

ДРУГИЕ ВОПРОСЫ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

УДК 629.584
EDN: CLRTBK

М.Ю. Григоров^{1, 2}, С.Д. Райская³, И.А. Ломакин³

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения (СПМБМ) «Малахит», Санкт-Петербург, Россия

МИРОВОЙ ОПЫТ РАЗВИТИЯ ОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ПРЕДЕЛЬНЫХ ГЛУБИН ПОГРУЖЕНИЯ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является компоновка технических решений, применяемых при конструировании обитаемых подводных аппаратов (ОПА). Цель работы – сформулировать актуальные направления развития элементов перспективных ОПА.

Материалы и методы. Использован метод анализа основных этапов развития ОПА с точки зрения повышения их эффективности, улучшения технико-эксплуатационных характеристик и используемого оборудования на основе научно-технических достижений.

Основные результаты. Рассмотрена история проектирования ОПА от относительно простых технических решений до передовых разработок. Проанализированы конструктивные особенности различных ОПА, их достоинства и недостатки.

Заключение. Определено, что основные направления улучшения эксплуатационных характеристик ОПА связаны с массогабаритными параметрами корпусных конструкций и применяемого оборудования.

Ключевые слова: обитаемый подводный аппарат, прочный корпус, легковесный наполнитель, технико-эксплуатационные характеристики.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

MISCELLANEOUS

UDC 629.584
EDN: CLRTBK

M. Yu. Grigorov^{1, 2}, S. D. Rayskaya³, I. A. Lomakin³

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

³ Malachite Design Bureau, St. Petersburg, Russia

DESIGN OF DEEP SUBMERGENCE VEHICLES (DSVS): GLOBAL EXPERIENCE

Object and purpose of research. This paper discusses technical solutions in design of manned deep-submergence vehicles (DSVs). The purpose of this work was to identify promising design fields for elements of future DSVs.

Materials and methods. The paper analyses main stages in design history of DSVs to improve their efficiency, performance parameters and equipment, relying on the latest research and engineering achievements.

Для цитирования: Григоров М.Ю., Райская С.Д., Ломакин И.А. Мировой опыт развития обитаемых подводных аппаратов предельных глубин погружения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 1(407): 147–160.

For citations: Grigorov M. Yu., Rayskaya S. D., Lomakin I. A. Design of deep submergence vehicles (DSVs): Global experience. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 1(407): 147–160 (in Russian).

Main results. The authors describe the history of deepwater submersible designs: from relatively simple early solutions to the latest developments, tackling design peculiarities of various DSVs with their respective pros and cons.

Conclusion. It was found that the most promising design field in terms of improving performance parameters of DSVs is to optimize weight and size of their hulls and onboard equipment.

Keywords: deep-submergence vehicle (DSV), pressure hull, lightweight filler, performance parameters.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

С 1960-х гг. проблема изучения и освоения Мирового океана приобретает первостепенное значение в экономической, политической и военной сферах. Наиболее развитые страны мира все большее внимание уделяют исследованиям океана. Формируются национальные программы освоения океана, включающие создание новейших подводных аппаратов различного назначения и архитектурного типа.

К сегодняшнему дню подводные аппараты различного назначения решают широкий круг задач по всему миру в условиях, недоступных для водолазных работ или другой техники, включая операции по обеспечению спасения экипажей затонувших объектов, выполнение работ на шельфе, проведение исследований, инспекций, подводных экскурсий.

Основываясь на анализе ежегодного роста мирового спроса на энергоресурсы, ведения поисковых, аварийно-спасательных и научно-исследовательских работ по изучению Мирового океана, можно утверждать несомненную востребованность глубоководных средств, необходимость их дальнейшего развития и все более широкого внедрения в практику морской деятельности.

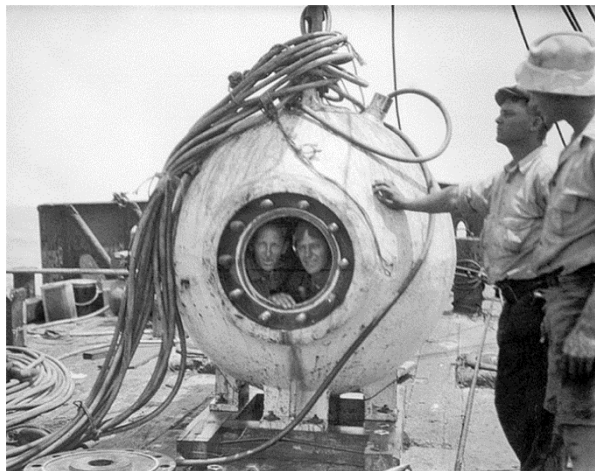


Рис. 1. Одна из первых батисфер
Fig. 1. An early bathysphere

Современный уровень развития техники, в частности, в области создания систем автоматического управления, обеспечивает решение многих практических задач под водой с использованием необитаемых подводных аппаратов различных типов, что, очевидно, безопаснее и дешевле. Однако современные автономные ОПА имеют значительные перспективы использования в качестве эффективного средства детального исследования объектов и выполнения сложных работ на больших глубинах по сравнению с необитаемыми аппаратами.

ОПА предельных глубин погружения являются одними из наиболее технически сложных (и дорогостоящих) объектов, создаваемых судостроительной промышленностью. Достижение высоких технико-эксплуатационных характеристик (ТЭХ) может быть обеспечено только комплексным применением передовых научно-технических достижений в области развития практически всех элементов аппарата, причем в условиях жестких ограничений по массе и габаритам. Создание таких аппаратов всегда сопряжено с необходимостью выполнения большого объема ОКР.

Первые обитаемые подводные аппараты

Early manned submersibles

История развития техники подводных исследований началась, по легендам, Александром Македонским, который спустился в водолажном колоколе на морское дно [1]. А вот прообразом современных ОПА стала батисфера (гидростат – рис. 1), представляющая собой «тяжелую» (отрицательной плавучести) герметичную камеру со средствами наблюдения и жизнеобеспечения, опускаемую с борта судна на тросах. Именно батисфера помогла начать освоение больших глубин.

Первый спуск в батисфере осуществил итальянец Бальзамелло в 1892 г: в Средиземном море он опустился на 165 м. Рекорд глубины – 923 м – установили 15 августа 1934 г. У. Биби и О. Бартон (продержался 15 лет), а в 1949 г. О. Бартон погрузился на глубину 1375 м. Эта глубина является рекордной для погружения в батисферах.

На батисфере имелись два иллюминатора и подводные светильники, но отсутствовали движители и средства аварийного подъема. Наличие стального грузонесущего троса ограничивало глубину погружения батисферы и затрудняло ее стабилизацию при вертикальной качке судна обеспечения (СО), а обрыв троса лишал гидронавтов надежды на спасение.

Задача увеличения глубины погружения сводилась к решению проблемы обеспечения прочности корпусов подводных аппаратов (разработка теоретической базы процессов деформирования, устойчивости и разрушения оболочечных конструкций, норм и запасов прочности), которые в 1930-х гг. получили развитие в работах ученых Ю.А. Шиманского, П.Ф. Папковича и В.В. Новожилова. На основании этих трудов были созданы первые нормативно-технические документы в данной области.

Завершению создания аппарата для научных исследований на больших глубинах помешала Великая Отечественная война. Практически готовую батисферу («Батисфера ВНИРО» СССР) пришлось отправить на разборку. Первые погружения в батисферах не имели большого практического значения в изучении океана и совершались в основном для достижения рекордных глубин и проверки различных технических решений. Но, что еще важнее, они обеспечили возможность определить направления создания новых технических средств, позволяющих проводить исследования и подводные работы на больших глубинах с высокой эффективностью и минимальным риском.

Появление батискафов было продиктовано потребностью исследования больших глубин при возможности свободно перемещаться под водой, что определило необходимость отказа от грузонесущего троса и обеспечения нейтральной плавучести аппарата.

Изобретение батискафа (от греч. Βαθύς – «глубокий» и σκάφος – «судно») позволило проводить подводные работы и исследования без жесткой связи с поверхностью (судном). Конструктивно батискаф состоит из прочного корпуса (ПК) с иллюминаторами, предназначенного для размещения экипажа, систем и механизмов, средств жизнеобеспечения (СЖО), различного оборудования и легкого корпуса (поплавка), заполненного жидкостью более легкой, чем вода (бензином), обеспечивающего плавучесть аппарата. Этот тип аппаратов иногда называют поплавковым [2]. Маневрирование по глубине осуществлялось за счет сброса дробяного балласта и стравливания части бензина.

Основной недостаток батискафов – большие габариты и масса (до 300 т), что не позволяет использовать их с борта судна традиционного типа: доставка к месту погружения осуществляется, как правило, путем буксировки. Батискафы строились с конца 1940-х до начала 1960-х гг. и сыграли большую роль в освоении океана.

Первый батискаф, получивший название FNRS-2, сконструировал швейцарский ученый Огюст Пикар в 1948 г., а его постройка была организована Бельгийским национальным фондом. После повреждения поплавка в ходе очередной буксировки фонд принял решение не финансировать доработку батискафа, в связи с чем в 1950 г. после долгих переговоров он был передан французскому военноморскому флоту. В 1953 г. этот батискаф был модернизирован по проекту Ж. Гуо и П. Вильма и получил наименование FNRS-3. Диаметр гондолы (сферического прочного корпуса) составлял 2,1 м, ее масса – 10 т, емкость поплавка – 30 м³.

В 1953 г. батискаф FNRS-3 достиг глубины погружения 4050 м. Этот рекорд был побит в 1960 г. модернизированным батискафом «Триест», серия погружений которого завершилась спуском в 1960 г. на дно Марианской впадины – на глубину 10 915 м (по другим данным – 10 918 м) [3].

В 1961 г. по заказу ВМС Франции по проекту Ж. Гуо и П. Вильма был построен батискаф *Archimede*. На нем, в отличие от предыдущих, были установлены движители вертикального и лагового перемещения и аккумуляторная батарея (АБ) повышенной до 100 кВт·ч энергоемкости. Обитаемая сфера не выступала за обводы легкого корпуса, что позволило улучшить гидродинамику и увеличить скорость буксировки до 8 уз [1].

В 1979 г. на Ленинградском Адмиралтейском объединении (ЛАО) был построен батискаф «Поиск-6». Его отличительной особенностью был легкий корпус, выполненный из стеклопластика с целью уменьшения массы.

Однако эксплуатация батискафов осложнялась не только проблемами их буксировки в условиях волнения, но и необходимостью иметь целый обеспечивающий флот: транспортный док, если место работы находилось на значительном удалении от береговой базы, буксиры, танкер для транспортировки бензина, которым заполняются цистерны плавучести непосредственно перед погружением, пожарное судно, обеспечивающее безопасность процесса заправки, а также судно, осуществляющее решение задач навигации и связи при подводном погружении.

Именно эти сложности, вызванные отказом от запланированного ранее создания специализированного СО, стали одной из основных причин непринятия на вооружение Поисково-спасательной службой ВМФ СССР батискафа «Поиск-6», осуществившего в ходе испытаний погружение на проектную глубину 6 км.

Основные характеристики и общий вид батискафов приведены в табл. 1 и на рис. 2 соответственно.

Таблица 1. Основные характеристики батискафов
Table 1. Main parameters of bathyscaphes

Наименование	FNRS-3	«Триест»	Archimede	«Поиск-6»
Год постройки	1953	1960	1961	1979
Глубина погружения, м	4000	11000	9545	6000
Масса без бензина и дрови, т	28,1	87,5	61	115
Автономность по СЖО, ч	12	24	36	72
Экипаж, чел.	2	3	3	3
Скорость хода, уз	0,5	1,5	3,0	2,65

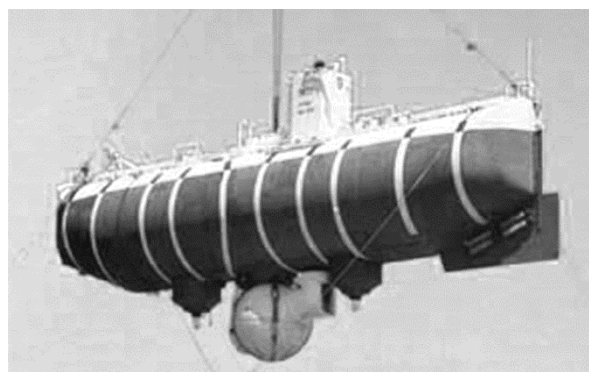
Разработка беспоплавковых обитаемых подводных аппаратов (первое поколение)

Floatless submersibles
 (Gen 1 DSVs)

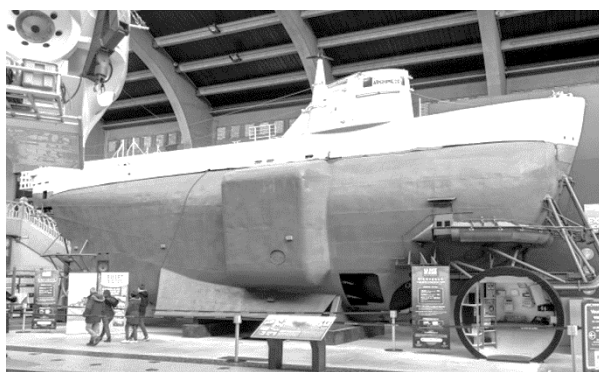
Задачи практического освоения Мирового океана не решались малоподвижными батисферами и батискафами, а требовали создания маневренных ап-



а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Батискафы: а) FNRS-2; б) «Триест»; в) Archimede; г) «Поиск-6»

Fig. 2. Bathyscaphes: a) FNRS-2; b) Trieste; c) Archimede; d) Poisk-6

паратов, оснащенных современными комплексами приборов и механизмов.

С середины 1960-х гг. активизировалось строительство беспоплавковых аппаратов. Наибольшее развитие это направление получило в США, Канаде и Франции. В основном строились аппараты для относительно малых глубин с возможностью базирования на СО.

Из глубоководных аппаратов следует упомянуть прежде всего Aluminaut (1964 г.), который стал первым в мире ОПА с прочным корпусом из алюминиевого сплава. Экспериментальный 80-тонный, 15,5-метровый ОПА для глубоководных исследований был построен Reynolds Metals Company, которая стремилась продвигать алюминий как перспективный конструкционный материал. Аппарат предназначен для глубоководных океанографических и геологических исследований, разведки местоположений полезных ископаемых на глубинах до 4500 м, поисковых и подъемно-спасательных работ. Aluminaut базировался в Майами (Флорида, США) и с 1964 по 1970 г. эксплуатировался компанией Reynolds Submarine.

Помимо цилиндрического ПК из алюминиевого сплава, этот ОПА обладал конструктивными особенностями, впоследствии широко используемыми на многих аппаратах:

- погружение и всплытие осуществлялось при помощи балластных цистерн и системы воздуха высокого давления;
- плавучесть регулировалась прочной уравнивательной цистерной;
- для маневрирования по курсу и глубине аппарат имел два кормовых горизонтальных гребных винта и один вертикальный;
- источником энергии являлась серебряно-цинковая АБ;
- на нем были установлены два манипулятора.

Масса ОПА составила 81 т, в связи с чем в район проведения работ он доставлялся буксировкой.

Первым отечественным автономным обитаемым глубоководным аппаратом стал «Север-2» (главный конструктор Ю.К. Сапожков), построенный в 1970 г. и рассчитанный для работ на глубинах до 2000 м. В 1976 г. было завершено строительство однотипного аппарата «Север-2бис». Для изготовления ПК этих аппаратов была разработана высокопрочная сталь АК-32, легкий корпус изготавливался из стеклопластика. Путем модернизации траулеров были созданы и СО этих аппаратов («Ихтиандр» и «Одиссей»), оборудованные специальными бортовыми спускоподъемными ус-

тройствами. Аппараты вплоть до середины 1990-х гг. активно эксплуатировались в системе Минрыбхоза СССР, в основном для исследований в области биологии, ихтиологии и океанологии.

По заданию Академии наук СССР в 1975 и 1976 гг. в Канаде были построены аппараты «Пайсис-VII» и «Пайсис-XI» (рис. 3). Это были первые аппараты, предназначенные для комплексных океанологических исследований на глубинах до 2000 м. Они имели сферические ПК и массу 12,5 т.

Одновременно и в СССР шли работы по созданию подобных аппаратов. В 1979 г. построен первый из четырех ОПА проекта 1832 «Поиск-2» (главный конструктор Ю.К. Сапожков) водоизмещением ок. 65 м³. Аппарат был предназначен для проведения подводных работ и исследований на глубинах до 2000 м (в основном в интересах Главного управления навигации и океанографии Минобороны СССР). Архитектурный облик ОПА первого поколения приведен на рис. 3.

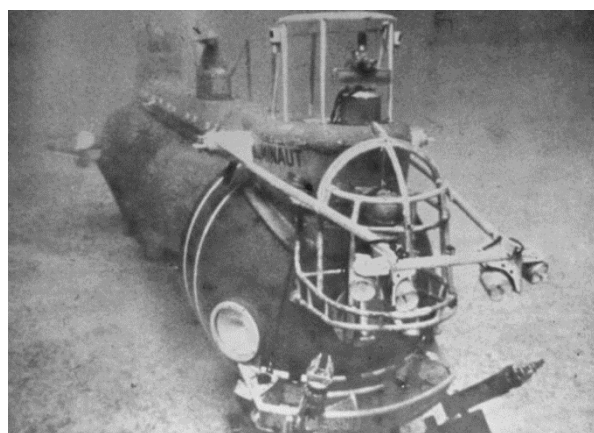
Параллельно, в 1970–1980 гг., в ЦПБ «Волна» (позднее вошло в состав СПМБМ «Малахит») проектировались ОПА «Поиск-2с» и «Поиск-6с» с ПК из стеклопластика – на глубину 2000 м и 6000 м соответственно. Предусматривалось, что, как и ОПА «Поиск-2», эти аппараты будут иметь достаточно большое насыщение научной аппаратурой и соответствующее энергообеспечение. По результатам эскизного проектирования масса ОПА «Поиск-2с» составила ок. 80 т, ОПА «Поиск-6с» – ок. 160 т. Однако проектирование этих ОПА было приостановлено до получения положительных результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполняемых по проблемам «Жемчуг» и «Глубина» (предметом исследования являлись отработка технологии изготовления ПК глубоководных аппаратов и подводных лодок из стеклопластика и испытания опытных отсеков) [8].

Проведение спуска-подъема ОПА с такими массогабаритными характеристиками в условиях волнения – достаточно сложная операция, а их буксировка в удаленные районы возможна лишь при благоприятных условиях. Поэтому эксплуатация ОПА подобного класса требует создания специализированных дорогостоящих крупнотоннажных СО. При проведении работ у грунта такие ОПА недостаточно маневренны. Как следствие – направление создания ОПА массой более 30 т развития не получило. В табл. 2 приведены основные характеристики беспоплавковых аппаратов.

Таблица 2. Основные характеристики беспоплавковых аппаратов с цилиндрическим прочным корпусом постройки 1960–1970-х гг.

Table 2. Main parameters of floatless DSVs with cylindrical hulls (1960s – 1970s)

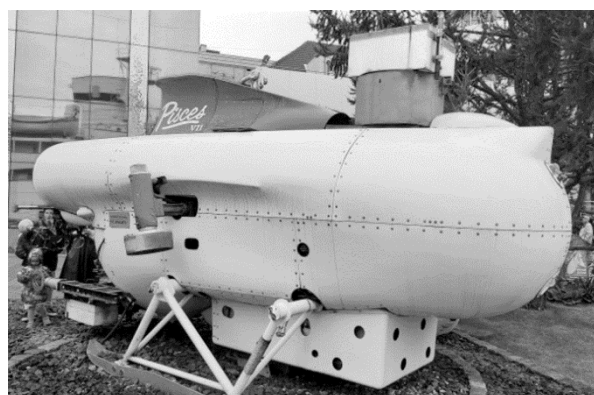
Наименование, страна	Aluminaut, США	«Север-2», СССР	«Поиск-2», СССР
Год постройки	1964	1970	1975
Глубина погружения, м	4500	2000	2000
Длина×ширина×высота, м	15,5×4,7×5,0	12,1×2,6×4,1	16,3×2,5×5,1
Масса, т	81	37,9	64,9
Материал прочного корпуса	Алюминиевый сплав	Сталь АК-32	Сталь АК-32
Аккумуляторная батарея:			
– тип	Серебряно-цинковая	Свинцово-кислотная	Свинцово-кислотная
– энергоемкость, кВт·ч	200	90	150
Рабочая автономность, ч	24	6,5	8-10
Экипаж, чел.	6	3–4	3



а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Беспоплавковые аппараты: а) Aluminaut; б) «Север-2»; в) «Пайсис-Х1»; г) «Поиск-2»

Fig. 3. Floatless submersibles: a) Aluminaut; b) Sever-2; c) Pisces-XI; d) Poisk-2

Разработка компактных обитаемых подводных аппаратов (второе поколение)

Compact vehicles (Gen 2 manned submersibles)

Опыт создания и эксплуатации первых автономных ОПА выявил необходимость минимизировать их спусковую массу путем применения:

- корпусов сферической формы, которые имеют минимальный относительный вес при одинаковом внутреннем объеме с цилиндрическими корпусами;
- материала ПК с большей относительной прочностью (отношение предела текучести к плотности материала) по сравнению с алюминием или сталью марки АК-32;
- твердого легковесного заполнителя (ЛВЗ) в виде блоков плавучести с плотностью не более $0,7 \text{ т/м}^3$ взамен бензина.

Именно этими соображениями руководствовался в Океанографическом институте в Вудс-Холле (WHOI) Уильям А. Рейне – разработчик ОПА Alvin. Новый аппарат был построен в 1964 г. Уже 20 июля 1965 г. сотрудник института на борту Alvin совершил погружение в подводный каньон Язык Океана и через 1 ч 37 мин достиг дна на глубине 1829 м. В 1973 г. корпус ОПА Alvin был заменен на новый корпус из титана, позволивший погружаться на глубину до 4500 м.

Основными отличиями ОПА Alvin от эксплуатируемых в то время батискафов были следующие:

- применение твердого ЛВЗ в виде блоков плавучести;
- применение активной уравнильной системы, снабженной насосами;
- использование винта в насадке в качестве маршевого движителя и двух бортовых колонок для перемещения в вертикальной плоскости.

В течение многих лет Alvin (рис. 4, см. вклейку) неоднократно модернизировался с заменой оборудования, АБ, движительно-рулевого комплекса (для обеспечения большей маневренности стационарные колонки заменены на поворотные, увеличено их количество). В 2001 г. были добавлены контроллеры двигателя и компьютерные системы. Все компоненты ОПА, включая ПК, были заменены, по крайней мере, один раз. Alvin полностью разбирают каждые 3–5 лет для полного осмотра.

В 1970 г. в Центре морских исследований в Марселе построен ОПА с глубиной погружения 3000 м, который впоследствии назван Суана. ОПА имеет сферический ПК с входным люком диамет-

ром 400 мм в верхней части и двумя иллюминаторами. Конструктивные особенности аппарата следующие:

- чечевицеобразная форма наружного корпуса и отсутствие оперения (рис. 5, см. вклейку);
- отсутствие традиционного для аппаратов ограждения входного люка;
- использование блоков ЛВЗ с плотностью $0,60\text{--}0,65 \text{ т/м}^3$;
- использование ртутно-масляной дифференциальной системы;
- создание отрицательной плавучести для погружения осуществляется размещением твердого балласта в кормовой оконечности аппарата. На заданной глубине балласт сбрасывается, плавучесть регулируется сбрасыванием небольших грузов весом по 1,5 кг и приемом воды в сферическую уравнильную цистерну;
- штатное всплытие аппарата осуществляется при отдаче твердого балласта, размещенного в килевой части, а аварийное – сбрасыванием АБ (470 кг), ртути из дифференциальных цистерн и манипулятора.

В 1968 г. завершено строительство двух ОПА – Sea Cliff и Turtle – на глубину 4500 м по заказу ВМС США. Эти аппараты использовались для обследования подводных объектов ВМС, доиска затонувших объектов (торпед, ракет и т.п.), а также выполнения глубоководных исследований для гражданских институтов США с различными СО. В 1984 г., в соответствии с решением руководства ВМС об увеличении до 6500 м глубины погружения Sea Cliff, на нем был заменен ПК.

Основные характеристики вышеуказанных ОПА приведены в табл. 3.

Открытие гидротермальных полей на дне океана выявило необходимость создания ОПА, способных проводить глубоководные исследования на всей площади Мирового океана (6000 м – почти 98 % площади Мирового океана). В связи с этим начиная с 1984 г. создано несколько ОПА, способных достигать именно этой глубины. Основные ТЭХ ОПА, выпущенных в период с 1984 по 2000 г., представлены в табл. 4.

В 1984 г. французский центр исследований океана построил ОПА Nautille, предназначенный для проведения научных исследований и работ на глубинах до 6000 м. Для создания плавучести применялся сферопластик плотностью $0,57\text{--}0,6 \text{ т/м}^3$ [9].

ОПА «Мир-1» и «Мир-2» построены в 1987 г. финской фирмой Rauma-Repola по заказу Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова.

Глубина погружения аппаратов – 6000 м. Обитаемый ПК ОПА «Мир» и цистерны уравнительно-дифференциальной системы изготовлены из мартенситно-старееющей, сильно легированной стали (18 % никеля) и собраны из полусфер, созданных путем непрерывного литья в форму и затем механически обработанных на станке. К настоящему времени ПК, установленные на ОПА «Мир-1/2», исчерпали свой ресурс, в связи с чем ОПА не используются.

ОПА Shinkai 6500 был построен в 1987 г. компанией Mitsubishi Heavy Industries по заказу японского центра морских наук и технологий Jamstec. ОПА предназначался для изучения океанских впадин, окружающих Японию. В 1989 г. аппарат совершил рекордное для того времени погружение на глубину 6572 м.

Анализ кратко изложенной выше истории развития аппаратов позволяет уточнить понятие современного автономного ОПА, предназначенного для проведения исследований и подводно-технических работ. К числу типовых требований следует прежде всего отнести:

- применение высокоемких АБ, обеспечивающих достаточную автономность в условиях жестких ограничений по массе и габаритам ОПА;
- обеспечения высокой маневренности за счет применения развитого движительно-рулевого комплекса, включающего, как правило, маршевые, вертикальные и лаговые движители;
- установку мощных многостепенных манипуляторов с широким набором сменных инструментов для выполнения работ.

Таблица 3. Основные характеристики компактных обитаемых подводных аппаратов

Table 3. Main parameters of compact DSVs

Наименование, страна	Alvin, США	Cyana, Франция	Sea Cliff, США
Год постройки	1973	1970	1984
Глубина погружения, м	4500	3000	6500
Длина×ширина×высота, м	7,3×2,6×3,7	5,7×3,2×2,7	8,6×3,6×3,4
Масса, т	17	9,3	29
Материал прочного корпуса	Титановый сплав	Сталь	Титановый сплав
Экипаж, чел.	3	3	3
Скорость хода, уз	2	2	2
Рабочая автономность, ч	9	6–10	–

Таблица 4. Основные характеристики обитаемых подводных аппаратов, разработанных в период с 1985 по 2000 г.

Table 4. Main parameters of 1985–2000 DSV designs

Наименование, страна	Nautile, Франция	Shinkai 6500, Япония	«Мир-1/2», СССР
Год постройки	1984	1989	1987
Глубина погружения, м	6000	6500	6000
Длина×ширина×высота, м	8,3×2,7×3,81	9,7×2,8×4,1	7,8×3,8×3,0
Масса, т	19,5	28,8	18,5
Аккумуляторные батареи:			
– тип	Свинцово-кислотные*	Литий-ионные (в 2004 г.)	Железоникелевые
– энергоемкость, кВт·ч	37	86,4	83
Материал основного корпуса	Титан	Титан	Никелевая сталь
Экипаж, чел	3	3	3
Рабочая автономность, ч		8	16
Скорость хода, уз	2,5	2,7	5

* Заменены на никель-кадмиевые с энергоемкостью 50 кВт·ч.

Современные эксплуатируемые обитаемые подводные аппараты

Modern DSVs

В настоящее время для проведения исследований и подводно-технических работ на больших глубинах в мире активно эксплуатируются следующие ОПА:

- Nautilie (Франция);
- Shinkai 6500 (Япония);
- «Русь» и «Консул» (Россия);
- Jiaolong (Китай).

Основные ТЭХ и архитектурный вид современных ОПА представлены в табл. 5 и на рис. 6.

Разработка проекта 16810 ОПА «Русь» и «Консул» началась в СПМБМ «Малахит» в середине 1980-х гг. Один из них предполагалось построить для нужд Управления поисковых и аварийно-спасательных работ ВМФ, второй – для Министер-

ства геологии СССР. По результатам разработки эскизного проекта ОПА имел водоизмещение 125 т, в отличие от уже разработанного к этому времени ОПА «Мир» – 18,5 т. По причине явного отставания отечественной радиоэлектронной промышленности в применяемой элементной базе от развитых стран было принято принципиальное решение создавать комплектующее оборудование под ОПА, а не наоборот [7].

В основу технического проекта положены следующие основные решения:

- механически обработанный корпус сферической формы с внутренним диаметром 2,1 м из титанового сплава;
- применение ЛВЗ с плотностью 0,65 т/м³;
- применение унифицированных движителей;
- использование высокочастотных серебряно-цинковых аккумуляторных батарей (впоследствии заменены на литий-ионные АБ).

Таблица 5. Основные характеристики обитаемых подводных аппаратов, разработанных в период с 1985 по 2000 г.

Table 5. Main parameters of 1985–2000 DSV designs

Наименование, страна	«Русь»/«Консул», Россия	Jiaolong, Китай
Год постройки	2007/2011	2012
Глубина погружения, м	6000	7000
Длина×ширина×высота, м	8,5×3,9×3,9	8,2×3,0×3,4
Масса, т	25	25
Материал основного корпуса	Титан	Титан

Примечание – ТЭХ ОПА Nautilie и Shinkai 6500 представлены в табл. 4.



Рис. 6. Обитаемые подводные аппараты, разработанные в период с 1985 по 2000 г.: а) «Русь»; б) Jiaolong
Fig. 6. DSV designs of 1985–2000: a) Rus; b) Jiaolong

Для обеспечения переходов по глубине в проекте 16810 была принята смешанная система, состоящая из уравнильных цистерн (две сферические цистерны в районе центра тяжести аппарата) и бункера с чугунной дробью. Масса принимаемой в бункер дроби обеспечивает погружение аппарата из-под поверхности до предельной глубины при незаполненных уравнильных цистернах. В случае необходимости в процессе погружения аппарат может зависнуть: для этого часть дроби ссыпается через управляемый электромагнитный затвор. Дальнейшее погружение обеспечивается приемом забортной воды в уравнильные цистерны самотеком через управляемый клапан. Всплытие аппарата осуществляется, в том числе, с полностью заполненными уравнильными цистернами – за счет сброса дроби.

Средством управления дифферентом ОПА является механическая система, представляющая собой два груза внутри труб опорного устройства. Перемещение грузов осуществляется лебедкой с гидроприводом и тросовой проводкой.

К началу 1990-х гг. на стапеле ЛАО уже стоял корпус будущего ОПА «Русь», изготавливались элементы обшивки из стеклопластика, блоки плавучести. Параллельно началось строительство второго ОПА. Однако события, произошедшие в России в эти годы, к сожалению, существенно отодвинули сдачу этих объектов.

26 марта 2012 г. одноместный ОПА DeepSea Challenger, пилотируемый знаменитым режиссером Джеймсом Кэмероном, достиг дна Марианской впадины на глубине 10 894 м. Этот аппарат нельзя отнести к ОПА, рассмотренным выше, т.к. он спроектирован лишь для нескольких погружений и предназначен для фиксации рекорда. Тем не менее факт создания такого аппарата является свидетельством комплексного применения высоких технологий и оригинальных технических решений.

Отличительными особенностями данного аппарата являются:

- вертикальная ориентация, из-за которой Кэмерон назвал его «вертикальной торпедой», но фактически аппарат имеет форму крыла. Такая форма обеспечивает, во-первых, сокращение времени переходов по глубине, во-вторых – управляемое движение у дна;
- отсутствие тяжелой металлической рамы – несущей конструкцией является непосредственно массив (блок) ЛВЗ плотностью $0,7 \text{ т/м}^3$, в котором предусмотрены вырезы для монтажа ПК и установки забортного оборудования (АБ, двигателей, подводных световых приборов и др.);

- стальной ПК сферической формы имеет внутренний диаметр 1,1 м и толщину 64 мм;
- переходы по глубине осуществляются за счет сбрасываемого балласта в виде стальных пластин суммарным весом в воде 500 кг.

Отметим, что в настоящее время ведется настоящая война технологий в области создания «рекордных» ОПА с глубиной погружения 11 000 м. Как было упомянуто выше, одноместный DeepSea Challenger Камерона в 2012 г. достиг дна Марианской впадины. В 2019 г. частная фирма разработала двухместный ОПА Triton 36000/2, также способный погружаться на глубину 11 000 м. На рис. 7 (см. вклейку) представлены ОПА DeepSea Challenger и Triton 36000/2.

Китай после постройки в 2012 г. ОПА Jiaolong с рабочей глубиной 7000 м заявил о строительстве ОПА «Цайхуньюй», испытания которого планировалось завершить в 2020 г. погружением на предельную глубину 11 000 м. В 2017 г. о строительстве и вводе в эксплуатацию в 2023 г. ОПА Shinkai 12000 с предельной глубиной 12 000 м заявила Япония [4]. Отметим, что ни один из указанных азиатских ОПА на сегодняшний день не введен в эксплуатацию.

Анализ основных требований к обитаемым подводным аппаратам и обеспечивающих их технических решений

Analysis of main requirements to DSVs and corresponding design solutions

Глубина погружения

После первого погружения в Марианскую впадину (11 км) батискафа Trieste, состоявшегося в 1960 г., и последующего создания французского батискафа Archimede, рассчитанного на такую же глубину (фактически при эксплуатации погружался до 9545 м), дальнейшее развитие ОПА было направлено на решение практических задач в области изучения и освоения предельных глубин Мирового океана (рис. 8, см. вклейку).

Масса обитаемого подводного аппарата

Во всех исходных технических требованиях или технических заданиях на разработку ОПА есть четкие ограничения по массогабаритным характеристикам. Это, как отмечено выше, связано с тем, что чем больше по массе и габаритам ОПА, тем большего водоизмещения требуется СО. Отсюда и появляется тенденция уменьшения массы ОПА (рис. 9, см. вклейку).

Прочный корпус

Принципиальным элементом, определяющим архитектурный облик ОПА, является ПК, с одной стороны, предназначенный для размещения экипажа и внутреннего оборудования, с другой – обеспечивающий основную долю плавучего объема.

Современные средства автоматизации позволяют обеспечить управление аппаратом при меньшей численности экипажа, поэтому во многих случаях ОПА, построенные в последние годы, рассчитаны на двух человек, а не на трех, как практиковалось ранее.

ПК должен обладать минимальной относительной массой и при этом обеспечивать надежную эксплуатацию в условиях длительного и циклического воздействия гидростатического давления на предельных и близких к ним глубинах. Масса ПК зависит от расчетного давления (глубины погружения), проектных геометрических характеристик и точности их соблюдения при изготовлении, физических свойств материала.

При проектировании практически используют две формы корпуса:

- в виде подкрепленной цилиндрической оболочки с концевыми сферическими переборками. Такая форма позволяет оптимально и комфортно разместить экипаж и оборудование и применяется до глубин 2000 м, однако с увеличением глубины использовать ее нецелесообразно по критерию относительной массы;
- в виде сферы. Применение такой формы в сочетании с современными конструкционными материалами и методами их обработки обеспечивает возможность создания ПК с приемлемой относительной массой вплоть до максимальной глубины – 11 000 м.

Наиболее часто применяемым материалом ПК в современных ОПА является высокопрочный титановый сплав, который позволяет получить максимальную глубину погружения при ограничении массы корпуса.

В то же время сегодня при разработке ОПА (пока до 2–3 км) прослеживается тенденция использования материалов на основе акрила, поскольку такой ПК обеспечивает максимальный круговой обзор, исключая применение сложных и тяжелых конструкций иллюминаторов. Так, в настоящее время в России создается ОПА «Ясон» с глубиной погружения 2250 м с ПК из акрила (проектант – СПМБМ «Малахит», завод-строитель – «Севмаш») [6].

Вопрос о применении композитов в конструкции прочного корпуса особенно актуален в связи

с катастрофой в 2023 г. ОПА Titan [5]. Результаты расследования пока не опубликованы, однако очевидно, что именно в области расчетов прочности и устойчивости углепластикового цилиндрического корпуса были допущены ошибки при проектировании.

Легковесный наполнитель

Создание легковесного наполнителя на основе сферопластика явилось существенным прорывом, обеспечившим принципиальное снижение массы и габаритов ОПА в сравнении с первыми поплавковыми аппаратами (батискафами). Другие, более дешевые, легкие материалы (например, пенопласт) не могут применяться на больших глубинах из-за малой гидростатической прочности и значительного водопоглощения. Применявшийся на батискафах бензин уступает по плотности современным твердым ЛВЗ и не удовлетворяет требованиям экологической безопасности [7].

В 1980-х гг. в нашей стране проводились работы по изготовлению сферических поплавков из ситалла. Испытания оболочек при действии гидростатического давления показали, что при относительном весе $0,6 \text{ т/м}^3$ в теории они способны выдержать 120 МПа [8]. Однако эти результаты не нашли практического применения из-за разброса характеристик ситалла в конкретных конструкциях.

Успешные исследования в США по разработке конструкционной керамики привели к созданию в начале 2000-х гг. блоков плавучести из алюмооксидной керамики [9]. Сейчас фирма Deepsea Power & Light занимается совершенствованием технологии изготовления алюмокерамических сфер больших диаметров для широкого диапазона глубин, вплоть до предельных. Достигнуты требуемые показатели прочности при действии гидростатического давления порядка 200 МПа при плотности $0,35 \text{ т/м}^3$ [8].

Создание комбинированного легковесного наполнителя на основе микросфер (сделанных из стекла, ситалла, технической керамики) и компаунда, сопровождается сложностями решения многих научных и технологических задач, как в части обеспечения минимального удельного веса, так и в части повышения циклической прочности блоков.

Таким образом, для больших глубин погружения приоритетом для создания положительной плавучести ОПА продолжает оставаться сферопластик с плотностью $0,5\text{--}0,7 \text{ т/м}^3$ для глубин 4000–11 000 м соответственно.

Энергетика

Принципиально важным шагом для развития автономных ОПА стало создание аккумуляторных батарей, размещаемых в забортных разгруженных от давления контейнерах, что позволило освободить значительное пространство в прочном корпусе и добавить аппарату плавучесть за счет объема АБ. На современных ОПА чаще всего используют литий-ионные АБ, поскольку они обладают высокими показателями удельной энергоемкости по сравнению с другими типами АБ.

Скорость хода и маневренность

Требуемая скорость определяется условиями проведения тех или иных наблюдений и исследований. Для большинства работ это в пределах 2–3 уз. Наибольшей маршевой скоростью – 5 уз – обладали ОПА «Мир», что обеспечивало возможность работы в условиях сильных придонных течений. Вряд ли сегодня стоит задача обеспечения ОПА большей скорости.

Для обеспечения высокой маневренности и стабилизации у объекта работ достаточно типовым является движительно-рулевой комплекс в составе маршевых, вертикальных и лаговых движителей, иногда – поворотных. Такой комплекс вполне справляется с управляемостью аппаратов современных габаритов и архитектуры.

Архитектура наружного корпуса

Архитектура наружного корпуса ОПА определяется как результат компромисса между требованиями размещения оборудования и блоков плавучести и требованиями по обеспечению ходовых и маневренных качеств.

Наиболее рациональной формой легкого корпуса ОПА, имеющего хорошие скоростные показатели во всех плоскостях, является вытянутый эллипсоид. Для таких ОПА характерны обтекаемые обводы носовой части, низкое расположение иллюминаторов и манипуляторов. Однако иногда конструкторы ОПА отдают предпочтение удобству расположения внешнего оборудования в ущерб скорости. Так, ОПА открытой архитектуры (практически без обтекаемого наружного корпуса), например, типа DeepRover с полностью прозрачным акриловым корпусом, не предназначены для решения задач, связанных с длительными перемещениями в толще воды.

Принцип расположения оборудования в междубортном пространстве определяет форму отдельных элементов легкого корпуса и ОПА в целом.

При расположении общесудового оборудования руководствуются требованиями обеспечения остойчивости, удифферентовки, плавучести, а также ограничениями по габаритам ОПА, которые определяются типом спускоподъемного устройства СО, размерами судового ангара и т.п.

Автономность

Достигнутая на ОПА предельных глубин погружения рабочая автономность составляет 8–12 ч (с учетом времени погружения-всплытия) и обеспечивается современными источниками энергии. Это является максимальной величиной с точки зрения реальной работоспособности экипажа из 1–3 человек.

Системы погружения-всплытия и дифферентовки

Принципиально важными для ОПА больших глубин являются системы погружения-всплытия и дифферентовки, поскольку длительное использование вертикальных движителей для этих целей не обеспечивается запасами электроэнергии.

Основной принципиальной проблемой является создание насосов требуемой эффективности с малыми массогабаритными характеристиками для приема-отлива воды из уравнительных цистерн. Известно, например, что на ОПА «Мир» отмечалась неэффективность насосов при работе на глубинах свыше 4000 м.

Поэтому рассматриваются альтернативные технические решения. Так, на отечественных ОПА «Русь» и «Консул» погружение осуществляется за счет отрицательной плавучести, которая создается твердым балластом, сбрасываемым при приближении к грунту. Вертикальное маневрирование у грунта осуществляется приемом воды в две прочные уравнительные цистерны суммарным объемом ок. 400 м³ (осушаются средствами СО после подъема ОПА на борт) и контролируемым сбросом дробяного балласта. Очевидно, возможности многократного маневрирования ограничены емкостями уравнительных цистерн и бункера с дробью, однако при грамотном планировании погружения практически обеспечивается требуемая эффективность такой системы.

Для регулирования дифферента на ОПА сегодня широко используется устройство продольного перемещения дифферентных грузов или АБ, расположенных в забортных контейнерах. С учетом современных экологических требований практически отказались от использования ртутно-масляных дифферентных систем, применяемых ранее (например, на ОПА типа

«Поиск»). В случае практических успехов в создании эффективных водяных насосов для работы при предельных гидростатических давлениях возможен возврат к уравнильно-дифференциальным системам, успешно применявшимся на ОПА малых глубин.

Заключение

Conclusion

Развитие ОПА предельных глубин погружения совершило революцию в освоении океана, по своему значению равную революции в космических исследованиях при создании обитаемых космических станций. Сегодня ОПА уже обеспечивают проведение широкого круга научно-исследовательских и подводно-технических работ на любых глубинах морей и океанов. Океанография, геология, изучение и освоение промыслов животного и растительного мира океана, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых, прокладка и осмотр подводных трубопроводов и кабелей, контроль над загрязнением морей и океанов, аварийно-спасательные работы – далеко не полный перечень того, чем заняты сегодня ОПА.

Проведенный анализ этапов конструирования глубоководной техники позволяет сформулировать актуальные направления развития современных ОПА. Основные из них связаны с решением следующих задач:

- дальнейшее улучшение массогабаритных характеристик всего оборудования;
- создание прозрачного конструкционного материала на основе акрила, работоспособного на больших глубинах, для изготовления панорамных иллюминаторов и ПК в целом;
- создание малогабаритных высокопроизводительных погружных насосов;
- создание комбинированного композитного легкового наполнителя на основе макросфер, размещаемых в сферопластике [11].

Список использованных литературы

1. *Войтов Д.В.* Подводные обитаемые аппараты. Москва : АСТ : Астрель, 2002. 303 с., [16] л. цв. ил.
2. *Коваленко Ю.С., Поцелуев С.В.* Гидронавтика // Большая российская энциклопедия : [сайт]. Москва, 2016. URL: https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/4419863 (дата обращения: 30.01.2024).
3. *Родин И.А., Померанцев Е.Э., Донец О.Е.* Современное состояние и тенденции развития обитаемых подводных аппаратов рабочего и исследовательского типов // Морская стратегия и политика России в кон-

тексте обеспечения национальной безопасности и устойчивого развития в XXI веке : сборник трудов. Вып. 2. Севастополь : ЧВВМУ им. П.С. Нахимова, 2019. С. 94–100.

4. Active manned submersibles by depth // MTS Manned Underwater Vehicles Committee : [site]. Columbia, 2023. URL: <https://www.mtsmuv.org/active-manned-submersibles-by-depth> (accessed: 30.01.2024).
5. DeLetter E. Watch Coast Guard press conference live: Officials give updates on missing Titanic sub // USA today : [сайт]. 22.06.2023. URL: <https://www.usatoday.com/story/news/nation/2023/06/22/coast-guard-press-conference-titanic-sub/70345483007> (дата обращения: 21.02.2024).
6. ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» представило проект уникального подводного аппарата // Газпром трансгаз Санкт-Петербург : [сайт]. 2017. 15 сент. URL: <http://spbtr.gazprom.ru/press/news/2017/09/618/> (дата обращения: 30.01.2024).
7. Воспоминания ветеранов Санкт-петербургского морского бюро машиностроения «Малахит», 1948–1998 годы / [авт.-сост. *Е.Н. Шанихин*]. Санкт-Петербург, 2006. XII, 739 с. (История Санкт-Петербургского морского бюро машиностроения «Малахит»; т. 4).
8. Центральное конструкторское бюро № 16 – Центральное проектное бюро «Волна», 1947–1974 гг. / [авт.-сост. *Н.Ф. Шульженко, В.И. Ефимов*]. Санкт-Петербург, 1995. 296 с. (История Санкт-Петербургского морского бюро машиностроения «Малахит»; т. 2).
9. *Федонюк Н.Н.* Прочность и долговечность элементов плавучести из сферопластика подводной техники : монография. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2022. 307 с.
10. Nereus // Wikipedia : [site]. [S.I.], 2024. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nereus> (Accessed: 30.01.2024).
11. *Амельянович К.К., Козуб Ю.И.* Опыт создания комбинированных блоков плавучести из сферопластика и стеклянных микрооболочек // Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических средств : тезисы докладов межвузовской научно-технической конференции. Николаев : НКИ, 1991. С. 158–159.

References

1. *Voytov D.* Manned submersibles. Moscow : JSC AST Publishing House, 2002. 303 p. (*in Russian*).
2. *Kovalenko Yu., Potselev S.* Hydronautics // Great Russian Encyclopedia entry : [web site]. Moscow, 2016. URL: https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/4419863 (Accessed: 30.01.2024) (*in Russian*).

3. *Rodin I., Pomerantsev Ye., Donets O.* State of the art and prospects of service and research UUVs // Russian maritime strategy and policy to ensure national security and sustainable development in 21st century. Compendium of papers, Vol. 2. Sevastopol: Nakhimov Higher Naval School, 2019. P. 94–100 (*in Russian*).
4. Active manned submersibles by depth // MTS Manned Underwater Vehicles Committee: [site]. Columbia, 2023. URL: <https://www.mtsmuv.org/active-manned-submersibles-by-depth> (accessed: 30.01.2024).
5. DeLetter E. Watch Coast Guard press conference live: Officials give updates on missing Titanic sub // USA today: [сайт]. 22.06.2023. URL: <https://www.usatoday.com/story/news/nation/2023/06/22/coast-guard-press-conference-titanic-sub/70345483007> (accessed: 21.02.2024).
6. Web site of Gazprom Transgaz St. Petersburg. URL: <http://spbtr.gazprom.ru/press/news/2017/09/618/> (Accessed on 30.01.2024) (*in Russian*).
7. Memories of Malakhit Design Bureau veterans (1948–1998) / Under editorship of Ye. Shanikhin. St. Petersburg, 2006. XII, 739 p. (Vol. 4 of Design Bureau Malakhit history) (*in Russian*).
8. Central Design Bureau No. 16 – Central Design Bureau Volna. 1947–1974 / Under editorship of N. Shulzhenko and V. Efimov. St. Petersburg, 1995. 256 p. (Vol. 2 of Design Bureau Malakhit history) (*in Russian*).
9. *Fedonyuk N.* Strength and durability of sphere-plastic buoyancy blocks for underwater vehicles. Monograph. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2022. 307 p. (*in Russian*).
10. Nereus // Wikipedia: [site]. [S.l.], 2024. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nereus> (Accessed: 30.01.2024).
11. *Amelyanovich K., Kozub Yu.* Hybrid (sphere-plastic and glass microshells) buoyancy blocks: Design Experience //

Composite Materials in Deepwater Technology. Compendium of papers. Inter-University Research & Technical Conference. Nikolaev: NKI, 1991. P. 158–159 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Григоров Максим Юрьевич, к.т.н., доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия, руководитель проектов ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44; Тел.: +7 (812) 748-63-67. E-mail: mygrigorov@ya.ru.

Райская Светлана Дмитриевна, инженер-конструктор 2-й категории АО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит». Адрес: 196135, Россия, Санкт-Петербург, ул. Фрунзе, д. 18. E-mail: revkovasv@gmail.com.

Ломакин Илья Андреевич, начальник сектора АО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит». Адрес: 196135, Россия, Санкт-Петербург, ул. Фрунзе, д. 18. E-mail: pisma.il@yandex.ru.

About the authors

Maxim Yu. Grigorov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., St. Petersburg State Marine Technical University; Project Manager, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-67. E-mail: mygrigorov@ya.ru.

Svetlana D. Rayskaya, 2nd Category Naval Architect, Malachite Design Bureau. Address: 18, Frunze st., St. Petersburg, Russia, post code 196135. E-mail: revkovasv@gmail.com.

Ilya A. Lomakin, Head of Sector, Malachite Design Bureau. Address: 18, Frunze st., St. Petersburg, Russia, post code 196135. E-mail: pisma.il@yandex.ru.

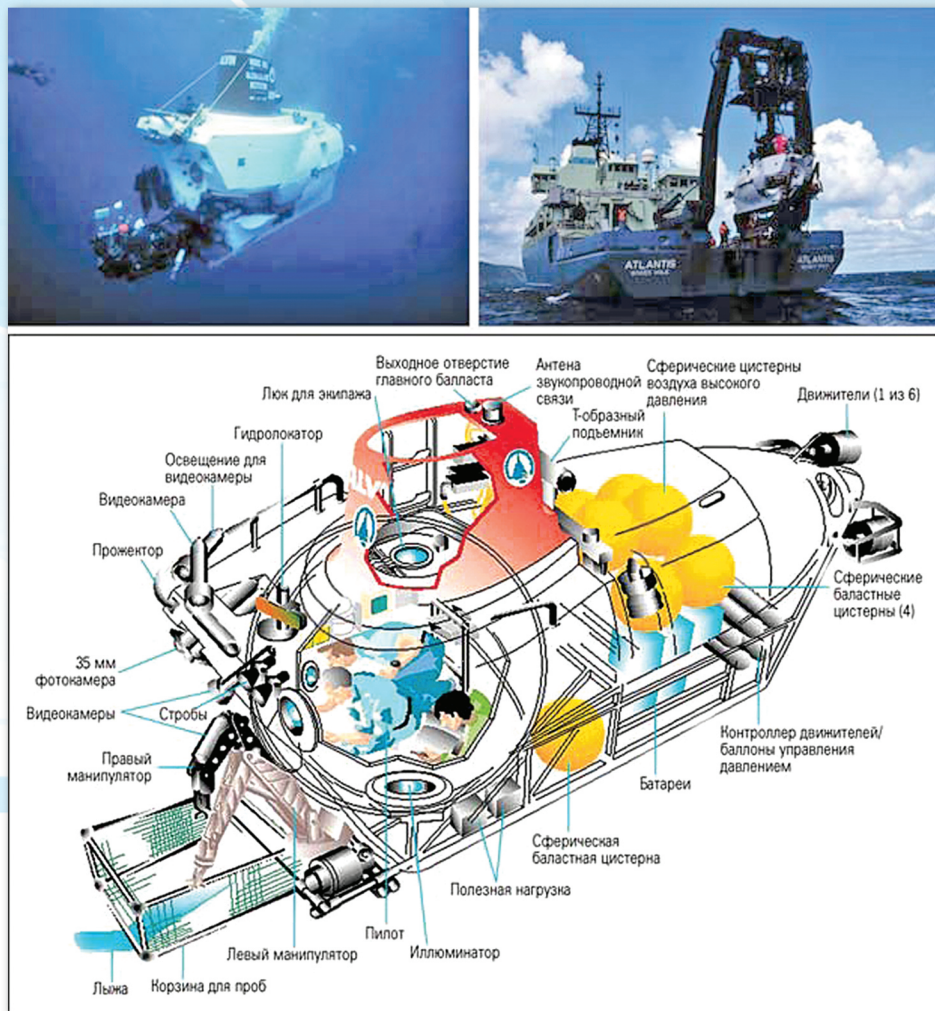
Поступила / Received: 09.10.23

Принята в печать / Accepted: 05.03.24

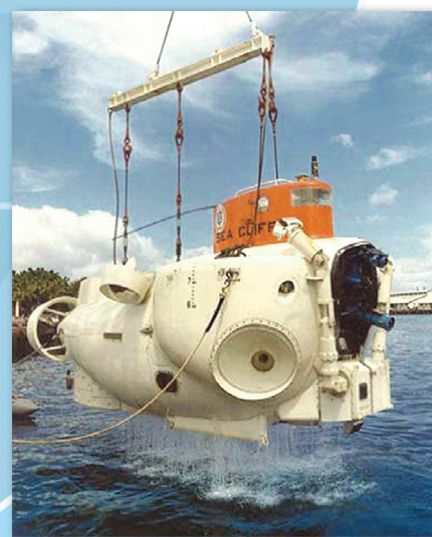
© Григоров М.Ю., Райская С.Д., Ломакин И.А., 2024

Рис. 4. Компактный обитаемый подводный аппарат Alvin после модернизации

Fig. 4. DSV Alvin (after retrofitting)



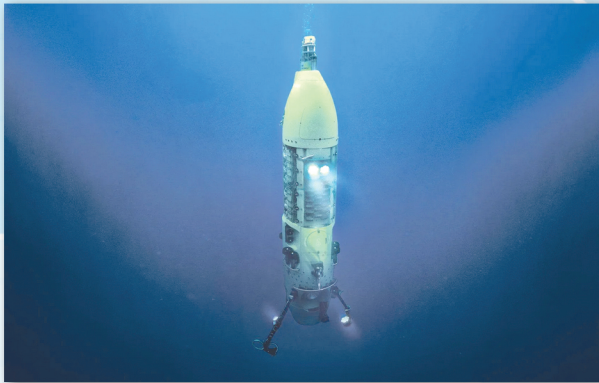
а)



б)

Рис. 5. Компактные обитаемые подводные аппараты: а) Cyana; б) Sea Cliff

Fig. 5. Compact DSVs: a) Cyana; b) Sea Cliff



а)



б)

Рис. 7. Обитаемые подводные аппараты: а) DeepSea Challenger; б) Triton 36000/2

Fig. 7. Modern DSVs: а) DeepSea Challenger; б) Triton 36000/2

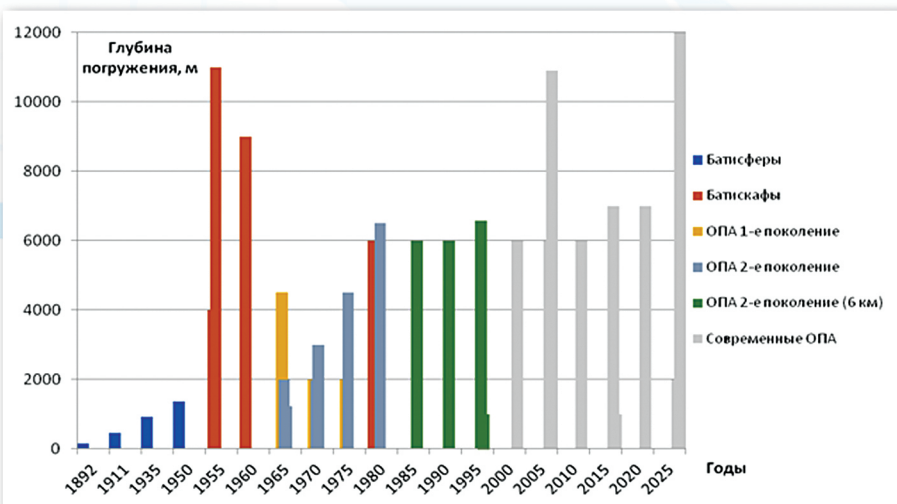


Рис. 8. Хронология освоения предельных глубин обитаемыми аппаратами

Fig. 8. Timeline of DSV dives to extreme depths

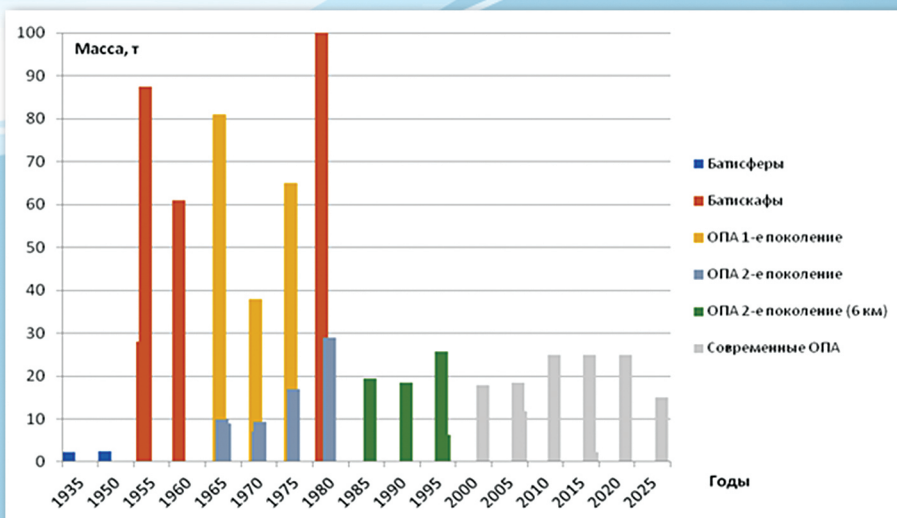


Рис. 9. Хронология снижения массы обитаемых подводных аппаратов предельных глубин

Fig. 9. Timeline of DSV weight reduction