

УДК 629.584  
Б 90

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТОРОИДАЛЬНЫХ ПРОЧНЫХ КОРПУСОВ ПОДВОДНОЙ ТЕХНИКИ

Е. Т. Бурдун, канд. техн. наук;  
А. В. Крептюк, инж.

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Проведен анализ массогабаритных показателей тороидальных прочных корпусов из металлов и армированных пластиков – стеклопластиков и углепластиков, изготавливаемых продольно-поперечной намоткой, при ограничении на устойчивость по верхнему критическому давлению. Выполнена оценка технико-экономической эффективности применения различных материалов.

**Ключевые слова:** тороидальный прочный корпус, устойчивость, углепластик, стеклопластик, массогабаритные характеристики, эффективность, стоимость корпусных материалов.

**Анотація.** Проведено аналіз масогабаритних показників тороїдальних міцних корпусів з металів та армованих пластиків – склопластиків і вуглепластиків, що виготовляються поздовжньо-поперечним намотуванням, при обмеженні на стійкість за верхнім критичним тиском. Виконано оцінку техніко-економічної ефективності застосування різних матеріалів.

**Ключові слова:** тороїдальний міцний корпус, стійкість, вуглепластик, склопластик, масогабаритні характеристики, ефективність, вартість корпусних матеріалів.

**Abstract.** The analysis of the mass-dimensional parameters of the toroidal pressure hulls made of metal, glass and carbon fiber reinforced plastics produced by longitudinal-transverse winding, at limiting the stability of the upper critical pressure has been carried out. The technical and economic efficiency of different materials was evaluated.

**Keywords:** toroidal pressure hull, stability, carbon fiber reinforced plastic, glass fiber reinforced plastic, mass-dimensional parameters, efficiency, cost of vessel materials.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

С появлением оригинальных эскизных проектов [1] подводных аппаратов, лабораторий и подводных буровых платформ с тороидальным прочным корпусом (ПК) возникают вопросы их эффективности и возможности реализации с использованием отработанной технологии намотки тороидальных сосудов давления в промышленном масштабе и широкого ассортимента высокопрочных армирующих материалов и связующих. Современная технология намотки позволяет изготавливать объемные изделия практически любых размеров. В частности, намотанные стеклопластики (СП) и углепластики (УП), обладающие малой плотностью и высокой удельной жесткостью и прочностью, оказались весьма перспективным материалом для изготовления прочных корпусов, работающих под действием внешнего давления [1]. К тому же создание тороидальных прочных корпусов из армированных пластиков оказывается технологически более простой процедурой, чем из металлов, которые должны поддаваться штамповке, ковке, гибке, хорошо свариваться без потери прочности и нарушения герметичности соединений.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Достижение оптимальных массогабаритных показателей, обеспечение гидростатической прочности и устойчивости прочного корпуса, технологичности формирования обшивки корпуса и, конечно, стоимости при выполнении всех других требований – важнейшие задачи, стоящие при проектировании подводного аппарата или конструкции. Возникает необходимость использовать все проектно-конструкторские резервы для обеспечения при возросших глубинах погружения заданной дальности, автономности плавания и размещения требуемого полезного груза.

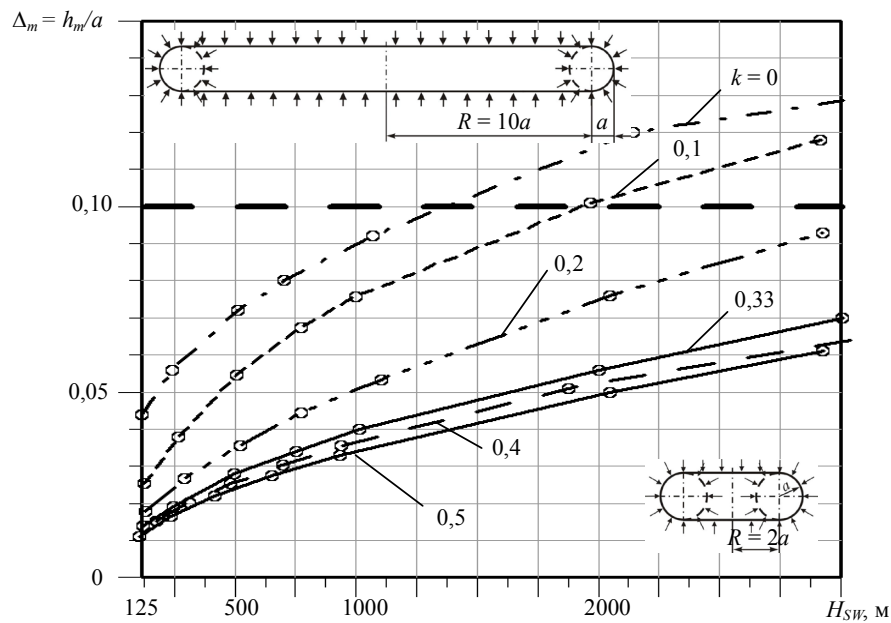
Эффективность разрабатываемых конструктивно-технологических решений для тороидального прочного корпуса до детальной проработки всего проекта можно оценить по следующим критериям: отношению массы прочного корпуса к его водоизмещению  $m_{ПК}/m_w$ , которое у большинства подводных аппаратов и конструкций обеспечивает плавучесть, оно должно быть наименьшим при условии удовлетворения всем требованиям задания на проектирование подводного судна; технологичности конструкции корпуса при постройке и ремонте; стоимости прочного корпуса.

**ЦЕЛЮ ДАННОЙ РАБОТЫ** является выполнение оценки эффективности применения различных конструкционных материалов для тороидальных прочных корпусов до детальной проработки всего проекта по критериям: отношение массы прочного корпуса к водоизмещению и стоимость корпусных материалов.

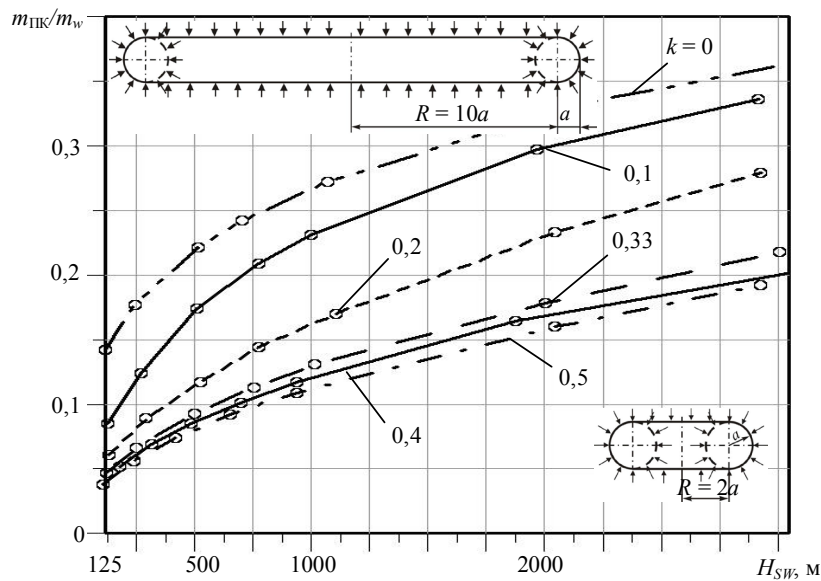
**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

В работе рассматривается влияние физико-механических свойств традиционно применяемых

металлов для прочных корпусов подводных технических средств, таких, как сталь ( $\sigma_{0,2} = 800 \dots 900$  МПа), титановый и алюминиевый сплавы, и углепластиков CN-90/ ЭДТ-10, М35J/ ЭДТ-10 (рис. 1, 2), стеклопластика S-стекло/ХР-251 (свойства армирующих наполнителей и связующего представлены в табл. 1), полученных продольно-поперечной намоткой, на массогабаритные показатели ( $m_{ПК}/m_w$  и  $\Delta_m$ ) тороидальных прочных корпусов круглого поперечного сечения с  $k = a/R = 0,33$  (рис. 3, 4).



**Рис. 1.** Зависимость относительной толщины  $\Delta_m = h_m/a$  тороидального прочного корпуса переменной толщины, полученного продольно-поперечной намоткой из УП (М35J/ ЭДТ-10), от рабочей глубины погружения при  $0 \leq k \leq 0,5$



**Рис. 2.** Зависимость отношения массы тороидального прочного корпуса переменной толщины, полученного продольно-поперечной намоткой из УП (М35J/ ЭДТ-10), к его водоизмещению  $m_{ПК}/m_w$  от рабочей глубины погружения при  $0 \leq k \leq 0,5$

Таблица 1. Свойства армирующих наполнителей и связующего, используемых при расчете на устойчивость намоточных тороидальных прочных корпусов

Марка компонента	Модуль упругости, ГПа	Прочность при растяжении, ГПа
Стеклоанное высокомодульное высокопрочное волокно ВМПС из S-стекла (Россия) [5]	93	4,2 – 4,75
Углеродное высокомодульное волокно M35J (TORAYCA®) [6]	343	4,7
Углеродное сверхвысокомодульное волокно CN-90 (Nippon Graphite Fiber Corporation) [8]	860	3,43
Эпоксидная смола ЭДТ-10 [3]	3	0,07

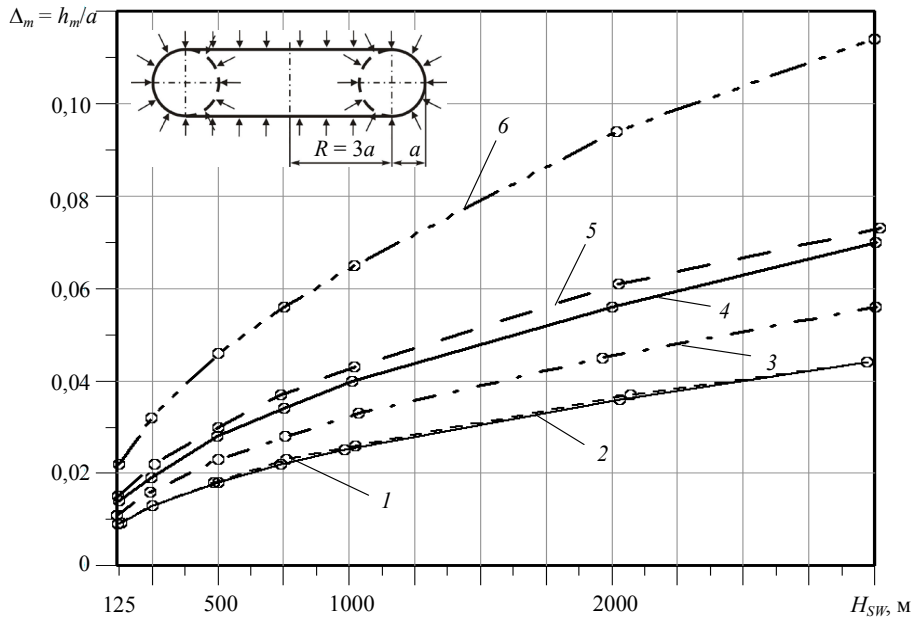


Рис. 3. Зависимость относительной толщины  $\Delta_m = h_m/a$  тороидального прочного корпуса с  $k = 0,33$  от рабочей глубины погружения: 1 – сталь; 2 – УП (CN-90/ ЭДТ-10) со схемой армирования  $[90^\circ, 0^\circ]_{1,1}$ ; 3 – титановый сплав; 4 – УП (M35J/ ЭДТ-10) со схемой армирования  $[90^\circ, 0^\circ]_{1,1}$ ; 5 – алюминиевый сплав; 6 – СП со схемой армирования  $[90^\circ, 0^\circ]_{1,1}$

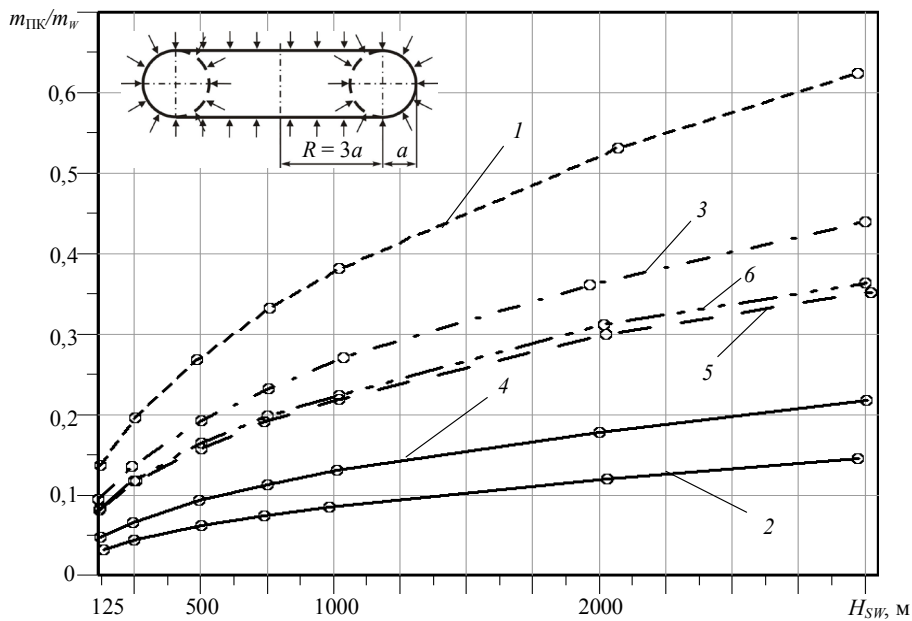


Рис. 4. Зависимость отношения массы тороидального прочного корпуса с  $k = 0,33$  из разных материалов к его водоизмещению  $m_{ПК}/m_w$  от рабочей глубины погружения: 1 – сталь; 2 – УП (CN-90/ ЭДТ-10) со схемой армирования  $[90^\circ, 0^\circ]_{1,1}$ ; 3 – титановый сплав; 4 – УП (M35J/ ЭДТ-10) со схемой армирования  $[90^\circ, 0^\circ]_{1,1}$ ; 5 – алюминиевый сплав; 6 – СП со схемой армирования  $[90^\circ, 0^\circ]_{1,1}$

Соотношение  $m_{ПК}/m_w$  для тороидального прочного корпуса рассчитывалось по формулам [3]:

$$m_{ПК}/m_w = 2 \cdot \frac{a \cdot h_m}{a + h_m} \cdot \frac{\rho}{\rho_w};$$

$$m_{ПК} = 4 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot R \cdot \rho \cdot h_m; \quad m_w = 2 \cdot \pi^2 \cdot (a + h_m) \cdot R \cdot \rho_w,$$

где  $m_{ПК}$  – масса тороидального прочного корпуса;  $m_w$  – водоизмещение тороидального прочного корпуса;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_w$  – плотность морской воды ( $\rho_w = 1010$  кг/м<sup>3</sup>);  $h_m$  – осредненная по меридиальному сечению намоточной тороидальной оболочки переменная толщина,  $h_m = \text{const}$ ;  $a$  – внутренний радиус сечения меридиана;  $R$  – расстояние от оси вращения до центра меридионального сечения (см. рис. 1).

Здесь  $m_{ПК}$  определяется с учетом ограничения по условию устойчивости по верхнему критическому давлению согласно расчету, приведенному в [4]. Свойства армирующих наполнителей и связующих, используемых для определения верхнего критического давления, приведены в табл. 1.

Оценка эффективного запаса плавучести при ограничении по верхнему критическому давлению проводилась с использованием коэффициента безопасности  $f_s = 2$  [7]. В результате рабочая глубина погружения  $H_{SW} = h_{SW}/f_s$ .

Для тороидального ПК с  $k = 0,33$  из армированных пластиков (см. рис. 3, 4) расчеты велись для продольно-поперечной схемы армирования с одинаковым количеством продольных и поперечных монослоев, поскольку при таком соотношении и геометрии оболочка будет выдерживать максимальное верхнее критическое давление [4].

Как видно из рис. 1 и 2, при увеличении значения  $k$  с 0,33 до 0,5 (кривые  $k = 0,33; 0,4; 0,5$ ) выигрыш в массе незначителен, что объясняется увеличением толщины в зоне внутреннего экватора в 1,5...2,0 раза в связи с особенностями формования замкнутого тороидального ПК методом непрерывной намотки.

На этапе предварительного проектирования при ограничении по верхнему критическому давлению

расчетная толщина тороидального прочного корпуса ( $k = 0,33$ ), полученного из УП (СН-90/ ЭДТ-10), для диапазона рабочей глубины погружения  $125 \text{ м} \leq H_{SW} \leq 3000 \text{ м}$  почти равна толщине аналогичного корпуса из стали с  $\sigma_{0,2} = 800...900$  МПа (разница в толщинах не превышает 5 %) – см. рис. 3. А при всех других равных условиях (одинаковых  $k$  и рабочей глубине погружения) расчетное соотношение  $m_{ПК}/m_w$  для стального корпуса выше, чем для углепластиковых корпусов: из СН-90/ ЭДТ-10 в 4,3–4,5 раза и из М35J/ ЭДТ-10 в 2,8–3,0 раза (см. рис. 4).

На основании полученного авторами [2] достаточного условия преимущественного выбора высокопрочных материалов для прочных корпусов подводной техники без детальной проработки всего проекта выполним сравнение технико-экономической эффективности использования различных материалов для тороидального прочного корпуса с учетом их стоимости и жесткости, используя решение [4] (рис. 5).

Эффективность использования различных материалов для тороидального прочного корпуса [2]

$$\mathcal{E}_{ПК} = \frac{1 - (m_{ПК}/m_w)}{(m_{ПК}/m_w) \cdot C_{ПК}},$$

где  $C_{ПК}$  – сравнительный коэффициент по стоимости единицы массы использованных материалов в составе корпусной конструкции (табл. 2).

Поскольку стоимость корпусных материалов со временем меняется, для качественной оценки в табл. 2 даны ориентировочные сравнительные данные по стоимости различных материалов в отношении к стали с  $\sigma_{0,2} = 320$  МПа.

Эффективность использования материала корпуса в общем тем выше, чем меньше его стоимость. С уменьшением массы прочного корпуса для свободно плавающих объектов уменьшатся требуемая мощность энергетической установки и другого оборудования, нужные для них объемы прочного корпуса и, как следствие, масса и стоимость всего объекта. Для стационарных объектов этот «общепроектный» эффект будет значительно слабее или вовсе исчезнет [2].

Таблица 2. Сравнительные данные по стоимости различных материалов за 1 кг по отношению к стали с  $\sigma_{0,2} = 320$  МПа (2009–2011 гг.)

Сравнительный коэффициент	Стали [2]		Титановые сплавы [2] с $\sigma_{0,2} = 600...800$ МПа	СП из высокопрочного стекловолокна (S-стекло)*	УП*	
	$\sigma_{0,2} = 320$ МПа	$\sigma_{0,2} = 800...900$ МПа			$E_{yB} = 275...345$ ГПа	$E_{yB} = 600...965$ ГПа
$C_{ПК}$	1	9,8	Около 50	9,2	24,3	794

\*  $C_{ПК}$  определен при коэффициенте объемного содержания армирующего волокна  $\eta = 0,6$ .

Так, применение сверхвысокомодульных углеродных волокон с модулем упругости  $E_{ув} = 600...965$  ГПа скорее всего, как следует из табл. 2, приведет к росту стоимости тороидального прочного корпуса, несмотря на наименьшее значение  $m_{ПК}/m_w$  (см. рис. 3,4) по сравнению с другими материалами.

Стоимость тороидального корпуса из УП с  $E_{ув} = 343$  ГПа в  $\sim 1,3$  раза больше стоимости корпуса из СП (см. рис. 5). Но с увеличением рабочей глубины погружения без увеличения модуля упругости стекловолокон СП неэффективен из-за необходимости

увеличения толщины оболочки, а при толщине стенки намотанного изделия свыше 80 мм трудно обеспечить стабильность прочностных свойств готового изделия [7].

Получение по представленным зависимостям наибольшей эффективности для материала, обеспечивающего устойчивость тороидального прочного корпуса при ограничении по верхнему критическому давлению позволяет сделать однозначный выбор детального проектирования аппарата.

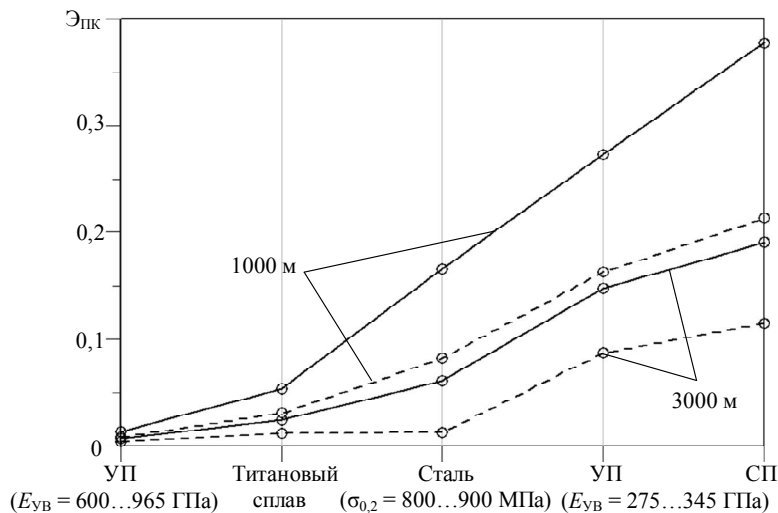


Рис. 5. Результаты сравнения технико-экономической эффективности  $\mathcal{E}_{ПК}$  для тороидальных прочных корпусов подводной техники из разных материалов для глубин погружения  $H_{sw} = 1000$  и  $3000$  м: —  $k = 0,33$ ; - - -  $k = 0,143$

**ВЫВОДЫ**

1. Для рабочих глубин ниже 3000 м по стоимости и отношению  $m_{ПК}/m_w$  при ограничении по верхнему критическому давлению целесообразно выбирать УП на основе высокомодульных высокопрочных углеродных волокон ( $E_{ув} = 275...345$  ГПа), поскольку для глубоководной техники расчет толщины прочного корпуса должен выполняться с удовлетворением условия прочности.

2. Применение в качестве материала для прочного корпуса углепластика со сверхвысокомодульным углеродным волокном ( $E_{ув} = 600...965$  ГПа), невысокопрочного и дорогостоящего возможно для аппаратов с небольшой глубиной погружения, которая уточ-

няется расчетом корпуса на прочность, и при крайней необходимости и экономической выгоде минимальной массы.

3. Практический интерес с точки зрения массогабаритных показателей представляют тороидальные прочные корпуса с  $k < 0,25...0,33$ , поскольку с  $k > 0,33$  масса оболочки в зоне внутреннего экватора существенно возрастает вследствие конструктивно-технологических особенностей намотки замкнутых тороидальных оболочек.

4. Технология изготовления тороидального прочного корпуса методом намотки из полимерных композиционных материалов с высокой удельной прочностью и жесткостью позволит уменьшить его массу и стоимость и увеличить полезную нагрузку.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

[1] Бурдун, Е. Т. Направления развития в проектировании прочных корпусов из композиционных материалов подводных аппаратов и конструкций [Текст] / Е. Т. Бурдун, А. В. Крептюк // Підводна техніка і технологія : матер. І Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнарод. участю (30–31 жовтня 2012). – Миколаїв : НУК, 2012. – С. 22–31.

[2] Греков, В. М. Оценка технико-экономической эффективности применения высокопрочных материалов для корпусов подводной техники [Текст] / В. М. Греков, Б. В. Дружиловский, В. М. Рябов // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. – СПб. : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. – № 56 (340). – С. 187–194.