

УДК 632.827:621.039  
EDN: VPANKO

В.В. Савенко, В.Ю. Чижов  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

## АКУСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АТОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК ФРАНЦИИ

**Объект и цель научной работы.** Рассмотрена методология акустического проектирования атомных подводных лодок (АПЛ) Франции.

**Материалы и методы.** Обзор работ по развитию методов и средств акустического проектирования АПЛ Франции в обеспечение достижения заданных акустических характеристик создаваемых АПЛ, прежде всего уровней излучаемого шума.

**Основные результаты.** Определены основные особенности методов и средств акустического проектирования многоцелевых и ракетных АПЛ, характерные для подводного кораблестроения Франции.

**Заключение.** Установлено, что разработанная французскими специалистами методология акустического проектирования АПЛ обеспечивает достижение заданных уровней шума и помех работе гидроакустических станций при ограниченном водоизмещении и уменьшенных размерах АПЛ. Это облегчает решение задачи повышения акустической скрытности и боевой эффективности АПЛ при ограниченных финансовых возможностях страны.

**Ключевые слова:** атомные подводные лодки, акустическое проектирование, снижение шумности и помех работе гидроакустических станций.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

UDC 632.827:621.039  
EDN: VPANKO

V.V. Savenko, V.Yu. Chizhov  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## ACOUSTIC DESIGN OF NUCLEAR SUBMARINES IN FRANCE

**Object and purpose of research.** This paper discusses acoustic design methodology for nuclear submarines in France.

**Materials and methods.** Review of publications about the progress of acoustic design methods and tools for French nuclear submarines to meet acoustic requirements (first of all, radiated noise levels).

**Main results.** The paper outlines main peculiarities of acoustic design methods and tools for attack and ballistic-missile nuclear submarines typical for French submarine building.

**Conclusion.** It is established that acoustic design methodology developed by French naval architects for nuclear submarines ensures compliance with radiated noise and sonar interference specifications for submarines with restricted displacement and size, thus facilitating development of stealthy and combat-efficient nuclear submarines in the context of budget difficulties faced by the country.

**Keywords:** nuclear submarines, acoustic design, noise and sonar interference mitigation.

*The authors declare no conflicts of interest.*

### Введение

Introduction

Проектирование атомных подводных лодок во Франции осуществляется под руководством Управ-

ления военного кораблестроения (DCN), которое ведет также разработку методов и средств снижения заметности АПЛ по различным физическим полям, включая акустические. Для повышения боевой эффективности АПЛ и защиты их от обнаруже-

*Для цитирования:* Савенко В.В., Чижов В.Ю. Акустическое проектирование атомных подводных лодок Франции. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 2(408): 136–150.

*For citations:* Savenko V.V., Chizhov V.Yu. Acoustic design of nuclear submarines in France. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 2(408): 136–150 (in Russian).

ния и поражения средствами с акустическими каналами наведения специалисты DCN разработали методы акустического проектирования АПЛ, которые основаны на самостоятельно накопленном практическом опыте обеспечения скрытности, прежде всего снижения шумности АПЛ.

Работы по снижению шумности стали первоочередными в послевоенные годы, когда стало ясно, что скрытность подводной лодки от обнаружения на фоне окружающей водной среды достигается снижением уровней ее первичного гидроакустического поля, т.е. шума, излучаемого при работе двигательной установки АПЛ и при обтекании ее корпуса потоком воды. Это поле воспринимается пассивными приемниками звука противника как основным средством скрытного обнаружения АПЛ на больших расстояниях. Для поиска АПЛ и точного целеуказания используется также активная гидролокация по вторичному акустическому полю, формируемому отраженным от АПЛ гидроакустическим сигналом. Другие физические поля, формируемые движущейся АПЛ (магнитное, электрическое, кильватерного следа, группа полей верхней полусферы), также обычно принимаются во внимание для обеспечения скрытности АПЛ.

С самого начала проектирования малошумных АПЛ во Франции специалисты DCN имели возможность изучать новые проектные решения, реализованные на уже построенных АПЛ США и Великобритании, однако искали собственные пути решения поставленных задач с учетом ограниченных финансовых возможностей страны. Это привело к созданию АПЛ с достаточно высокими техническими характеристиками, обеспечивающими решение основных задач поддержания боевой эффективности ВМС Франции. Вместе с тем АПЛ Франции отличаются от АПЛ США и Великобритании, как правило, меньшим водоизмещением и менее высокими максимальными скоростями хода, что несколько облегчает решение задачи снижения их шумности и помех работе гидроакустических станций.

С целью достижения низких уровней акустических полей, необходимых для обеспечения акустической скрытности создаваемых АПЛ, специалисты Франции используют самостоятельно разработанные методы и средства акустического проектирования АПЛ, которые соответствуют современным методам, изложенным в работе [1]. Начало таким работам было положено при создании первых АПЛ Франции, прежде всего с целью снижения их шумности.

## Снижение шумности первых атомных подводных лодок

Noise mitigation for early French nuclear submarines

В отличие от США и Великобритании, где сначала были созданы многоцелевые АПЛ, во Франции первыми атомными ПЛ стали ПЛАРБ (подводные лодки атомные с баллистическими ракетами, или ракетноносцы) типа «Редутабль». Работы по созданию ПЛАРБ с баллистическими ракетами (БР) начались во Франции в 1960-х гг., когда было принято решение создать собственные стратегические ядерные силы.

Головная ПЛАРБ «Редутабль» (Le Redoutable S 611) заложена в 1964 г. и вступила в состав ВМС в 1971 г. При ее проектировании специалисты DCN принимали во внимание опыт создания первых атомных подводных ракетноносцев США типа «Джордж Вашингтон», поэтому основные тактико-технические характеристики французских ПЛАРБ, включая вооружение, водоизмещение и скорость хода, были близки к американским прототипам. Однако проектирование и строительство первой ПЛАРБ, как и ядерного реактора для нее, специалисты Франции вели самостоятельно – в отличие от Великобритании, которая получила ядерную главную энергетическую установку (ГЭУ) для своей первой АПЛ от США [2]. Следует отметить, что ко времени создания ПЛАРБ типа «Редутабль» в США на смену довольно шумным ракетноносцам типа «Джордж Вашингтон» уже были построены «обесшумленные» ПЛАРБ типа «Итан Аллен» (головная Ethan Allen SSBN 608 вступила в строй в 1961 г.).

Первые ПЛАРБ Франции типа «Редутабль» согласно [3] имели водоизмещение 8045/8940 т (надводное/подводное), длину 128,7 м и диаметр корпуса 10,6 м. Это были однокорпусные на большей части длины и одновальные ПЛ с цилиндрическим корпусом и обтекаемой надстройкой, в которой были «спрятаны» крышки 16 ракетных шахт с собственными БР. Форма корпуса была близка к обводам, отработанным ранее на опытовой ДЭПЛ ВМС США «Альбакор» (заложена в 1952 г., одновременно с первой в мире АПЛ ВМС США «Наутилус»). Запас плавучести ракетноносца был уменьшен до минимума (около 900 т).

В состав ГЭУ ПЛАРБ типа «Редутабль», помимо оборудования реактора, входили две паровые турбины, два турбогенератора и главный гребной электродвигатель (ГЭД), а также ГЭД малошумного хода. Максимальная мощность на гребном валу

16 тыс. л.с. позволяла развивать скорость более 20 уз, но основным режимом ПЛАРБ являлось малозумное патрулирование в режиме электродвижения на скорости 4–5 уз.

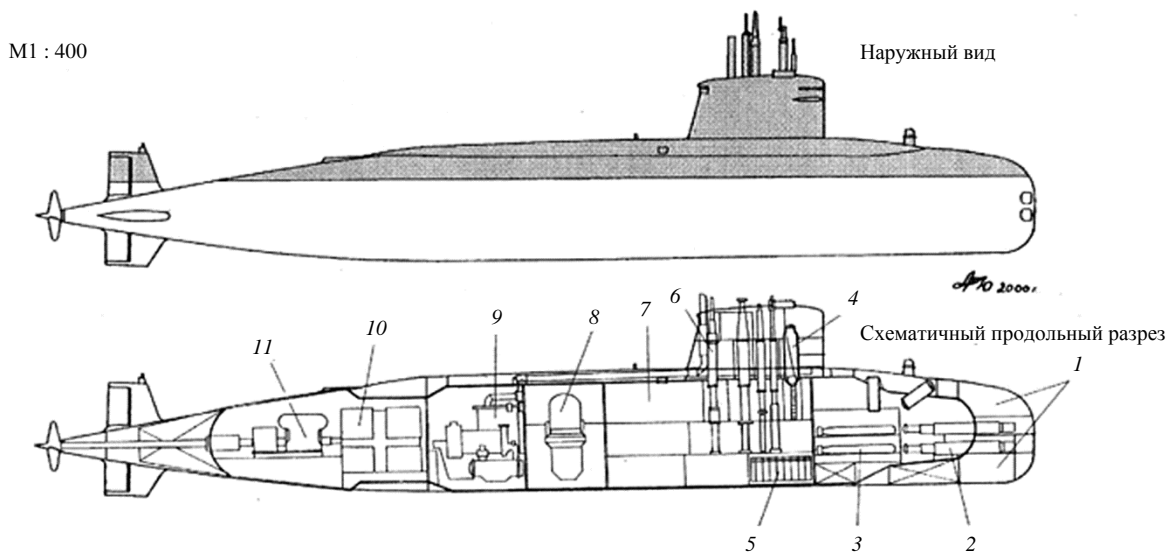
Всего было построено пять ПЛАРБ типа «Редутабль», но они оказались довольно шумными, поэтому на шестой, модернизированной ПЛАРБ S 615, вступившей в строй в 1985 г., были внедрены мероприятия по снижению шумности главного и вспомогательного оборудования [3] как основных источников шума в режиме электродвижения на малой скорости. Пятилопастный гребной винт на S 615 (а затем и на остальных ПЛАРБ при модернизации) был заменен на менее шумный семилопастный винт [23]. Все эти ПЛАРБ в настоящее время выведены из состава ВМС.

О создании первой многоцелевой АПЛ для ВМС Франции было официально объявлено в 1973 г. [3]. При проектировании многоцелевой АПЛ небольшого водоизмещения (проект SNA 72) специалисты DCN решили для уменьшения шума, излучаемого при работе ГЭУ, применить полное электродвижение на всех скоростях хода. Это позволило исключить главные турбины и редуктор как одни из основных источников повышенной вибрации и шума. С этой же целью был создан сравнительно мало-

мощный моноблочный реактор небольших размеров CAS-48.

Головная многоцелевая АПЛ Франции по проекту SNA 72 «Прованс» (Provence S 601), позже переименованная в «Рюби» (Rubis), была заложена в 1976 г. и вступила в строй в 1983 г. Согласно [3] первая многоцелевая АПЛ имела весьма малое водоизмещение – 2385/2670 т (надводное/подводное) и малый запас плавучести – около 10%. Длина (72,1 м) и диаметр корпуса (7,6 м) были выбраны с учетом ограничения удлинения значением 9,5. Архитектура корпуса французской АПЛ типа «Рюби» (рис. 1) подобна архитектуре первой многоцелевой АПЛ США с «альбакоровскими» обводами корпуса типа «Скипджек» (Skipjack SSN 585), которая была однокорпусной на большей части длины (рис. 2) и в американских ВМС считалась «маленькой, скоростной и шумной» [2, 4]. Конструкция корпуса одновальневой АПЛ «Рюби» выбрана по типу многоцелевой АПЛ «Скипджек», но отличается наличием небольшой по размерам хорошо обтекаемой надстройки.

Ранее было установлено, что для каплеобразного тела оптимальное значение удлинения 6,8 позволяет минимизировать буксировочное сопротивление, а, значит, снизить нагрузку на двигательную систему ПЛ и уменьшить шумность



**Рис. 1.** Схема атомной подводной лодки Франции типа «Рюби»: 1 – выгородка носовой антенны; 2 – торпедный аппарат; 3 – запасные торпеды, 4 – прочная выходная шахта; 5 – аккумуляторная батарея; 6 – подъемно-мачтовые устройства, 7 – центральный пост и жилые помещения; 8 – реактор, 9 – турбогенераторы, 10 – основной гребной электродвигатель; 11 – аварийный электродвигатель (малозумный ход)

**Fig. 1.** Layout of *Rubis*-class nuclear submarine: 1 – bow sonar dome; 2 – torpedo tube; 3 – torpedo stock, 4 – pressure-resistant exit shaft; 5 – accumulator battery; 6 – retractable mast, 7 – central station and living quarters; 8 – reactor, 9 – turbogenerators, 10 – main propulsion motor; 11 – emergency motor (silent sailing)



**Рис. 2.** Схема атомной подводной лодки США типа «Скипджек»  
**Fig. 2.** Layout of *Skipjack*-class SSN (USA)

при ее работе (допустимо увеличение удлинения примерно до 9 с тем же результатом). Эти параметры были экспериментально подтверждены в 1950-х гг. при ходовых испытаниях опытной одновалной ДЭПЛ ВМС США «Альбакор» с удлинением 8, позволивших определить характеристики ее ходкости, маневренности и устойчивости на курсе [5]. Также были измерены уровни подводного шума и помех работе ГАС на разных скоростях хода, подтвердившие противоречивость скоростных и акустических характеристик ПЛ.

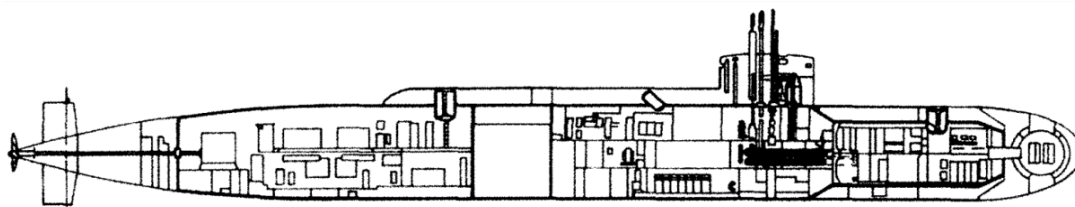
На втором этапе испытаний ДЭПЛ «Альбакор», выполненных в 1956 г., были проверены новые для того времени технические решения, включавшие преобразование конструкции кормовой оконечности в однокорпусную путем ликвидации кормового участка легкого корпуса, вибрирующего при его обтекании потоком. Крестообразное кормовое оперение, впервые установленное перед гребным винтом, включало вертикальные рули без стабилизаторов и горизонтальные рули со стабилизаторами перед ними. Движителем «Альбакор» являлся новый пятилопастный малошумный гребной винт.

Выполненные всесторонние испытания опытовой ПЛ «Альбакор» показали, что мероприятия по снижению шума оборудования, а также по уменьшению

шумоизлучения, обусловленного работой двигателя и обтеканием корпуса встречным потоком воды, позволили существенно снизить не только шумность ПЛ, но и помехи работе ГАС [5]. «Альбакоровская» форма корпуса, впервые реализованная на АПЛ США типа «Скипджек», стала общепринятой для всех последующих ПЛ, в т.ч. АПЛ Франции.

Носовая оконечность АПЛ типа «Рюби» сначала имела полную штевневую форму со скругленными верхней и нижней частями, внутри которой расположили четыре торпедных аппарата (ТА) и цилиндрическую гидроакустическую антенну [6]. В состав ГЭУ полного электродвижения входят два турбогенератора мощностью по 3950 кВт, питающих низкооборотный гребной электродвигатель (ГЭД) мощностью 9,5 тыс. л.с., непосредственно вращающий гребной вал. Это позволило двигаться на скорости полного хода 23,5 уз и кратковременно развивать максимальную скорость 26,5 уз [6]. Дополнительный (аварийный) электродвигатель может использоваться при питании от аккумуляторных батарей (АБ) для режима движения на малой скорости при поиске малошумных целей.

Полное электродвижение АПЛ типа «Рюби» было аналогично схеме, впервые реализованной ранее в США на противолодочной АПЛ «Тьюлли-



**Рис. 3.** Схема атомной подводной лодки США «Тьюллиби» (Tullibee SSN 597)  
**Fig. 3.** Layout of USS *Tullibee* (SSN 597, USA)



**Рис. 4.** Многоцелевая атомная подводная лодка типа «Рюби»

**Fig. 4.** Rubis-class nuclear-powered attack submarine



**Рис. 5.** Многоцелевая атомная подводная лодка типа «Аметист»

**Fig. 5.** Amethyste-class nuclear-powered attack submarine

би» (Tullibee SSN597), вступившей в строй в 1960 г. Водоизмещение небольшой одновальнй АПЛ «Тьюллиби» [7] с полным электродвижением (рис. 3) составляло 2317/2640 т, длина 83,16 м, диаметр корпуса 7,09 м, относительное удлинение корпуса довольно большое – 11,7.

При работе турбогенераторов и ГЭД мощностью 2,5 тыс. л.с. АПЛ «Тьюллиби» могла развивать максимальную скорость хода не более 16 уз. Зато занявшая всю носовую оконечность сферическая антенна с высокой чувствительностью и низкими уровнями собственных акустических помех обладала улучшенными возможностями обнаружения целей в пассивном режиме. Четыре ТА впервые были установлены во втором отсеке – по два на борт под углом к оси корпуса.

Кратковременный режим наименьшей шумности мог достигаться путем остановки оборудования

реактора и турбогенераторов, а движение на малой скорости для поиска целей осуществлялось при питании от АБ. Однако низкая максимальная скорость хода «Тьюллиби» не подходила для многоцелевых АПЛ ВМС США, и от серийного строительства таких тихоходных АПЛ отказались [7].

После постройки четырех серийных АПЛ Франции типа «Рюби» (рис. 4) две последние были построены по усовершенствованному проекту – АПЛ типа «Аметист» (Amethyste S 605 заложена в 1984 г., вступила в строй в 1992 г.). Программа модернизации Amethyste, которая совпадает с названием модернизированной АПЛ, была разработана согласно [8] для повышения тактических характеристик АПЛ за счет улучшения гидродинамики, обесшумливания, использования средств виброизоляции и шумопоглощения, а также совершенствования гидроакустического комплекса (ГАК).

Затем по усовершенствованному проекту типа «Аметист» (рис. 5) были модернизированы и первые четыре АПЛ, что позволило уменьшить их шумность, установить новые ГАК и системы радиоэлектронного вооружения [8]. Эти усовершенствования были направлены на повышение возможностей многоцелевых АПЛ при противолодочных операциях, поскольку по первоначальному проекту АПЛ типа «Рюби» предназначались для боевых действий преимущественно против надводных кораблей.

Водоизмещение (надводное/подводное) АПЛ «Аметист» согласно [8] составляет 2410/2680 т, с малым (270 т) запасом плавучести; длина увеличилась до 73,6 м из-за возрастания длины носовой оконечности, форма которой стала осесимметричной (что позволило снизить гидродинамические помехи работе ГАК). Была установлена новая носовая антенна ГАК, также появились бортовые антенны и буксируемая антенна. На скоростях хода меньше 6 уз реактор может работать с отключенными насосами первого контура при естественной циркуляции охлаждающей воды [8], что позволило снизить его вклад в шумоизлучение АПЛ на малозумных скоростях хода, а также снизить уровни корабельных акустических помех (КАП) работе ГАК.

Надстройка и ограждение выдвижных устройств АПЛ «Аметист» выполнены с использованием элементов из легких композиционных материалов [9], имеющих повышенное демпфирование, что позволило снизить их вибрации и возможный вклад в шумоизлучение, а также в формирование гидролокационного отражения. Обтекатель носовой

антенны ГАК, выполненный из композиционных материалов, способствовал снижению помех работе ГАК от шумов обтекания. Более обтекаемые формы надстройки и ограждения выдвижных устройств (ОВУ), которое выполняется в виде традиционного узкого крыла с размещенными на нем горизонтальными рулями, позволили снизить буксировочное сопротивление, а меньший вес конструкций – ограничить рост водоизмещения АПЛ при модернизации.

Тем не менее согласно [8] шумность многоцелевых АПЛ «Аметист» оказалась выше шумности новейших многоцелевых АПЛ, построенных в то время в США (типа «Лос-Анджелес») и Великобритании (типа «Графальгар»), поскольку излучаемый оборудованием ГЭУ шум, несмотря на исключение главных турбин и редуктора, остался довольно большим из-за вклада турбогенераторов высокой мощности, а также шума, возникающего при работе вспомогательного оборудования. Минимальная шумность АПЛ «Аметист» могла достигаться лишь на самой малой скорости хода при энергопитании ГЭД малошумного хода от АБ приблизительно в течение 15 часов [8].

В отличие от АПЛ «Аметист», более скоростные многоцелевые АПЛ США и Великобритании предназначались для действий в глобальных операциях в любом районе Мирового океана, несли больше технических средств, оборудования, средств акустической защиты и запасов, а потому отличались более значительным водоизмещением [6, 8].

С 2004 г. началась очередная программа модернизации многоцелевых АПЛ типа «Аметист», включающая замену гребного винта на малошумный движитель водометного типа (pump-jet) и установку нового электронного оборудования [10].

При оценке боевой эффективности АПЛ «Аметист» следует учитывать, что многоцелевые АПЛ Франции создавались с учетом влияния театра боевых действий на выбор тактико-технических характеристик АПЛ и выполняемых ею задач. В докладе на конференции по подводной оборонной тематике (UDT 2005), где излагаются результаты работ специалистов DCN по оптимизации сигнатур ПЛ для действий в мелких водах [11], приведен такой пример.

Результаты численного расчета показали, что невозможно увеличить дальность обнаружения цели с помощью пассивного режима работы ГАК более 11 км при состоянии моря 3 балла (исходя из уровней шума моря по Кнудсену), как бы ни были малы уровни КАП, обусловленных шумоизлучением ПЛ – носителя ГАК. Поскольку приближенные

и мелкие воды отличаются повышенной шумностью даже при небольшом волнении, то требования к уровням шума ПЛ – носителя и к уровням КАП работе ГАК могут быть не самыми жесткими, а должны быть оптимизированы применительно к предполагаемому театру боевых действий.

Приведен и другой пример [11], что если малошумная ПЛ в шумной акватории может быть обнаружена по излучаемому шуму на расстоянии немногим менее 2,5 км, то на 5 дБ более шумная ПЛ обнаруживается примерно на том же расстоянии. Это позволяет смягчить требования к шумности ПЛ, а также при проектировании уменьшить размеры ПЛ и снизить стоимость ее жизненного цикла, поскольку достижение минимальных уровней различных сигнатур ведет к увеличению весов и габаритов, необходимых для размещения на ПЛ высокоэффективных средств акустической защиты, а также значительно увеличивает стоимость ПЛ [11].

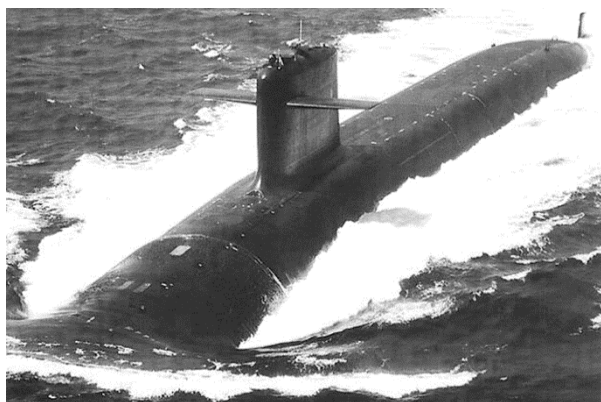
Сравнение общекорабельных характеристик многоцелевых АПЛ Франции типа «Рюби» и состоявших в то время в составе ВМС США многоцелевых АПЛ типа «Стерджен», данные о которых приведены в [10], позволяет сделать вывод, что с учетом ограниченных финансовых возможностей Франции DCN уделило основное внимание созданию АПЛ меньшего водоизмещения. Водоизмещение АПЛ типа «Аметист» примерно в два раза меньше АПЛ США типа «Стерджен», вооружение те же 4 ТА, и только максимальная скорость хода у «Стерджен» (около 28 уз) на 1,5 уз выше.

Вместе с тем ограничение водоизмещения облегчило решение задачи обеспечения скрытности сравнительно небольших АПЛ Франции от обнаружения как по акустическим, так и по другим физическим полям. Работы по снижению шумности первых АПЛ заложили основы методов акустического проектирования, сложившихся позже при создании современных многоцелевых и ракетных АПЛ Франции.

## **Акустическое проектирование современных атомных подводных лодок**

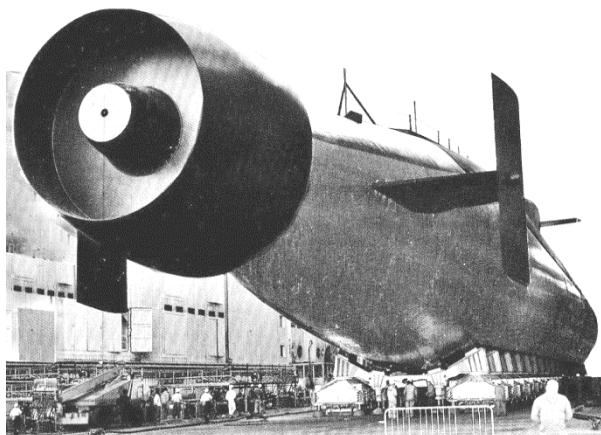
Acoustic design of modern nuclear submarines

Современные методы акустического проектирования АПЛ Франции разработаны при создании состоящих в составе ВМС Франции ПЛАРБ типа «Триумфан», разработанных на смену ПЛАРБ первого поколения типа «Редутабль». О создании нового поколения



**Рис. 6.** Подводный ракетоносец типа «Триумфан» в море

**Fig. 6.** *Triumphant-class ballistic-missile nuclear submarine at sea*



**Рис. 7.** Кормовая оконечность и движитель pump-jet подводного ракетоносца типа «Триумфан»

**Fig. 7.** Stern and propulsor (pump-jet) of *Triumphant-class ballistic-missile nuclear submarine*

ПЛАРБ было объявлено в 1981 г., строительство началось в 1989 г, однако из-за финансовых трудностей было приостановлено до 1993 г., а серия была сокращена с пяти до четырех ПЛАРБ [8].

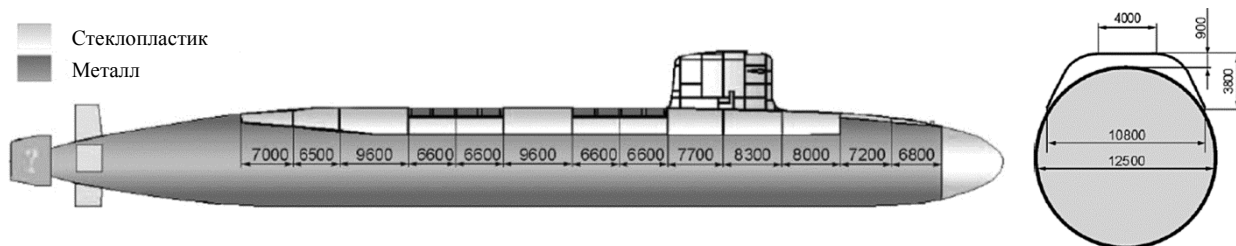
Ввод в строй головной ПЛАРБ типа «Триумфан» (S-616 *Le Triumphant*) состоялся в 1997 г. При водоизмещении 12,64/14,335 тыс. т (надводном/подводном) и мощности на валу 41,5 тыс. л.с. данная ПЛАРБ может развивать максимальную скорость не менее 25 уз. Энергетическая установка включает две турбины и редуктор, передающий вращение на гребной вал, а также два турбогенератора, электродвигатель маломощного хода и другое оборудование [8].

Корпус ПЛАРБ типа «Триумфан» (длиной 138 м, диаметром 12,5 м) выполнен с большим вниманием к гидродинамическому совершенствованию обводов (рис. 6), включая носовую и кормовую оконечности, ограждение выдвижных устройств с горизонтальными рулями, кормовое оперение по типу ПЛАРБ США «Огайо», обтекаемую надстройку с 16 крышками ракетных шахт (подобно ПЛАРБ Великобритании типа «Вэнгард»). Применение однокорпусной архитектуры с минимальным запасом плавучести и ракетного оружия собственной разработки с минимизированными габаритами (согласно [6] длина БР типа М-45 11,1 м по сравнению с 13,5 м у Trident D-5) позволило ограничить размеры и подводное водоизмещение ПЛАРБ типа «Триумфан». Это также снизило нагрузку на двигательную систему, а, следовательно, и ее шумность.

Особое внимание при акустическом проектировании было уделено снижению излучаемого «Триумфан» шума за счет таких основных решений [8], как установка главного и вспомогательного оборудования на виброизолированные рамные конструкции, а также применение малошумного движителя водометного типа (pump-jet). Впервые движитель типа pump-jet был ранее установлен на многоцелевой АПЛ Великобритании «Турбулент» (S 87 *Turbulent*), вступившей в строй в 1984 г. [12].

Разработанный специалистами DCN маломощный водометный движитель типа pump-jet (рис. 7), по некоторым оценкам, имеет рабочее колесо диаметром около 6 м, а максимальная скорость вращения ориентировочно составляет 100 об/мин. Выполненная с использованием композитных материалов кольцевая насадка водометного движителя, закрепленная лопатками направляющего аппарата на кормовой оконечности корпуса ПЛАРБ, имеет длину около 5,25 м и наибольший наружный диаметр около 7 м.

Профиль насадки выбран исходя из необходимости подтормаживать поток в диске рабочего колеса и имеет предположительно «вогнутую» форму. Поэтому специалисты DCN назвали ее не пропульсивной насадкой, а «акустическим аппаратом», управляющим полем скоростей за счет предварительного поджатия потока на входе. Замедление потока способствует восстановлению (повышению) давления в потоке воды перед рабочим колесом, что позволяет повысить кавитационную устойчивость и снизить шумность ценой небольшой потери



**Рис. 8.** Композитные детали подводного ракетноносца Франции типа «Триумфан»  
**Fig. 8.** Composite parts of *Triomphant*-class ballistic-missile nuclear submarine

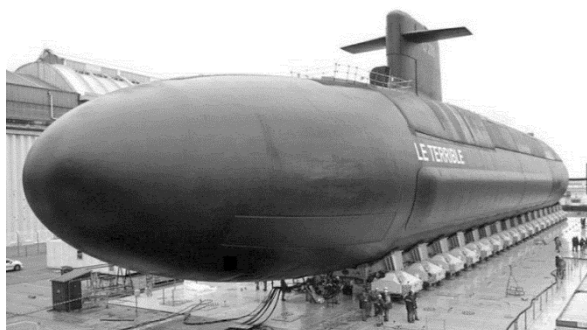
максимальной скорости ПЛАРБ типа «Триумфан» (по некоторым оценкам, примерно 1,5 уз).

Композитные детали ПЛАРБ типа «Триумфан» [9], показанные на рис. 8, помимо снижения веса конструкций надстройки и ОВУ, позволяют повысить демпфирование их колебаний и снизить возможный вклад в шумоизлучение, а также в формирование гидролокационного отражения.

Носовой обтекатель гидроакустической антенны длиной около 8 м и диаметром около 10 м, выполненный из монолитного стеклопластика сравнительно большой толщины без ребер жесткости, позволяет снизить гидродинамические помехи работе носовой антенны ГАК (рис. 9). На рисунке видно, что щели для протекания воды между обтекателями бортовых антенн и прочным корпусом минимальны, как и щели между надстройкой и корпусом.

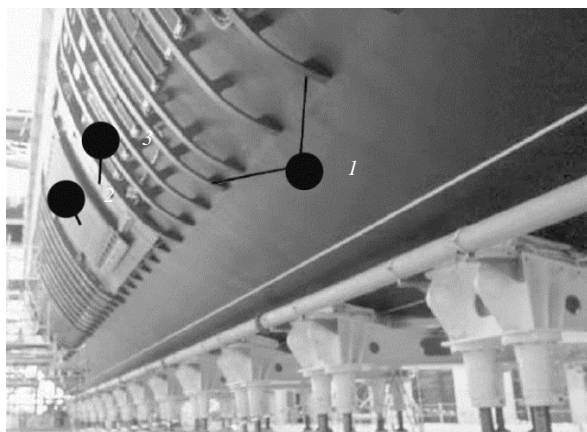
Из стеклопластика выполнены также обтекатели, закрывающие бортовые антенны, которые закреплены на наборе металлических рамных конструкций вместе с шумозаглушающими экранами [9]. Конструкция крепления секций обтекателей, экранов и бортовой антенны на наружном прочном корпусе, которая обеспечивает снижение вибрационной и шумовой составляющих помех работе ГАК, показана на рис. 10.

При акустическом проектировании ПЛАРБ типа «Триумфан» применялись все известные к тому времени средства снижения шумности в источнике и на путях распространения, а также учитывались условия распространения излучаемого шума применительно к предполагаемому району действий [11]. Прежде всего это глубокие воды (глубина погружения «Триумфан» может достигать 500 м [8]), наиболее благоприятные для дальнего распространения звуковых волн, что требует максимального снижения излучаемых уровней шума. Вместе с тем следует учитывать неизбежные шумовые помехи гидроакустическим поисковым системам противника со стороны акватории, возрастающие с увели-



**Рис. 9.** Носовой и бортовой обтекатели гидроакустических антенн подводного ракетноносца типа «Триумфан»

**Fig. 9.** Bow sonar dome and side-scanning sonar fairings of *Triomphant*-class ballistic-missile nuclear submarine



**Рис. 10.** Конструкция бортовой антенны подводного ракетноносца типа «Триумфан»: 1 – опорные поперечные рамы экранов антенны; 2 – секция бортовой антенны; 3 – секция шумозаглушающего экрана антенны

**Fig. 10.** Side-scanning sonar of *Triomphant*-class ballistic-missile nuclear submarine: 1 – bearing cross-frames of sonar shields; 2 – side-scanning antenna section; 3 – noise-dampening shield section

чением ветрового волнения морской поверхности, а также при интенсивном судоходстве в предполагаемом районе действий.

Задание избыточно жестких требований к уровням шума, излучаемого ПЛ, по мнению специалистов DCN, приводит к недопустимому усложнению и удорожанию мероприятий по их достижению, что требует также увеличения массогабаритных характеристик ПЛ. Поэтому особое внимание DCN уделяется составлению спецификации для достижения поставленных заказчиком целей и задач исходя из предполагаемой стоимости ПЛ и вероятного театра боевых действий.

При этом учитываются наиболее вероятные параметры маскирующих движущуюся ПЛ шумов предполагаемой акватории в заданном районе действий, которые могут значительно отличаться в прибрежных водах от шумов глубоководной акватории. В докладе специалистов DCN [11] отмечается, что, если вероятность возникновения наименьшей шумности акватории (при минимальном волнении и отсутствии судоходства) не превышает 1–2 %, то необходимость обеспечения незаметности ПЛ на таком фоне потребует неоправданного усложнения и неприемлемого удорожания мероприятий по соответствующему снижению шумности ПЛ.

Для подводного ракетносца основная модель боевого использования состоит в предельно скрытном режиме патрулирования в заданном районе в готовности к пуску ракет в случае поступления приказа. Обычным является движение на заданной для данной акватории глубине с малой скоростью при минимально возможной шумности. На малых скоростях хода, при наличии малошумного движителя, основной вклад в шумность ПЛАРБ обычно дает работа оборудования и систем жизнеобеспечения, снижению шумоизлучения которых уделяется основное внимание [11].

Это приводит к предъявлению наиболее жестких требований к виброакустическим характеристикам оборудования, а также к обеспечению наибольшей эффективности акустических средств защиты, включая виброизоляцию и вибропоглощение, а также других средств, обеспечивающих снижение передачи колебательной энергии как по структурным, так и по жидкостным и воздушным каналам во внешнюю водную среду [11]. Оценки эффективности всех необходимых для достижения требуемых акустических характеристик средств акустической защиты выполнены при проектировании ПЛАРБ типа «Триумфан».

Разработанные специалистами Франции методы акустического проектирования включали достижение указанных в спецификации акустических характеристик ПЛ. В общем случае в число требований заказчика, определяющих задачи акустического проектирования, согласно [1] могут входить следующие акустические характеристики:

- уровни первичного гидроакустического поля (т.е. уровни подводного шума, излучаемого ПЛ в окружающую водную среду);
- уровни вторичного гидроакустического поля ПЛ (т.е. сила цели при формировании отраженного акустического поля в случае облучения ПЛ внешним излучателем звука – гидролокатором);
- уровни корабельных акустических помех работе собственных гидроакустических станций ПЛ;
- уровни шума и вибрации в обитаемых служебных и жилых помещениях ПЛ.

Достижение требуемых акустических характеристик ПЛ путем последовательных приближений при проектировании обычно сочетается с методом вариаций. В силу взаимозависимости общекорабельных и акустических характеристик при поиске и выборе рациональных решений учитываются предъявленные общие ограничения, например по водоизмещению, мощности главной энергетической установки, скорости хода проектируемой ПЛ.

Важным дополнительным мероприятием при акустическом проектировании ПЛАРБ типа «Триумфан» явилось использование результатов экспериментальных исследований, выполненных с применением крупномасштабной (1:10) модели MN2 (рис. 11), испытания которой проходили на акустическом полигоне Франции SESAC в 2005 г. Полигон SESAC для испытаний гидродинамических и акустических характеристик самоходных моделей ПЛ и НК массой до 15 т оборудован на искусственном озере (водохранилище) глубиной 100 м в Альпах [13].

Реализация разработанных принципов акустического проектирования включала внедрение на ПЛАРБ типа «Триумфан» следующих акустических технологий:

- идентификация путей распространения шума от оборудования в море;
- использование низкочастотных упругих креплений оборудования и специальных гибких неопорных связей (патрубков, кабелей, воздуховодов);
- расчетное определение методом конечных элементов параметров (составление каталогов) стандартных опорных фундаментных конструк-

ций, а также виброизолированных палуб и специальных фундаментов для критически важного (в плане снижения шумности) оборудования с обеспечением высокого импеданса фундаментов и перепада жесткостей между подвеской и фундаментом;

- выбор частоты вращения оборудования во избежание совпадения возбуждающих частот оборудования с резонансными модами фундамента;
- использование проверенных методов проектирования трубопроводов для минимизации флуктуаций давления, передаваемых по системам забортной воды;
- проектирование гребного винта специалистами опытового бассейна Франции, которые используют наиболее мощные методы расчета гребных винтов, разработанные при создании АПЛ.

Важным практическим средством акустического проектирования являются также расчетно-аналитические методы (в т.ч. метод конечных элементов) [1] для моделирования проектируемых ПЛ, основанные на возможностях вычислительной техники. При этом могут моделироваться как известные по прототипу, так и принципиально новые технические решения, применяемые при создании ПЛ и его элементов. Особым преимуществом виртуального моделирования является возможность определять (оценивать) в процессе проектирования ожидаемую акустическую эффективность принятых в проекте новых технических решений.

Сложившаяся структура мероприятий акустического проектирования ПЛАРБ типа «Триумфан» включала также работы по входному виброакустическому контролю оборудования, поставляемого на строящуюся ПЛ, по измерению шума и вибрации ПЛ после ее постройки, выявлению источников возможных превышений заданных уровней и по разработке рекомендаций, позволяющих устранить выявленные превышения. Разработка проекта, оптимизированного применительно к задачам, поставленным заказчиком (ВМС Франции), с учетом выделенных средств [11], позволила достичь заданных уровней акустических характеристик ПЛАРБ типа «Триумфан», необходимых для обеспечения скрытности носителя стратегического оружия.

Разработанные при создании ПЛАРБ типа «Триумфан» методы акустического проектирования нашли применение также при создании современных экспортных неатомных ПЛ ВМС Франции типа «Скорпене» (Scorpene) [14].

Работы по созданию новейших многоцелевых французских АПЛ по проекту «Барракуда»



а)



б)

**Рис. 11.** Самоходная крупномасштабная (1:10) модель MN2 подводного ракетноносца типа «Триумфан» в ангаре (а) и на акустическом полигоне SESAC (б) во время испытаний гидродинамических и акустических характеристик

**Fig. 11.** Self-propelled large-scale (1:10) model MN2 of *Triumphant*-class ballistic-missile nuclear submarine in hangar (a) and at SESAC acoustic range (b) during hydrodynamic and acoustic tests

(*Barracuda*) на смену АПЛ типа «Рюби»/«Аметист» начались в 1998 г. Предусматривалось повышение скоростей хода, увеличение глубины погружения, а также более эффективное обесшумливание новых АПЛ [8]. При создании многоцелевых АПЛ «Барракуда» широко применялись методы акустического проектирования, реализованные ранее на ПЛАРБ типа «Триумфан» и усовершенствованные с учетом новых акустических технологий, примененных на новейших многоцелевых АПЛ США и Великобритании [15]. При этом принимались во внимание ограниченные финансовые возможности Франции, аналогично тому, как это было реализовано при создании многоцелевых АПЛ типа «Рюби» (по оценке [16] на 1983 г. АПЛ «Рюби» водоизмещением 2,7 тыс. т стоила 350 млн долл., тогда как многоцелевая АПЛ Великобритании типа «Графальгар» с водоизмещением 5,2 тыс. т стоила 530 млн долл.).

Для достижения низкой шумности АПЛ «Барракуда» было решено использовать ядерный реактор типа К-15, разработанный ранее для ПЛАРБ типа «Триумфан» [17] и «гибридную» энергоустановку, включающую две турбины и редуктор, работающие на больших скоростях, а также электродвижение на самых малых и поисковых скоростях хода. Для этого используются два электродвигателя – маломощный для малозумного хода и более мощный для работы на поисковых скоростях хода [18].

С учетом современной тенденции к повышению «акустических» (малозумных и поисковых) скоростей хода многоцелевых АПЛ [15, 16], которая впервые была реализована на АПЛ США типа «Сивулф»,



**Рис. 12.** Многоцелевая атомная подводная лодка «Сюффрен» S 635 во время испытаний в море

**Fig. 12.** Suffren (S-635) nuclear-powered attack submarine during sea trials



**Рис. 13.** Самоходная модель ML1 (2011 г.) атомной подводной лодки типа «Сюффрен»

**Fig. 13.** Self-propelled model ML1 (year 2011) of Suffren-class nuclear-powered attack submarine

диапазон «акустических» скоростей хода многоцелевой АПЛ «Барракуда» согласно [18] будет в два раза выше, чем у АПЛ «Рюби» (ориентировочно 12–16 уз вместо 6–8 уз). Для снижения шума, излучаемого при работе движителя, он выполнен по типу низкооборотного pump-jet, аналогичного примененному ранее на ПЛАРБ типа «Триумфан».

Максимальная скорость хода многоцелевых французских АПЛ «Барракуда» задана не менее 25 уз (в реальности более 25 уз) [19], т.е. близка к скорости хода современных АПЛ США типа «Вирджиния», у которых она составляет также 25 уз, а реально может достигать 28 уз [20]. Передача флоту заложенной в 2007 г. головной АПЛ типа «Барракуда», получившей название «Сюффрен» (Suffren S 635), состоялась в 2020 г., а ввод в полную оперативную готовность для действий в составе ВМС – в 2022 г., после прохождения всех испытаний (рис. 12). Морские испытания второй АПЛ типа «Барракуда» – Duguay-Trouin, заложенной в 2009 г., начались в 2023 г.

Многоцелевая АПЛ «Сюффрен» имеет следующие характеристики: водоизмещение 4,725/5,3 тыс. т, длина 99,5 м, диаметр прочного корпуса 8,8 м, глубина погружения 350–400 м [19]. Имеющиеся 4 ТА, установленные под углом к оси корпуса, могут использоваться для выпуска как тяжелых торпед, так и крылатых ракет, общий боезапас 20 ед. Антенны ГАК включают носовую и бортовые широкоапертурные антенны, а также тонкую двухлинейную буксируемую антенну.

Впервые на атомных ПЛ у «Сюффрен» применено Х-образное кормовое оперение, которое позволяет снизить гидролокационное отражение от него в направлениях, близких к горизонтальной плоскости. Носовые горизонтальные рули с ОВУ перенесены на корпус, а носовая оконечность ОВУ имеет (для исключения подпорного вихря) прилив внизу, подобно АПЛ США типа «Вирджиния». Выдвижные устройства выполнены аналогично «Вирджинии» телескопического (непроникающего в корпус) типа и включают оптронные мачты вместо перископов. Внутри ОВУ в верхней части выходной шахты имеется шлюзовая (спасательная) доковая камера на 5 человек [18]. Композитные материалы широко использованы для изготовления деталей надстройки, ОВУ, оперения и носового обтекателя ГАК, а также насадки водометного движителя.

Согласно [13] для проверки принятых на АПЛ типа «Сюффрен» технических решений по ходкости и бесшумности в 2011 г. построена и испытана масштабная самоходная модель ML1 (рис. 13).

В сравнении с характеристиками новейшей многоцелевой АПЛ США типа «Вирджиния» [20] французская АПЛ типа «Сюффрен» имеет значительно меньшие (на 2,5 тыс. т) подводное водоизмещение и размеры (длина меньше на 15 м, а диаметр корпуса – на 1,6 м). Максимальная скорость хода указанных АПЛ примерно одинакова, но «акустическая» скорость «Сюффрен» меньше, чем у «Вирджинии» (примерно 15 уз по сравнению с 20–25 уз). Уровни излучаемого шума АПЛ «Сюффрен» скорее всего немного выше, чем у АПЛ типа «Вирджиния», являющихся одними из самых малозумных зарубежных многоцелевых АПЛ [20].

Тем не менее достигнутые при акустическом проектировании АПЛ «Сюффрен» акустические характеристики являются достаточно хорошими для современных многоцелевых АПЛ. Уменьшение водоизмещения и размеров АПЛ, как уже отмечалось, способствует повышению скрытности как по акустическим полям (первичному и вторичному), так и по остальным физическим полям. Менее сильным является вооружение АПЛ «Сюффрен», включающее 4 ТА, из которых могут выпускаться как торпеды, так и крылатые ракеты, но отсутствуют 12 вертикальных пусковых установок крылатых ракет, как у «Вирджинии». Можно предположить, что стоимость АПЛ типа «Сюффрен» значительно меньше стоимости АПЛ типа «Вирджиния».

## Перспективные ракетносцы нового поколения

Future ballistic-missile submarines (new generation)

Современные ПЛАРБ типа «Огайо» и «Вэнгард», составляющие основу сил ядерного сдерживания США и Великобритании, были спроектированы и начали

строиться в конце 1970-х гг. и в начале 1990-х гг. соответственно. К настоящему времени они достигают конца срока службы, и в ближайшее время им понадобится замена. Разработаны проекты и начинается строительство ПЛАРБ нового поколения, в США – типа «Колумбия» (Columbia SSBN 826), а в Великобритании – типа «Дредноут» (Dreadnought).

Франция также начала работы по созданию перспективных ПЛАРБ нового поколения (SNLE-3G) на замену четырем ПЛАРБ типа «Триумфан», которые вступили в строй в 1997–2010 гг. Перспективные ПЛАРБ SNLE-3G имеют отличия от новых ПЛАРБ США и Великобритании [21], но совпадают по усиленному вниманию к повышению их скрытности, прежде всего акустической. Сравнение облика и основных характеристик перспективных ПЛАРБ [21] показано на рис. 14.

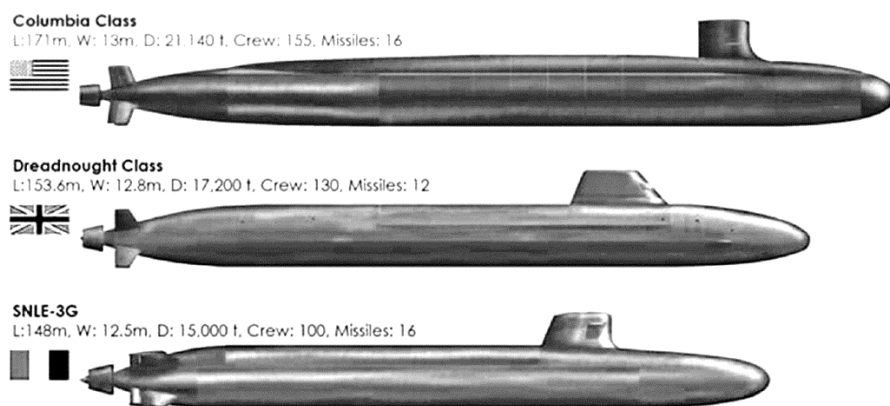
Перспективные ПЛАРБ Франции (SNLE-3G) будут иметь традиционно меньшие размеры и водоизмещение (15 тыс. т по сравнению с 21 тыс. т у ПЛАРБ США), поскольку на них будет установлена более компактная атомная энергоустановка и размещены меньшие по размерам баллистические ракеты собственной разработки. Общим для всех перспективных ПЛАРБ будет наличие малошумного движителя водометного типа (низкооборотного pump-jet) и Х-образного кормового оперения со сниженным гидролокационным отражением в горизонтальной плоскости.

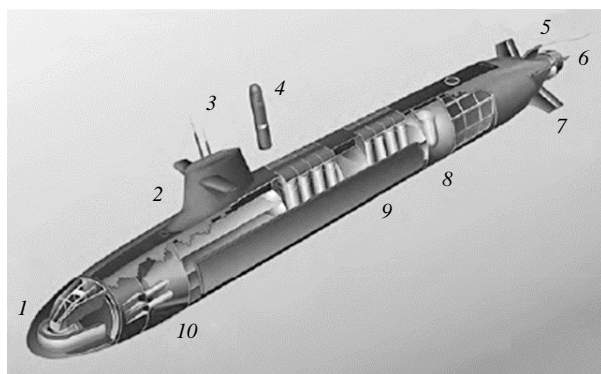
При создании перспективной ПЛАРБ Франции SNLE-3G (рис. 15) широко используются методы и средства акустического проектирования, разработанные и усовершенствованные в ходе проектирования современных ПЛАРБ типа «Триумфан» и многоцелевых АПЛ типа «Сюффрен».

Планируется увеличение длины отсека паротурбинной установки (примерно на 10 м) для

**Рис. 14.** Перспективные ракетносцы США, Великобритании и Франции

**Fig. 14.** Future ballistic-missile submarines of the USA, the UK, and France





**Рис. 15.** Перспективный ракетоносец Франции SNLE-3G: 1 – носовая подковообразная антенна гидроакустического комплекса с увеличенной апертурой; 2 – ограждение выдвижных устройств с носовыми горизонтальными рулями; 3 – непроницающие в прочный корпус телескопические мачты ВУ; 4 – баллистические ракеты в 16 шахтах; 5 – стабилизатор–плавник с устройством для выпуска гибкой протяженной буксируемой антенны; 6 – движитель pump-jet; 7 – X-образное кормовое оперение; 8 – ядерный реактор; 9 – широко-апертурная бортовая антенна гидроакустического комплекса; 10 – четыре торпедных аппарата

**Fig. 15.** Future French ballistic-missile submarine SNLE-3G: 1 – horseshoe-shaped bow sonar antenna with increased aperture; 2 – sail with sail planes; 3 – non-hull-penetrating telescopic masts; 4 – ballistic missiles (16 silos); 5 – fin stabilizer with releasing gear of flexible towed array; 6 – pump-jet propulsor; 7 – X-shaped stern fins; 8 – nuclear reactor; 9 – wide-aperture side-scanning sonar; 10 – torpedo tubes (x4)

размещения менее виброактивного оборудования и высокоэффективных средств акустической защиты, позволяющих снизить вклад оборудования в шум, излучаемый ПЛАРБ SNLE-3G на малой скорости боевого патрулирования [22]. Ожидается, что излучаемый ПЛАРБ SNLE-3G шум будет ниже уровней шумов океана (типичных шумов глубокого моря).

Помимо снижения шумности ПЛАРБ SNLE-3G, большое внимание уделяется повышению эффективности и снижению помех работе ее ГАК. Новый ГАК с усовершенствованными системами обработки сигналов (в т.ч. с использованием систем искусственного интеллекта) будет включать показанные на рис. 15 антенны, которые обеспечат круговой обзор гидроакустической обстановки в широком диапазоне частот [22], включая низкие частоты (0,3–3 кГц).

Корпус ПЛАРБ Франции (SNLE-3G) предполагается облицевать новым гидроакустическим

покрытием, позволяющим снизить уровни излучаемого шума и отраженного гидролокационного сигнала, а также снизить сопротивление потоку воды.

Традиционно для подводного кораблестроения Франции соблюдаются требования ограничения финансовых затрат на проектирование, постройку и эксплуатацию, т.е. снижения стоимости жизненного цикла перспективной ПЛАРБ. Предполагается [21, 22], что первый из четырех перспективных ракетоносцев Франции SNLE-3G вступит в строй в 2032 г.

## Заключение

### Conclusion

Выполненный обзор работ по развитию методов акустического проектирования АПЛ Франции в обеспечение достижения заданных акустических характеристик создаваемых АПЛ, прежде всего уровней излучаемого шума и помех работе ГАК, позволил определить основные особенности акустического проектирования многоцелевых и ракетных АПЛ, характерные для подводного кораблестроения Франции.

Установлено, что разработанная французскими специалистами при создании современных ПЛАРБ типа «Триумфан» и многоцелевых АПЛ типа «Сюффрен» методология акустического проектирования АПЛ обеспечивает достижение заданных уровней шума и помех работе ГАК при ограниченном водоизмещении и уменьшенных размерах АПЛ Франции по сравнению с АПЛ ведущих морских держав. Это в определенной степени облегчает достижение высокой скрытности и повышение боевой эффективности АПЛ, а также позволяет снизить стоимость их жизненного цикла.

Технологии акустического проектирования АПЛ будут совершенствоваться и использоваться при создании перспективных ракетоносцев Франции.

## Список использованной литературы

1. Савенко В.В. Совершенствование методов акустического проектирования кораблей // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 3(385). С. 131–144. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-131-144.
2. Friedman N. Submarine design and development. Annapolis : Naval Institute Press, 1984. 192 p.
3. Jane's Fighting Ships, 1991–1992. 94<sup>th</sup> ed. Coulsdon ; Alexandria : Jane's information group, 1991. [100], 842 p.

4. Современные и перспективные многоцелевые АПЛ ВМС США : аналитический отчёт. Санкт-Петербург : ЦКБ МТ «Рубин», 2003. 62 с.
5. *Савенко В.В., Шлемов Ю.Ф.* Малошумные дизель-электрические подводные лодки // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 61(345). С. 141–154.
6. *Александров Ю.И., Гусев А.Н.* Боевые корабли мира на рубеже XX–XXI веков. Ч. 1: Подводные лодки. Санкт-Петербург : Галера Принт, 2000. 301 с.
7. *Полмар Н., Мур К.Дж.* Подводные лодки холодной войны : проектирование и строительство американских и советских подводных лодок / [пер. с англ.: Б.Ф. Дронов]. Санкт-Петербург : СПМБМ «Малахит», 2011. 469 с.
8. *Wertheim E.* The Naval Institute Guide to combat fleets of the world. Their ships, aircraft, and systems. 15<sup>th</sup> ed. Annapolis : Naval Institute Press, 2007. XXVI, 1058, [4] p.
9. *Федонюк Н.Н.* Применение полимерных композиционных материалов в зарубежном кораблестроении : обзор по материалам прессы, 1990–2006 гг. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2009. 114 с.
10. *Jane's Fighting Ships, 2013–2014 / ed. S. Saunders.* London : IHS Global Limited, 2013. 1030 p.
11. Оптимизация уровней физических полей подводных лодок при действиях в мелководных районах // Дайджест зарубежной прессы. ВМС и кораблестроение. 2006. Вып. 43. С. 24–27.
12. *Савенко В.В.* Снижение шумности атомных подводных лодок Великобритании // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 61(345). С. 125–140.
13. Использование масштабных моделей при проектировании ПЛ : аналитический отчёт. Санкт-Петербург : ЦКБ МТ «Рубин», 2014. Вып. 19. 131 с.
14. Акустическое проектирование подводных лодок типа «Scorpene» // Дайджест зарубежной прессы. ВМС и кораблестроение. 2004. Вып. 36. С. 97–101.
15. *Zimmerman S.* Submarine design for the 21<sup>st</sup> century. Arlington : Pasha Pub., 1993. 182 p.
16. *Савенко В.В.* Акустические технологии на многоцелевых атомных подводных лодках // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 52(336). С. 29–46.
17. *Василенко В.А., Каплиенко А.В., Петров С.А.* Перспективы развития корабельных ЯЭУ зарубежных государств. Санкт-Петербург, 2014. 346 с.
18. Атомная подводная лодка многоцелевого назначения ВМС Франции // Дайджест зарубежной прессы. ВМС и кораблестроение. 2021. Вып. 99. С. 20–22.
19. *Jane's Fighting Ships, 2020–2021 / A. Pape.* Coulsdon : IHS Global Limited, 2020. 989 p.
20. *Polmar N.* The Naval institute guide to the ships and aircraft of the U.S. fleet. 19<sup>th</sup> ed. Annapolis, Maryland, 2013. 650 p.
21. Подводные ракетноносцы нового поколения с повышенной скрытностью // Дайджест зарубежной прессы. ВМС и кораблестроение. 2023. Вып. 105. С. 87–89.
22. Проработка перспективного подводного ракетноносца ВМС Франции // Дайджест зарубежной прессы. ВМС и кораблестроение. 2021. Вып. 98. С. 27–28.
23. Подводные лодки типа «Редутабль» // Википедия : [сайт]. [Б. м.], 2023. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Подводные\\_лодки\\_типа\\_«Редутабль»](https://ru.wikipedia.org/wiki/Подводные_лодки_типа_«Редутабль») (дата обращения: 04.04.2024).

## References

1. *Savenko V.V.* Refinement of acoustic design methods for ships // Transactions of Krylov State Research Centre. 2018. Vol. 3(385). P. 131–144. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-131-144 (*in Russian*).
2. *Friedman N.* Submarine design and development. Annapolis : Naval Institute Press, 1984. 192 p.
3. *Jane's Fighting Ships, 1991–1992.* 94th ed. Coulsdon ; Alexandria : Jane's information group, 1991. [100], 842 p.
4. Modern and future ballistic-missile submarines of US Navy. Analytical Report. St. Petersburg : CDB MT Rubin, 2003. 62 p. (*in Russian*).
5. *Savenko V.V., Shlemov Yu.F.* Silent diesel-electric submarines // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2011. Vol. 61(345). P. 141–154 (*in Russian*).
6. *Alexandrov Yu.I., Gusev A.N.* Naval ships over the world on the eve of the 21st century. Part 1. Submarines. St. Petersburg : Galeya Print, 2000. 301 p. (*in Russian*).
7. *Polmar N., Moore K.J.* Cold War Submarines: Design and Construction of U.S. and Soviet Submarines, 1945–2001 (*Russian translation* by B.F. Dronov). St. Petersburg : Malakhit Design Bureau, 2011. 469 p.
8. *Wertheim E.* The Naval Institute Guide to combat fleets of the world. Their ships, aircraft, and systems. 15<sup>th</sup> ed. Annapolis : Naval Institute Press, 2007. XXVI, 1058, [4] p.
9. *Fedonyuk N.N.* Application of polymeric composite materials in foreign shipbuilding. Press review. 1990–2006. St. Petersburg : Krylov Central Research Institute, 2009. 114 p. (*in Russian*).
10. *Jane's Fighting Ships, 2013–2014 / ed. S. Saunders.* London : IHS Global Limited, 2013. 1030 p.
11. Optimization of submarine signatures for operations in shallow waters // Navy and Shipbuilding Nowadays. Digest of foreign press. 2006. Vol. 43. P. 24–27 (*in Russian*).
12. *Savenko V.V.* Noise mitigation for nuclear submarines of the Royal Navy // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2011. Vol. 61(345). P. 125–140 (*in Russian*).

13. Application of scaled models in submarine design. Analytical Report. St. Petersburg : CDB ME Rubin, 2014. Vol. 19. 131 p. (*in Russian*).
14. Acoustic design of Scorpene-class submarines // Navy and Shipbuilding Nowadays. Digest of foreign press. 2004. Vol. 36. P. 97–101 (*in Russian*).
15. *Zimmerman S.* Submarine design for the 21<sup>st</sup> century. Arlington : Pasha Pub., 1993. 182 p.
16. *Savenko V.V.* Acoustic technologies on nuclear-powered attack submarines // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2010. Vol. 52(336). P. 29–46 (*in Russian*).
17. *Vasilenko V.A., Kaplienko A.V., Petrov S.A.* Development prospects of nuclear power at foreign navies. St. Petersburg, 2014. 346 p. (*in Russian*).
18. Nuclear-powered attack submarine of the French Navy // Navy and Shipbuilding Nowadays. Digest of foreign press. 2021. Vol. 99. P. 20–22 (*in Russian*).
19. Jane's Fighting Ships, 2020-2021 / A. Pape. Coulsdon : IHS Global Limited, 2020. 989 p.
20. *Polmar N.* The Naval institute guide to the ships and aircraft of the U.S. fleet. 19th ed. Annapolis, Maryland, 2013. 650 p.
21. New-generation ballistic-missile submarines with enhanced stealth performance // Navy and Shipbuilding Nowadays. Digest of foreign press. 2023. Vol. 105. P. 87–89 (*in Russian*).
22. Research design of future ballistic-missile submarine of the French Navy // Navy and Shipbuilding Nowadays. Digest of foreign press. 2021. Vol. 98. P. 27–28 (*in Russian*).
23. Redoutable-class submarine // Wikipedia (Russian edition). 2023. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Подводные\\_лодки\\_типа\\_«Редутабль»](https://ru.wikipedia.org/wiki/Подводные_лодки_типа_«Редутабль») (Accessed: 04.04.2024).

---

#### Сведения об авторах

*Савенко Валентин Викторович*, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заместитель начальника лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-49-85.

*Чижов Виталий Юрьевич*, начальник отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-49-20.

#### About the authors

*Valentin V. Savenko*, Cand. Sci., Lead Researcher, Deputy Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-85.

*Vitaly Yu. Chizhov*, Head of Division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-20.

Поступила / Received: 14.02.24  
Принята в печать / Accepted: 17.05.24  
© Савенко В.В., Чижов В.Ю., 2024