

В.В. Савенко

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

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРАБЛЕЙ

**Объект и цель научной работы.** Рассмотрены методы акустического проектирования кораблей с целью определения путей совершенствования этих методов.

**Материалы и методы.** Критический обзор методов и мероприятий по акустическому проектированию кораблей и основных особенностей их практического применения в обеспечение достижения заданных акустических характеристик проектируемых кораблей.

**Основные результаты.** Разработаны предложения по совершенствованию методов акустического проектирования кораблей.

**Заключение.** Установлено, что без совершенствования методологии акустического проектирования невозможно обеспечить дальнейшее улучшение акустических характеристик перспективных кораблей.

**Ключевые слова:** проектирование, корабль, акустические характеристики.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Савенко В.В. Совершенствование методов акустического проектирования кораблей. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 3(385): 131–144.

УДК 629.5.002.63:534

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-131-144

V.V. Savenko

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

### REFINEMENT OF ACOUSTIC SHIP DESIGN METHODS

**Object and purpose of research.** Methods of acoustic ship design are considered to explore the ways to improve these methods.

**Materials and methods.** Critical review of methods and measures related to acoustic design of ships and their practical application to achieve the specified acoustic characteristics in the ship design process.

**Main results.** Proposals on how to improve the methods of acoustic ship design have been elaborated.

**Conclusion.** It is found that acoustic ship design methods need to be refined if further improvement of ship acoustic performance is intended in future.

**Key words:** design, ship, acoustic characteristics.

Author declares lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Savenko V.V. Refinement of acoustic ship design methods. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 3(385): 131–144 (in Russian).

UDC 629.5.002.63:534

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-131-144

## Введение

### Introduction

Проектирование кораблей, несмотря на разработку отдельных систем автоматического проектирования, до настоящего времени остается в некоторой степени искусством, а его результаты во многом зависят от опыта проектанта и определяются его творческим замыслом. Как отмечал известный специалист США в области проектирования кораблей Т. Джилмер [1], проектирование корабля, как и всякое проектирование, предполагает наличие творческого замысла, его развитие и осуществление. Цель проектирования – выразить и передать строителю основной замысел корабля, как подвижного плавучего сооружения, каким бы простым или сложным он ни был. Вопросы проектирования современного корабля рассмотрены в [1] на основе сложившейся в США практики системного проектирования боевых надводных кораблей (НК) и подводных лодок (ПЛ), включая исследовательские проектные работы, во многом определяющие облик проектируемого корабля.

В работе отечественных авторов, посвященной проектированию атомных подводных лодок [2], дана более конкретная формулировка: «Цель проектирования подводной лодки, как и всякого корабля, – определение ее элементов, а также разработка документации, необходимой для постройки ПЛ на судостроительном заводе и ее дальнейшей эксплуатации. Определенные в процессе проектирования элементы должны быть оптимальными в рамках предъявленных к ПЛ требований и технических возможностей». Помимо изложения технических проблем и вопросов, возникающих при проектировании атомных подводных лодок, в работе [2] содержится описание их устройства, включая корпус, движители, энергетические установки, оборудование и системы, средства обитаемости (в том числе средства снижения шумности в отсеках), элементы защиты (в том числе средства акустической защиты).

Методы проектирования современных кораблей (включая ПЛ) являющихся одними из наиболее сложных видов инженерных сооружений, обеспечивают проектное обоснование и обеспечение заданных общекорабельных характеристик (например, прочностных, ходовых и др.), а также акустических параметров корабля. Вопросы общего проектирования кораблей изложены во многих работах отечественных и зарубежных авторов. Во многих из них, например в [3–7], особое внимание уделено вопросам акустической защиты проектируемых ПЛ,

для которых вопросы скрытности по акустическим полям имеют первостепенное значение.

Согласно сложившимся к настоящему времени представлениям, составную часть общего проектирования кораблей, обеспечивающую выполнение требований заказчика к заданным акустическим параметрам, называют акустическим проектированием, понимая под этим проектное обеспечение требуемых акустических характеристик кораблей.

В той или иной мере методы и руководства по акустическому проектированию кораблей применяются при разработке проектов практически всех современных боевых НК и ПЛ, а также при проектировании гражданских судов. Особое внимание к вопросам проектного обеспечения акустических характеристик боевых кораблей обусловлено стремлением повысить их боевую эффективность, а именно улучшить акустическую скрытность малозумных ПЛ, а также обеспечить защищенность ПЛ и НК от поражения боевыми средствами с акустическими каналами наведения. Эти вопросы изложены, например, в работах [8–12]. Кроме того, для всех классов и типов ПЛ, НК и гражданских судов действуют санитарные нормы по обитаемости, поэтому задачи акустического проектирования включают выполнение предъявляемых требований по уровням шума и вибрации в обитаемых служебных и жилых помещениях проектируемого корабля, направленные на обеспечение заданных условий работы (например, требование безошибочной слышимости команд) и комфортных условий отдыха команды и пассажиров. Указанные санитарные нормы по уровням шума и вибрации на судах приведены, например, в [13].

Помимо указанных норм, в 1995 г. в рекомендациях ICES 209 [14] были сформулированы первые международные требования экологов по ограничению вредного влияния подводного шума гражданских исследовательских и рыболовных судов на жизнь морских обитателей.

Несмотря на огромный опыт, накопленный при проектировании кораблей различных классов, акустическое проектирование до настоящего времени зачастую определяется опытом и конкретным уровнем знаний специалистов-проектантов в области вибраций и шумоизлучения кораблей. Практически отсутствуют систематически изложенные общие методы и руководства (методология) акустического проектирования кораблей, обеспечивающего проектное обеспечение их заданных акустических характеристик. Поэтому представляется целесообразным

ным выполнить критический обзор, систематизацию и анализ существующих методов и руководств акустического проектирования, а также определить пути их совершенствования, направленного на улучшение акустических характеристик проектируемых кораблей.

## Цель и задачи акустического проектирования кораблей

### Purpose and tasks of acoustic ship design

Общей целью акустического проектирования кораблей является проектное обеспечение выполнения требований заказчика к акустическим (т.е. вибрационным и шумовым) характеристикам кораблей. Задачи акустического проектирования определяются конкретными требованиями заказчика, которые могут предъявляться к различным акустическим характеристикам в зависимости от типа и функционального назначения проектируемого корабля – ПЛ, НК или гражданского судна.

В наиболее полном объеме задачи акустического проектирования обычно решаются при проектировании ПЛ, поскольку для этого типа кораблей первостепенное значение имеют вопросы обеспечения акустической скрытности по первичному и вторичному гидроакустическим полям, а также минимальных помех работе гидроакустических станций [15–21]. Именно для ПЛ традиционно задаются наиболее «жесткие» требования по указанным акустическим характеристикам, что вызывает необходимость применять практически все известные методы и средства акустического проектирования.

Не менее важно обеспечение заданных санитарных уровней шума и вибрации в обитаемых служебных и жилых помещениях кораблей, эти вопросы изложены, например, в [22]. Для ПЛ эти санитарные требования могут быть особенно важными в специфических условиях подводного плавания подо льдами [23].

Принимая во внимание вышеизложенное, в число требований заказчика, определяющих задачи акустического проектирования, в общем случае могут входить следующие акустические характеристики корабля:

- уровни первичного гидроакустического поля, т.е. уровни подводного шума, излучаемого кораблем (ПЛ или НК) в окружающую водную среду;
- уровни вторичного гидроакустического поля корабля (ПЛ), т.е. сила цели при формировании отраженного акустического поля в случае об-

лучения ПЛ внешним излучателем звука – гидролокатором;

- уровни корабельных акустических помех (КАП) работе собственных гидроакустических станций корабля;
- уровни шума и вибрации в обитаемых служебных и жилых помещениях корабля.

Конкретизация задач акустического проектирования выполняется в соответствии с установленным заказчиком перечнем требований к акустическим характеристикам проектируемого корабля. Это можно показать на следующих примерах.

Известно, что для ряда гражданских судов, включая научно-исследовательские (НИС), рыболовные и некоторые другие, помимо санитарных норм и требований по уровням шума и вибрации в служебных и жилых помещениях проектируемого судна, в последнее время разработаны национальные требования к максимально допустимым уровням подводного шума (например, приведенные в Правилах Регистра Норвегии [24]). Указанные требования сформулированы исходя из необходимости ограничения вредного воздействия шума на морских обитателей, а также минимизации помех работе собственных гидроакустических станций судов, и в основном соответствуют международным рекомендациям ICES 209 [14].

Конкретные цели, поставленные и реализованные при акустическом проектировании современного корабля, можно проиллюстрировать работами, выполненными в обеспечение создания малошумных НИС в США [25–28]. При проектировании малого НИС Hugh R. Sharp (его длина меньше 50 м) были предъявлены требования по обеспечению весьма низких уровней подводного шума на скорости хода 8 уз, удовлетворяющих международным рекомендациям ICES 209 [14]. Отмечалось, что измеренные уровни шума одного из обычных (ранее построенных) НИС на 4–12 дБ превышают требования ICES 209 на частотах от 100 до 800 Гц. Еще выше шумность коммерческого буксира, уровни шума которого превышают требования на 20 дБ и более во всем диапазоне частот. Поэтому акустическое проектирование малого НИС потребовало поиска и разработки новых технических решений и мероприятий, итогом которых стало успешное достижение поставленных целей.

Следует отметить, что при акустическом проектировании другого (большого) НИС США Oscar Dyson, длина которого превышает 50 м, те же уровни подводного шума согласно ICES 209 были заданы на скорости хода 11 уз, что весьма усложнило

решение поставленной задачи. Поэтому для достижения заданных уровней шума были использованы методы и руководства акустического проектирования, разработанные применительно к боевым кораблям («военные» акустические технологии [27]).

Таким образом, цели и задачи акустического проектирования кораблей определяют выбор применяемых в процессе проектирования методов и руководств.

## Методы акустического проектирования кораблей

### Methods of acoustic ship design

Основой методологии, т.е. методического подхода к акустическому проектированию кораблей, является поиск и выбор наиболее эффективных технических решений, позволяющих обеспечить достижение требуемых акустических характеристик. Обычно для решения основных задач общего проектирования кораблей используется метод последовательных приближений, который сочетается с методом вариаций. В силу взаимозависимости общекорабельных и акустических характеристик при поиске и выборе

рациональных акустических решений необходимо учитывать и предъявленные общие ограничения, например, по водоизмещению, мощности главной энергетической установки, скорости хода проектируемого корабля [29]. При этом, особенно в начале проектирования, неизбежен поиск вариантов компромиссных решений, позволяющих совместить требуемые общекорабельные и акустические характеристики корабля, которые зачастую взаимосвязаны и противоположны по сути. Так, к примеру, обычно повышение скорости корабля ведет к увеличению вибрации и шума, а для повышения эффективности средств снижения вибрации и шума, применяемых на кораблях, как правило, необходимо увеличивать их массо-габаритные характеристики.

На основании сложившегося к настоящему времени опыта можно составить типовую (общую) структуру методологии, т.е. методов (мероприятий) и руководств (проектных средств), применяемых в процессе акустического проектирования корабля. Алгоритм (структура) указанных методов акустического проектирования, в которой реализуется известная спираль проектирования корабля, приведен на рис. 1.



Рис. 1. Структура методов акустического проектирования корабля

Fig. 1. Structure of acoustic ship design methods

Таким образом, методы и руководства акустического проектирования кораблей в наиболее общем виде могут включать следующие мероприятия.

1. Поиск наиболее эффективных технических решений, обеспечивающих требуемые акустические характеристики в пределах заданных общепроектных характеристик корабля.
2. Анализ проектных материалов корабля-прототипа и сведений об основных технических решениях, обеспечивающих его требуемые акустические характеристики.
3. Выбор рациональных (компромиссных) вариантов технических решений, позволяющих совместить общекорабельные и акустические требования.
4. Выполнение расчетных оценок ожидаемых акустических характеристик вариантов корабля с использованием следующих методических материалов:
  - физико-математические модели (ФММ) формирования акустических характеристик;
  - методики расчетной оценки акустических характеристик;
  - расчетно-аналитические методы оценки акустических характеристик;
  - результаты экспериментальных исследований акустических характеристик.
5. Выявление необходимости корректировки проекта корабля.
6. Определение достаточности выбранных решений для достижения поставленных целей акустического проектирования корабля.

Применение перечисленных методов и мероприятий, являющихся основными составляющими методологии акустического проектирования кораблей, обеспечивает достижение поставленных целей (требований заказчика) по достижению заданных акустических характеристик.

## **Основные особенности практического применения методов акустического проектирования кораблей**

Main considerations related to practical implementation of acoustic ship design methods

Рассмотрим подробнее основные особенности практического применения методов акустического проектирования кораблей.

Поиск целесообразных технических (в том числе компромиссных) решений, которые могут быть при-

менены на проектируемом корабле, обычно выполняется на ранних стадиях проектирования на основе известных сведений о характеристиках корабля-прототипа или нескольких таких кораблей. При этом могут использоваться следующие сведения:

- проектные материалы и сведения об основных технических решениях, обеспечивающих требуемые акустические характеристики корабля, принятого в качестве прототипа или аналога, включая такие параметры, как архитектура, обводы и выступающих частей, движение и рули, шумящее и виброактивное оборудование и системы, внутрикорпусные и фундаментные конструкции, размещение и компоновка оборудования, внутрикорпусные и наружные средства акустической защиты и т.д.;
- сведения об измеренных (реально достигнутых) акустических (вибрационных и шумовых) характеристиках корабля, принятого в качестве прототипа, а также о характеристиках его оборудования, движителей и других элементов;
- сведения о характеристиках (эффективности, массе, габаритах), примененных на корабле-прототипе средств акустической защиты, о характеристиках других существующих и новых (разрабатываемых) средств акустической защиты;
- другие сведения о формировании акустических характеристик корабля-прототипа.

Помимо перечисленных сведений, при акустическом проектировании кораблей необходимо достаточно хорошо знать основные источники и средства снижения вибрации и шума современных кораблей, сведения о которых изложены, например, в работах [30–36].

Эти и другие сведения об устройстве корабля-прототипа и его систем, например, приведенные в [37–44], используются начиная с самых ранних стадий проектирования корабля, для предварительного выбора рациональных (в том числе компромиссных) сочетаний технических решений, позволяющих совместить общекорабельные и акустические требования. При этом могут быть рассмотрены и всесторонне оценены различные проектные варианты корабля со всеми возможными сочетаниями отдельных технических решений по корпусу, энергетической установке, движителю, полезной (боевой) нагрузке и т.д., а также по акустической защите корабля.

Основные стадии проектирования корабля, как правило, сопровождаются периодическим выпол-

нением расчетных оценок ожидаемых акустических характеристик выбранных вариантов корабля с использованием соответствующих методик (методических материалов), что позволяет определить достаточность выбранных решений или выявить необходимость корректировки проекта корабля для достижения поставленных целей акустического проектирования (т.е. реализуется известная спираль проектирования корабля).

На более поздних стадиях проектирования корабля используются методы и руководства по акустическому проектированию его отдельных элементов, таких, как внутрикорпусные и фундаментные судовые конструкции, виброизолирующие крепления, системы трубопроводов и др. Так, например, акустическое проектирование судовых конструкций может выполняться согласно работе [45], другие средства совершенствования отдельных элементов и оборудования корабля изложены в работах [46–47].

После использования на определенном этапе проектирования таких методов и выбора наиболее подходящего варианта корабля обычно выполняются уточненные расчетные оценки его акустических характеристик с целью определения достаточности примененных решений или разработки дополнительных рекомендаций по улучшению акустических характеристик для их доведения до заданных требований.

Расчетные методы оценок ожидаемых акустических характеристик основаны на зависимостях, содержащихся в физико-математических моделях (ФММ) формирования акустических характеристик кораблей. Разработанные по результатам теоретических и экспериментальных исследований, ФММ описывают процессы формирования следующих акустических характеристик кораблей:

- первичного гидроакустического поля;
- вторичного гидроакустического поля;
- корабельных акустических помех;
- шума и вибрации в обитаемых служебных и жилых помещениях кораблей.

Основные научные положения ФММ формирования акустических характеристик кораблей разработаны в середине и конце прошлого века и приведены, например, в работах [48–56]. Отдельные вопросы корабельной акустики освещены и развиты в более поздних работах отечественных авторов [57–61]. Зарубежные авторы также регулярно публикуют работы по измерениям и источникам шума и вибрации на кораблях, а также по ФММ их формирования. Обобщение сведений по этим вопросам

содержится, например, в справочнике по вибрации и шуму кораблей, выпущенном в 2006 г. регистром Ллойд (Великобритания) [62].

Наличие в научно разработанных ФММ зависимостей, характеризующих физические процессы формирования акустических параметров корабля в целом и его отдельных элементов, дает возможность выявить основные факторы, определяющие практические пути достижения заданных или снижения достигнутых уровней акустических и вибрационных характеристик корабля. Это позволяет принять рациональные технические решения, направленные на решение проектных задач в части достижения заданных акустических характеристик корабля.

Методики расчетной оценки уровней первичного гидроакустического поля, вторичного гидроакустического поля, корабельных акустических помех, шума и вибрации в обитаемых служебных и жилых помещениях корабля, разработанные на основе сформулированных в ФММ закономерностей происходящих физических процессов и характеризующих их соотношений, являются одним из наиболее эффективных традиционных средств акустического проектирования корабля. В качестве примера можно привести приближенный метод расчетной оценки подводного шума транспортных и промысловых судов [63] и методику расчета уровней шума в судовых помещениях [64].

Выполнение расчетных оценок с использованием соответствующих методик позволяет оценить эффективность различных технических решений и принять решение об их использовании в проекте для достижения заданных акустических характеристик, оценить достаточность принятых решений или принять решение о необходимости поиска и разработки дополнительных технических решений. Использование методик расчетной оценки шумовых и вибрационных характеристик корабля позволяет принимать рациональные технические решения начиная с самых ранних этапов проектирования и своевременно реализовывать мероприятия, обеспечивающие решение поставленных задач проектирования.

Весьма эффективным, активно развивающимся в последнее время практическим средством акустического проектирования являются расчетно-аналитические, в том числе конечно-элементные, методы моделирования проектируемых кораблей, основанные на возможностях современной вычислительной техники. Это позволяет виртуально моделировать проектируемый корабль и его элементы

(такие примеры приведены в [65–67]), а также уточнять процессы формирования его характеристик, в том числе виброакустических. При этом могут моделироваться как известные по прототипу, так и принципиально новые технические решения, применяемые при создании корабля и его элементов. Особым преимуществом виртуального моделирования является возможность определять (оценивать) в процессе проектирования ожидаемую акустическую эффективность принятых в проекте новых технических решений.

Важным дополнителем мероприятием акустического проектирования является использование результатов экспериментальных исследований, выполняемых с применением масштабных физических (акустических) моделей проектируемого корабля или его основных элементов. Акустические модели различного масштаба позволяют определять ожидаемую (реально достижимую на практике) эффективность новых технических решений и технологий, а также исключить случаи получения ошибочных результатов при выполнении расчетных оценок [68–69].

Создание специальных акустических крупномасштабных, в том числе самоходных, моделей ПЛ и НК для выполнения экспериментальных исследований в морских (озерных) акваториях [70] позволяет существенно снизить технические риски применения в проекте новых технических решений и в условиях, близких к натурным, подтвердить возможность достижения заданных акустических характеристик для таких сложных инженерных сооружений, как современные корабли. Указанные факторы приобретают еще более важное значение при создании ПЛ и НК новых типов, использующих новые технологии и материалы, когда близких прототипов практически не существует, а оценка ожидаемых акустических характеристик по имеющимся методикам весьма затруднительна.

Сложившаяся структура методов и мероприятий акустического проектирования кораблей может дополняться работами по входному виброакустическому контролю оборудования, поставляемого на строящийся корабль, а также по измерению шума и вибрации корабля после его постройки, выявлению источников возможных превышений заданных уровней и по разработке рекомендаций, позволяющих устранить выявленные превышения. Одним из примеров подобной структуры является карта процесса (блок-схема) акустического проектирования, строительства и сдачи малошумных НИС в США, приведенная в работе [26].

Примером практического применения современных методов и мероприятий акустического проектирования кораблей являются работы по созданию в США малошумных НИС [25–26], цели акустического проектирования которых приведены выше. В обеспечение достижения заданных уровней подводного шума этих НИС, удовлетворяющих международным рекомендациям ICES 209 [14], были приняты следующие технические решения.

При проектировании малого НИС Hugh R. Sharp (рис. 2, см. вклейку), длина которого меньше 50 м, а уровни подводного шума контролируются на скорости хода 8 уз, реализовано полное электродвижение и применены винторулевые колонки (ВРК). На судне предусмотрены четыре дизель-генератора (ДГ), два из которых установлены на двухкаскадную амортизацию и обеспечивают движение НИС на малошумных скоростях хода (включая 8 уз). Два других ДГ, как и остальное вспомогательное и научное оборудование, установлены на однокаскадные виброизолирующие крепления.

Промежуточная рама ДГ (рис. 3, см. вклейку) опирается на более мощные амортизаторы второго каскада комбинированного типа, они сочетают стальные пружины с резиновыми элементами. Снизу поверхности полостей рамы облицованы звукопоглощающим покрытием для снижения передачи колебательной энергии от рамы по воздуху на корпусные конструкции судна. На опорные и прилегающие корпусные конструкции судна (включая переборки) в районе виброактивного оборудования нанесены плиточные вибропоглощающие армированные покрытия общим весом 16 т.

Внутренние ограждения машинного отделения облицованы тремя слоями шумопоглощающего покрытия из керамического волокна, эффективного в диапазоне низких звуковых частот.

В качестве движителей использованы размещенные в кормовой оконечности НИС две ВРК типа Schottel Z Drive, что позволило обеспечить высокую маневренность судна без использования рулей и малую шумность при повороте винтов в тянущий режим. Каждый ВРК закреплен на круглой опорной плите (рис. 4, см. вклейку) с ребрами жесткости, виброизолированной от корпуса судна посредством специального упругого крепления. Это позволило эффективно виброизолировать электродвигатель, валы с зубчатыми передачами и гребным винтом, а также другие элементы ВРК от корпуса судна, а следовательно, снизить его вибрации и шумоизлучение под воздействием динамических усилий, передаваемых по валу от гребного

винта и от электропривода на корпус судна. Для снижения воздействия на корпус судна динамических усилий, передаваемых от винта через воду, расстояние (зазор) от диска винта до обшивки корпуса составило около половины его радиуса, а ближайшая к винту поверхность корпуса является обшивкой, виброизолированной от корпуса опорной плиты движителя, что также способствует уменьшению вибраций корпуса при работе винта.

Все работающие на ходу судна вспомогательные механизмы и оборудование малого НИС, так же как и трубопроводы систем охлаждения, установлены на опорных судовых конструкциях с использованием виброизолирующих креплений или упругих прокладок; в трубопроводах имеются виброизолирующие резиноармированные вставки. Применение вышеуказанных средств акустической защиты позволило значительно снизить вклад излучения корпуса, обусловленного работой виброактивного оборудования и систем малого НИС, в уровни его подводного шума.

Перечисленные технические решения существенно отличаются от «военных» акустических технологий, реализованных при акустическом проектировании больших НИС США типа Oscar Dyson (рис. 5, см. вклейку), длина которых превышает 50 м, водоизмещение составляет 2,5 тыс. т, максимальная скорость хода – 14 уз, а уровни подводного шума контролируются на скорости хода 11 уз.

В обеспечение достижения малошумности НИС на такой высокой скорости хода были приняты следующие основные технические решения:

- использование специальных («военных») технологий при проектировании корпуса и гребного винта НИС;
- полное электродвижение с дизель-генераторами, установленными на усовершенствованную двухкаскадную виброизоляция;
- жестко закрепленный безредукторный низкооборотный гребной электродвигатель специального малозумного исполнения (разработанный применительно к военным кораблям);
- виброизолированное вспомогательное оборудование и трубопроводы;
- применение вибро- и звукопоглощающих покрытий.

Дополнительно была разработана программа приемных испытаний виброактивного и шумящего оборудования, предназначенного для установки на НИС, а также программа сдаточных испытаний построенного корабля с измерением уровней подводного шума.

При акустическом проектировании большого НИС Oscar Dyson в обеспечение наилучших в плане акустики условий работы одновальной движительной установки с низкооборотным гребным винтом были разработаны новые обводы кормовой оконечности судна. Выбранные обводы характеризуются весьма протяженным кормовым участком, отличающимся тем, что примерно со середины длины корпуса начинается плавный переход от полной осадки к кормовому транцу, находящемуся вблизи ватерлинии судна. Под кормовым подзором размещен удлиненный сравнительно узкий обтекатель гребного вала, соединенный с корпусом вертикальной пластиной стабилизатора, выполняющей роль подкрепления (рис. 6, см. вклейку). Разработанные обводы позволили обеспечить минимальные неоднородности натекающего потока в диске винта, ось вращения которого параллельна продольной оси корабля. Таким образом, условия работы низкооборотного винта в натекающем потоке удалось максимально приблизить к условиям, характерным для ПЛ, что облегчило задачу снижения его шумности. Оставшиеся неоднородности натекающего потока в диске винта в значительной мере компенсируются саблевидной формой лопастей.

Вращение винта обеспечивается тандемом из двух гребных электродвигателей мощностью 1950 kW с максимальной скоростью вращения 128 об/мин. Малошумный низкооборотный гребной винт с пятью саблевидными лопастями обеспечивает отсутствие кавитации на скоростях хода вплоть до 12 уз. Проектирование винта, являющегося одним из основных источников подводного шума НИС на скорости хода 11 уз, было выполнено с участием специалистов, разрабатывающих малошумные движители для НК и ПЛ ВМС США.

При акустическом проектировании двухкаскадной виброизоляции ДГ было разработано новое конструктивное решение – применение вместо протяженной промежуточной рамы, в которой могут возникнуть низкочастотные резонансы, отдельных («точечных») промежуточных масс (блоков). Общая масса блоков составила 40 % от массы ДГ (рис. 7, см. вклейку).

Все работающие на ходу судна вспомогательные механизмы и оборудование НИС, так же как и трубопроводы систем охлаждения, установлены на виброизолирующие крепления; в трубопроводах имеются виброизолирующие резиноармированные вставки. На опорные и прилегающие корпусные конструкции (включая переборки) в районе виброактивного оборудования нанесены плиточные виб-



поглощающие покрытия с армирующим слоем общим весом 16 т.

Для снижения вклада в подводный шум НИС воздушного шума поверхности помещений с шумящим оборудованием облицованы звукопоглощающими (звукоизолирующими) покрытиями.

В процессе акустического проектирования широко применялись современные компьютерные методы и программное обеспечение, позволяющее строить трехмерные виртуальные модели всего НИС и его отдельных элементов. В качестве примера на рис. 8 (см. вклейку) приведены результаты расчета низшей частоты (110,9 Гц) и соответствующей формы изгибных колебаний опорной рамы ДГ, установленной на промежуточных «точечных» массах. Были выполнены расчетные оценки, обеспечившие возможность избегать в процессе проектирования совпадения собственных частот колебаний корабельных конструкций с частотами возбуждающих усилий со стороны механизмов и гребного винта, особенно на его оборотах, соответствующих контролируемой по шуму скорости хода.

Оценка ожидаемых уровней подводного шума выполнялась на основании расчетно-экспериментальных данных, включая учет всех путей распространения колебательной энергии от источников шума и вибраций до корпуса, а также использование передаточных функций при оценке уровней шума по известным вибрациям корпуса НИС.

В результате применения передовых методов акустического проектирования малошумных НИС удалось достичь весьма низких уровней подводного шума, удовлетворяющих рекомендациям ICES 209. Сравнение рекомендуемых (ICES Limit) и измеренных уровней подводного шума в третьоктавных полосах частот НИС FRV-40 Oscar Dyson на скорости хода 11 уз показано на рис. 9 (см. вклейку). Видно, что в низкочастотном диапазоне измеренные уровни шума меньше рекомендованных на 1–6 дБ, а на более высоких частотах измеренные уровни шума намного ниже требуемых: на частотах 250 Гц и выше достигнуто снижение 10–20 дБ по сравнению с рекомендованными уровнями. Здесь же показаны измеренные на скорости хода 8 уз уровни шума малого НИС Hugh R. Sharp: лучшие (RV Sharp – Best) и худшие (RV Sharp – Worst). Только на частотах 1,6 и 2 кГц худший результат измерений превысил требования ICES 209, тогда как на остальных частотах уровни подводного шума НИС заметно ниже требуемых.

Приведенные примеры, свидетельствующие о большой эффективности современных методов

и мероприятий акустического проектирования малошумных кораблей, подтверждают необходимость их широкого применения в отечественной практике при создании современных и перспективных кораблей.

Необходимость дальнейшего совершенствования существующей методологии акустического проектирования кораблей обусловлена постоянно растущими требованиями к акустическим характеристикам перспективных боевых кораблей и гражданских судов, а также стремлением более целенаправленно и эффективно решать задачи, возникающие при создании новых кораблей с улучшенными акустическими характеристиками.

## **Рекомендации по совершенствованию методологии акустического проектирования кораблей**

Recommendations regarding refinement of acoustic ship design methods

Применение в практике работы предприятий судостроительной промышленности разработанных к настоящему времени методов и средств акустического проектирования кораблей и усилия многих научных и промышленных организаций позволили создать корабли и суда отечественного флота, отличающиеся достаточно совершенными характеристиками в части акустических параметров. Так, неоднократно отмечалось, что в результате работ по совершенствованию акустических характеристик ПЛ удалось значительно снизить их шумность, подтверждением чего являются известные случаи столкновения в подводном положении отечественных и иностранных ПЛ, не обнаруживших друг друга пассивными средствами гидроакустики даже на близких расстояниях.

Вместе с тем, непрерывное развитие средств обнаружения ПЛ заставляет продолжать работы по дальнейшему снижению их шумности. Все более жесткие требования по уровням вибрации и шума предъявляются к перспективным кораблям всех классов, включая не только боевые корабли, но и гражданские суда. Следует отметить, что в 2012 г. в США были разработаны рекомендации по снижению шума коммерческих судов и его влияния на жизнь морских обитателей [71], которые были приняты Международной морской организацией в 2013 г. в качестве руководящего документа.

Для достижения все более совершенных акустических характеристик перспективных кораблей

необходимо, наряду с другими работами, дальнейшее совершенствование методов акустического проектирования кораблей, включая все перечисленные в предыдущих разделах.

При совершенствовании ФММ формирования виброакустических характеристик кораблей представляется целесообразным уточнять и развивать представления о происходящих вибрационных и акустических процессах с использованием современных вычислительных и экспериментальных средств. Большое значение имеют результаты специальных вибрационных и акустических испытаний современных ПЛ и НК, а также других морских сооружений различного назначения, что позволяет не только уточнить и дополнить существующие ФММ, но и определить наиболее актуальные направления дальнейшего акустического совершенствования кораблей и других морских объектов. Аналогичные работы актуальны и для гражданских судов с учетом современных тенденций их развития и новых экологических требований по шумности.

Существующие методики расчета позволяют надежно оценить уровни виброакустических характеристик современных кораблей, но могут дать большие погрешности при оценке новых типов кораблей и их элементов, отличающихся от традиционных. Необходимо разработать современные расчетные методики для перспективных кораблей, в том числе с нетрадиционными конструктивными решениями, основанные на результатах теоретических и экспериментальных исследований, в том числе полученных при создании усовершенствованных ФММ. При этом следует всемерно совершенствовать и применять новейшие расчетно-аналитические методы виртуального акустического проектирования кораблей с использованием современного программного обеспечения, а также с учетом возможностей постоянно развивающейся вычислительной техники.

При развитии экспериментальных средств исследований целесообразно предусмотреть создание более совершенных исследовательских акустических стендов, оснащенных современными средствами измерений и обработки информации. Весьма актуальными являются проектирование и постройка крупномасштабных акустических моделей кораблей вместе с созданием специально оборудованных для их испытаний малозумных глубоководных акваторий (акустических полигонов). Это позволит в условиях, близких к натурным, достоверно определить правильность принятых решений, оценить эффек-

тивность новых средств улучшения вибрационных и акустических характеристик проектируемых кораблей и уточнить пути их дальнейшего совершенствования. Ранее уже отмечалось, например в [68], что исследования на крупномасштабных моделях значительно дешевле, чем проведение экспериментов на действующих ПЛ. По некоторым зарубежным оценкам, такие исследования позволяют сэкономить около \$1 млрд при разработке новых технологий для проектируемых ПЛ и НК.

Без реализации перечисленных рекомендаций по дальнейшему совершенствованию методологии акустического проектирования кораблей, в том числе без проведения соответствующих НИОКР в обеспечение научно-технического задела, важность создания которого отмечена, например, в [72], невозможно обеспечить научное сопровождение проектирования и строительство новых кораблей отечественного флота, еще более совершенных в плане акустических характеристик.

## Заключение

### Conclusion

Выполненный анализ существующих методов и мероприятий акустического проектирования кораблей позволил систематизировать методологию акустического проектирования и определить пути ее совершенствования, а также разработать рекомендации по дальнейшему совершенствованию методологии акустического проектирования в обеспечение дальнейшего улучшения акустических характеристик проектируемых кораблей. Установлено, что для дальнейшего улучшения акустических характеристик перспективных кораблей необходимо выполнение исследовательских работ, направленных на совершенствование методологии акустического проектирования кораблей.

## Библиографический список

### References

1. *T.C. Gilmer*. Modern ship design. L.: Sudostroenie, 1974. (Russian translation).
2. *Букалов В.М., Нарусбаев А.А.* Проектирование атомных подводных лодок. Л.: Судостроение, 1968. [*Bukalov V.M., Narusbaev A.A.* Design of nuclear submarines. L.: Sudostroenie, 1968. (in Russian)].
3. *Friedman N.* Submarine Design and Development. Annapolis, Naval Institute Press, 1984.
4. *Dalgleish D. and Schweikart L.* Trident. Southern Illinois University Press, 1984.

5. *Harris B.* The navy times book of submarines. Berkley Books, New York, 1997.
6. *Вакс А.И., Мурадян В.А., Сагайдаков Ф.Р.* Подводные лодки. Прошлое, настоящее, будущее. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Судостроение, 2001. [*Vaks A.I., Muradyan V.A., Sagaidakov F.R.* Submarines. Past, present, future. SPb.: Krylov Shipbuilding Research Institute. L.: Sudostroenie, 2001. (in Russian)].
7. *Кормилицин Ю.Н., Хализов О.А.* Проектирование подводных лодок. СПб.: Элмор, 2004. [*Kormilitsin Yu.N., Khalizev O.A.* Design of submarines. SPb.: Elmor, 2004. (in Russian)].
8. *Простаков А.Л.* Гидроакустика и корабль. Л.: Судостроение, 1967. [*Prostakov A.L.* Hydroacoustic and ship. L.: Sudostroenie, 1967. (in Russian)].
9. *Простаков А.Л.* Гидроакустические средства флота. М.: Воениздат, 1974. [*Prostakov A.L.* Naval sonar systems. M.: Voenizdat, 1974. (in Russian)].
10. *Родионов Б.И.* Противолодочные силы и средства флотов. М.: Воениздат, 1977. [*Rodionov B.I.* Antisubmarine warfare capabilities of navies. M.: Voenizdat, 1977. (in Russian)].
11. *Stefanic T.* Strategic antisubmarine warfare and naval strategy. Lexington, MA DC, Heath and Co., 1987.
12. *Zimmerman S.* Submarine technology for the 21<sup>st</sup> century. Pasha Publications, Arlington, VA, 1997.
13. *Мышинский Э.Л.* Борьба с вибрацией и шумом в инженерной практике. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2011. [*Myshinsky E.L.* Vibration and noise control in engineering practices. SPb.: Krylov Shipbuilding Research Institute, 2011. (in Russian)].
14. International Council for Exploration of the Seas (ICES) Cooperative Research Report no. 209. Underwater noise of research vessels, review and recommendations. May 1995.
15. *Александров Ю.И., Гусев А.Н.* Боевые корабли мира на рубеже XX–XXI веков. Ч. 1. Подводные лодки. СПб.: Галлея Принт, 2000. [*Aleksandrov Yu.I., Gusev A.N.* Warships of the world at the turn of XX–XXI centuries. Part 1. Submarines. SPb.: Gallereya Print, 2000. (in Russian)].
16. Современные и перспективные многоцелевые АПЛ ВМС США. Аналитический отчет ЦКБ МТ «Рубин», 2003. [Contemporary and prospective attack nuclear submarines of US Navy. Analytical report CDB ME RUBIN, 2003. (in Russian)].
17. Аналитика. Современное состояние и перспективы развития зарубежного кораблестроения и ВМС. 2009. Спец. вып. № 1. Приложение к Дайджесту зарубежной прессы. ВМС и кораблестроение № 52. [Analysis. State-of-the-Art and prospective development of foreign shipbuilding and navies. 2009. Special issue No. 1. Supplement to Digest of foreign press. Navy and shipbuilding No. 52. (in Russian)].
18. *Кормилицин Ю.Н., Хализов О.А.* Устройство подводных лодок. Т. 1, 2. СПб.: Элмор, 2008. [*Kormilitsin Yu.N., Khalizev O.A.* Arrangement and design of submarines. V.1, 2. SPb.: Elmor, 2008. (in Russian)].
19. *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. [*Savenko V.V., Shlemov Yu.F.* Low-noise diesel-electric submarines. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2011. Issue 61(345). P. 141–154. (in Russian)].
20. Аналитика. Современное состояние и перспективы развития зарубежного кораблестроения и ВМС. Дайджест зарубежной прессы. ВМС и кораблестроение. 2013. Вып. 67. Спец. вып. № 2. [Analysis. State-of-the-Art and prospective development of foreign shipbuilding and navies. 2013 Digest of foreign press. Navy and shipbuilding. Issue 67. Special issue No. 2. (in Russian)].
21. Аналитика. 2017. Спец. вып. № 3. Современное состояние и перспективы развития зарубежного кораблестроения и ВМС. Дайджест зарубежной прессы. ВМС и кораблестроение. Вып. 80. [Analysis. 2017. Special issue No.3. State-of-the-Art and prospective development of foreign shipbuilding and navies. Digest of foreign press. Navy and shipbuilding. Issue 80. (in Russian)].
22. *Бородицкий Л.С., Спиридонов В.М.* Снижение структурного шума в судовых помещениях. Л.: Судостроение, 1974. [*Boroditsky L.S., Spiridonov V.M.* Reduction of structural noise in ship spaces. L.: Sudostroenie, 1974. (in Russian)].
23. *Комаров М.П.* Подводники уходят под лед. СПб.: Морское наследие, 2014. [*Komarov M.P.* Submariners go under ice. SPb.: Marine Heritage, 2014. (in Russian)].
24. Rules for classification of ships newbuildings special equipment and systems additional class. Part 6, chapter 24. Det Norske Veritas, January 2010.
25. *Bahtiarian M.* Underwater noise: for new research vessels. UNOLS Fleet Improvement Committee, March 8, 2011.
26. *Fischer R.* Acoustic design, construction and testing of fisheries research vessels. Noise Control Engineering Inc., 09.11.2004.
27. *Савенко В.В.* Применение военных технологий при создании малошумных научно-исследовательских судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 93(377). С. 105–112. [*Savenko V.V.* Application of military technologies for development of research vessels. Transactions of Krylov State

- Research Centre. 2016. Issue 93(377). P. 105–112. (in Russian)].
28. Савенко В.В., Шлемов Ю.Ф. Малошумное судно малых размеров с винторулевыми колонками // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 3(381). С. 123–128. [Savenko V.V., Shlemov Yu.F. Low-noise ship of small size with podded propulsion units. Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Issue 3(381). P. 123–128. (in Russian)].
29. Пепеляев В.В., Белоненко В.Ф., Капранов О.М. Методологический подход к разработке аванпроектов боевых кораблей // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 1(379). С. 78–85. [Pepelyaev V.V., Belonenko V.F., Kapranov O.M. Methodological approach to conceptual design of warships. Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Issue 1(379). P. 78–85. (in Russian)].
30. Клюкин И.И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. Л.: Судостроение, 1971. [Klyukin I.I. Control of noise and acoustic vibrations in ships. L.: Sudostroenie, 1971. (in Russian)].
31. Urick R.J. Principles of Underwater Sound. L.: Sudostroenie, 1978. (Russian translation)
32. Болгов В.М., Плахов Д.Д., Яковлев В.Е. Акустические шумы и помехи на судах. Л.: Судостроение, 1984. [Bolgov V.M., Plakhov D.D., Yakovlev V.E. Acoustic noise and interferences on ships. L.: Sudostroenie, 1984. (in Russian)].
33. Опытная ДЭПЛ ВМС США Dolphin AGSS-555. Аналитический отчет ЦКБ МТ «Рубин». 2006. Вып. 7. [Research and development USN diesel-electric USS Dolphin AGSS-555. Analytical report of CDB ME RUBIN. 2006. Issue 7. (in Russian)].
34. Ионов А.В. Средства снижения вибрации и шума на судах. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2000. [Ionov A.V. Means for noise and vibration control in ships. SPb.: Krylov Shipbuilding Research Institute, 2000. (in Russian)].
35. Савенко В.В. Акустические технологии на многоцелевых атомных подводных лодках // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 52(336). С. 29–46. [Savenko V.V. Acoustic technologies on nuclear attack submarines. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2010. Issue 52(336). P. 29–46. (in Russian)].
36. Савенко В.В. Акустические технологии на неатомных подводных лодках с анаэробными установками // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 61(345). С. 155–164. [Savenko V.V. Acoustic technologies on conventional submarines with air-independent propulsion systems. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2011. Issue 61(345). P. 155–164. (in Russian)].
37. Федонюк Н.Н. Применение полимерных композиционных материалов в зарубежном кораблестроении. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2009. [Fedonyuk N.N. Application of polymer composite materials in foreign shipbuilding. SPb.: Krylov Shipbuilding Research Institute. 2009. (in Russian)].
38. Савенко В.В. Снижение шумности атомных подводных лодок Великобритании // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 61(345). С. 125–140. [Savenko V.V. Reduction of noise levels on nuclear submarines of the UK Navy. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2011. Issue 61(345). P. 125–140. (in Russian)].
39. Акопов О.А. Обоснование требований к дальности обнаружения гидроакустического комплекса подводной лодки // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 80(364). С. 149–159. [Akopov O.A. Validation of submarine sonar system detection range requirements. Transactions of Krylov State Research Centre. 2014. Issue 80(364). P. 149–159. (in Russian)].
40. Савенко В.В. Размещение гидроакустических антенн на многоцелевых АПЛ ВМС США и Великобритании // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 80(364). С. 137–142. [Savenko V.V. Layout of sonar antennas on nuclear attack submarines of US and UK navies. Transactions of Krylov State Research Centre. 2014. Issue 80(364). P. 137–142. (in Russian)].
41. Иванов В.С. Решение проблемы снижения корабельных акустических помех работе гидроакустических станций (ГАС) и создание современных конструкций обтекателей антенн ГАС // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 80(364). С. 131–136. [Ivanov V.S. Resolving the problem of own-ship noise interferences with sonar operation and development of advanced sonar domes. Transactions of Krylov State Research Centre. 2014. Issue 80(364). P. 131–136. (in Russian)].
42. Шапошников В.М., Ярцев Б.А. Композитные конструкции наружного корпуса и элементов оперения подводной лодки // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 1(379). С. 36–44. [Shaposhnikov V.M., Yartsev B.A. Composite outer hull structures and tail unit parts of submarines. Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Issue 1(379). P. 36–44. (in Russian)].
43. Савенко В.В. Электродвижение и малошумность // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 1(379). С. 134–140. [Savenko V.V. Electric propulsion and low noise. Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Issue 1(379). P. 134–140. (in Russian)].

44. *Никитин В.С.* Двойные технологии – основа развития гражданского и военного флота России // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 2(380). С. 5–8. [*Nikitin V.S.* Dual application technologies: basis of the Russian navy and commercial fleet development. 2017. Issue. 2(380). P. 5–8. (in Russian)].
45. *Никифоров А.С.* Акустическое проектирование судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1990. [*Nikiforov A.S.* Acoustic design of ship structures. L.: Sudostroenie, 1990. (in Russian)].
46. *Попков В.И., Попков С.В.* Колебания механизмов и конструкций. СПб.: Сударья, 2009. [*Popkov V.I., Popkov S.V.* Oscillations of machinery and structures. SPb.: Sudarynya, 2009. (in Russian)].
47. *Никитин В.С., Половинкин В.Н.* Современное состояние и перспективы применения композитов в зарубежном подводном кораблестроении // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 57–74. [*Nikitin V.S., Polovinkin V.N.* State-of-the-art and outlook for application of composites in foreign submarine building. 2017. Issue 4(382). P. 57–74. (in Russian)].
48. *Гутин Л.Я.* Избранные труды. Л.: Судостроение, 1977. [*Gutin L.Ya.* Selection of papers. L.: Sudostroenie, 1977. (in Russian)].
49. *Никифоров А.С., Будрин С.В.* Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. Л.: Судостроение, 1968. [*Nikiforov A.S., Budrin S.V.* Propagation and absorption of acoustic vibrations in ships. L.: Sudostroenie, 1968. (in Russian)].
50. *Шендеров Е.Л.* Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972. [*Shenderov E.L.* Wave problems in hydroacoustics. L.: Sudostroenie, 1972. (in Russian)].
51. *Ляпунов В.Т., Никифоров А.С.* Виброизоляция в судовых конструкциях. Л.: Судостроение, 1975. [*Lyapunov V.T., Nikiforov A.S.* Vibration isolation in ship structures. L.: Sudostroenie, 1975. (in Russian)].
52. *Клюкин И.И., Боголепов И.И.* Справочник по судовой акустике. Л.: Судостроение, 1978. [*Klyukin I.I., Bogolepov I.I.* Handbook on ship acoustics. L.: Sudostroenie, 1978. (in Russian)].
53. *Никифоров А.С.* Вибропоглощение на судах. Л.: Судостроение, 1979. [*Nikiforov A.S.* Vibration absorption in ships. L.: Sudostroenie, 1979. (in Russian)].
54. *Donald Ross.* Mechanics of underwater noise. USA, Peninsula Publishing, 1987.
55. *Ляпунов В.Т., Лавендел Э.Э., Шляпочников С.А.* Резиновые виброизоляторы. Л.: Судостроение, 1988. [*Lyapunov V.T., Lavendel E.E., Shlyapochnikov S.A.* Rubber vibration isolators. L.: Sudostroenie, 1988. (in Russian)].
56. *Романов В.Н., Иванов В.С.* Излучение звука элементами судовых конструкций. СПб.: Судостроение, 1993. [*Romanov V.N., Ivanov V.S.* Acoustic radiation by ship structure parts. SPb.: Sudostroenie, 1993. (in Russian)].
57. *Левковский Ю.Л.* Шум гребных винтов. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. [*Levkovsky Yu.L.* Noise of propellers. SPb.: Krylov Shipbuilding Research Institute. 2005. (in Russian)].
58. *Смоляков А.В.* Шум турбулентных потоков. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. [*Smolyakov A.V.* Noise of turbulent flows. SPb.: Krylov Shipbuilding Research Institute. 2005. (in Russian)].
59. *Ионов А.В., Майоров В.С.* Гидролокационные характеристики подводных объектов. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2011. [*Ionov A.V., Mayorov V.S.* Sonar detection characteristics of underwater objects. SPb.: Krylov State Research Centre, 2011. (in Russian)].
60. *Кирпичников В.Ю.* Вибровозбудимость конструкций и пути ее уменьшения. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2014. [*Kirpichnikov V.Yu.* Vibration excitation of structures and ways of mitigation. SPb.: Krylov State Research Centre, 2014. (in Russian)].
61. *Кирпичников В.Ю.* Вибрация и шумоизлучение обтекаемых конструкций судна. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2016. [*Kirpichnikov V.Yu.* Vibration and noise radiation of ship structures in water flow. SPb.: Krylov State Research Centre, 2016. (in Russian)].
62. Ship vibration and noise. Guidance notes. Lloid's Register, 2006.
63. Приближенный метод расчетной оценки подводного шума транспортных и промысловых судов. Л.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1973. [*An approximate method for estimation of underwater noise for merchant and fishing vessels. L.: Krylov Shipbuilding Research Institute, 1973. (in Russian)].*
64. Уровни шума в судовых помещениях. Методика расчета. РД 5.0173-87. Л.: ЦНИИ ТС, 1988. [*Noise levels in ship spaces. Method of estimation. RD 5.0173-87. L.: TsNII TS, 1988. (in Russian)].*
65. Многоцелевые АПЛ ВМС Великобритании. Ч. 1–3. Аналитические отчеты ЦКБ МТ «Рубин». 2006–2008. Вып. 9–11. [*Nuclear attack submarines of UK Navy. Parts 1-3. Analytical report of CDB ME RUBIN. 2006–2008. Issue 9–11. (in Russian)].*
66. *Маслов В.Л., Будрин С.В.* Методы управления акустическими полями в инженерных конструкциях. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. [*Maslov V.L., Budrin S.V.* Methods of acoustic signature

- management for engineering structures. SPb.: Krylov Shipbuilding Research Institute, 2010. (in Russian)].
67. Багаев Д.В., Егоров С.В., Лобачев М.П., Рудниченко А.А., Таранов А.Е. Валидация технологии численного моделирования кавитационных течений // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 46–56. [Bagaev D.V., Egorov S.V., Lobachev M.P., Rudnichenko A.A., Taranov A.E. Validation of numerical simulation technologies for cavitation flow modeling. Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Issue 4(382). P. 46–56. (in Russian)].
68. Использование масштабных моделей при проектировании ПЛ. Аналитический отчет ЦКБ МТ «Рубин». 2014. Вып. 19. [Application of scaled models in submarine design process. Analytical report of CDB ME RUBIN. 2014. Issue 19. (in Russian)].
69. Ионов А.В. Физическое масштабное моделирование судовых конструкций со средствами акустической защиты. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2015. [Ionov A.V. Physical scale modeling of ship structures outfitted with acoustic damping tools. SPb.: Krylov State Research Centre, 2015. (in Russian)].
70. Савенко В.В. Использование крупномасштабных моделей при разработке новых технологий для подводных лодок и кораблей ВМС США // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2014. Вып. 80(364). С. 143–148. [Savenko V.V. Application of large-scale models in development of new technologies for USN submarines and surface ships. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2014. Issue 80(364). P. 143–148. (in Russian)].
71. International Maritime Organisation. DE 57/WP.8. Provisions for reduction of noise from commercial shipping and its adverse impacts on marine life. 20 March 2013.
72. Никитин В.С. О важности создания научно-технического задела в судостроительной отрасли // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 5–10. [Nikitin V.S. On importance of forward-looking R&Ds for shipbuilding industry. Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Issue 4(382). P. 5–10. (in Russian)].
- 

#### Сведения об авторе

Савенко Валентин Викторович, к.т.н., старший научный сотрудник, заместитель начальника лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-49-85, e-mail: krylov@krylov.spb.ru.

#### About the author

Savenko, Valentin V., Cand. Tech. Sc., Senior Researcher, Deputy Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44 Moskovskoe shosse, Saint-Petersburg, Russia, post code 196158. Tel. 8 (812) 415-49-85. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 16.04.18  
Принята в печать / Accepted: 20.08.18  
© Савенко В.В., 2018