

Проектирование и конструкция судов

Научная статья

УДК 629.127.4-52

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-2/27-38>

В.В. Новиков, К.А. Молоков, А.А. Гурская

НОВИКОВ ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, leka1551@rambler.ru

Департамент морской техники и транспорта Политехнического института

МОЛОКОВ КОНСТАНТИН АЛЕКСАНДРОВИЧ – к.т.н., доцент, spektrum011277@gmail.com

Департамент промышленной безопасности Политехнического института,

Кафедра информационных технологий и систем

(Владивостокский государственный университет экономики и сервиса)

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

ГУРСКАЯ АЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА – инженер–конструктор, gurskaya-a@mail.ru

Дальневосточный завод «Звезда»

г. Большой Камень, Россия

Расчетная оценка влияния глубины погружения на характеристики корпуса подводного аппарата

Аннотация. В мировой практике проектирования и эксплуатации подводных аппаратов принято считать для корпуса разрушающим то давление, которое соответствует потере устойчивости. Критическое давление при заданной предельной глубине погружения зависит от материала прочного корпуса, его формы и размеров, толщины обшивки и количества установленных шпангоутов. В данной работе на базе известных аналитических формул, а также с использованием программного продукта SolidWorks Simulation построены графические зависимости и диаграммы, позволяющие оценивать взаимосвязь прочностных, геометрических и весовых характеристик основного корпуса конструируемого подводного аппарата. Эти характеристики связаны с расчетной глубиной его погружения, что позволяет выбрать параметры элементов корпуса на начальных этапах проектирования. Расчеты напряженного состояния корпуса подводного аппарата в программе SolidWorks показали, что выбранные его параметры удовлетворяют условиям прочности и металлоемкости при эксплуатации на заданной глубине погружения.

Ключевые слова: подводный аппарат, основной корпус, прочность, напряжения, устойчивость, глубина погружения

Для цитирования: Новиков В.В., Молоков К.А., Гурская А.А. Расчетная оценка влияния глубины погружения на характеристики корпуса подводного аппарата // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 2(51). С. 27–38.

Введение

Совершенствованию методики проектирования подводных аппаратов (ПА), тесно связанной с обеспечением их прочности, уделяется большое внимание. Исследователями рассматриваются вопросы определения напряженного состояния оболочечных конструкций, их устойчивости сжимающим нагрузкам, использования и поведения различных материалов [2,3,5,9,14,15].

Расчетная глубина погружения является основным параметром, определяющим конструктивную прочность основного корпуса (ОК) подводного аппарата. Она чаще всего устанавливается техническим заданием на проектирование исходя из назначения аппарата с учетом

принятых технических требований. Известны различные упрощенные методики определения параметров основного прочного корпуса объектов морской подводной техники на начальном этапе проектирования [1, 4, 5, 10, 13]. Они базируются на расчетных схемах, в которых проверяются в основном условие прочности по напряжениям и условие обеспечения устойчивости оболочечной конструкции в зависимости от расчетной глубины погружения [1, 6, 9].

При проектировании цилиндрического корпуса ПА с кольцевыми равноотстоящими шпангоутами и концевыми переборками при заданных размерах и величины расчетного давления вначале необходимо выбрать материал, толщину оболочки, предельную шпацию, обеспечивающие устойчивость обшивки между шпангоутами, а также массу конструкций. Корректный выбор марки материала конструкций, толщины обшивки, расстояния между шпангоутами должен обеспечить не только оптимальную металлоемкость, но и высокий уровень технологичности. Эти параметры можно определить в первом приближении по простым расчетным формулам [1,5]. В силу того, что подобная задача является многофакторной и определяемые параметры взаимосвязаны, для выбора элементов корпуса в техническом задании или на начальном этапе проектирования целесообразно построение графических зависимостей, иллюстрирующих влияние глубины погружения аппарата на характеристики и элементы прочного корпуса. Задачей данного исследования является проведение расчетного анализа для цилиндрического ОК с использованием аналитических зависимостей и программного комплекса SolidWorks Simulation с целью определить влияние глубины погружения на основные параметры корпуса.

Расчетный анализ

Толщина основного корпуса $t_{\text{ц}}$ заданного радиуса r цилиндрической оболочки из условия прочности зависит от расчетного давления воды $P_{\text{расч}}$, связанного с глубиной погружения ПА, и допускаемых напряжений $\sigma_{\text{доп}}$:

$$t_{\text{ц}} = 1,03 \frac{P_{\text{расч}} r}{\sigma_{\text{доп}}}.$$

Предельная шпация $l_{\text{пр}}$, обеспечивающая устойчивость обшивки между шпангоутами при полученном значении толщины обшивки, связана с материалом ОК зависимостью:

$$l_{\text{пр}} = r \varepsilon^{0,5} \left[0,067 \frac{E \varepsilon}{\sigma_{\text{T}} 10^2} + 0,062 \right],$$

где σ_{T} – предел текучести, E – модуль нормальной упругости, $\varepsilon = 100 t_{\text{ц}}/r$.

Принятая конструктивная шпация l должна удовлетворять условию $l < l_{\text{пр}}$. Теоретическое значение критического давления для стальной цилиндрической оболочки можно определить по формуле Мизеса–Папковича:

$$P_{\text{кр}} = 19,1 \left(\frac{100 t_1}{r} \right)^2 \cdot \left(\frac{r 100 t_1}{l^2} \right)^{0,58}$$

или по формуле Соусвелла–Папковича:

$$P_{\text{кр}} = 18,3 \left(\frac{100 t_1}{r} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{100 t_1}{l} \right).$$

Здесь t_1 – толщина цилиндрической оболочки.

Действительное критическое давление равно

$$P_{\text{кр}}^{\text{д}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot P_{\text{кр}},$$

где η_1, η_2 – поправочные коэффициенты, учитывающие начальную погибь, неоднородность материала, влияние отклонений от закона Гука и другие нелинейные факторы.

Масса основного прочного корпуса с полусферическими концевыми переборками складывается из массы оболочки $P_{\text{ц}}$ и масс полусфер концевых переборок $P_{\text{с}}$ и тоже зависит от материала, допускаемых напряжений и геометрических размеров конструкции.

Поскольку в формулах прослеживается взаимосвязь основных характеристик ОК и расчетного давления, представляет несомненный интерес построение соответствующих диаграмм.

Объектом исследования выбран цилиндрический ОК со сферическими концевыми переборками при следующих характеристиках и исходных данных:

- в качестве расчетных величин давления приняты значения давлений, изменяющиеся до глубины погружения 1000 м;
- радиус прочного корпуса и сферических переборок изменялся в пределах $r = 0,15–0,35$ м; длина цилиндрической части аппарата принята равной $l_{ц} = 1,6$ м;
- диапазон изменения предела текучести стали соответствовал 395–980 МПа; также рассчитывались толщина, предельная шпация и масса прочного корпуса из алюминиевых и титановых сплавов.

Толщина обшивки. Выбор толщины обшивки ОК напрямую зависит от геометрических размеров ПА и механических свойств материала. Из графиков, показывающих взаимосвязь между пределом текучести, расчетной глубиной погружения подводного аппарата и толщиной обшивки корпуса, видно, что для ПА, эксплуатируемых на больших глубинах, рационально использовать более прочные стали в целях снижения толщины обшивки и, соответственно, металлоемкости (рисунки 1, 2). Для ПА, работающих на малых глубинах, возможно использование менее прочных материалов. Если толщины обшивки получаются относительно небольшими, для обеспечения устойчивости корпуса целесообразно устанавливать кольцевые равноотстоящие шпангоуты.

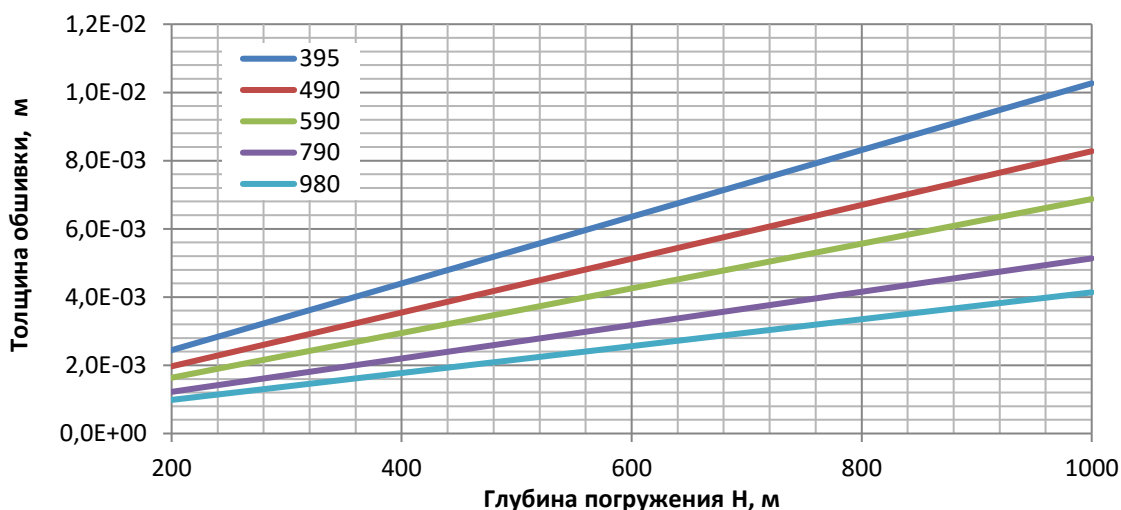


Рис. 1. Влияние глубины погружения подводного аппарата на толщину обшивки цилиндрического прочного корпуса с радиусом $r = 0,25$ м и различным пределом текучести (МПа)

Трехмерная диаграмма позволяет проследить взаимосвязь радиуса основного корпуса ПА и глубины погружения при выбранной толщине обшивки.

Предельная шпация. Критерием величины предельной шпации при проектировании ПА является предотвращение разрушения корпуса на заданной глубине погружения. Построенные зависимости (рис. 3) показывают, что для прочного корпуса диаметром до 0,7 м и глубиной погружения до 1000 м расчетная шпация получается сравнительно небольшой. Однако это делает конструкцию менее технологичной, так как становится затруднительным использование сварочных автоматов и полуавтоматов. Оптимальной можно считать шпацию ~500 мм. Слишком малая шпация, полученная в расчете, свидетельствует о некорректном выборе материала. Если шпангоуты не устанавливать, то потребуется значительное увеличение толщины обшивки. При больших глубинах толщина естественно увеличится. В некоторых случаях ОК может обеспечивать устойчивость и без установки набора.

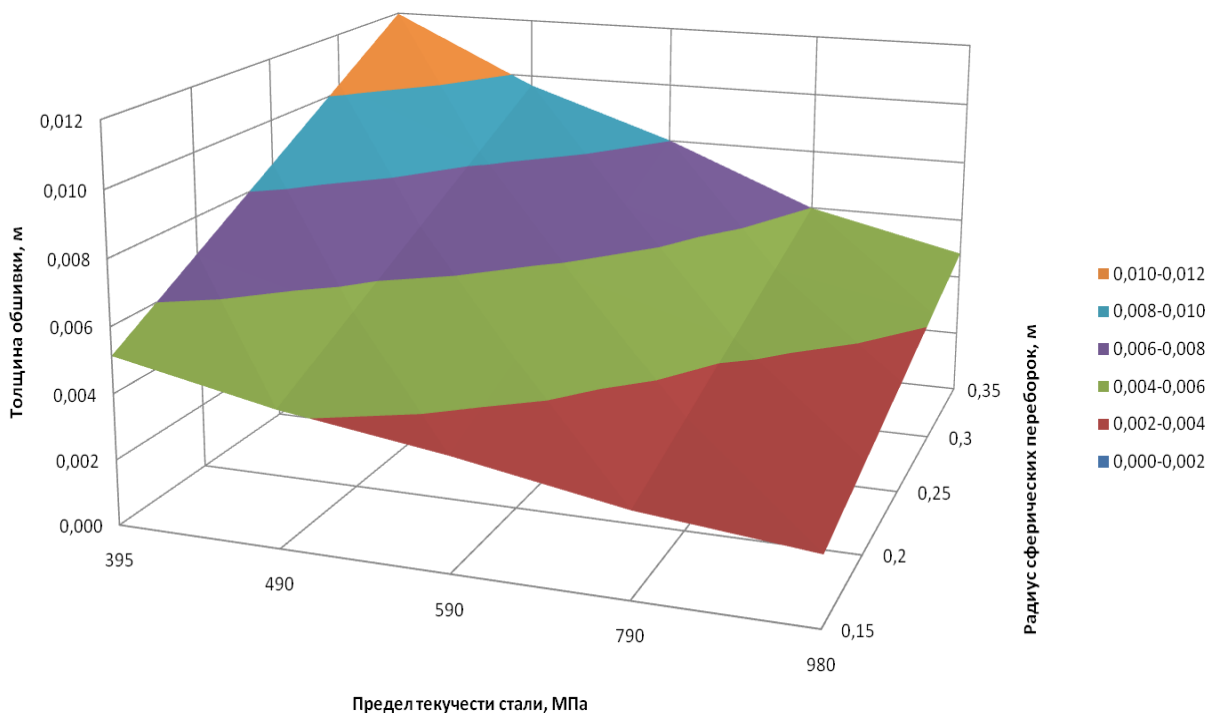


Рис. 2. Диаграмма зависимости толщины обшивки от предела текучести материала и радиуса цилиндрической оболочки основного корпуса при глубине погружения 1000 м

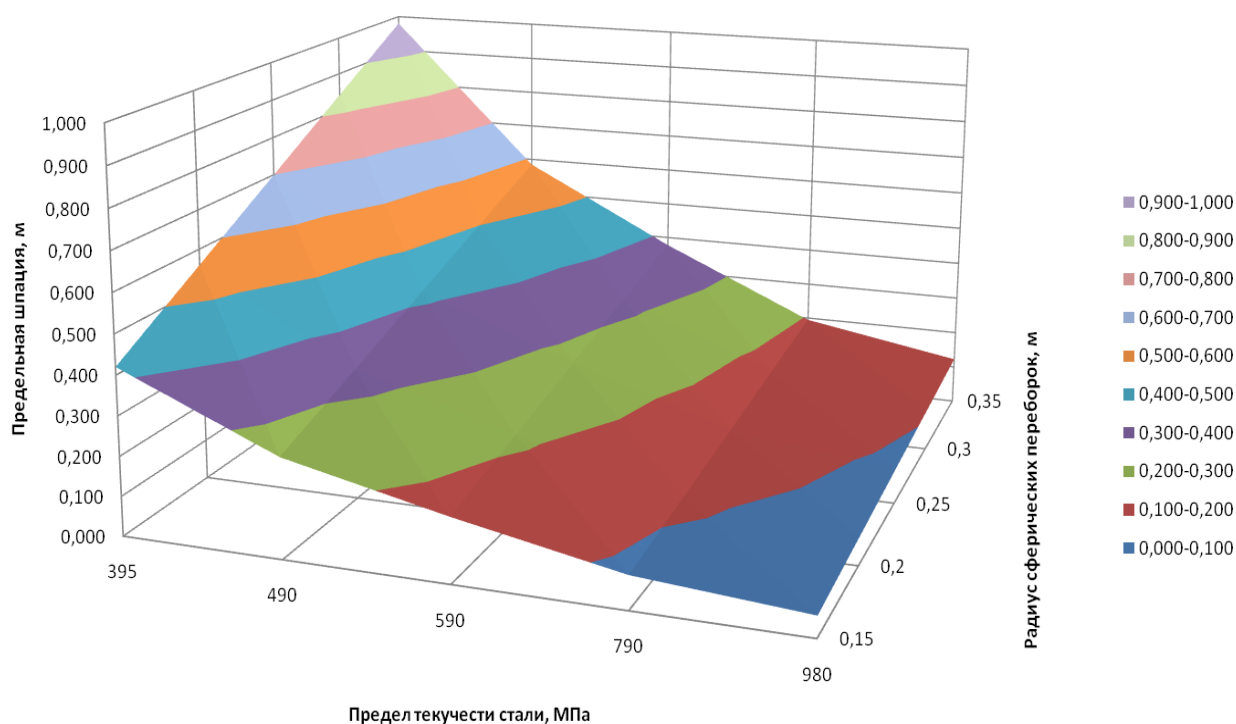


Рис. 3. Диаграмма зависимости предельной шпации от предела текучести стали и радиуса цилиндрической оболочки основного корпуса при глубине погружения 1000 м

Масса корпуса. В сильной степени зависит от его геометрических размеров, формы и механических свойств материала. Из представленных результатов расчета видно, что масса ОК может достигать значительной величины (рисунки 4, 5). Уменьшить ее можно путем рационального распределения материала. Иначе уменьшению массы может способствовать использование более легких сплавов. К примеру, применение титановых сплавов позволяет снизить массу корпуса примерно в 2 раза, а в случае использования алюминиевых сплавов – почти в 3 раза.

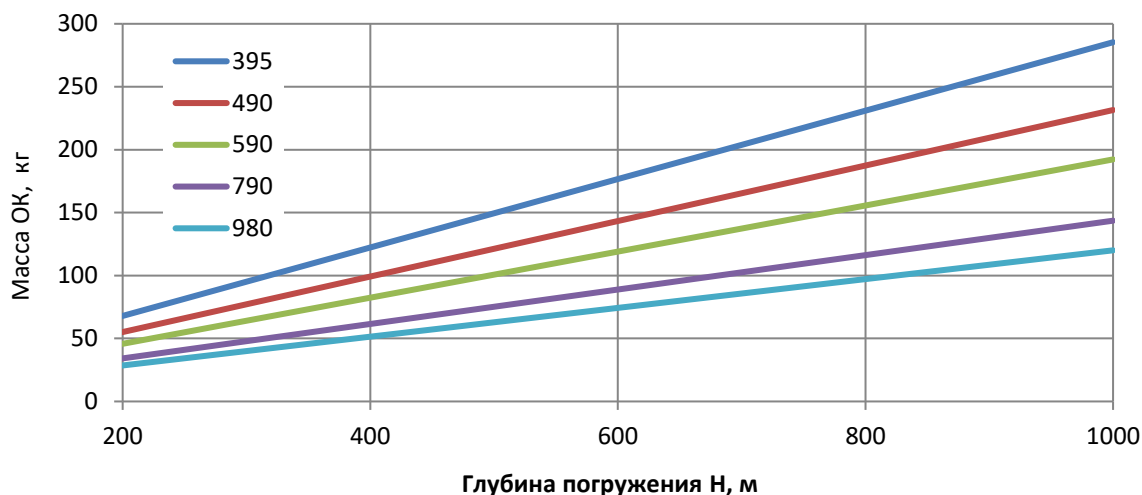


Рис. 4. Влияние глубины погружения на массу основного корпуса, выполненного из материалов с разным пределом текучести (МПа)

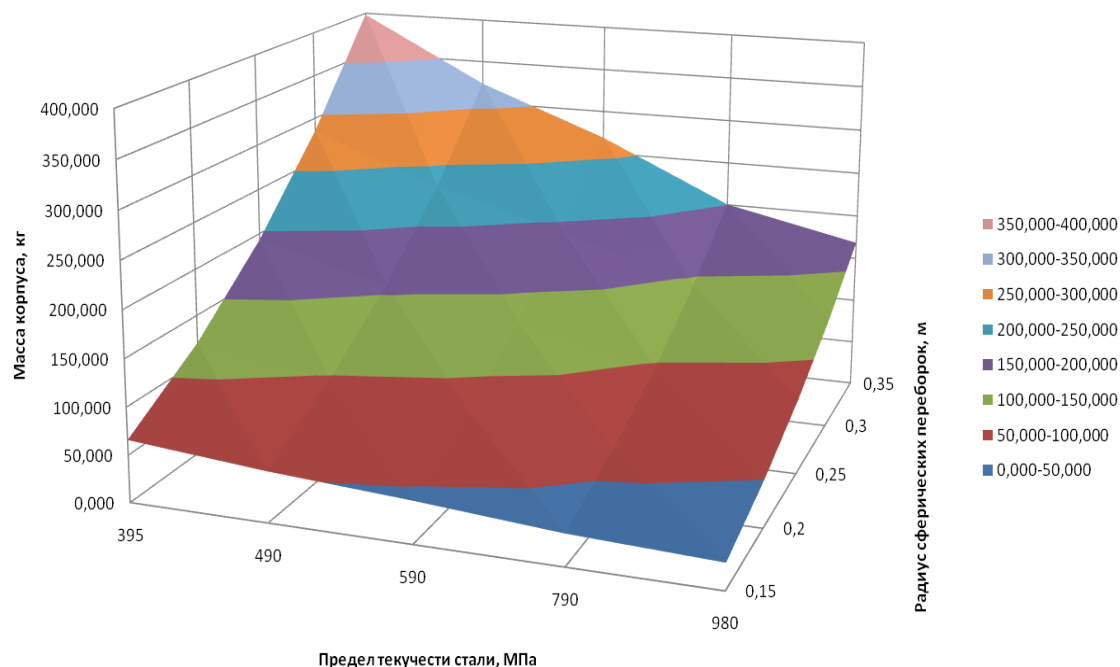


Рис. 5. Диаграмма зависимости массы основного корпуса от предела текучести материала и радиуса цилиндрической оболочки корпуса при глубине погружения 1000 м

По результатам расчетов предварительно можно рекомендовать применение материалов для основного прочного корпуса цилиндрической формы с глубинами погружения до 1000 м. К примеру, представляется рациональным использование следующих материалов:

- на глубинах до 200 м – сталь (с пределом текучести 295 МПа), алюминиевые сплавы (200 МПа);
- на глубинах 400-600 м – сталь (490 МПа), алюминиевые сплавы (435 МПа);
- на глубинах 800-1000 м – сталь (790 МПа), алюминиевые сплавы (505 МПа) или титановые сплавы (790 МПа). Определенного интереса заслуживает использование стеклометаллокомпозиата для изготовления ОК [2, 3, 11].

Расчетный анализ с использованием приведенных зависимостей дает возможность на начальном этапе проектирования ПА выбрать основные параметры прочного корпуса, приемлемые с точки зрения обеспечения прочности, устойчивости, металлоемкости и приступить к оценке напряженного состояния, применяя современные программные продукты, например SolidWorks Simulation (SWS).

Были рассчитаны различные варианты основного корпуса ПА при разных глубинах погружения. При этом менялись толщина обшивки, шпация и материал ОК.

На графике представлены результаты статического анализа по SWS – напряжений, возникающих в отсеках основного корпуса ПА с разной шпацией с изменением глубины погружения (рис. 6). Для рассмотренного варианта ОК приняты следующие основные характеристики:

- материал прочного корпуса – алюминиевый сплав 7075-T6 с пределом текучести 505 МПа;

- толщина обшивки аппарата – 5 мм;

- диаметр цилиндрической оболочки – 0,3 м.

График показывает изменение напряжений с увеличением размера шпации при эксплуатации на разных глубинах. Как видно, для малых глубин шпация не оказывает существенного влияния на величину напряжений при сжатии корпуса. При глубинах больше 1000 м напряжения, возрастая, могут превысить предел текучести, а их значения сильно различаются для конструкций с разными шпациями.

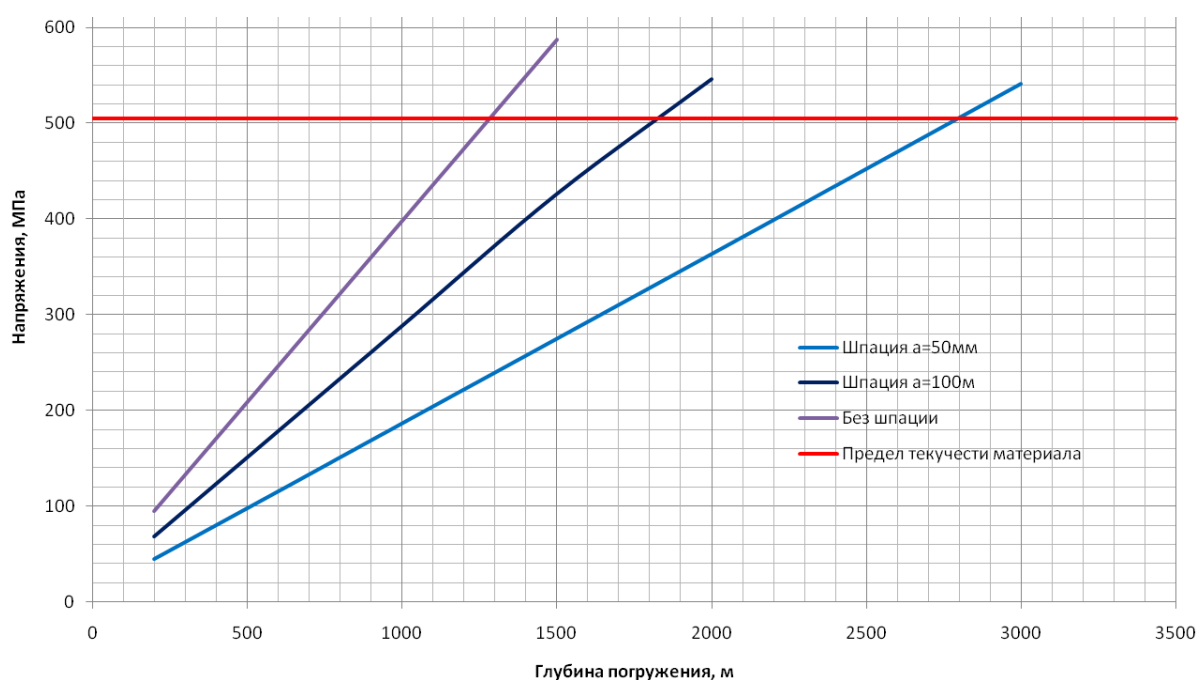


Рис. 6. Изменение напряжений в обшивке цилиндрического ОК подводного аппарата в зависимости от глубины погружения

На рисунках 7–9 представлены результаты расчета по SWS напряжений в цилиндрической оболочке с плоскими переборками при следующих принятых исходных данных:

- глубина погружения аппарата – 200 м;

- длина корпуса – 500 мм;

- диаметр основного корпуса – 250 мм;

- толщина обшивки корпуса $S=5,0$ мм, а толщина переборок с учетом влияния отверстий на прочность и с учетом расчетных формул, рекомендуемых по ГОСТ [2], принята равной 15 мм;

- материал – алюминиевый сплав с пределом текучести $\sigma_T=170$ МПа.

При малых глубинах напряжения в обшивке корпуса, равные 42,3 МПа, распределены равномерно (рис. 8). Их значения примерно в 4 раза меньше предела текучести. Величина напряжений в концевых переборках, равная 103,1 МПа, в целом также не превышает предела текучести. По краям переборки их величина примерно в 2 раза меньше бт. Однако в районе отверстий наблюдается их концентрация, а величина напряжений близка к пределу текучести (рис. 9), что требует установки соответствующих подкреплений конструкции корпуса или местного увеличения толщины материала.

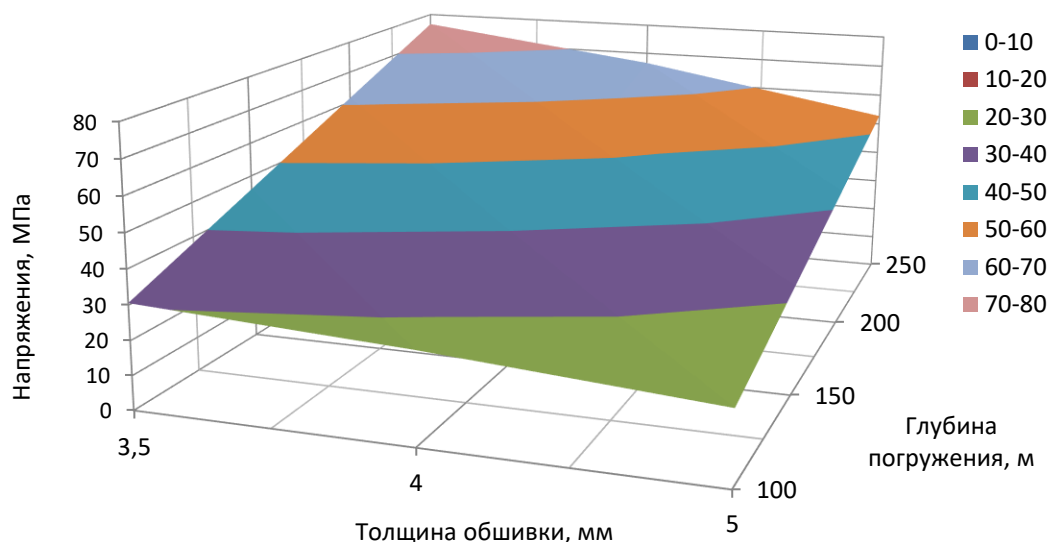


Рис. 7. Изменение напряжений в обшивке основного корпуса ПА в зависимости от глубины погружения и толщины оболочки (корпус выполнен из алюминиевого сплава)

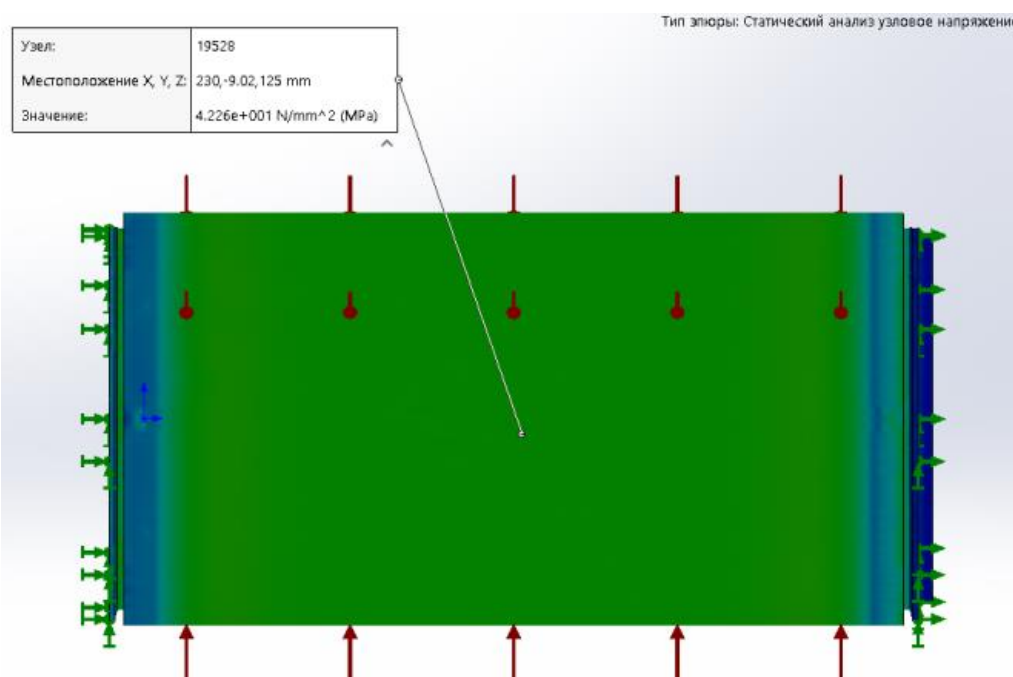


Рис. 8. Иллюстрация напряженного состояния цилиндрической части основного корпуса в программном комплексе SolidWorks

Такой значительный разброс величин напряжений в разных областях ОК говорит о недостаточности правильных конструктивных решений и неоправданном запасе прочности. Действительно, хрупкое разрушение материала маловероятно в силу действующих напряжений сжатия, а не растяжения [7]. Вместе с тем долговечность ОК должна обеспечиваться не отсутствием областей с пластическими деформациями, а отсутствием остаточных напряжений растяжения выше предела выносливости и хрупких микро-разрушений после разгрузки материала корпуса. Известно, что при отклонении нагружения от равноосного двухосного сжатия/растяжения концентрация напряжений в области отверстий может изменяться от 2 до 3. Для снижения эффектов концентрации возможно использование результатов работы [12].

Использование программ SWS при сравнительном анализе прочности цилиндрических корпусов ПА, разных по конструкции, дает возможность относительно просто оценить их напряженное состояние.

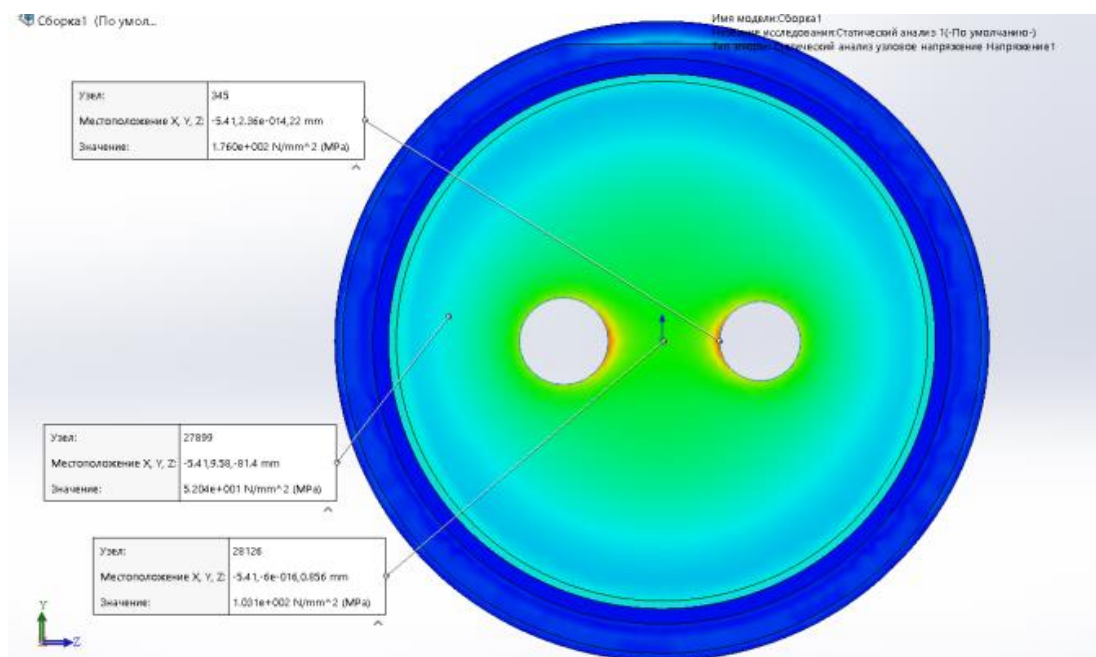


Рис. 9. Напряженное состояние концевой плоской переборки цилиндрического корпуса подводного аппарата, рассчитанного в программном комплексе SolidWorks

В качестве примера на рис. 10 показаны величина и характер распределения напряжений в обшивке цилиндрического корпуса ПА с кольцевыми шпангоутами, а на рис. 11 – напряженное состояние в такой же оболочке при отсутствии шпангоутов. Приняты следующие характеристики цилиндрической оболочки:

- материал корпуса – алюминиевый сплав с пределом текучести 505 МПа;
- толщина обшивки – 5 мм;
- диаметр оболочки – 0,3 м.

Анализ показывает, что напряжения в прочном корпусе с небольшим интервалом между шпангоутами распределяются равномерно по всей поверхности корпуса. При этом в районе установки шпангоутов напряжения почти в 2 раза меньше, чем между ними.

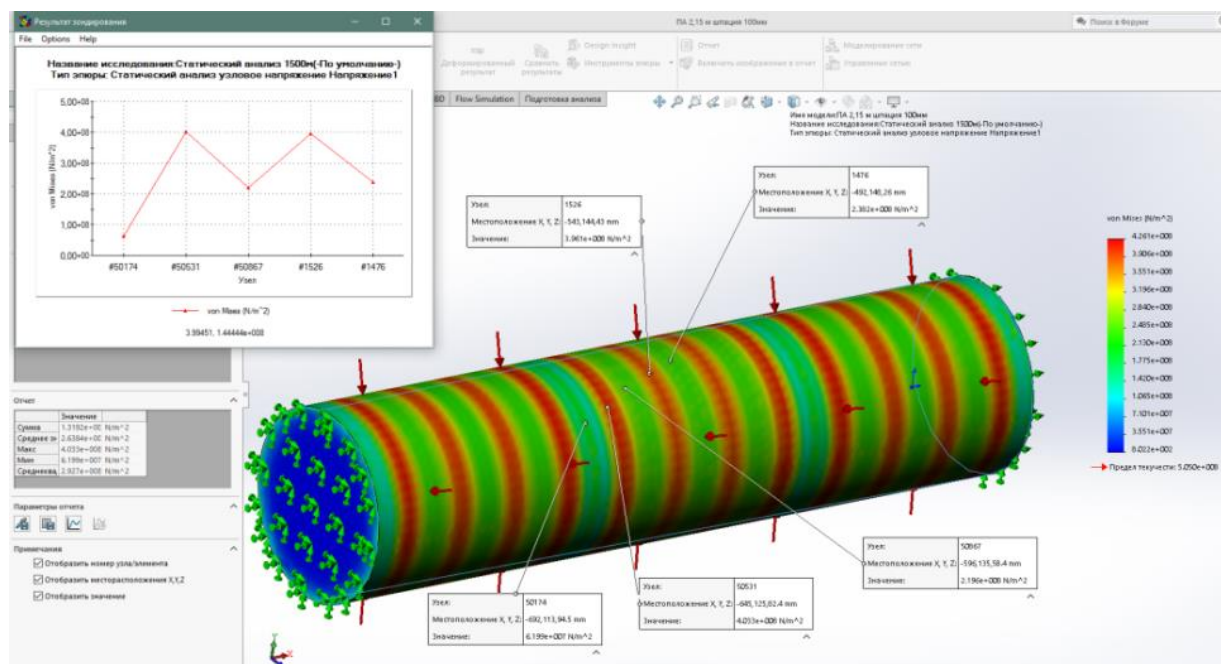


Рис. 10. Распределение напряжений в цилиндрической оболочке корпуса подводного аппарата с установленными кольцевыми шпангоутами (шпация равна 100 мм)

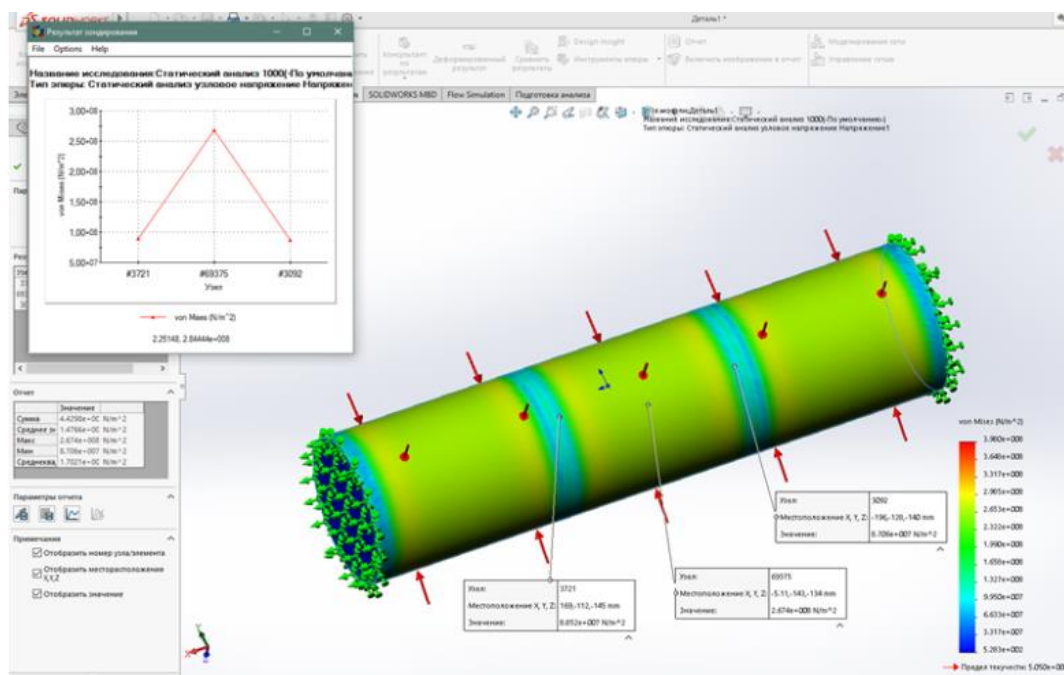


Рис. 11. Напряженное состояние цилиндрического корпуса подводного аппарата без шпангоутов

Для цилиндрического корпуса без шпангоутов при тех же характеристиках напряжения в районе переборок оказываются примерно в 3 раза меньше, чем в отсеках корпуса.

Заключение

Графические зависимости и диаграммы, построенные с использованием аналитических зависимостей, дают возможность на начальной стадии разработки технического задания и проектирования подводного аппарата достаточно просто и обоснованно выбирать ключевые параметры основного корпуса, обеспечивающие необходимые прочность, устойчивость и металлоемкость основного корпуса при эксплуатации подводного аппарата на заданных глубинах погружения.

Результаты расчета, проведенные аналитическим методом и с применением программы SolidWorks Simulation, достаточно близки, что свидетельствует о приемлемой точности как используемых формул, так и методики расчета прочности по данной программе. Использование программных продуктов информационных технологий дает возможность иллюстративно показать более приемлемые варианты конструкций.

Выполненный расчетный анализ показал возможность снижения металлоемкости прочного корпуса без снижения его прочностных качеств путем соответствующего выбора его геометрических характеристик.

Дальнейшие исследования по обеспечению прочности основного корпуса подводного аппарата в связи с минимизацией металлоемкости и максимизации глубины погружения могут быть направлены на создание условий, при которых будет обеспечиваться равноосное двухосное сжатие, а также на комбинирование элементов корпуса из материалов с разными характеристиками упрочнения.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Александров В.Л., Глозман М.К., Ростовцев Д.М., Сиверс Н.Л. Проектирование конструкций основного корпуса подводных аппаратов. Санкт-Петербург: Изд. центр Мор. техн. ун-та, 1994. 435 с.

2. Бочарова А.А., Гончарук В.К., Ратников А.А. Математическое моделирование процесса формирования прочного корпуса глубоководных аппаратов из стекломаталлокомползита // Вестник Инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. 2015. № 4(25). С. 93–102.
URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/4-25/12/>
3. Гончарук В.К., Антоненко С.В., Бочарова А.А., Ратников А.А. Создание стекломаталлокомползитных цилиндрических оболочек для прочных корпусов глубоководных аппаратов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1, № 3(41). С. 76–83.
4. ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
5. Дмитриев А.Н. Проектирование подводных аппаратов. Ленинград: Судостроение, 1978. 286 с.
6. Кормилицин Ю.Н., Хализев О.А. Проектирование подводных лодок. Санкт-Петербург: Элмор. 2004. 328 с.
7. Молоков К.А., Новиков В.В., Турмов Г.П., Васильченко Н.П. Оценка надежности судовых конструкций с микротрещинами и остаточными сварочными напряжениями // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 3-1(41). С. 45–54. EDN: YMNXMD
8. Новиков В.В., Турмов Г.П. Прочность объектов подводной техники. Владивосток: Издательский дом ДВФУ, 2013. 234 с.
9. Пикуль В.В. Методика проектирования и расчета прочного корпуса подводного аппарата. Владивосток: Дальнаука, 2011. 91 с.
10. Правила классификации и постройки обитаемых подводных аппаратов и судовых водолазных комплексов и пассажирских подводных аппаратов. НД № 2–020201–014: Морской Регистр судоходства РФ. Санкт-Петербург, 2018. 204 с.
11. Ратников А.А., Нагаева М.В., Карпачев А.А., Осуховский В.Э., Гончарук В.К. Особенности изготовления прочных корпусов подводных аппаратов на основе металлостеклокомползита для их использования на различных глубинах мирового океана // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4–2 (46). С. 33–38.
12. Русановский С.А. Методика моделирования фаски отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения под варку насыщения. Часть 3. Применение твердотельного моделирования для получения кромок отверстий в сферических участках корпусов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 2-1(52). С. 48–53. doi: 10.37220/MIT.2021.52.2.005
13. Самоходные необитаемые подводные аппараты / Под общей редакцией И.Б. Иконникова. Ленинград: Судостроение, 1986. 260 с.
14. Трещев А.А., Спасская М.В. Напряженно-деформированное состояние круговой цилиндрической оболочки из материала с усложненными свойствами // Физика и механика материалов. 2016. Т. 29, № 1. С. 32–38. URL: <https://mpm.spbstu.ru/article/2016.50.4/>
15. Tadahiro Hyakudome. Design of Autonomous Underwater Vehicle. *Int. J. of Advanced Robotic Systems*. 2011;8(1):122-130. doi: 10.5772/10536

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-2/27-38>

Novikov V., Molokov K., Gurskaya A.

VALERY V. NOVIKOV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
leka1551@rambler.ruDepartment of Marine Engineering and Transport of the Polytechnic Institute
KONSTANTIN A. MOLOKOV, Ph.D., Associate Professor, spektrum011277@gmail.com

Department of Industrial Safety of the Polytechnic Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

ALENA A. GURSKAYA, Design Engineer, gurskaya-a@mail.ru

Far Eastern plant "Zvezda"

Bolshoy Kamen, Russia

Estimated influence of the immersion depth on the hull of underwater vehicles

Abstract. In the world practice of designing and operating underwater vehicles, it is customary to consider destructive for the hull the pressure that corresponds to the loss of stability. The critical pressure at a given maximum of immersion depth depends on the material of the strong hull, its shape and dimensions, the shell thickness and the number of installed frames. In this paper, graphical dependencies and diagrams are constructed with the help of well-known analytical formulas and the SolidWorks Simulation software product. These dependencies and diagrams enable to evaluate the relationship between the strength, geometric and weight characteristics of the main body of the designed underwater vehicle. These characteristics are associated with the estimated depth of its immersion, which allows us to select the parameters of the hull elements at the initial design stages. The calculations of the stress state of the underwater vehicle hull in the SolidWorks program showed that its selected parameters satisfy the conditions of strength and metal consumption during the operation at a given immersion depth.

Keywords: underwater vehicle, main body, strength, stresses, stability, immersion depth

For citation: Novikov V., Molokov K., Gurskaya A. Estimated influence of the immersion depth on the hull of underwater vehicles. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(2):27-38. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

1. Aleksandrov V.L., Glozman M.K., Rostovtsev D.M., Sievers N.L. Design of structures of the main body of underwater vehicles. St. Petersburg, 1994. 435 p.
2. Bocharova A.A., Goncharuk V.K., Ratnikov A.A. Mathematical modeling of the process of forming a strong hull of deep-sea submersibles from glass-metal composite. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2015;(4):93-102. URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/4-25/12/>
3. Goncharuk V.K., Antonenko S.V., Bocharova A.A., Ratnikov A.A. Creation of glass-metal-composite cylindrical shells for strong hulls of deep-sea vehicles. *Marine Intelligent Technologies*. 2018;1(3):76–83. URL: <https://www.elibrary.ru/mggytr>
4. GOST 14249–89. Vessels and devices. Norms and methods for calculating strength.
5. Dmitriev A.N. Design of underwater vehicles. Leningrad, Shipbuilding, 1978. 286 p.
6. Kormilitsin Yu.N., Khalizev O.A. Submarine design. St. Petersburg, Elmore. 2004. 328 p.
7. Molokov K.A., Novikov V.V., Turmov G.P., Vasilchenko N.P. Estimation of reliability of ship structures with microcracks and residual welding stresses. *Marine Intelligent Technologies*. 2018;(3-1):45–54. EDN: YMNXMD

8. Novikov V.V., Turmov G.P. *Strength of Underwater Technique*. Vladivostok, FEFU Publishing House, 2013. 234 p.
9. Pikul V.V. *Methodology for designing and calculating the strong hull of an underwater vehicle*. Vladivostok, Dalnauka, 2011. 91 p.
10. Rules for the classification and construction of manned underwater vehicles and ship diving systems and passenger underwater vehicles. ND No. 2–020201–014: Maritime Register of Shipping of the Russian Federation. St. Petersburg, 2018. 204 p. Electronic analogue of the printed edition. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293738/4293738846.pdf>
11. Ratnikov A.A., Nagaeva M.V., Karpachev A.A., Osukhovskiy V.E., Goncharuk V.K. Features of manufacturing strong hulls of underwater vehicles based on metal-glass composite for their use at various depths of the world ocean. *Marine Intelligent Technologies*. 2019;(4–2):33–38. URL: http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1580-826366MITVOL46No4PART22019.pdf
12. Rusanovskiy S.A. Modelling technique of the opening's bevel in underwater shipbuilding hulls objects for welding flanges. Part 3. Applying 3D-modeling to opening's bevel in spherical sections of hulls. *Marine Intelligent Technologies*. 2021;(2-1):48–53. doi: 10.37220/MIT.2021.52.2.005
13. Self-propelled uninhabited underwater vehicles / Under the general editorship of I.B. Ikonnikov. Leningrad, Shipbuilding, 1986. 260 p.
14. Treshev A.A., Spasskaya M.V. Stress-strain state of a circular cylindrical shell made of a material with complicated properties. *Physics and Mechanics of Materials*. 2016;29(1):32–38. URL: <https://mpm.spbstu.ru/article/2016.50.4/>
15. Tadahiro Hyakudome. Design of Autonomous Underwater Vehicle. *Int. J. of Advanced Robotic Systems*. 2011;8(1):122–130. doi: 10.5772/10536