

<http://dx.doi.org/10.15589/evn20140302>

УДК 629.584:539.3

К 77

PERFORMANCE EVALUATION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS AS CONSTRUCTION MATERIALS FOR END-DOMES OF UNDERWATER PRESSURE HULLS

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОКОНЕЧНОСТЕЙ КОРПУСОВ ПОДВОДНОЙ ТЕХНИКИ

Viktor I. Kravtsov
akvarobotec@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-4207-7594

В. И. Кравцов,
д-р техн. наук, проф.

National Aviation University, Kyiv

Національний авіаційний університет, м. Київ

Abstract. Analysis of papers describing the results of fabrication and testing of various shapes of the composite end-domes for underwater pressure hulls was carried out. The aim of the paper is to evaluate the prospects for the use of FRP as constructional material for the various shapes of shell structures used in construction of underwater pressure hulls. The influence of some shapes of underwater shell structures made of FRP on critical external pressure, density and thickness of the shell structure, useful internal volume of the shell is discussed. A comparative evaluation of the long cylindrical filament-wound pressure hull and pressure hull in shape of closed toroid with circular cross section for underwater structures operating in the shelf zone (up to 1000 m) is made. Graphic illustration of the results is presented. The results of discussion are useful in design and fabrication of underwater structures.

Keywords: underwater vehicle; pressure hull; end-dome; glass-fiber reinforced plastic (GFRP); carbon-fiber reinforced plastic (CFRP); fabrication technology; external hydrostatic pressure; load carrying capacity.

Аннотация. Проведен анализ работ, описывающих результаты производства и испытаний различных форм оконечностей из ПКМ для прочных корпусов подводной техники. Оценены перспективы применения ПКМ и технологий производства оболочечных конструкций, используемых в подводном судостроении, по следующим критериям: плотность, толщина и полезный внутренний объем оболочки, уровень давления потери несущей способности под действием внешнего гидростатического давления.

Ключевые слова: подводный аппарат; прочный корпус; оконечность корпуса; стеклопластик; углепластик; технология формования; несущая способность; внешнее гидростатическое давление.

Анотація. Проведено аналіз робіт, які описують результати виробництва і випробувань різних форм країв корпусів з ПКМ для міцних корпусів підводної техніки. Оцінено перспективи застосування полімерних композиційних матеріалів і технологій виробництва оболонкових конструкцій, які використовуються у підводному суднобудуванні, за наступними критеріями: щільність, товщина і корисний внутрішній об'єм оболонки, рівень тиску втрати несучої здатності під дією зовнішнього гідростатичного тиску.

Ключові слова: підводний апарат; міцний корпус; край корпуса; склопластик; вуглепластик; технологія формування; несуча здатність; зовнішній гідростатичний тиск.

REFERENCES

- [1] Dmitriev A.N. *Proektirovanie podvodnykh apparatov* [Design of underwater vehicles]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 235 p.
- [2] Kravtsov V.I., Geyko S.P. O raschete nesushchey sposobnosti tsilindricheskikh prochnykh korpusov iz armirovannykh kompozitsionnykh materialov dlya podvodnoy tekhniki [On the calculation of the load carrying capacity of cylindrical pressure hulls made of reinforced composite materials for underwater facilities]. *Vestnik NUK* [NUS Journal. Electronic Edition], 2014, no. 2, pp. 21–25.
- [3] Kreptiuk A.V. *Proektirovanie i metod rascheta ustoychivosti kompozitnykh toroidalnykh prochnykh korpusov podvodnykh tekhnicheskikh sredstv, poluchennykh prodolno-poperechnoy namotkoy* [Design and method of stability calculation of toroidal pressure hulls of underwater facilities obtained with longitudinal-circumferential

- winding]. *Problemy tekhniki: Naukovo-vyrobnychiy zhurnal* [Technical Issues: Scientific and production magazine], 2011, no. 2, pp. 113–127.
- [4] *Pravila klassifikatsii i postroyki obitaemykh podvodnykh apparatov, sudovykh vodolaznykh kompleksov i pas-sazhirsikh podvodnykh apparatov* [Rules for the classification and construction of manned underwater vehicles, ship diving systems and passenger underwater vehicles]. Saint Peterburg, Rossiyskiy Morskoy Registr Sudokhodstva, 2004. 204 p.
- [5] Solomenko N.S., Rumyantsev Yu.N. *Stroitel'naya mekhanika podvodnykh lodok* [Structural mechanics of submarines]. Leningrad, Vyshee Morskoe Inzhenernoe ordena Lenina uchilishche im. F. E. Dzerzhinskogo Publ., 1962. 396 p.
- [6] Antonelli V., Laborus M., Nederveen P. Composite end closures for an autonomous underwater vehicle. *7th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM-7) (7.07-9.07.2004)*. United States of America, 2004, pp. 213–217.
- [7] Blachut J. Developments in strength and stability of shell components used in submersibles. *Shell Structures: Theory and Applications (Vol. 2): Proceedings of the 9th SSTA Conference (14.10-16.10. 2009)*. Jurata, 2009.
- [8] Blachut J., Galletly G.D. Externally Pressurized Hemispherical Fibre-Reinforced Plastic Shells. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science May*, 1992, vol. 206, no. 3, pp. 179–191.
- [9] Blachut J. On optimal end closures made from woven CFRP. *Optimal Design with Advanced Materials*, 2012, pp. 367–382.
- [10] Greene E. *Marine Composites*. Annapolis, 1999. 377 p.
- [11] Griffiths G. *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles, vol. 2*. Abingdon, UK, Taylor & Francis Publ., 2002. 372 p.
- [12] 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: <http://www.escm.eu.org>.
- [13] Muc A., Bondyra A., Romanowicz P. Buckling of composite multilayered shells – an experimental analysis. *Shell Structures: Theory and Application*, 2013, vol. 3, pp. 227–230.
- [14] New manned submersible to feature carbon fiber composite hull. Available at: <http://www.compositesworld.com>.
- [15] Kelly J.J., Leon G.F., Hall J.C., Woodall C. Reliable Design and Fabrication of Composite High Performance Marine Structures. *Proceedings of the Tenth International Conference on Composite Materials: Microstructure, degradation, and design*, Whistler, B. C., Canada, August 1995.
- [16] 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.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

На протяжении многих лет (начиная с 1946 года [10]) полимерные композиционные материалы (ПКМ) эффективно используют для производства корпусных конструкций в судостроении. В настоящее время уже реализовано огромное количество проектов конструкций из ПКМ и проводится множество исследований по замене металлических конструкций на легкие композитные.

В подводном судостроении различные конструкции уже изготавливаются из композиционных материалов, в частности обтекатели перископов на атомных подводных лодках, носовые оконечности на боевых подводных лодках, гребные винты для торпед (вместо алюминиевых), легкие и прочные корпуса обитаемых и необитаемых подводных аппаратов. В [10] описаны некоторые детали проектов, направленных на исследования по внедрению ПКМ в кон-

струкции подводных лодок, и их стадия реализации. Для оффшорной промышленности разрабатываются райзеры и обитаемые модули из ПКМ.

Применение ПКМ позволяет моделировать величину давления потери несущей способности (прочности или устойчивости) оболочки, нагруженной внешним равномерным давлением, в большей степени по сравнению с ее металлическим аналогом. На величину потери несущей способности (монолитности) композитного корпуса влияют его геометрия, ассортимент армирующего материала (нить, лента или ткань) и способ его укладки (в случае армирующего тканого материала – его раскрой, для однонаправленного наполнителя – схема армирования), технология производства оболочечной конструкции и др.

Применение в качестве конструктивных материалов для прочных корпусов (ПК) подводных аппаратов (ПА) полимерных композиционных материалов

было predeterminedено требованиями малой плотности корпусов. Как известно, прочный корпус в форме сферы (полусферы) обладает большей несущей способностью по сравнению с цилиндрическим корпусом, и такая форма прочного корпуса используется для глубоководных аппаратов.

Проблема проектирования прочных корпусов из ПКМ включает в себя не только проектирование оболочки основного прочного корпуса, но и проектирование крышек люков и оконечностей корпусов подводных обитаемых судов и аппаратов.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Оболочечные конструкции из ПКМ формируют методами намотки, ручной укладки, вакуумной пропитки под давлением, автоматизированной укладки армирующего материала. Технология формообразования изделия из ПКМ влияет на прочность сформированного слоистого КМ. Наименьшей прочностью обладает слоистый КМ, полученный методом ручной укладки.

В 2013 году OceanGate (США) [14] анонсировала работу над проектом обитаемого подводного аппарата Cuslops 3000 с рабочей глубиной погружения до 3000 м. Углепластиковый прочный корпус толщиной 178 мм для ПА будет изготовлен с помощью технологии производства на основе автоматизированной укладки волокна, разработанной компанией «Boeing».

В автономных необитаемых подводных аппаратах AUSS [16] и Autosub-1 [6, 11, 12] оконечности для цилиндрических прочных корпусов, выполненных методом намотки из ПКМ, были изготовлены из титанового сплава в форме полусфер.

Оболочечные формы оконечностей цилиндрических корпусов бывают полусферические, торосферические, эллиптические, конические и т. д. Исследованию аналитически и численно металлических оконечностей, нагруженных внешним равномерным давлением, а также описанию результатов их испытаний посвящено множество работ, в том числе и направленных на создание регрессионных уравнений, описывающих результаты их экспериментальных и теоретических исследований.

Испытания внешним равномерным давлением полусферических, эллиптических, торосферических и «гибридных» оконечностей из стеклопластика (СП) и углепластика (УП) описаны в работах J. Blachut, G.D. Galletly, A. Muc, V. Papazoglou, V. Antonelli, J.J. Kelly, G. F. Leon, J. C. Hall и др.

В работе [13] описаны результаты испытания внешним равномерным давлением стальных торосферических оболочек, покрытых СП и УП на вершине оболочки. Если внутренняя поверхность стальной оконечности с несовершенствами покрыта однонаправленным углепластиком, то разрушающая

нагрузка в 4 раза выше, чем для стальной оболочки без слоя из слоистого КМ. Давление потери несущей способности (потери устойчивости или разрушение при достижении предела прочности слоистого ПКМ) очень чувствительно к углу армирования, но в обоих случаях разрушение было в вершине композитной оконечности.

В [7–9] представлены результаты испытаний полусферических и торосферических оболочек, подвергнутых действию внешнего равномерного давления. Оболочки были изготовлены ручной укладкой препрега из углепластиковой ткани и методом намотки.

В [8] представлены результаты испытаний шести полусферических оконечностей из СП и УП радиусом кривизны $R = 0,4$ м; отношение радиуса R к средней толщине t_{cp} исследуемых оболочек колебалось от 33 до 54. Четыре из них были сформованы из цельных полотен тканого препрега, а два – соединением кусков препрега в форме лепестков (рис. 1). Углепластиковая полусфера ($t_{cp}/R = 0,03$) была в 1,4 раза прочнее, чем стеклопластиковая ($t_{cp}/R = 0,027$), а по сравнению с геометрически подобной стальной полусферой, изготовленной сварной, с $R/t = 0,0177$, разрушающее давление было одинаковым. Углепластиковая оконечность получилась легче стальной в 2,8 раза [8].



Рис. 1. Углепластиковая торосферическая оболочка диаметром 0,8 м после разрушения [7]

Авторами [6, 12] освещены результаты производства из УП методом пропитки под вакуумом нескольких форм оконечностей и их испытаний внешним гидростатическим давлением. В [12] приведены результаты испытаний полусферических, эллиптических и «гибридных» оконечностей с отношением толщины к высоте $t/R = 0,133; 0,19; 0,21$ и $0,3$.

При испытании внешним гидростатическим давлением прочного корпуса, состоящего из цилиндрического корпуса, изготовленного методом намотки из углепластика, и углепластиковых оконечностей, изготовленных из УП методом пропитки под вакуумом (вместо титановых в конструкции прочного корпуса AUTOSUB [12]), разрушение произошло при 39,8 МПа вследствие потери устойчивости цилиндрической части.

В процессе выполнения оконечностей из углепластика методом пропитки под вакуумом [12] для цилиндрических прочных корпусов для исключения вероятности расслаивания и улучшения качества в результате было установлено, что отношение толщины к радиусу кривизны t/R должно быть 0,2, т. е. толщину оконечности необходимо выбирать больше расчетной, это в результате приведет к увеличению ее плотности. В [6] показана возможность производства оконечностей из армированных эпоксиглепластиков для конструкций прочных корпусов подводной техники (рис. 2).



Рис. 2. Сформированная методом пропитки под вакуумом углепластиковая крышка для цилиндрического прочного корпуса [6]

В качестве связующих для ПКМ как конструкционных материалов в подводном судостроении обычно используют реактопласты – полиэфирные (например, ПК LR5) и эпоксидные смолы (например, цилиндрическая часть ПК аппарата AUSS). В [15] исследовалась возможность использования в качестве связующих для изготовления модулей из ПКМ, работающих на глубине, термопластов – полиэфирэфиркетона и полифениленсульфида. Основной целью этих исследований было улучшение технологии производства оболочечных конструкций из ПКМ для проектирования в дальнейшем легких композитных док-камер для подводных лодок ВМС США. Был изготовлен из ПКМ на основе термопластичных полимерных систем модуль, состоящий из цилиндрического корпуса диаметром 1,22 м и эллиптических оконечностей.

Сегодня при разработке конструкций из ПКМ в подводном судостроении исследования направлены не только на снижение массы, получение заданных эксплуатационных характеристик, но и на уменьшение стоимости готового изделия.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – оценить эффективность и перспективу применения ПКМ для различных форм оболочечных конструкций, используемых в подводном судостроении, по следующим критериям: плотность, толщина и полезный внутренний объем оболочки, уровень давления потери несущей способности под действием внешнего равномерного давления.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Согласно [5], для прочных корпусов подводных лодок и аппаратов свойства идеального материала (металла) должны быть следующими: предел текучести – 2000 МПа, модуль упругости – 370 ГПа, плотность – 1,8 г/см³.

Для приближенной оценки эффективности изготовления полусферических оконечностей из ПКМ приведен построенный по условию прочности [4] график (рис. 3) влияния относительной толщины углепластиковой (условно-квазиизотропной, $\rho_{уп} = 1800$ кг/м³) и титановой ($\rho_{титан} = 4200$ кг/м³, $\sigma_{титан} = 850$ МПа) оконечностей для глубоководных конструкций на их плотность и величину разрушающего давления (коэффициент безопасности принят равным 1,5). Согласно [1], для глубин свыше 4000 м расчет должен выполняться при условии удовлетворения прочности. Например, плотность углепластиковой полусферы с $t/R = 0,2$ будет 0,814 (см. рис. 3). Соотношение масса/водоизмещение цилиндрического углепластикового прочного корпуса без оконечностей подводного аппарата AUSS (рабочая глубина погружения – 6000 м) равно 0,477, а с титановыми полусферическими оконечностями – 0,58 [16]. Применяв в качестве конструкционного материала для цилиндрического корпуса углепластик, достигли самого низкого значения отношения масса/водоизмещение для прочного корпуса среди автономных или дистанционно управляемых подводных аппаратов [16].

Проведена сравнительная оценка цилиндрической (без оконечностей) и тороидальной форм прочных корпусов из СП для подводных аппаратов, работающих в шельфовой зоне (до 1000 м), по следующим критериям: плотность, толщина и полезный внутренний объем корпусов, уровень расчетного давления потери устойчивости. Внутренний радиус поперечного сечения исследуемых корпусов $R = 0,3$ м. Параметры, определяющие структуру сформированной стенки корпуса из слоистого КМ: стекловолоконно с $E_{св} = 92$ ГПа, связующее – эпоксидная смола ($E_{сс} = 3$ ГПа), схема намотки – $[0^\circ; 90^\circ]_{30}$, коэффициент объемного содержания армирующего наполнителя $V_f = 0,58$. Геометрия замкнутого кругового тороида характеризуется параметром $k = R/c$, где c – расстояние от оси вращения тороида до центра кругового сечения.

Расчеты произведены по материалам работ [2, 3], результаты расчета проиллюстрированы на рис. 4.

Если сравнивать цилиндрический (без оконечностей) и тороидальный стеклопластиковые корпуса одинаковой плотности, то полезный объем у тороидального корпуса будет в 3,5 раза больше, а несущая способность – в 6 раз (см. рис. 4).

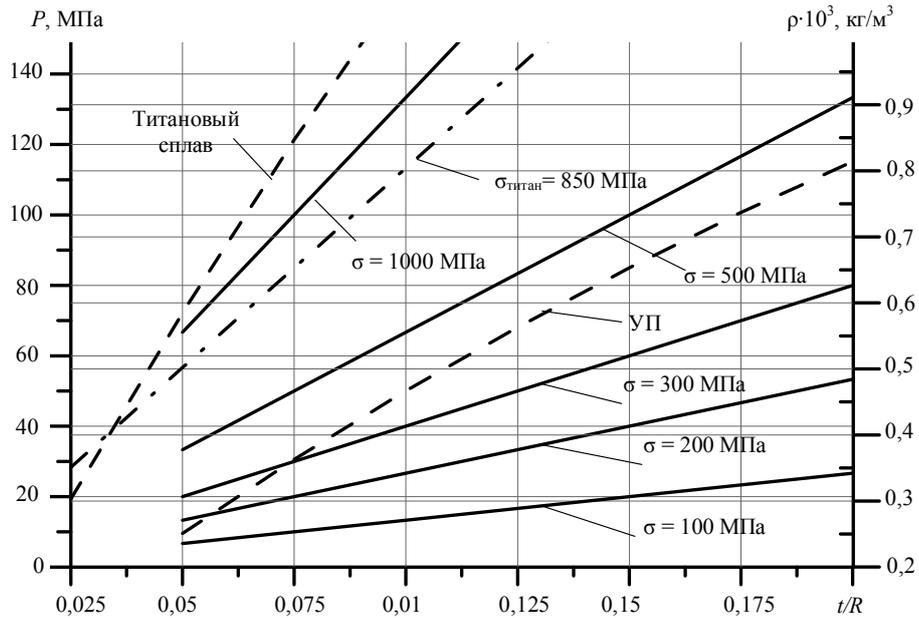


Рис. 3. График влияния относительной толщины полусферической оконечности и прочности конструкционного материала на ее плотность и величину рабочего давления под действием внешнего гидростатического давления

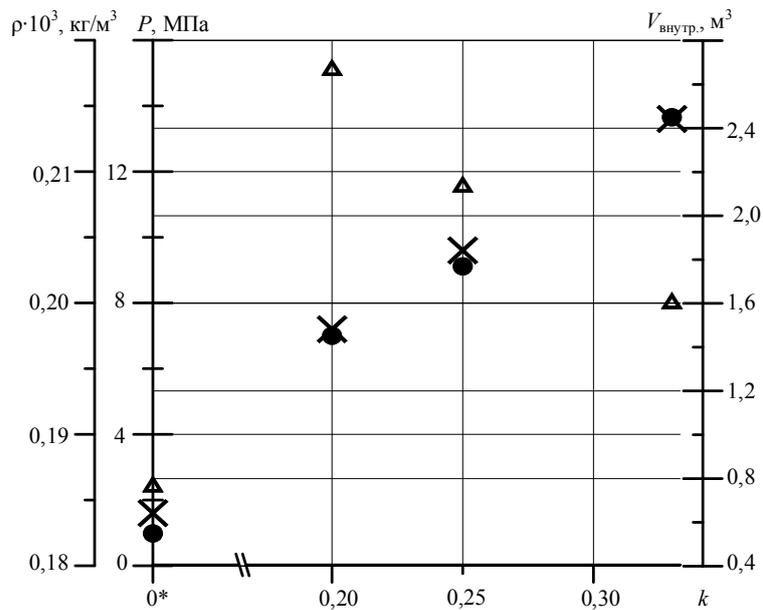


Рис. 4. Зависимость расчетного давления (по условию устойчивости), внутреннего объема и плотности стеклопластиковых корпусов от их формы – цилиндрической ($k = 0^* - L/R \geq 9$) и замкнутой тороидальной: × – плотность корпуса; ● – расчетное давление потери устойчивости; Δ – внутренний объем корпуса

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенного анализ работ, описывающих результаты производства и испытаний различных форм оконечностей из ПКМ для прочных корпусов подводных аппаратов, судов и конструкций, оценены перспективы применения ПКМ и техноло-

гий изготовления оконечностей для оболочечных конструкций.

2. Решение о выборе материала и формы прочного корпуса следует принимать с учетом таких факторов, как требуемые эксплуатационные характеристики к материалу и формы корпуса, технологичность его изготовления, плотность и стоимость.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Дмитриев, А. Н.** Проектирование подводных аппаратов [Текст] / А. Н. Дмитриев. – Л. : Судостроение, 1978. – 235 с.
- [2] **Кравцов, В. И.** О расчете несущей способности цилиндрических прочных корпусов из армированных композиционных материалов для подводной техники [Электронный ресурс] / В. И. Кравцов, С. П. Гейко // Электронне видання «Вісник НУК». – Миколаїв : НУК, 2014. – № 2. – Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [3] **Крептюк, А. В.** Проектирование и метод расчета устойчивости композитных тороидальных прочных корпусов подводных технических средств, полученных продольно-поперечной намоткой [Текст] / А. В. Крептюк // Проблеми техніки : науково-виробничий журнал. – 2011. – № 2. – С. 113–127.
- [4] Правила классификации и постройки обитаемых подводных аппаратов, судовых водолазных комплексов и пассажирских подводных аппаратов [Текст]. – СПб. : Российский морской Регистр судоходства, 2004. – 204 с.
- [5] **Соломенко, Н. С.** Строительная механика подводных лодок [Текст] / Н. С. Соломенко, Ю. Н. Румянцев. – Л. : Издание Высшего морского инженерного ордена Ленина училища им. Ф. Э. Дзержинского, 1962. – 396 с.
- [6] **Antonelli, V.** Composite end closures for an autonomous underwater vehicle [Text] / V. Antonelli, M. Labordus, P. Nederveen // 7th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM-7). – Newark : University of Delaware. – United States of America, 2004. – P. 213–217.
- [7] **Blachut, J.** Developments in strength and stability of shell components used in submersibles [Text] / J. Blachut // Shell Structures: Theory and Applications Vol. 2: Proceedings of the 9th SSTA Conference. – Jurata, Poland, 2009.
- [8] **Blachut, J.** Externally Pressurized Hemispherical Fibre-Reinforced Plastic Shells [Text] / J. Blachut, G. D. Galletly // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – Part C : Journal of Mechanical Engineering Science May. – 1992. – Vol. 206, nr 3. – P. 179–191.
- [9] **Blachut, J.** On optimal end closures made from woven CFRP [Text] / J. Blachut // Optimal Design with Advanced Materials. – 2012. – P. 367–382.
- [10] **Greene, E.** Marine Composites [Text] / E. Greene. – Annapolis, 1999. – 377 p.
- [11] **Griffiths, G.** Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles, Vol. 2 [Text] / G. Griffiths. – Abingdon, UK : Taylor & Francis, 2002. – 372 p.
- [12] Lightweight Composite Pressure Housings for Mid-Water and Benthic Applications [Electronic Resource] / V. Papazoglou, F. Livingstone, P. Chaucho [et al.] // ESCM. – 2006. – 10 p. – Access Mode: <http://www.escm.eu.org>.
- [13] **Muc, A.** Buckling of composite multilayered shells – an experimental analysis [Text] / A. Muc, A. Bondyra, P. Romanowicz // Shell Structures : Theory and Application. – 2013. – Vol. 3. – P. 227–230.
- [14] New manned submersible to feature carbon fiber composite hull [Electronic Resource]. – Access Mode: <http://www.compositesworld.com>.
- [15] Reliable Design and Fabrication of Composite High Performance Marine Structures [Text] / J. J. Kelly, G. F. Leon, J. C. Hall, C. Woodall // Proceedings of the Tenth International Conference on Composite Materials: Microstructure, degradation, and design. – Canada : Whistler, B. C., 1995.
- [16] **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.

© В. І. Кравцов

Надійшла до редколегії 14.11.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. Л. І. Коростильов

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2014