critical force on the options for laying the layers are presented. Depending on the magnitude of the critical force and the form of buckling, the most and least favorable options for laying layers in a composite material package have been determined.

Discussion and conclusions. A conclusion is made of the dependence of the critical force on the combination of stacking layers in the composite.

KEYWORDS: Composite material, cylindrical shell, stability, deformation, critical force, carbon fiber, stress-strain state.

Submitted 23.05.21, revised 30.06.21.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Adegova L.A., Bobrysheva M.V., Scherbinina A.E. Study of stability loss of cylindrical shell made of composite material. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (3): 342-350. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-342-350>

© Adegova L.A., Bobrysheva M.V., Scherbinina A.E., 2021



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В мире во многих сферах деятельности человека используются композиционные материалы благодаря их достоинствам и экономической целесообразности.

Применяются композиционные материалы в строительстве объектов транспортной инфраструктуры, зданий и сооружений разного назначения, в жилищно-коммунальном хозяйстве [1]. Их использование достаточно многообразно в этой отрасли. Выделяя наиболее распространенные из них, получим: углепластики, полимерные бетоны, стеклопластики, текстолиты [2, 3, 4, 5].

В настоящее время расчёт конструкций из композиционных материалов используется в области: напряженно-деформированного состояния, потери устойчивости, анализа при растяжении материала, влияния трещин на состояние этих конструкций [6].

В области расчёта конструкций из композиционных материалов активно применяются расчеты конструкций для летательных аппаратов, например, для определения наиболее выгодного армирования несущих слоёв, а также для выбора оптимальной толщины материала. При помощи общей теории оболочек проводится расчёт межслойных нормальных напряжений на основе перемещений в слоистых композиционных конструкциях [7, 8].

Для ремонта и реконструкций опорных конструкций с помощью композиционных материалов довольно широко используются цилиндрические оболочки. Например, расчёт усиления железобетонной конструкции, для которой предусмотрена система внешнего армирования композиционными материалами [9, 10].

Благодаря своей высокой удельной жесткости и прочности композиционные материалы за последние два десятилетия стали популярными во всех отраслях технологической жизнедеятельности человека, особенно в аэрокосмической, автомобильной и ветроэнергетической отраслях. Одним из преимуществ композиционных материалов является то, что строитель может адаптировать материал в соответствии с его требованиями к жесткости и прочности в определенном направлении [11, 12, 13]. Наряду с этим присутствуют и другие преимущества применения углепластика: 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 [14, 15, 16].

Внедрение конструкции из композиционного материала с широким диапазоном механических и физических свойств зависит от назначения конструкции. Необходимо разработать расчетную модель и методику, учитывающую особенности структуры и характеристики этого материала. Механические свойства композиционного материала зависят от расположения армирующих элементов, поэтому может быть получена конструкция с направленной анизотропией механических свойств [17].

Способ изготовления конструкции цилиндрической оболочки из композиционных материалов осуществляется методом непрерывной намотки. Способ, согласно которому 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 правки. Таким образом можно получить конструкцию с необходимой схемой армирования.

Так как конструкции цилиндрических оболочек используются во многих отраслях строительства, важно, чтобы оболочки были устойчивыми к нагрузке, для того чтобы избежать потери устойчивости, из-за чего происходит обрушение конструкции [18, 19].

С помощью пакета конечно-элементного анализа FEMAP with NX Nastran создана модель цилиндрической оболочки из углепластика с учётом 8 слоёв намотки.

Для анализа необходимо вычислить общее количество вариантов намоток для 8 слоёв с различными заданными углами, методом комбинаторики определено 2520 вариаций по формуле

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

здесь 8 – количество укладок слоёв, 2 укладки с углом 0°, 2 укладки с углом 90°, 2 укладки с углом 45°, 2 укладки с углом -45°.

Было рассмотрено 200 вариантов, из которых 24 с симметричной намоткой и 176 с несимметричной намоткой. При рассмотрении вариантов первыми рассчитывались симметричные укладки слоёв, при проведении расчётов коэффициента критической нагрузки с несимметричными укладками слоёв полученные результаты сравнивались с предыдущими значениями. Были рассмотрены 176 различных несимметричных комбинаций, но оптимальные варианты возможны только при симметричной укладке. Для них в пакете конечно-элементного анализа получены зна-

чения коэффициента критической нагрузки и рассчитаны критические силы.

Несмотря на наличие большого опыта разработки и эксплуатации оболочечных конструкций из полимерных композиционных материалов, задача анализа на механическое поведение расположения слоёв намотки оболочки остается недостаточно исследованной. В частности, нет исчерпывающих данных о влиянии на устойчивость и форму потери устойчивости при варьировании расположения слоёв намотки под различными, установленными ранее углами для их регламентации [20, 21].

Цель работы – выполнить исследование потери устойчивости цилиндрической оболочки, выполненной из композиционного материала, с помощью пакета конечно-элементного анализа, чтобы установить закономерность влияния ориентации слоев намотки в пакете композиционного материала.

Основными задачами являются: рассмотрение первой формы потери устойчивости цилиндрической оболочки и расчёт величины критических сил в зависимости от расположения слоёв намотки в пакете композиционного материала, а также выявление расположения слоёв намоток, при которых будут действовать максимальная и минимальная критические силы.

Объектом исследования в данной работе является цилиндрическая оболочка, выполненная из композиционного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выбор расчетной схемы. В качестве объекта исследования выбрана композиционная ци-

линдрическая оболочка радиусом $R = 300$ мм и высотой $H = 600$ мм, представленная на рисунке 1. Для моделирования оболочки из композиционного материала использовался двумерный ортотропный материал с заданными характеристиками, которые указаны в таблице.

В осевом направлении цилиндрическая оболочка может свободно деформироваться, но не смещаться, так как закреплена по нижнему торцу [22].

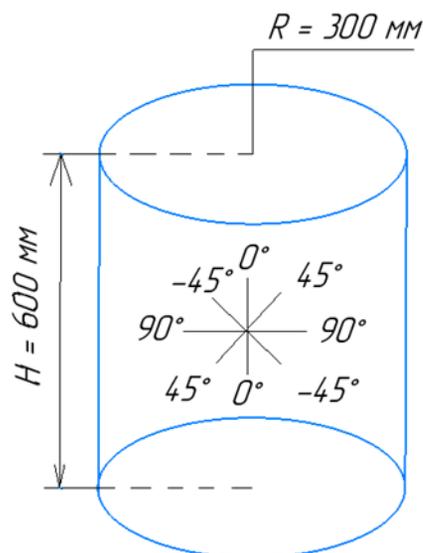


Рисунок 1 – Параметры оболочки и ориентация слоёв намотки материала

Figure 1 - Composite shell and orientation of the material winding layer

Таблица
Характеристики композиционного материала

Table
Characteristics of the composite material

Свойства	Единицы измерения	Значения
Продольный модуль упругости, E_1	МПа	147000
Поперечные модули упругости, $E_2 = E_3$	МПа	7580
Модуль сдвига в плоскости пластинки, G_{12}	МПа	3960
Межслоевой модуль сдвига, G_{13}	МПа	3960
Межслоевой модуль сдвига, G_{23}	МПа	3000
Коэффициент Пуассона в плоскости пластинки, μ_{12}		0,33
Коэффициент Пуассона в межслоевом направлении, μ_{13}		0,33
Коэффициент Пуассона в межслоевом направлении, μ_{23}		0,38
Продольное растягивающее напряжение, X_t	МПа	2860
Продольное сжимающее напряжение, X_c	МПа	2860
Поперечное растягивающее напряжение, Y_t	МПа	1550
Поперечное сжимающее напряжение, Y_c	МПа	1550
Напряжение сдвига, S	МПа	104
Толщина слоя, t	мм	0,195

Стенки цилиндрической оболочки смоделированы плоскими элементами типа Laminate, учитывающими слои укладки композита. Условия нагружения и закрепления 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 узлами по поступательным степеням свободы, этим достигается условие сохранения формы торцов цилиндра при возможных деформациях.

По нижнему торцу цилиндра независимый узел закрепляется по 6 степеням свободы, этим обеспечивается закрепление оболочки.

По верхнему торцу оболочки к независимому узлу прикладывается произвольная нагрузка в виде осевой сжимающей силы $F = 100\,000\text{ Н}$, которая равномерно распределяется по верхнему торцу оболочки.

Конечно-элементная модель и условие нагружения оболочки показаны на рисунке 2.

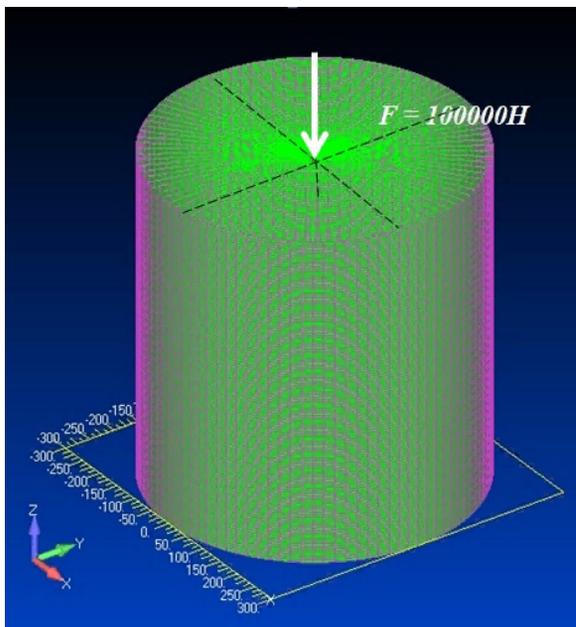


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель

Figure 2 – The finite element model

Механическое поведение оболочки. Рассмотрена первая форма потери устойчивости. Сделан анализ деформации оболочки и величины критической силы при различных углах

укладки слоёв. Критическая сила, при которой происходит потеря устойчивости, определяется соотношением

$$P_{кр} = F \cdot \lambda,$$

где $F = 100\,000\text{ Н}$ – сжимающая сила, а λ – коэффициент критической нагрузки при первой форме потери устойчивости.

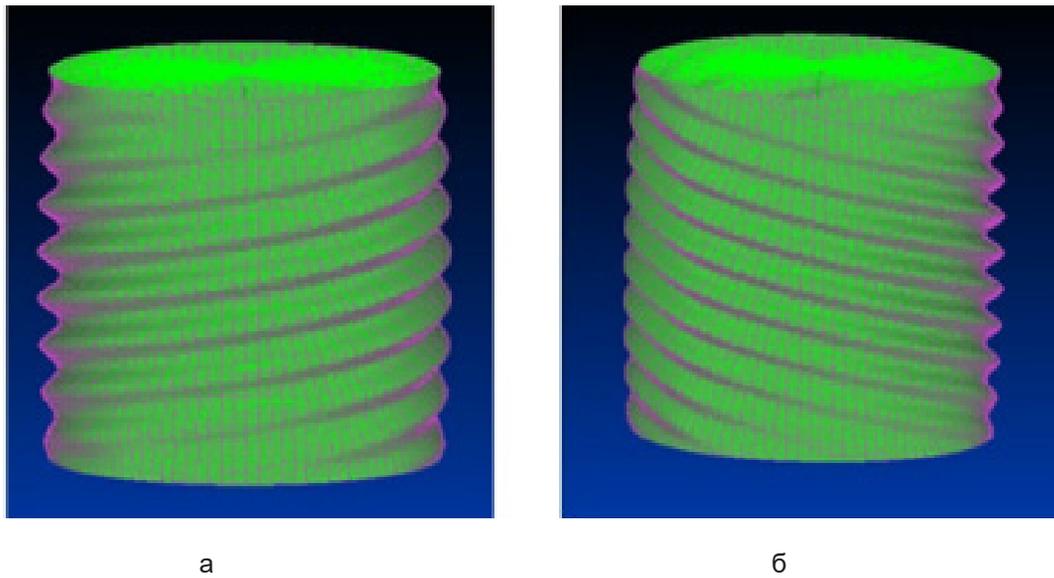
РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием метода конечно-элементного анализа были получены формы потери устойчивости при симметричной укладке и несимметричной укладке слоёв в пакете композиционного материала. Удалось не просто отследить форму потери устойчивости цилиндрической оболочки, но и получить величину критической силы, при которой произойдет потеря устойчивости.

В результате произведённых расчётов при разных вариантах укладки слоёв материала авторским коллективом сделаны выводы, что оболочка способна вынести наибольшую критическую силу, действующую при следующей ориентации слоёв композита: $-45^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ и имеет деформацию скручивания, которая представлена на рисунке 3, а. Проводился расчёт до выявления оболочки, которая деформируется при наименьшей критической нагрузке со следующими углами намотки: $-45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 45^\circ$, как и при предыдущей ориентации слоёв оболочки имеет деформацию скручивания, которая показана на рисунке 3, б.

По полученным данным построены графики для симметричных укладок (рисунок 4) и несимметричных укладок слоёв (рисунок 5), показывающие зависимость изменения критической силы от вариантов намотки. Графики начинаются с укладки, где критическая сила имеет максимальное значение, и заканчиваются, где критическая сила минимальна.

В результате данной работы установлено, что конечно-элементный анализ позволяет оценить процесс потери устойчивости и величину критической силы цилиндрической оболочки, зависящих от расположения углов укладок композиционного материала. А также расчётная практика показала, что на форму потери устойчивости и величину критической нагрузки влияет расположение слоёв в пакете композиционного материала.



а

б

Рисунок 3 – Формы потери устойчивости: а – при максимальной критической силе, б – при минимальной критической силе

Figure 3 - Forms of stability loss at maximum critical force (a) and minimum critical force (b)

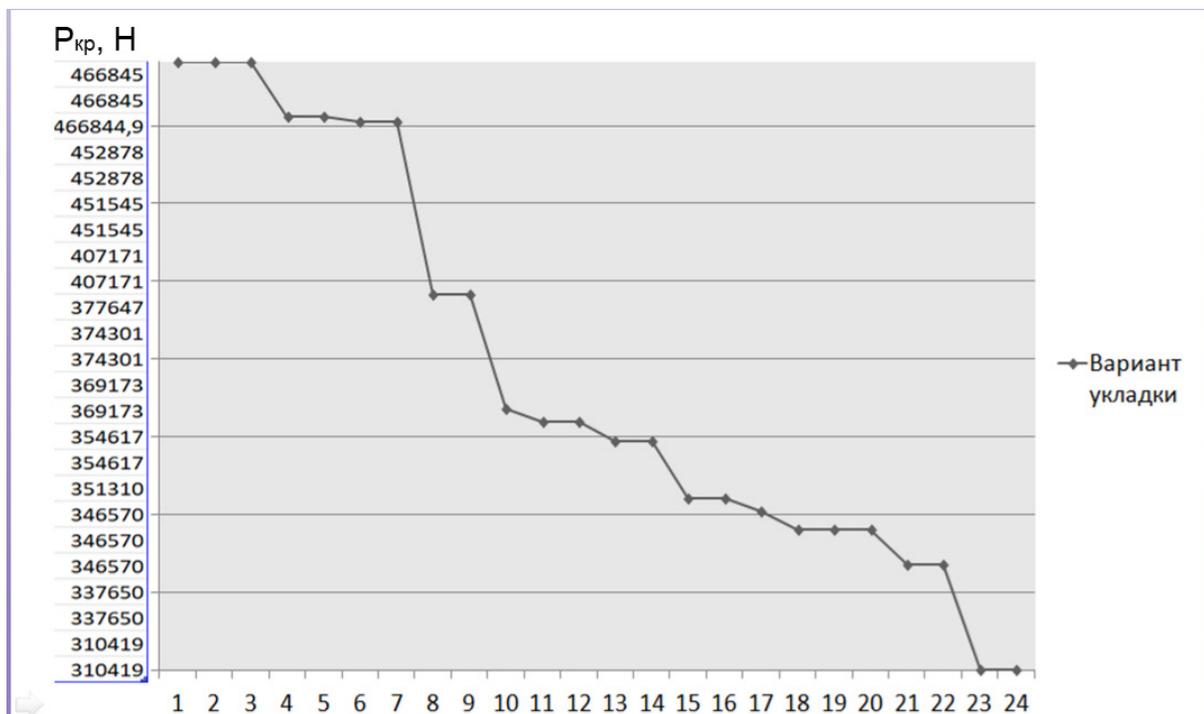


Рисунок 4 – Зависимость критической силы от вариантов симметричных укладок слоев

Figure 4 – Dependence of the critical force on the variants of symmetric layer layering

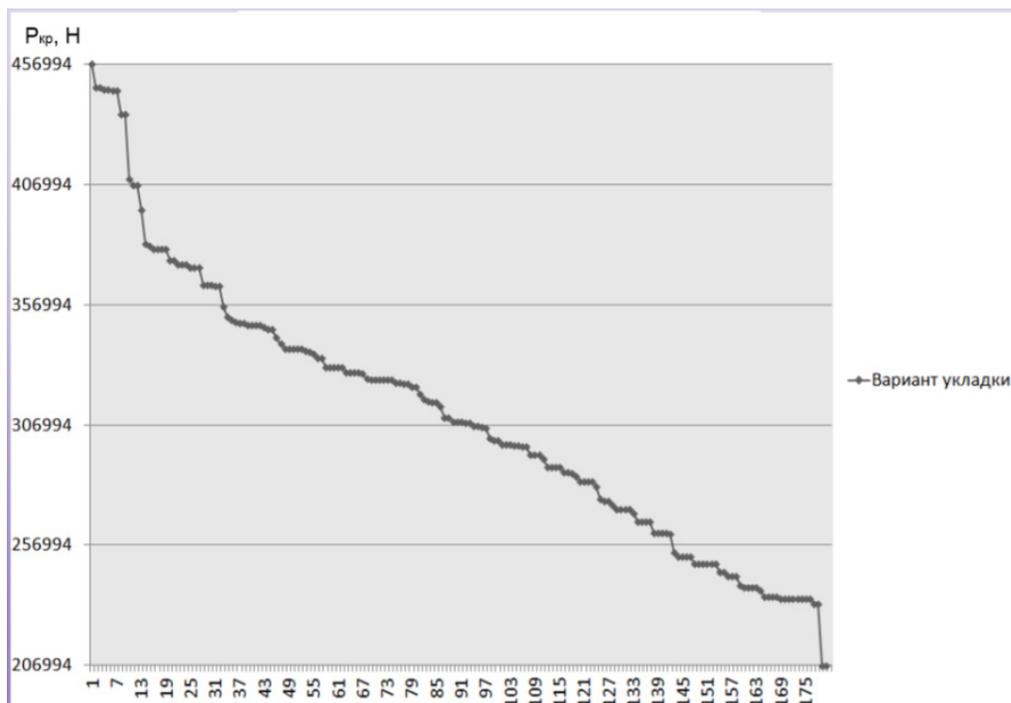


Рисунок 5 – Зависимость критической силы от вариантов несимметричных укладок слоев

Figure 5 – Dependence of the critical force on the variants of asymmetric layer layering

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью метода конечных элементов построена компьютерная трехмерная модель деформирования цилиндрической оболочки, состоящая из восьми слоёв материала. В результате использования метода комбинаторики было определено количество вариантов укладок для 8 слоёв, из которых состоит цилиндрическая оболочка. В данном исследовании построены и изучены все симметричные укладки слоёв в размере 24 ед. и 176 вариантов несимметричных укладок слоёв.

Исследования показали, что при симметричной укладке слоёв цилиндрическая оболочка может подвергаться наибольшей критической нагрузке по сравнению с несимметричной намоткой. Расчёты подтвердили, что оболочка с углами намотки -45° , 45° , 0° , 90° , 90° , 0° , 45° , -45° наиболее выгодна и выдерживает критическую нагрузку в 466 865 Н, а с несимметричными углами намотки -45° , -45° , 0° , 0° , 90° , 90° , 45° , 45° невыгодна и выдерживает минимальную нагрузку, равную 206 994 Н. Результаты исследования помогут регламентировать допустимую осевую нагрузку в создании деталей с наиболее оптимальными показателями устойчивости для строительства и других областей, в которых используются цилиндрические оболочки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цыгвинцев И.В., Постникова П.И., Сенцов И.В. Применение композиционных материалов в строительстве // Инновационное развитие. 2017. С. 26–29.
2. 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. Т. 33. № 6 (216). С. 62–64.
3. Корбова А.А. Проектирование легкой катерной надстройки из полимерных композиционных материалов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 2. С. 242–249.
4. Samyn P., Van Schepdael L., Leendertz J. S., Gerber A., Van Paeppegem W., De Baets P., Degrieck J. Deformation of reinforced polymer bearing elements on full-scale compressive strength and creep tests under yielding conditions // Polymer Testing. 2006. 230-245 p.
5. Quintelier J., Samyn P., De Baets P., Tuzolana T., Van Paeppegem W., Van den Abeele F., Vermeulen J. Wear behavior of carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide) // Polymer Composites. 2006. 92-98 p.
6. 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. С. 116–130.

7. Кудряшов А.Б., Кутышов В.Ф. Методика расчета и проектирования створок люков летательных аппаратов из композиционных материалов // Ученые записки ЦАГИ. 1985. Т.16. № 5. С. 74–83.
8. Карташова Е.Д., Муиземнек А.Ю. Расчет межслойных напряжений в композиционных оболочках с двойкой положительной кривизной // Вестник Пензенского государственного университета. 2017. № 2(18). С. 105–111.
9. Sofiyev A. H., Avcar M. The stability of cylindrical shells containing an FDM layer subjected to axial load on the pasternak foundation // *Scientific research*. 2010. 228-236 p.
10. 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. 805-828 p.
11. Aimenov Zh. T., Khudyakova T. M., Sarsenbayev B. K. Composite cements production and their economic and technological advantages // *Industrial Technologies and Engineering (ICITE-2017)*. IV International Conference. 2017. 301-306 p.
12. Давлетчин Д.И. Композиционные материалы для авиастроения, энергетики, машиностроения // *Наукоемкие технологии*. 2019. Т. 20. № 2. С. 34–39.
13. 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. Vol. 13. № 3. 345-348 p.
14. Neumeister J., Jansson S., Leckie F. The effect of fiber architecture on the mechanical properties of carbon/carbon fiber composites // *Acta Materialia*. 1996. Vol. 44. № 2. 573-585 p.
15. Vasilescu A., Gáspár S., Hayat A., Marty J. -L. Advantages of carbon nanomaterials in electrochemical aptasensors for food analysis. // *Electroanalysis*. 2018. Vol. 30. № 1. 2-19 p.
16. 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. Vol. 28. № 1. 4-13 p.
17. 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. Vol. 37. № 6. 1327-1331 p.
18. 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 (42). С. 111–118.
19. Попова А.П. Исследование устойчивости сжатой анизотропной цилиндрической оболочки // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2018. Т. 1. С. 266–268.
20. Артемьева 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 (1). С.158–162.
21. 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. Том 15. № 4. С. 291–297.
22. Васильев В.В. К задаче устойчивости цилиндрической оболочки при осевом сжатии // *Известия российской академии наук. Механика твердого тела*. 2011. № 2. С. 5–15.

REFERENCES

1. Tsygvintsev I.V., Postnikova P.I., Sentsov I.V. Primenenie kompozitsionnykh materialov v stroitel'stve [Application of composite materials in construction] // *Innovative development*. 2017: 26-29 (In Russian)
2. Malakhovskiy S. S., Panafidnikova A. N., Kostromina N. V., Osipchik V. S. Ugleplastiki v sovremennom mire: ih svoystva i primeneniya [Carbon fiber reinforced plastics in the modern world: their properties and area of application] // *Advances in chemistry and chemical technology*. 2019. 33. 6(216): 62-64 (In Russian)
3. Korbova A. A. Proektirovanie legkoj katernoj nadstrojki iz polimernyh kompozitsionnykh materialov [Development of lightweight polymeric-composite superstructure for a fast boat] // *Proceedings of Krylov State Scientific Center*. 2020. 2: 242-249. (In Russian)
4. Samyn P., Van Schepdael L., Leendertz J. S., Gerber A., Van Paepegem W., De Baets P. Degrieck J. Deformation of reinforced polymer bearing elements on full-scale compressive strength and creep tests under yielding conditions // *Polymer Testing*. 2006: 230-245.
5. J. Quintelier, P. Samyn, P. De Baets, Tuzolana T., Van Paepegem W., Van den Abeele F., Vermeulen J. Wear behavior of carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide) // *Polymer Composites*. 2006: 92-98.
6. Anoshkin A. N., Fedorovtsev D. I., Pisarev P. V., Osokin V. M. Raschet naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya flanca iz polimernyh kompozitsionnykh materialov s defektom v vide rassloeniya [Calculation of stress-strain state of the flange made of polymer composites with a defect in the form of delamination] // *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2015. 43: 116-130. (In Russian)
7. Kudryashov A. B., Kutyshev V. F. Metodika rascheta i proektirovaniya stvorok ljukov letatel'nykh apparatov iz kompozitsionnykh materialov [Methodology of calculation and design of aircraft hatch doors made of composite materials] // *Scientific Notes of TsAGI*. 1985. 16 (5): 74-83. (In Russian)
8. Kartashova E. D., Muizemnek A. Yu. Raschet mezhslajnykh naprjazhenij v kompozitsionnykh oblochkah s dvojakoj polozhitel'noj kriviznoj [Calculation of interlayer stresses in composite shells with double positive curvature] // *Bulletin of Penza State University*. 2017. 2(18): 105-111. (In Russian)
9. Sofiyev A. H., Avcar M. The stability of cylindrical shells containing an FDM layer subjected to axial load on the pasternak foundation // *Scientific research*. 2010: 228-236.
10. 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: 805-828.

11. Aimenov Zh. T., Khudyakova T. M., Sarsenbayev B. K., Composite cements production and their economic and technological advantages // *Industrial Technologies and Engineering (ICITE-2017). IV International Conference*. 2017: 301-306.

12. Davletchin D. I. Kompozicionnye materialy dlja aviastroenija, jenergetiki, mashinostroenija [Composite materials for aviation, energetics, mechanical engineering] // *Science-intensive Technologies*. 2019. 20(2): 34-39. (In Russian)

13. Stepanova M. Y., Baurova N. I. Analysis of methods for determining the biostability of polymer composite materials used in mechanical engineering. Series D. 2020. 13(3): 345-348.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Rytova T. G. K voprosu poteri ustojchivosti predvaritel'no-naprjazhennyh tonkostennyh cilindricheskikh obolochek [On the issue of loss of stability of pre-stressed thin-walled cylindrical shells] // *I. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University Bulletin. Series: Mechanics of limit state*. 2019. 4(42): 111-118. (In Russian)

19. Popova A. P. Issledovanie ustojchivosti szhatoj anizotropnoj cilindricheskoj obolochki [Investigation of stability of compacted anisotropic cylindrical shell] // *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2018. 1: 266-268. (In Russian)

20. Artemyeva A. A., Baranova M. S., Kibets A. I., Romanov V. I., Ryabov A. I., Shoshin D. V. Konechno-jelementnyj analiz ustojchivosti uprugoplasticheskoj sfericheskoj obolochki pri vsestoronnem szhatii [Finite element analysis of the stability of an elastic-plastic spherical shell under comprehensive compression]. 2011. 3 (1): 158-162 (In Russian)

21. Kosytsyn S. B., Akulich V. Yu. Opredelenie kriticheskoj nagruzki poteri ustojchivosti sterzhnevoj i ploskoj modelej krugovoj cilindricheskoj obolochki, vzaimodejstvujushhej s osnovaniem [The definition of the critical buckling load beam model and two-dimensional model of the round cylindrical shell that interact with the soil] // *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. 2019. 15(4): 291-297. (In Russian)

22. Vasiliev V. V. To the Problem of Stability of a Cylindrical Shell in Axial Compression // *Mechanics of Solids*. 2011. 2: 5-15. (In Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Адегова Л.А. Автор статьи. Формулировка направления и темы исследования. Создание конечно-элементной модели, определение методов исследования. Выполнение расчетов, разработка плана проведения исследования.

Бобрышева М.В. Выполнение аналитических исследований, анализ и ознакомление с зарубежным и отечественным опытом, оформление статьи.

Щербинина А.Е. Постановка цели и задачи исследований, анализ полученных результатов, оформление статьи.

COAUTHORS CONTRIBUTION

Ludmila. A. Adegova The author of the article. Formulation of the direction and topic of research, creation of a finite element model, determination of research methods, performing calculations, developing a research plan.

Maria. V. Bobrysheva performing analytical research, analyzing and familiarizing with foreign and domestic experience, writing an article

Alexandra. E. Scherbinina setting the goals and objectives of research, analysis of the results obtained, writing an article.

АФФИЛИЯЦИЯ АВТОРОВ

Адегова Людмила Алексеевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительная механика» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет» Scopus Author ID: 57213838719, ORCID ID: 0000-0003-3234-0977 (630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, эл. почта l.adegova@sibstrin.ru).

Бобрышева Мария Викторовна – студентка ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет» ORCID ID: 0000-0002-3565-7294 (630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, эл. почта m.bobrysheva@edu.sibstrin.ru).

Щербинина Александра Евгеньевна – студентка ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет» ORCID ID: 0000-0002-8813-0912 (630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, эл. почта shherbinina-sash@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ludmila A. Adegova, Cand. of Sci., Scopus Author ID: 57213838719, ORCID ID: 0000-0003-3234-0977, Associate Professor of the Construction Mechanics Department, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Leningradskaja, 113, e-mail l.adegova@sibstrin.ru, tel. +79139535775.

Maria V. Bobrysheva, coauthor, student, ORCID ID: 0000-0002-3565-7294, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Leningradskaja, 113, e-mail m.bobrysheva@edu.sibstrin.ru

Alexandra E. Scherbinina, student, ORCID ID: 0000-0002-8813-0912, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Leningradskaja, 113, e-mail shherbinina-sash@mail.ru