

<http://dx.doi.org/10.15589/evn20140201>

УДК 629.584:539.3

К 77

ABOUT LOAD CARRYING CAPACITY CALCULATION OF CYLINDRICAL COMPOSITE UNDERWATER HULLS

О РАСЧЕТЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОЧНЫХ КОРПУСОВ ИЗ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ТЕХНИКИ

Viktor I. Kravtsov

akvarobotec@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-4207-7594

Serhii P. Heiko

sergiy.geiko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-5005-2437

В. И. Кравцов,

д-р техн. наук, проф.;¹

С. П. Гейко,

канд. техн. наук²

¹National Aviation University, Kyiv

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

¹Національний авіаційний університет, г. Київ

²Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, г. Николаев

Abstract. Features of load carrying capacity calculation of cylindrical composite pressure hulls for underwater applications were discussed. The aim of the work – to evaluate the efficiency of composite materials as structural materials for cylindrical underwater hulls using the main criterion of quality of pressure hull – its density – on basis of stability criterion. The critical buckling pressure was predicted for long cylindrical filament-wound pressure hulls, subjected to external hydrostatic pressure, using classical laminated orthotropic shell theory and finite element analysis package ANSYS. The numerical results of critical buckling pressure predicted by ANSYS were in good agreement with the analytical results. The effect of modulus of elasticity of different fibers on the critical buckling behaviour of composite filament-wound cylinders under external hydrostatic pressure was shown. The results of the research are relevant in connection with the intensive replacement of metal alloys on fiber reinforced composites in the construction of underwater vehicles and structures and give an idea of future lines of development in composite hull designing.

Keywords: cylindrical hull; external hydrostatic pressure; load carrying capacity; buckling; filament winding; glass-fiber reinforced plastic; carbon-fiber reinforced plastic.

Аннотация. Оценено применение композитов в качестве конструкционных материалов для цилиндрических корпусов подводных аппаратов и конструкций. С использованием аналитического решения и решения, полученного с помощью программного пакета ANSYS, показано влияние модуля упругости различных волокон на величину критического давления потери устойчивости длинных цилиндров, изготавливаемых методом намотки из армированных композиционных материалов.

Ключевые слова: цилиндрический корпус; внешнее гидростатическое давление; несущая способность; потеря устойчивости; намотка волокном; стеклопластик; углепластик.

Анотація. Оцінено використання композитів як конструкційних матеріалів для циліндричних корпусів підводних апаратів і конструкцій. З використанням аналітичного розв'язку та розв'язку, отриманого за допомогою програмного пакету ANSYS, показано вплив модуля пружності різних армуючих матеріалів на величину критичного тиску втрати стійкості довгих циліндрів, що виготовляються методом намотування із армованих композиційних матеріалів.

Ключові слова: циліндричний корпус; зовнішній гідростатичний тиск; несуча здатність; втрата стійкості; намотування волокном; склопластик; вуглепластик.

REFERENCES

- [1] Volmir A.S. *Ustoychivost deformiruemyykh system* [Stability of deformable systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1967. 984 p.
- [2] Dmitriev A.N. *Proektirovanie podvodnykh apparatov* [Design of underwater vehicles]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 235 p.

- [3] Lizin V.T., Pyatkin V.A. *Proektirovanie tonkostennykh konstruksiy* [Design of thin-walled structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 448 p.
- [4] Rosato D.V., Grove C.S. *Namotka steklonitu: razvitie metoda, proizvodstvo, oblasti primeneniya i konstruirovaniye* [Filament winding: its development, manufacture, applications, and design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 310 p.
- [5] Trach V.M. *Neliniine deformuvannia ta stikiist anizotropnykh obolonok obertannia iz sharuvatykh voloknystykh kompozytiv*. Avtoreferat Diss. [Nonlinear deformation and stability of anisotropic shells of revolution mode of laminated fibrous composites. Avtor's abstract]. Kyiv, 2009. 37 p.
- [6] Myung-Hun Kim, Jong-Rae Cho, Won-Byong Bae, Jin-Hwe Kweon, Jin-Ho Choi, Sang-Rae Cho, Yun-Sik Sho. Buckling analysis of filament-wound thick composite cylinder under hydrostatic pressure. *International journal of precision engineering manufacturing*, 2010, vol. 11, no. 6, pp. 909–913.
- [7] Cardon A.H. *Durability Analysis of Structural Composite Systems: Reliability, Risk Analysis and Prediction of Safe Residual Integrity*. Taylor & Francis Publ., 1996. 190 p.
- [8] Govindaraj M., Narayanarao N.M.H., Munishaiah K., Nagappa R. Comparative study of metallic and polymer composite shells for underwater vessels using FEA. *International journal of ocean system engineering*, 2013, vol. 3, issue 3, pp. 136–141.
- [9] Scott E. Groves, Alton L. Highsmith *Compression response of composite structures*. ASTM International, 1994, issue. 371 p.
- [10] Griffiths G. *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles, Vol. 2*. Abingdon, UK, Taylor & Francis, 2002. 372 p.
- [11] Papazoglou V., Livingstone F., Chauchot P., Jennequin G., Kilpatrick I., Meddes R., Stevenson P., Antonelli V., Tsouvalis N., Williams J. Lightweight Composite Pressure Housings for Mid-Water and Benthic Applications. *ESCM*. 2006. 10 p. Available at: URL: <http://www.escm.eu.org/docs/eccm/B155.pdf>. (Accessed 22 December 2013)
- [12] Philip Nivin, Prabha C. Numerical investigation of stiffened composite cylindrical shell subjected to external pressure. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, vol. 3, issue 3, pp. 591–598.
- [13] Messenger T., Pyrz M., Gineste B., Chauchot P. Optimal laminations of thin underwater composite cylindrical vessels. *Composite Structures*, 2002, vol. 58, no. 4, pp. 529–537.
- [14] Stachiw J.D., Frame B. *Graphite-Fiber-Reinforced Plastic Pressure Hull Mod 2 for the Advanced Unmanned Search System (AUSS)*: NOSC technical Report 1245. San Diego, CA, Aug. 1988, 232 p.
- [15] Davies P., Riou L., Mazeas F., Warnier Ph. Thermoplastic Composite Cylinders for Underwater Applications. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2005, vol. 18, no. 5, pp. 417–443.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Выбор направления данной работы обусловлен важностью задач проектирования прочных корпусов для обеспечения Украины собственными подводными аппаратами для исследования шельфов Азово-Черноморского бассейна, а также необходимостью развития фундаментальных исследований в области расчета несущей способности композитных прочных корпусов. Возможность применения для подводных аппаратов композитных цилиндрических прочных корпусов, изготавливаемых методом намотки, была продемонстрирована на таких реализованных проектах, как MAST III [11], AUSS [14] и др.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Прочность и устойчивость прочного корпуса, находящегося под действием внешнего гидростатического давления, являются наиболее значимыми критериями потери его несущей способности. Переход от одного

расчета к другому зависит от физико-геометрических параметров конструкции, подвергающейся действию гидростатического давления [7, 15]. Анализ последних теоретических и экспериментальных исследований в области расчета несущей способности композитных цилиндрических корпусов для подводных конструкций и аппаратов [7–15] показал, что этот переход зависит от толщины корпуса, на величину которой существенно влияет уровень анизотропии сформированного слоистого композиционного материала (КМ). Этот уровень определяется модулем упругости армирующего материала, последовательностью укладки монослоев и углами намотки каждого монослоя.

Неопределенность этого перехода для каждой конкретной конструкции (разные свойства компонентов слоистого материала и его структура, разные геометрические параметры корпуса) порождает разногласия в выборе соответствующего критерия для определения давления потери несущей способности (монолитности) композитного прочного корпуса при действии внешнего гидростатического давления.

Для оценки прочности композитных конструкций разработано множество критериев, учитывающих анизотропию композиционного материала [8]. Для прогнозирования несущей способности прочных корпусов подводной техники в настоящее время успешно применяют критерии Цая-Ву и Мизеса-Хилла. Эти критерии заложены во многие программные пакеты, основанные на методе конечных элементов. Однако они не обеспечивают согласование с экспериментальными данными для толстостенных корпусов глубоководной техники [7]. Понятие «толстостенность» для прочных корпусов условное, поскольку выбор критерия расчета – по условию устойчивости или прочности – не зависит от принадлежности к общим понятиям разграничения на тонкостенные (обычно $h/R \leq 1/20 \dots 1/10$) и толстостенные конструкции. Поэтому есть необходимость в исследовании применимости других критериев прочности для прогнозирования несущей способности прочных корпусов из армированных композиционных материалов.

Теоретические исследования композитных прочных корпусов указывают, что углепластик (УП) – более подходящий материал для обеспечения максимума несущей способности и минимума массы цилиндрического прочного корпуса. Однако немногочисленные проведенные эксперименты не всегда подтверждают этот результат, что связано, скорее всего, с наличием высокой степени анизотропии сформированной структуры углепластика, которая обусловлена высоким модулем упругости углеродных волокон по сравнению со стеклянными ($E_{УВ}/E_{СВ} > 3$) [14]. Отрицательное влияние анизотропии на критические нагрузки отмечают и другие авторы, в частности [5].

В работе [12] исследовались различные структуры слоистого КМ для подкрепленных намотанных цилиндрических оболочек с варьированием длины шпации между ребрами жесткости. Структура $[0^\circ; 90^\circ]_s$, согласно [12], оказалась наиболее оптимальной из исследуемых и обеспечивает максимум несущей способности.

Согласно некоторым исследованиям [4, 13], совпадение теоретических и экспериментальных величин давления потери несущей способности композиционно цилиндрического прочного корпуса наблюдается для квазиизотропных структур армированных КМ. Квазиизотропные материалы образуются при использовании низко модульного армирующего материала, например стеклянных волокон, или в случае высоко модульных волокон при создании квазиизотропных структур слоистого материала. Однако существуют производственные проблемы при намотке слоистого КМ сложной структуры, в частности намотка под малыми углами [11]. Наилучшим компромиссом найдено осуществление многоступенчатых намотки и отверждения в процессе производства цилиндрических корпусов, что было успешно реализовано на примере цилиндрического корпуса со схемой намотки $[90^\circ_n; (\pm 55^\circ)_n]$ [11].

Для инженерных (приблизительных) расчетов композитных конструкций используют приведенный (осредненный по толщине слоистого КМ) модуль упругости [3, 4, 6]. Стеклопластиковые пустотелые сферы как прочные корпуса для подводной техники до рабочей глубины погружения 6000 м следует рассчитывать, согласно [2], из условия устойчивости, используя приведенный модуль упругости КМ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – оценить эффективность цилиндрических прочных корпусов из полимерных композиционных материалов для подводных аппаратов, необходимых для исследования шельфов Азово-Черноморского бассейна Украины, с помощью аналитического и численного подходов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследуется длинная цилиндрическая оболочка с внутренним радиусом $R = 300$ мм и длиной $L = 2,7$ м ($L/R \geq 9$), нагруженная внешним гидростатическим давлением. В качестве конструкционных материалов оболочки рассматриваются эпоксипластики на основе стеклянных ($E_{СВ} = 78$ ГПа) и углеродных ($E_{УВ} = 275$ ГПа и 375 ГПа) волокон; КМ формируется методом намотки. Схема армирования – $[0^\circ; 90^\circ]_s$.

Для бесконечно длинной цилиндрической оболочки, выполненной намоткой $[0^\circ; 90^\circ]_s$ из однонаправленных КМ, решение для критического давления потери устойчивости совпадает с формулой [1] для критического давления, относящейся к бесконечно длинному изотропному цилиндру.

Используя аналитическое решение [1] для бесконечно длинной изотропной цилиндрической оболочки и программный пакет ANSYS, выполнено сравнение величин критического давления потери устойчивости. При расчете в среде ANSYS принята слоистая структура формируемого методом намотки КМ.

Для исследуемых оболочек из полимерных КМ проектными переменными являются коэффициент объемного содержания армирующего наполнителя V_f , упругие свойства связующего и армирующего наполнителя. Толщина монослоя – $h = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Свойства исследуемых эпоксипластиков приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства исследуемых эпоксипластиков

Эпоксипластики	V_f	Упругие свойства монослоя			$E_{эф}$ пакета КМ $[0^\circ; 90^\circ]_s$, ГПа
		E_1 , ГПа	E_2 , ГПа	ν_{12}	
СП ($E_{СВ} = 78$ ГПа)	0,63	50	8,00	0,27	29,17
УП ($E_{УВ} = 275$ ГПа)	0,60	166	7,40	0,27	87
УП ($E_{УВ} = 395$ ГПа)	0,58	209	9,45	0,27	108

Величины критического давления потери устойчивости для композитных цилиндрических корпусов разной толщины, спрогнозированных с использованием аналитического решения [1] и пакета ANSYS, сведены в табл. 2. Численные результаты, полученные с помощью ANSYS, хорошо согласуются с аналитическим решением [1].

Таблиця 2. Прогнозируемое аналитически и численно критическое давление потери устойчивости длинных цилиндрических корпусов из ПКМ, нагруженных внешним гидростатическим давлением

Материал	Толщина корпуса t , мм	R/t	P , МПа		%
			Решение в ANSYS	Аналитическое решение [1]	
СП	15	20	0,87	0,914	4,8
	23	13	3,04	3,296	7,76
УП ($E_{yв} = 395$ ГПа)	5	60	0,122	0,124	0,2
	16	18,75	3,83	4,193	8,66
	20	15	7,31	7,907	7,55

Качество прочных корпусов из разных материалов (см. табл. 1) на базе аналитического решения [1] оценивалось по плотности материала (рис. 1). Коэффициент запаса принят равным 1,5.

Эффективность применения армированных КМ для цилиндрических прочных корпусов (без сферических оконечностей) оценивалась с помощью коэффициента рациональности [2]:

$$K_1 = \frac{P_p}{\rho_{ПК}}$$

где P_p – рабочее давление, Па; $\rho_{ПК}$ – плотность корпуса, кг/м³ (рис. 2).

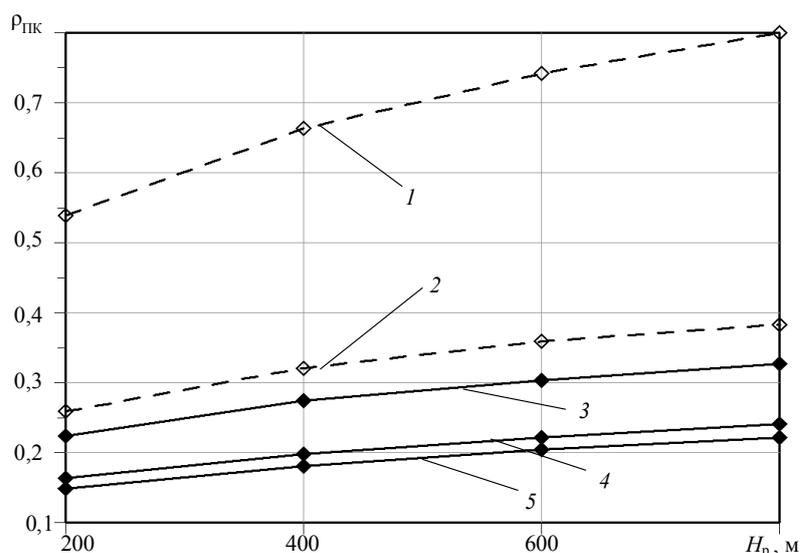


Рис. 1. Изменение плотности цилиндрического прочного корпуса (без сферических оконечностей) в зависимости от материала и рабочей глубины погружения H_p при ограничении по устойчивости: 1 – сталь; 2 – алюминиевый сплав; 3 – СП; 4 – УП ($E_{yв} = 275$ ГПа); 5 – УП ($E_{yв} = 395$ ГПа)

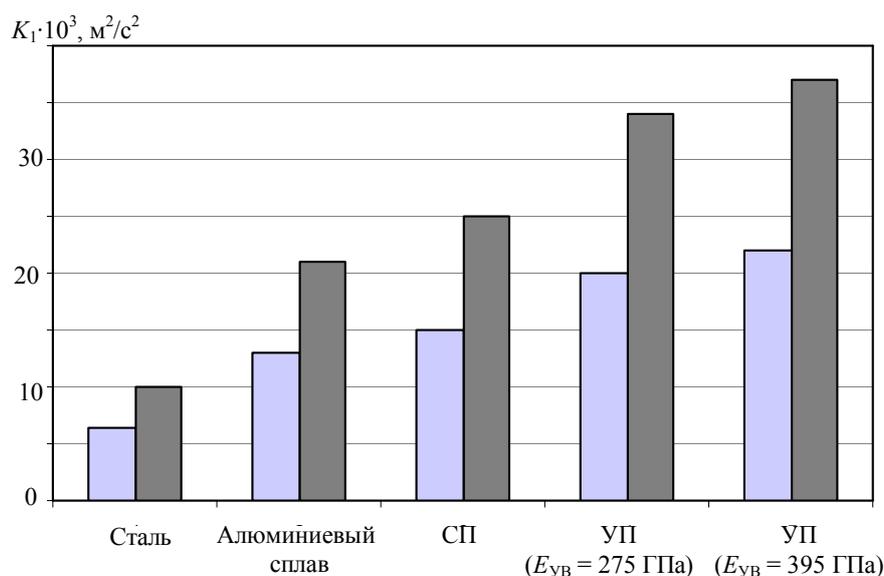


Рис. 2. Зависимость коэффициента рациональности K_1 цилиндрического прочного корпуса (без сферических оконечностей) от конструкционного материала и рабочей глубины погружения H_p : ■ – $H_p = 400$ м; ■ – $H_p = 800$ м

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенного анализа состояния работ в области исследования устойчивости и прочности цилиндрических намотанных композитных корпусов, находящихся под действием внешнего гидростатического давления, определены направления дальнейшего развития исследований с целью их рационального проектирования.

2. С увеличением глубины погружения, что приводит к увеличению массы корпуса, СП и УП стано-

вятся наиболее подходящими материалами для цилиндрических прочных корпусов. Однако сложность расчета композитных конструкций в связи с большим пространством проектных параметров и их комплексным взаимным влиянием создают трудности в прогнозировании их несущей способности. Результаты расчета цилиндрического корпуса показали: для глубины погружения 800 м с коэффициентом запаса 1,5 уменьшение массы корпуса из УП ($E_{ув} = 275$ ГПа) возможно на 68 % и из СП на 55 % по сравнению со стальным корпусом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Вольмир, А. С.** Устойчивость деформируемых систем [Текст] / А. С. Вольмир. – М. : Физматгиз, 1967. – 984 с.
- [2] **Дмитриев, А. Н.** Проектирование подводных аппаратов [Текст] / А. Н. Дмитриев. – Л. : Судостроение, 1978. – 235 с.
- [3] **Лизин, В. Т.** Проектирование тонкостенных конструкций [Текст] : учеб. пособие для студентов вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. Т. Лизин, В. А. Пяткин. – М. : Машиностроение, 2003. – 448 с.
- [4] **Росато, Д. В.** Намотка стеклотканью: развитие метода, производство, области применения и конструирование [Текст] / Д. В. Росато; К. С. Грове. – М. : Машиностроение, 1969. – 310 с.
- [5] **Трач, В. М.** Нелінійне деформування та стійкість анізотропних оболонок обертання із шаруватих волокнистих композитів [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.17 / Трач Володимир Мирославович ; Київський національний ун-т будівництва і архітектури, Національний ун-т водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України. – К., 2009. – 37 с.
- [6] Buckling analysis of filament-wound thick composite cylinder under hydrostatic pressure [Text] / Myung-Hun Kim, Jong-Rae Cho, Won-Byong Bae [et al.] // International journal of precision engineering manufacturing. – 2010. – Vol. 11, nr 6. – P. 909–913.
- [7] **Cardon, A. H.** Durability Analysis of Structural Composite Systems: Reliability, Risk Analysis and Prediction of Safe Residual Integrity [Text] / Albert H. Cardon. – Taylor & Francis, 1996. – 190 p.
- [8] Comparative study of metallic and polymer composite shells for underwater vessels using FEA [Text] / M. Govindaraj, N. M. H. Narayanarao, K. Munishaiah, R. Nagappa // International journal of ocean system engineering. – 2013. – Vol. 3, issue 3. – P. 136–141.
- [9] Compression response of composite structures, issue 1185 [Text] / Ed. by Scott E. Groves, Alton L. Highsmith. – ASTM International, 1994. – 371 p.
- [10] **Griffiths, G.** Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles, vol. 2 [Text] / G. Griffiths. – Abingdon, UK, Taylor & Francis, 2002. – 372 p.
- [11] Lightweight Composite Pressure Housings for Mid-Water and Benthic Applications [Virtual Resource] / V. Papazoglou, F. Livingstone, P. Chauchot [et al.] // ESCM. – 2006. – 10 p. – Access Mode : URL : <http://www.escm.eu.org/docs/eccm/B155.pdf>.
- [12] **Nivin, Philip.** Numerical investigation of stiffened composite cylindrical shell subjected to external pressure [Text] / Philip Nivin, C. Prabha // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2013. – Vol. 3, issue 3. – P. 591–598.
- [13] Optimal laminations of thin underwater composite cylindrical vessels [Text] / T. Messenger, M. Pyrz, B. Gineste, P. Chauchot // Composite Structures. – 2002. – Vol. 58, nr 4. – P. 529–537.
- [14] **Stachiw, J. D.** Graphite-Fiber-Reinforced Plastic Pressure Hull Mod 2 for the Advanced Unmanned Search System (AUSS) [Text] : NOSC technical Report 1245 / J. D. Stachiw, B. Frame. – San Diego, CA, Aug. 1988. – 232 p.
- [15] Thermoplastic Composite Cylinders for Underwater Applications [Text] / P. Davies, L. Riou, F. Mazeas, Ph. Warnier // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2005. – Vol. 18, nr 5. – P. 417–443.

© В. І. Кравцов, С. П. Гейко

Надійшла до редколегії 12.12.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. Л. І. Коростильов

Статтю розміщено у Віснику НУК № 2, 2014