

## СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 629.5.03:629.542  
EDN: ННКРҮМ

А.В. Сверчков 

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

### ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ГАЗА В СИСТЕМЕ ВОЗДУШНОЙ СМАЗКИ КОРПУСА

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования является система воздушной смазки корпуса транспортного судна, использующая низкооборотный дизель в качестве источника газа. Цель работы – обобщить технические решения мировых производителей судовых низкооборотных дизелей и ведущих судостроительных компаний, направленные на повышение экономических показателей систем воздушной смазки за счет применения главного двигателя в качестве источника газа.

**Материалы и методы.** Анализ зарубежных статей, патентов и патентных публикаций, в которых приведены технические решения, использующие главный судовой двигатель в качестве источника газа в системах воздушной смазки корпуса транспортного судна, для последующего применения в проектах отечественных судов с воздушными кавернами.

**Основные результаты.** На основании проведенного анализа выявлены четыре группы технических решений по использованию главного дизельного двигателя в качестве источника газа в системах воздушной смазки корпуса. Первая группа – непосредственная подача под днище выхлопных газов. Вторая – использование штатного турбокомпрессора главного двигателя с отбором части сжатого воздуха, предназначенного для работы дизеля. Технические решения третьей группы предполагают утилизацию давления выхлопных газов турбодизеля для работы дополнительного турбокомпрессора или турбогенератора. Четвертая группа – утилизация остаточной тепловой энергии отработанных газов парогенератором или термоэлектрическим генератором. Возможно одновременное применение двух или даже трех перечисленных выше технических решений, а также увеличение объема выхлопных газов главного двигателя путем их смешивания с атмосферным воздухом или водяным паром.

**Закключение.** Отказ от использования компрессоров с электроприводом должен снизить стоимость и сложность системы подачи воздуха под днище, что, в свою очередь, позволит увеличить общую экономическую эффективность транспортного судна, оборудованного устройством создания воздушных каверн.

**Ключевые слова:** транспортное судно, снижение буксировочного сопротивления, воздушная смазка корпуса, низкооборотный судовой дизель, система подачи воздуха.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

## SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

UDC 629.5.03:629.542  
EDN: ННКРҮМ

A.V. Sverchkov 

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

### APPLICATION PROSPECTS OF MAIN ENGINE AS GAS SOURCE FOR AIR LUBRICATION OF HULL

*Для цитирования:* Сверчков А.В. Перспективы использования главного двигателя в качестве источника газа в системе воздушной смазки корпуса. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 1(407): 49–64.

*For citations:* Sverchkov A.V. Application prospects of main engine as gas source for air lubrication of hull. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 1(407): 49–64 (in Russian).

**Object and purpose of research.** This paper discusses air lubrication system for hulls of carrier vessels, with low-speed diesel as gas source. The purpose of the study was to summarize technical solutions suggested by major shipyards and low-speed diesel manufacturers over the world intended to improve cost efficiency of air lubrication system through employing the main engine as a source of gas.

**Materials and methods.** The study analyses foreign publications, patents and patent applications describing various configurations of air lubrication systems for carrier vessels with main engine as gas source, for further application on Russian ships with air cavities.

**Main results.** The analysis has identified four groups of technical solutions for main diesel engine as gas source in air lubrication systems. The first group focuses on direct feed of exhaust gases under ship bottom. The second group uses standard turbocharger of the main engine and implements air lubrication system with partial bypass of the compressed air fed to the diesel. The third group utilizes the pressure of turbodiesel exhausts to run an additional turbocompressor or turbogenset. The fourth group utilizes residual heat of exhaust gases by means of economizer or thermoelectric generator. Two or even three of above-mentioned solutions may be implemented simultaneously. It is also possible to increase the volume of main engine exhausts mixing them with atmospheric air or vapour.

**Conclusion.** Air lubrication systems without electric compressors feeding the air under ship bottom would be less costly and less complex than conventional ones, increasing total cost efficiency of a carrier ship with air cavity system.

**Keywords:** carrier vessel, towing resistance reduction, air lubrication, low-speed diesel, air supply system.

*The author declares no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

В российской практике проектирования водоизмещающих судов с искусственными кавернами в качестве источников сжатого воздуха для создания каверн предлагались либо компрессоры, либо воздухоудки, в зависимости от величины противодавления на выходе [1–5]. Альтернативные источники сжатого воздуха даже не рассматривались.

В качестве приводов предполагалось использовать электрические моторы, получающие электропитание от штатных или дополнительных дизель-генераторов, что неизбежно приводило к увеличению расхода дизельного топлива и росту нагрузки на судовые электростанции. При использовании компрессоров с электроприводом от дизель-генераторов энергетические затраты на подачу воздуха составляют 2–3 % мощности главного двигателя, что заметно снижает эффективность энергоберегающего устройства.

Многие зарубежные компании, разрабатывающие пузырьковую смазку корпуса, в качестве источника сжатого воздуха также могут применять воздушные компрессоры с приводом от электромотора или от вала главного двигателя. В их числе – Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. [6], Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd. [7, 14, 15] и Samsung Heavy Industries Co., Ltd. из Ю. Кореи [10, 11], Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. из Японии [8, 9], Silverstream Technologies B.V. из Нидерландов [12, 13].

Низкая эффективность пузырьковой смазки потребовала улучшения работы системы подачи воздуха под днище судна, особенно в отношении

энергопотребления. Поэтому ведущие производители судовых дизелей и судостроительные компании, в основном азиатские, начали активный поиск конструктивных решений получения сжатого воздуха, основанных на использовании газовыхлопа или тепловой энергии главного судового двигателя.

Предлагаемые технические решения можно условно разделить на четыре группы.

Первая группа – непосредственная подача под днище выхлопных газов главного дизельного двигателя или отработанных газов газовой турбины. Это наиболее простой и экономически эффективный вариант.

Вторая группа воздушных систем предполагает использование штатного турбокомпрессора главного двигателя с отбором части сжатого воздуха, предназначенного для работы дизеля. Если при низких оборотах двигателя давление сжатого воздуха окажется недостаточным, его можно повысить, используя дополнительные средства.

Технические решения третьей группы предполагают утилизацию давления выхлопных газов турбодизеля для работы дополнительного турбокомпрессора или турбогенератора. Дополнительная электроэнергия, вырабатываемая турбогенератором, может использоваться для работы электродвигателя компрессора, установленного на значительном расстоянии от главного двигателя. Этих дополнительных турбокомпрессоров или турбогенераторов можно использовать несколько, установив их последовательно либо параллельно с основным турбокомпрессором, предназначенным для снабжения сжатым воздухом турбодизеля.

Четвертая группа использует остаточную тепловую энергию отработанных газов. Магистраль выхлопных газов оборудуется парогенератором, вырабатывающим пар, который приводит во вращение паровую турбину, соединенную непосредственно с компрессором или электрогенератором, который питает электроэнергией двигатель воздушного компрессора или воздуходувки. Парогенератор может быть заменен термоэлектрическим генератором, вырабатывающим электроэнергию для работы электродвигателя привода компрессора.

Возможно одновременное применение двух или даже трех перечисленных выше технических решений, а также увеличение объема выхлопных газов главного двигателя путем их смешивания с атмосферным воздухом или водяным паром. Если давления выхлопных газов или воздуха от турбокомпрессора недостаточно для их подачи под днище судна (например, при движении судна с полной загрузкой), его можно увеличить, установив в газовую магистраль дополнительный компрессор.

В этом варианте дополнительный компрессор имеет значительно меньшую мощность, чем компрессор, используемый в традиционной системе подачи атмосферного воздуха. Кроме того, в воздушной магистрали может быть установлен резервный компрессор небольшой мощности с электроприводом от судовой электросети. Резервный компрессор подключается при недостаточном объеме воздуха или выхлопных газов, получаемых от главного двигателя.

Большинство вариантов использования главного двигателя в качестве источника сжатого газа разработано для применения на судах с пузырьковой смазкой или с пневмообмывом. При этом ничто не мешает их использовать и на судах с искусственными кавернами, поскольку системы подачи воздуха для создания пузырьков имеют практически такие же параметры давления и расхода, как и системы для создания каверн.

## Подача под днище выхлопных газов

Feeding exhausts under ship bottom

Заменить атмосферный воздух для создания каверн выхлопными газами главного двигателя предложила компания DK Group из Нидерландов (рис. 1). Согласно материалам, представленным в патенте [16], часть выхлопных газов от главного двигателя 43 не выбрасывается в атмосферу по системе газ-выхлопа 50, а одним из двух возможных путей (47 или 49) поступает к средству подачи газа 35, а от туда через выходное отверстие в днище 8 направляется в днищевую выемку 6 для формирования искусственной каверны.

Первый путь наиболее простой. Газ через выпускное отверстие системы газ-выхлопа по магистрали 47 с системой управления 44 поступает к средству подачи газа 35 и от туда направляется под днище судна. Следует обратить внимание, что часть трубопровода воздушной магистрали 47 проходит выше ватерлинии. Это должно предотвратить попадание морской воды в выпускное отверстие для газа, расположенное ниже ватерлинии, тем самым позволяя дополнительно повысить безопасность главного двигателя в случае выхода из строя невозвратно-запорных клапанов.

Второй путь выхлопных газов лежит через балластные цистерны 90 и 91. В этом случае газ по магистрали 49 подается в заполненные морской водой балластные цистерны. Пройдя через балластную воду, газ поступает к средству подачи газа 35 и от туда направляется под днище судна. В результате выхлопные газы подвергаются процессу влажной очистки, что позволяет уменьшить количество содержащейся в них сажи. Одновременно достигается возможность дезинфекции воды в балластных цистернах для снижения активности бактерий.

По мнению авторов патента, этот вариант дает возможность пользователю не только соблюдать

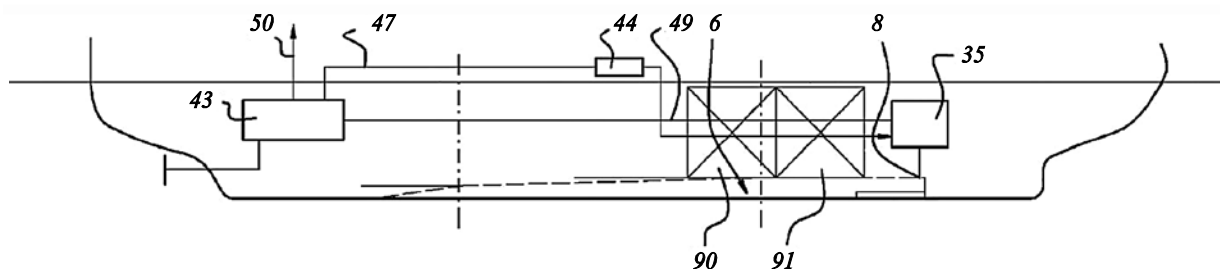


Рис. 1. Система подачи выхлопных газов по патенту [16]

Fig. 1. Exhaust gas feed system described in Patent [16]

строгие экологические нормы, но и охлаждать выхлопные газы перед их попаданием в каверну. Пониженная температура выхлопных газов приводит к уменьшению коррозии элементов днища, ограждающих днищевую нишу. Используя систему управления выпуском отработавшего газа, можно выбирать первый или второй путь прохождения выхлопных газов.

Целесообразность использования выхлопных газов для создания каверны подтверждает корейский патент [17], согласно которому содержание кислорода в выхлопных газах не превышает 5–8 %, что должно предотвращать обрастание корпуса над каверной, убивая живущие здесь морские организмы, использующие кислород для дыхания.

Использовать газовыхлоп двигателя внутреннего сгорания в качестве источника газа в системе снижения сопротивления с пузырьковой смазкой предлагает китайская компания Shanghai Starry Marine Engineering Services Co., Ltd. [18]. Система газовыхлопа дополнительно включает в себя устройство рекуперации отработанного тепла выхлопных газов, компрессор и накопительное устройство для хранения выхлопных газов. По мнению авторов патента, подача выхлопных газов в воду уменьшает выброс загрязняющих веществ в атмосферу столь значительно, что суда могут быть освобождены от установки автономных устройств очистки выхлопных газов, что, в свою очередь, снижает первоначальные инвестиции и эксплуатационные расходы.

Чтобы увеличить подаваемый под днище объем газа, выхлопные газы можно смешивать с атмосферным воздухом или водяным паром, как это рекомендуется в Международной патентной публикации [19] датской судоходной компании Maersk AS, а также в китайском патенте [20] шанхайской

технологической компании Shanghai Zitan Energy Saving and Environmental Protection Technology Co., Ltd. Для создания водяного пара используется морская вода, нагреваемая теплом выхлопных газов.

Предложения по различным вариантам использования выхлопных газов в системе пузырьковой смазки приводятся в европейском патенте [21] немецкой компании MAN Energy Solutions SE; в патентных публикациях [22–26] и патентах [27, 28] японской судостроительной компании Mitsubishi Heavy Ind., Ltd.; в патенте Китая [29] Уханьского политехнического университета (Wuhan University of Technology); в патенте Японии [30]; в патенте [31] корейской судостроительной компании Samsung Heavy Ind. Co., Ltd.; в Международной патентной публикации [32] Maersk AS, Дания; в патенте [33] компании Turbo Systems Switzerland, Ltd., Швейцария.

## Использование штатного турбокомпрессора для подачи воздуха под днище судна

Feeding the air under ship bottom by means of standard turbocompressor

Крупные океанские транспортные суда, такие как балкеры или танкеры, в качестве главного двигателя используют мощный низкооборотный дизель, напрямую соединенный с гребным винтом. Такой двигатель оснащен турбоагнетателем, который, используя энергию выхлопных газов для вращения турбины, подает в цилиндры сжатый (наддувочный) воздух, необходимый для сгорания топлива. Среднее эффективное давление наддувочного воздуха современного турбодизеля составляет 1,9–2,1 МПа [34].

Благодаря высокой эффективности современных турбоагнетателей количество подаваемого

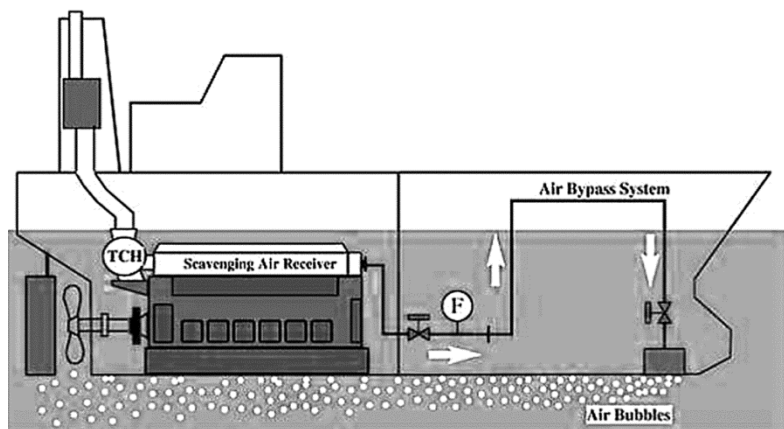


Рис. 2. Схема системы байпаса наддувочного воздуха [35]

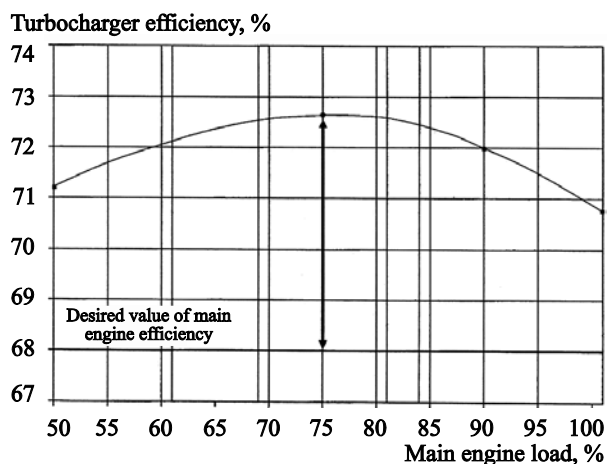
Fig. 2. Layout of turbocharging air bypass system [35]

воздуха превышает потребность двигателя, и в результате часть наддувочного воздуха может быть отведена для использования в системе воздушной смазки, что повышает общую эффективность судна. Такая система отвода воздуха называется байпасом наддувочного воздуха (scavenging air by-pass), как показано на рис. 2 [35]. Байпас – это клапан перепускного типа, который позволяет сбросить излишнее давление воздуха во впускной системе турбинных дизелей.

Традиционный уровень техники не предусматривает возможности забора воздуха нагнетаемого турбоагнетателя или концепцию забора газа из точки высокого давления между промежуточным охладителем и компрессором. Поэтому, чтобы исследовать влияние перепускной системы наддувочного воздуха на работу двигателя как в установившемся, так и в переходном режиме, в Японии была проведена серия натурных экспериментов на четырехтактных и двухтактных судовых двигателях [35], которые позволили выявить влияние системы перепуска наддувочного воздуха на работу двигателя в установившемся и в переходном режиме. Как было обнаружено, большая скорость удаления воздуха вызывает резкое падение давления наддувочного воздуха в ресивере и даже может привести к отказу двигателя, тогда как колебания скорости удаления воздуха имеют незначительное влияние на характеристики двигателя.

Как сообщается в работе [35], безвредный для двигателя отвод наддувочного воздуха возможен только в узком рабочем диапазоне, поскольку первичной предпосылкой для хорошего процесса сгорания является надлежащее соотношение массы впрыскиваемого топлива и массы воздуха. Уменьшение объема наддувочного воздуха ухудшает процесс сгорания, сказываясь на удельном расходе мазута и выбросах выхлопных газов, что в итоге сводит на нет чистую экономию энергии. Более того, противоречивая эксплуатационная мера (медленное пропаривание) для снижения стоимости топлива неизбежно снижает нагрузку на двигатель и давление наддувочного воздуха, что в итоге может сделать невозможным использование наддувочного воздуха для системы воздушной смазки.

Объяснение, почему наддувочный воздух можно отводить только в узком диапазоне нагрузок дизеля, дается в описании патентов [36, 37]. На рис. 3 представлена диаграмма, показывающая пример взаимосвязи между нагрузкой на судовой дизельный двигатель и эффективностью турбоком-



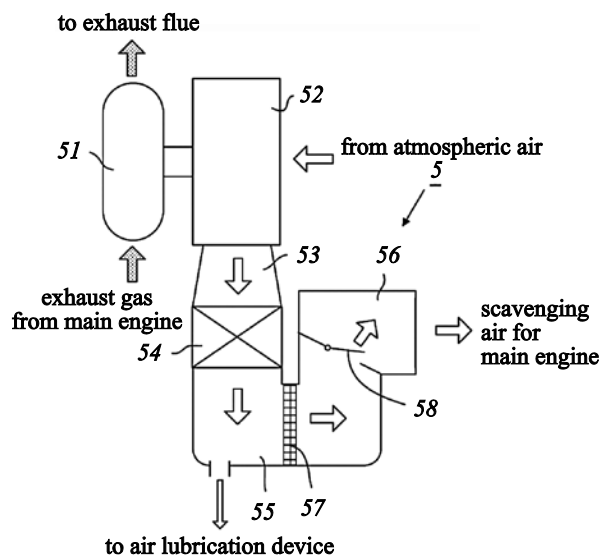
**Рис. 3.** Типовая диаграмма зависимости эффективности турбокомпрессора от нагрузки двигателя [36]

**Fig. 3.** Typical diagram of turbocompressor efficiency as function of engine load [36]

прессора. Как показано на этом рисунке, создается значительный избыток КПД турбокомпрессора по сравнению с желаемым значением КПД главного двигателя. Например, когда нагрузка на главный двигатель составляет 75,0 %, фактически достигается КПД турбокомпрессора 72,7 %, в то время как желаемое значение КПД основного двигателя составляет 68,0 %. Эта разница вызывает образование остаточного газа. Однако даже если КПД турбокомпрессора превышает КПД двигателя более чем на 3 %, то может быть отобрано только менее 10 % наддувочного воздуха.

Проведенные японцами эксперименты позволили прийти к идеям, как улучшить работу главного двигателя, чтобы он мог нормально функционировать в условиях наличия системы перепуска воздуха. Поскольку скорость удаления воздуха зависит от давления наддувочного воздуха, при увеличении потока возникает более глубокий перепад давления со стороны двигателя. Для компенсации перепада давления в работе [35] рекомендовано применение гибридного компрессора вместе с системой турбины переменной площади.

Использование турбоагнетателя главного двигателя в качестве источника воздуха для работы пумпной смазки запатентовала японская фирма Oshima Shipbuilding Co., Ltd. [38, 39]. Как и в работе [35], из системы подачи воздуха исключен отдельный компрессор (рис. 4). Вместо него предложено использовать компрессор 52 из воздушной магистрали турбоагнетателя дизеля, который, как и в преды-

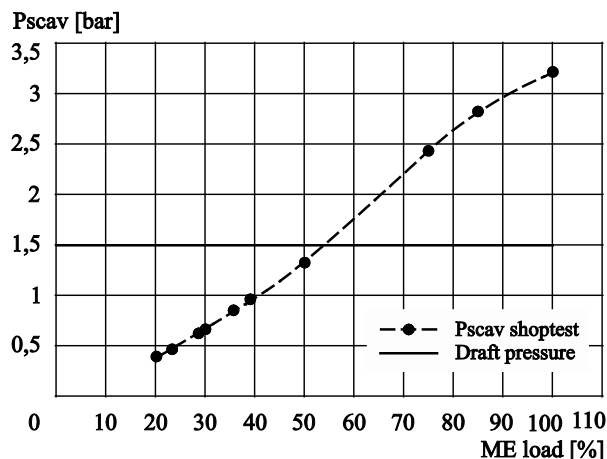


**Рис. 4.** Схема использования воздуха из магистрали турбонаддува главного дизеля по патентам [38, 39]

**Fig. 4.** Layout of air bleeding from turbocharging line of the main engine as per Patents [38, 39]

дущем варианте, приводится во вращение турбиной 51, установленной в тракте газовыхлопа.

Предложенное японцами весьма простое техническое решение прошло проверку в натурных условиях на балкере Soyo, построенном в 2012 г. Судно оборудовано системой пузырьковой смазки, имеет длину 230 м, ширину 43 м, дедвейт 92 тыс. т.



**Рис. 5.** Типовой график зависимости давления наддувочного воздуха от нагрузки двигателя по материалам компании Maersk AS [32]

**Fig. 5.** Typical diagram of turbocharging air pressure as functions of engine load, as reported by Maersk AS [32]

Позже, в частной беседе, японские инженеры сообщили, что их система подачи воздуха работает только при высоких оборотах главного дизеля. На малых и средних ходах, на которых судно эксплуатируется значительную часть времени, система не функционирует и требует кардинальной доработки.

Объяснение этого факта приведено на рис. 5, на котором показан типовой график зависимости давления наддувочного воздуха от нагрузки дизеля [32]. Приведенные данные свидетельствуют, что при осадке судна 15 м (давление на уровне основной плоскости 1,5 бар) давление наддувочного воздуха обеспечит работу системы воздушной смазки только при нагрузке дизеля более 55 %. С учетом потерь в трубопроводах нагрузка дизеля должна быть не менее 60 %.

В 2014 г. компания Oshima совместно с еще десятью научно-исследовательскими и судостроительными организациями получила патент [39] на доработанную систему подачи воздуха, в которой используются дополнительные средства повышения давления воздуха перед их подачей под днище судна.

Японская судостроительная компания Mitsubishi Heavy Industries предложила для судна, использующего систему воздушной смазки в виде пузырьков воздуха, техническое решение [40], направленное на оптимизацию работы турбокомпрессора. Оно заключается в применении регулируемого сопла, способного увеличить производительность турбины турбокомпрессора при подаче воздуха под днище судна.

Различные варианты применения штатного турбокомпрессора для подачи воздуха под днище судна можно найти: в патенте [41] немецкой компании Man Diesel & Turbo SE; в патентной публикации [42] японской компании Ishikawajima Harima Heavy Industries; в патентной публикации [43] южнокорейской судостроительной компании Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering; в патенте [28] японской судостроительной компании Mitsubishi Heavy Industries; в международных патентных публикациях [32, 44] судоходной компании Maersk AS, Дания.

В качестве дополнительного варианта использования турбокомпрессора в патентной публикации [42] вышеупомянутой компании Ishikawajima Harima Heavy Industries предлагается двухступенчатый нагнетатель, когда на вал турбины насажены два компрессора. Такая схема может быть применена, когда системе снижения сопротивле-

ния необходимо более низкое давление воздуха, чем требуется для работы главного двигателя. Воплощение этого технического решения схематично приведено на рис. 6.

Выхлопные газы из цилиндров 10 главного двигателя 1 поступают в коллектор 11, откуда, пройдя через сопло 12 и лопатки турбины 13, направляются в выхлопную трубу 14. Сила вращения лопаток турбины 13 через вал 15 передается на компрессионный блок 3 высокого давления и компрессионный блок 4 высокого давления, вращающий лопатки компрессора 16 низкого давления и лопасти компрессора 17 высокого давления. В секции сжатия низкого давления 3 воздух, пройдя через фильтр 18, сжимается турбиной 16 и отправляется в секцию сжатия высокого давления 4, а часть воздуха по трубам 19, 20 через клапан 21 поступает в систему воздушной смазки 6. Количество и форма лопастей низкого давления 16 спроектированы таким образом, чтобы поднять давление воздуха до уровня, необходимого для подачи под днище судна. Компрессионный блок 4 высокого давления дополнительно сжимает воздух и по трубе 22 через охладитель 23 подает его в главный двигатель 1.

Похожая схема, в которой на одном валу газовой турбины установлены два компрессора, приведена в патентных публикациях [45, 46] южнокорейской компании Samsung Heavy Industries. Отличие этой схемы от рассмотренной выше заключается в том, что оба компрессора работают независимо друг от друга. Первый компрессор используется для подачи сжатого воздуха в цилиндры дизеля, а второй подает воздух под днище судна. Вал второго компрессора может дополнительно включать в себя трансмиссию для прекращения передачи силы вращения.

Японская компания Nishishiba Electric Co., Ltd. предлагает в системе воздушной смазки использовать сжимаемый турбокомпрессором воздух параллельно с воздухом от компрессора с электроприводом [47]. Когда воздуха от турбокомпрессора достаточно для работы системы, компрессор с электроприводом отключается, экономя электроэнергию. В этом же патенте компрессор системы воздушной смазки с электроприводом используется для подачи сжатого воздуха на главный двигатель в момент его запуска, когда турбокомпрессор еще не работает. Это позволяет исключить дополнительный компрессор с электроприводом, который используется только в момент запуска главного двигателя.

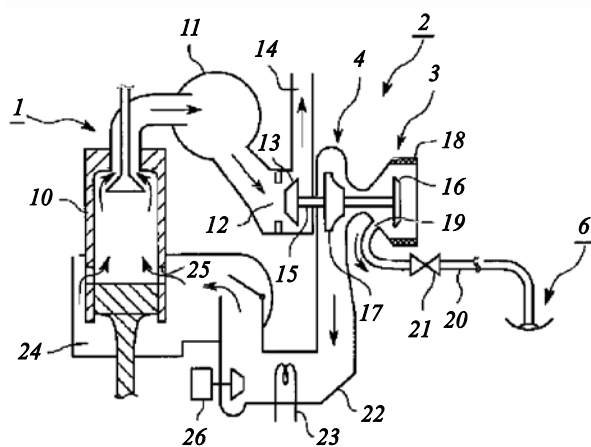


Рис. 6. Схема двухступенчатого турбокомпрессора [42]

Fig. 6. Layout of two-stage turbocompressor [42]

## Использование давления выхлопных газов для работы дополнительного турбокомпрессора или электрогенератора

Utilization of exhaust gas pressure to run additional turbocharger or genset

В настоящее время турбины выхлопных газов выпускаются с очень высоким КПД, что обеспечивает простое и эффективное использование энергии выхлопных газов для преобразования в энергию роторного привода. Турбины выхлопных газов рассчитаны на длительные периоды эксплуатации без технического обслуживания и чрезвычайно надежны и стабильны, что снижает затраты на техническое обслуживание и эксплуатационные расходы. Это обеспечивает дополнительный компрессор или электрогенератор недорогим, энергоэффективным, неприхотливым в обслуживании и надежным приводом, которому не требуется дополнительная энергия [41].

Осевые и центробежные компрессоры также обладают высокой эффективностью, что гарантирует простое и эффективное использование энергии роторного привода для производства сжатого газа или дополнительного повышения давления. Осевые и центробежные компрессоры рассчитаны на длительные периоды эксплуатации без технического обслуживания. Кроме того, осевые и центробежные компрессоры в широком диапазоне размеров

и классов производительности доступны в качестве стандартных сборок [41].

Турбины выхлопных газов начинают работать, как только судно приводится в движение. При использовании турбокомпрессора система подачи газа становится саморегулируемой. С ростом скорости судна увеличивается частота вращения двигателя, возрастает объем выхлопных газов, повышается скорость вращения турбины и, таким образом, может быть произведено больше сжатого газа или выработано больше электроэнергии для привода компрессора или воздуходувки. Кроме того, объем выхлопных газов возрастает при движении судна в неблагоприятных погодных условиях, когда требуется увеличить подачу воздуха.

В случае судов с воздушной смазкой дополнительная турбина может быть установлена либо в том же газовом тракте до или после основной турбины, либо в отдельном трубопроводе параллельно основной турбине. Оба решения позволяют получать сжатый воздух малозатратным экологически чистым способом без привлечения дополнительной энергии, поскольку используется только избыточная энергия от двигателя внутреннего сгорания.

Использование дополнительного (вспомогательного) турбокомпрессора, установленного в одном газовом тракте после главного турбокомпрессора, можно рассмотреть на примере системы газ-выхлопа, приведенной в патенте [48] китайской компании ABB Schweiz AG (рис. 7).

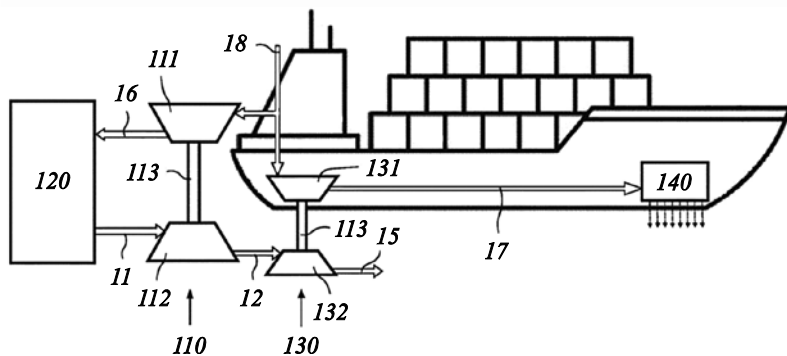
Устройство подачи воздуха включает в себя главный турбокомпрессор 110, имеющий главный компрессор 111 и главную турбину 112. Главный компрессор 111 соединен с главным двигателем 120 через первую трубу подачи воздуха 16. Главная турбина 112 соединена с главным двигателем 120 через первую трубу 11 выхлопных газов. Главная турбина 112 приводится в действие выхлопными газами главного двигателя 120.

Дополнительно устройство подачи воздуха включает в себя вспомогательный турбокомпрессор 130, имеющий вспомогательный компрессор 131 и вспомогательную турбину 132. Вспомогательная турбина 132 приводится в действие выхлопными газами, поступающими от главной турбины 112 через вторую трубу 12 выхлопных газов. Воздух в главный компрессор 111, а также во вспомогательный компрессор 131 поступает через воздухозаборник 18. Отработанные выхлопные газы выходят через трубопровод 15 выхлопных газов, соединенный со вспомогательной турбиной 132. Вспомогательный компрессор 131 соединен через вторую трубу 17 подачи воздуха с устройством 140 для создания воздушного слоя на нижней поверхности корпуса.

Схему использования дополнительного турбокомпрессора, установленного перед главным турбокомпрессором, можно также найти в международной патентной публикации [44] датской судовой компании Maersk AS. В этом варианте дополнительная турбина имеет возможность увеличивать давление воздуха, получаемого на выходе главного турбокомпрессора.

Использование дополнительного турбокомпрессора, установленного параллельно главному турбокомпрессору, рассмотрено на примере системы газ-выхлопа, приведенной в патенте [41] крупнейшего производителя судовых дизелей Man Diesel & Turbo SE, Германия. Принципиальная схема, раскрывающая суть предлагаемого усовершенствования судовой дизеля, показана на рис. 8.

Двухтактный дизельный двигатель 10 вращает гребной вал 20, соединенный с гребным винтом 21. Блок турбонадува 30, состоящий из трех главных (первичных) турбокомпрессоров выхлопных газов, обеспечивает работу турбодизеля 10. Вспомогательный (вторичный) турбокомпрессор выхлопных газов 40 подает сжатый воздух в систему воздуш-



**Рис. 7.** Упрощенная схема установки дополнительного турбокомпрессора после главного турбокомпрессора [48]

**Fig. 7.** Simplified layout of applying an additional turbocharger downstream of the main one [48]



ной смазки. Отработанные выхлопные газы проходят через теплообменник 60 для извлечения оставшейся тепловой энергии и удаляются через дымоход 50, оборудованный фильтрами и/или каталитическими нейтрализаторами.

Двигатель 10 имеет блок цилиндров 11, коллектор 12 наддувочного воздуха и коллектор 13 выхлопных газов с несколькими (в данном случае четыре) выпускными отверстиями – 13a, 13b, 13c и 13d. Блок турбонаддува 30 включает в себя три параллельно соединенных турбокомпрессора – 31, 34 и 37, каждый из которых имеет турбину 32, 35 и 38 выхлопных газов для преобразования энергии выхлопных газов, поступающих по трубопроводам 32a, 35a и 38a, в энергию роторного привода и компрессор 33, 36 и 39 для генерации сжатого газа в виде атмосферного воздуха под давлением. Компрессоры 33, 36 и 39 могут быть спроектированы как осевые или как радиальные.

Турбокомпрессор 40 вторичных выхлопных газов имеет турбину 41 для преобразования энергии выхлопных газов, поступающих по трубопроводу 14 через заслонки 14a и 14b, в энергию роторного привода и компрессор 42, соединенный с турбиной 41 выхлопных газов для генерации сжатого воздуха, подаваемого в трубопровод 42b. Компрессор 42 может быть спроектирован как осевой или как радиальный. Регулирование объема подаваемого в турбокомпрессор 40 вторичных выхлопных газов осуществляется быстро открывающейся 19a и управляющей 19b заслонками с приводом от двигателя.

Похожие технические решения, в которых используется вспомогательный турбокомпрессор, установленный в ответвлении трубопровода выхлопных газов, приводятся в патентных публикациях [45, 46] южнокорейской судостроительной компании Samsung Heavy Ind. Co., Ltd.; в патенте [49] китайской судостроительной компании Hudong Zhonghua Shipbuilding Group Co., Ltd.; в международной патентной публикации [32] датской судостроительной компании Maersk AS.

В патенте [50] компании MAN Energy Solutions, Дания (филиал немецкой компании MAN Energy Solutions SE), дается описание турбодизеля с улучшенными характеристиками системы сжатого воздуха, используемого для работы воздушной смазки. В частности, вместо воздуха предложено использовать отработанные газы, усовершенствована система управления турбокомпрессором вторичных выхлопных газов. Кроме того, применены турбокомпрессоры, имеющие турбину с изменяемой геометрией, позволяющей регулировать проходное

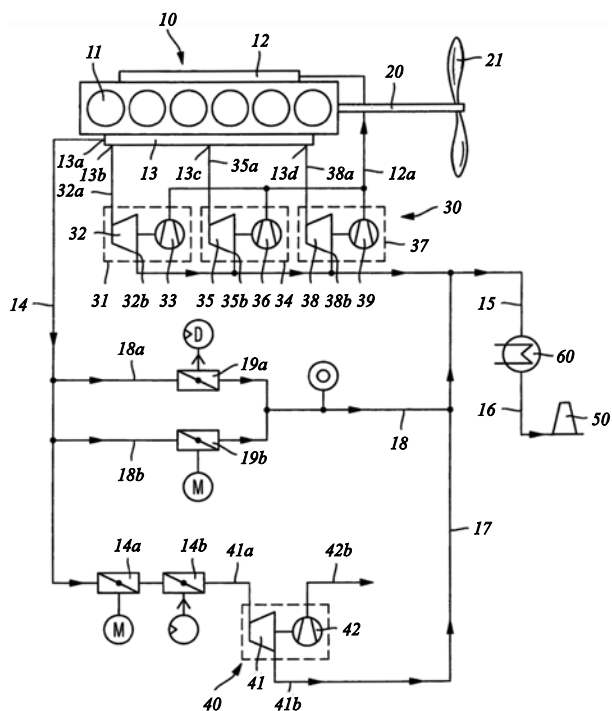


Рис. 8. Принципиальная схема усовершенствования судового дизеля по патенту [41]

Fig. 8. Principal layout of marine engine improvement as described in Patent [41]

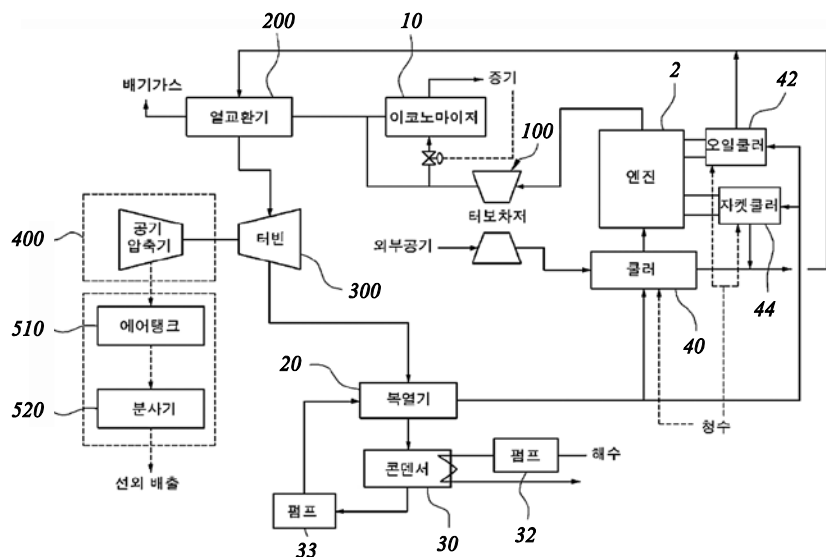
сечение турбины для повышения давления, создаваемого компрессором в фактических условиях работы двигателя.

Японский судостроитель Mitsubishi Heavy Industries предложил дополнить вспомогательный турбокомпрессор электромотором/генератором, посаженным на один вал с компрессором [51]. Когда нагрузка на главный двигатель составляет 50 % и более, избыточная мощность вспомогательной турбины передается на генератор для выработки электроэнергии, используемой судовой системой. Когда нагрузка на главный двигатель становится ниже заданного значения, мотор-генератор работает в качестве дополнительного привода компрессора, получая электроэнергию от судовой системы.

## Использование тепловой энергии выхлопных газов для работы паровой турбины

Utilization of residual heat of exhaust gases to run a steam turbine

Температура выхлопных газов низкооборотного судового турбодизеля перед турбокомпрессором



**Рис. 9.** Схема получения сжатого воздуха с использованием парогенератора [53]

**Fig. 9.** Air compression by means of economizer [53]

составляет в зависимости от нагрузки дизеля примерно от 280 °С (при нагрузке 25 %) до 420 °С (при нагрузке 100 %) [52].

Крупнейшая южнокорейская судостроительная компания Samsung Heavy Industries разработала и запатентовала [53] систему подачи воздуха под днище судна с пузырьковой смазкой, использующую остаточное тепло выхлопных газов главного двигателя. В основе предлагаемого корейцами решения лежит применение парогенератора, вырабатывающего пар, который приводит во вращение паровую турбину (рис. 9).

Выхлопные газы главного двигателя 2 приводят во вращение главный турбокомпрессор 100, который сжимает атмосферный воздух для его подачи в цилиндры главного двигателя. Пройдя через турбину главного турбокомпрессора 100, выхлопные газы направляются в парогенератор 200, в котором происходит испарение и нагрев рабочей жидкости. Рабочей жидкостью, имеющей низкую температуру кипения, может быть хладагент фреоновой серии или углеводородный материал, такой как пропан. Полученный в парогенераторе пар вращает турбину 300, на валу которой установлен компрессор 400.

Сжатый компрессором атмосферный воздух поступает в накопительный бак 510, а оттуда – в систему создания воздушных пузырьков 520. Пар, пройдя через турбину 300, попадает в теплообменник 20, затем в конденсатор 30, где охлаждается морской водой, возвращаясь в жидкое состояние. Охлажденная рабочая жидкость поступает либо в охладитель турбонаддува 40, либо в маслоохладитель 42, либо в охладитель 44 рубашки дизеля. От-

туда нагретая рабочая жидкость снова направляется к парогенератору 200, где она превращается в пар.

Аналогичное техническое решение с использованием парогенератора, утилизирующего тепло отработанных газов для выработки пара, вращающего воздушный компрессор, предложила южнокорейская судостроительная компания STX Offshore & Shipbuilding Co., Ltd. [54].

Похожее техническое решение [55], направленное на увеличение энергосберегающего эффекта воздушной смазки корпуса, разработала японская компания Mitsubishi Heavy Industries, предложившая заменить электродвигатель привода компрессора или воздуходувки паровой турбиной, приводимой в движение паром. Пар вырабатывается парогенерирующей установкой, рекуперирующей избыточное тепло выхлопных газов главного двигателя.

В патенте [56] Samsung Heavy Industries предлагается заменить парогенератор термоэлектрическим генератором, который может генерировать электроэнергию, используя отработанное тепло главного двигателя. В основе работы термогенератора положено термоэлектрическое явление, при котором ток течет в замкнутой цепи, соединяющей два металла или полупроводника, имеющих разную температуру. В данном случае термоэлектрический генератор использует разницу температур между выхлопными газами и забортной водой. В другом варианте, предложенном этой же компанией, термогенератор вместо тепла выхлопных газов может использовать тепло жидкости из системы охлаждения главного двигателя.

Китайская судостроительная компания Hudong Zhonghua Shipbuilding Group Co., Ltd. получила патент [49], в котором тепло выхлопных газов или жидкости из системы охлаждения дизеля используется для выработки пара, вращающего турбогенератор. Полученная электроэнергия используется для электропривода вспомогательного компрессора, подающего воздух под днище судна.

## Комбинированное использование выхлопных газов главного двигателя

Combined use of main engine exhausts

Японские ученые из Национального морского исследовательского института (National Maritime Research Institute Mitaka-shi) нашли решение [36, 37], как, используя только главный двигатель, увеличить объем подаваемого под днище газа для судна с воздушными пузырьками. Идея заключается в том, чтобы задействовать три имеющихся в наличии источника сжатого газа судового дизеля. Общий вид судна, оборудованного энергосберегающим устройством, представлен на рис. 10.

Главный двигатель включает в себя турбокомпрессор 4011, приводимый в действие энергией выхлопных газов и имеющий механизм для принудительного нагнетания сжатого воздуха в камеры сгорания двигателя; промежуточный охладитель 4012, охлаждающий воздух, сжатый турбокомпрессором 4011; трубу 4013 подачи воздуха, передающую сжатый воздух; ресивер 4014 очищенного газа для накопления сжатого воздуха и ресивер 4015 выхлопного газа для накопления генерируемого газа, сжигаемого двигателем.

Газ от главного двигателя 4010 поступает к выпускному отверстию 4040, расположенному на днище судна, по трубе 4030, оборудованной

расходомером 4035, по трем перепускным трубам, присоединенным к разным точкам воздушной магистрали главного двигателя. Первая труба 4023 забирает сжатый воздух на его пути от турбокомпрессора 4011 к промежуточному охладителю 4012. Вторая труба 4024 сообщается с ресивером 4014 очищенного газа. Третья труба 4025 присоединена к приемнику 4015 выхлопных газов. Все три трубы оборудованы дистанционно управляемыми клапанами, с помощью которых можно регулировать объемы газа, подаваемого под днище судна.

Скорость отбора сжатого воздуха и выхлопного газа регулируется в соответствии с навигационными условиями, расходом топлива, с тепловой нагрузкой на двигатель, давлением наддувочного воздуха, температурой выхлопных газов и характеристиками турбокомпрессора.

## Заключение

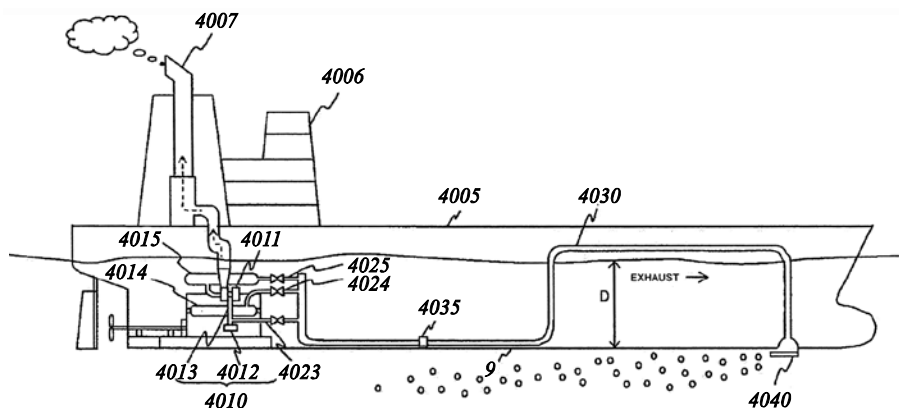
Conclusion

Установка в систему газовыхлопа главного двигателя дополнительного турбокомпрессора или турбогенератора, а также настройка судового дизеля на обеспечение максимально возможного давления продувки или максимально возможного давления выхлопных газов дают возможность превратить двигатель в поставщика сжатого газа для системы воздушной смазки судна. Это намного более эффективно по сравнению с использованием воздушных компрессоров и воздуходувок с электроприводом от дизель-генераторов.

Исключение из системы подачи воздуха компрессоров и воздуходувок с их дизель-генераторами должно повысить заинтересованность судовладельцев в применении воздушных каверн для повышения экономической эффективности как

**Рис. 10.** Схема судна, оборудованного устройством подачи газа по патентам [36, 37]

**Fig. 10.** Layout of a ship with exhaust gas feed system described in Patents [36, 37]



морских транспортных судов, так и судов внутреннего и смешанного «река – море» плавания.

Представленные выше идеи, которые прямо или косвенно используют выхлопной газ главного двигателя или забирают воздух из турбокомпрессора и используют его для уменьшения сопротивления судна, могут быть чреваты различными проблемами при их фактическом применении, которые следует учитывать при проектировании систем подачи воздуха.

Например, газ, проходящий через турбину турбоагрегата, важен для обеспечения газовых характеристик и надежной работы главного двигателя. Забор воздуха из турбоагрегата и забор выхлопных газов после основного двигателя изменяет давление, скорость потока, температуру воздуха, подаваемого в главный двигатель, а также целый ряд других важных параметров. Это может создать проблему для работы главного двигателя в подходящих или в допустимых условиях.

Следующая проблема заключается в том, соответствуют ли параметры отбираемого газа (объем, температура, давление) для работы энергосберегающих устройств, снижающих сопротивление судна. Если газ поступает из нескольких источников, имеющих разные характеристики, параметры газовой смеси могут меняться и не всегда удовлетворять требованиям устройств, применяемых для снижения сопротивления.

Кроме того, в случае использования выхлопных газов возможна экологическая проблема, заключающаяся в том, что выхлопные газы могут загрязнять воду океана. В водах, где выхлопные газы недопустимы для использования, следует использовать подачу наддувочного воздуха или очищенного газа. При этом могут возникнуть ситуации, при которых не удастся отвести достаточное количество газа в соответствии с условиями эксплуатации судна.

В итоге выбор того или иного способа подачи воздуха под днище судна с каверной должен решаться проектантом и должен быть согласован с фирмой – изготовителем дизельных двигателей.

## Список использованной литературы

1. *Сверчков А.В., Пустошный А.В., Горбачев Ю.Н.* Экспериментальные исследования и проектные проработки по применению воздушных каверн на судах смешанного плавания // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 69(353). С. 23–38.
2. *Горбачев Ю.Н., Буянов А.С., Сверчков А.В.* Перспективный способ совершенствования конструкции судов внутреннего и смешанного река – море плавания // Речной транспорт (XXI век). 2014. № 6. С. 28–34.
3. *Горбачев Ю.Н., Сверчков А.В., Галушина М.В.* Пропульсивные качества водоизмещающих судов с единой воздушной каверной на днище // Судостроение. 2015. № 1. С. 17–23.
4. *Горбачев Ю.Н., Буянов А.С., Сверчков А.В.* Суда на воздушной каверне: реальный способ повышения энергоэффективности и экологической безопасности // Морской флот. 2015. № 2. С. 28–37.
5. Устройство для создания единой воздушной каверны на танкере как энергосберегающая технология / *Малов Е.В., Сверчков А.В., Стрельников Н.В., Терентьев А.А.* // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2016. Вып. 91(375). С. 125–138.
6. Friction reducing device and ship comprising same : Pat. 2018016863 WIPO / *Han S.-H., Kim C.-H.* № PCT/KR2017/007754; appl. 19.07.2017; publ. 25.01.2018. 23 p.
7. Air lubrication system for ship and method for reducing frictional resistance of ship applied with air lubrication system : Pat. 20220098858 South Korea / *Son S.-J.* [et al.]. № 10-2021-0000682; appl. 05.01.2025; publ. 12.07.2022. 7 p.
8. Ship with reduced frictional drag and frictional drag reduction device for ship : Pat. 2692623 Europe / *S. Takano, M. Kawabuchi, C. Kawakita* [et al.]. № 12764684.2; appl. 29.03.2012; publ. 05.02.2014, Bul. 2014/06. 52 p.
9. Frictional resistance reduction device for ship : Pat. 3098156 Europe / *C. Kawakita, S. Takano, T. Kubo* [et al.]. № 15754608.6; appl. 06.02.2015; publ. 30.11.2016, Bul. 2016/48. 53 p.
10. Frictional resistance-reducing device and ship including same : Pat. 3385155 Europe / *J.H. Jang, S.M. Kim, S.H. Choi* [et al.]. № 16870858.4; appl. 08.01.2016; publ. 10.10.2018, Bul. 2018/41. 21 p.
11. Frictional resistance reduction device and ship including same : Pat. 20180354587 United States / *Jin Ho Jang* [et al.]. № 15/780600; appl. 08.01.2016; publ. 13.12.2018. 17 p.
12. Air lubrication system and vessel comprising such a system : Pat. 2915735 Europe / *J. Johannesson, N. Silberschmidt, J. Clausen.* № 14157871.6; appl. 05.03.2014; publ. 04.05.2016, Bul. 2016/18. 15 p.
13. Air lubrication system : Pat. 9545978 United States / *J. Johannesson.* № 14/753095; appl. 29.06.2015; publ. 17.07.2017. 9p.
14. Air lubrication device of ships : Pat. 20220013104 South Korea / *Nam B.-T., Oh D.-J.* № 10-20200092168; appl. 24.07.2020; publ. 04.02.2022. 13 p.

15. Air lubrication device of ships : Pat. 20220013518 South Korea / *Nam B.-T.* [et al.]. № 10-20200092169; appl. 24.07.2020; publ. 04.02.2022. 14 p.
16. Air Cavity Vessel : Pat. 7789030 United States / *J.P. Winkler, K. Matveev.* № 11/995253; appl. 23.05.2007; publ. 07.09.2010. 7 p.
17. Air cavity vessel : Pat. 2388188 Europe / *Y.M. Lee, Y.B. Choi, Y.H. Jang.* № 10197434; appl. 30.12.2010; publ. 23.11.2011, Bul. 2011/47. 37 p.
18. Bubble lubrication drag reduction system and ship using internal combustion engine exhaust gas as gas source : Pat. 218858636 China / *Guo S., Jiang S., Xu H., Wang D.* № 202320203862.9; appl. 14.02.2023; publ. 14.04.2023. 7 p.
19. Steam assisted air supply system for a hull of a vessel and a vessel comprising the air supply system : Pat. 2022073900 WIPO / *M. Preem.* № PCT/EP2021/0772322022-04-14; appl. 04.10.2021; publ. 14.04.2022. 25 p.
20. Ship drag reduction system and ship : Pat. 116022280 China / *Sun Y., Sun M.* № 202310097245.X; appl. 01.02.2023; publ. 28.04.2023. 20 p.
21. Propulsion system for ships and method for operating same : Pat. 3933180 Europe / *J. Lauterbach.* № 21178463.2; appl. 09.06.2021; publ. 05.01.2022. 7 p.
22. Exhaust gas blowout device for ship : Pat. 2001233281 Japan / *Y. Ito, S. Sugiyama.* № 2000045783; appl. 23.02.2000; publ. 28.08.2001.
23. Exhaust gas blowout device for ship : Pat. 2001233282 Japan / *A. Tsuo, S. Abe.* № 2000049164; appl. 25.02.2000; publ. 28.08.2001.
24. Underwater discharge device for exhaust gas from ship : Pat. 2001233292 Japan / *S. Yamaguchi, S. Abe.* № 2000045801; appl. 23.02.2000; publ. 28.08.2001.
25. Underwater discharge device for exhaust gas in ship : Pat. 2001239994 Japan / *S. Abe, Y. Ito.* № 2000053942; appl. 29.02.2000; publ. 04.09.2001.
26. Underwater discharge devices for exhaust gas in ship : Pat. 2001239995 Japan / *S. Abe, S. Yamaguchi.* № 2000053943; appl. 29.02.2000; publ. 04.09.2001.
27. Frictional resistance reducing device for ship : Pat. 5631340 Japan / *H. Ishida.* № 2012007794; appl. 18.01.2012; publ. 26.11.2014. 8 p.
28. Frictional resistance-reducing device for air-lubricated ship, and ship : Pat. 6484902 Japan / Mitsubishi Heavy Industries. № 2015073479; appl. 31.03.2015; publ. 20.03.2019. 28 p.
29. Ship drag reduction system based on waste gas utilization : Pat. 111746710 China / *Zhu H.* [et al.]. № 202010495940; appl. 03.06.2020; publ. 09.10.2020. 12 p.
30. A device that generates bubbles from the bottom of the ship : Pat. 5697192 Japan. № 1979180109; appl. 24.12.1979; publ. 01.08.1981.
31. Apparatus for Discharging Exhaust Gas for Ship : Pat. 101505571 South Korea / *Lim I.* [et al.]. № 20130067506; appl. 13.06.2013; publ. 24.03.2015. 10 p.
32. An air supply system for a hull of a vessel and a vessel comprising the air supply system : Pat. 2022069627 WIPO / *M. Preem.* № PCT/EP2021/076940; appl. 30.09.2021; publ. 07.04.2022. 43 p.
33. An air supply apparatus for a ship including the same and method of supplying air to an air lubrication device : Pat. 20230150405 South Korea / *J.-F. Tissot* [et al.]. № 1020237035458; appl. 17.03.2022; publ. 30.10.2023. 20 p.
34. Современные крейцкопфные двигатели // MirMarine : [сайт]. 2022. 27 янв. URL: <https://mirmarine.net/dvs/1618-sovremennye-krejtscopfnye-dvigateli?ysclid=lpw06z8fp30497354> (дата обращения: 10.12.2023).
35. *Bondarenko O., Fukuda T.* An Efficient Utilization of Main Engine Scavenging Air for Air Lubrication System. Part 1: Experiment and Simulation // Proceedings of the 7<sup>th</sup> Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics in Naval Architecture, Ocean Technology and Subsea Technology. Vladivostok, 2014. P. 146–151.
36. Method and apparatus for reducing marine frictional resistance : Pat. 5311565 Japan / *H. Kawashima* [et al.]. № 2009080676; appl. 27.03.2009; publ. 09.10.2013. 43 p.
37. Frictional Resistance Reduction Device for Ship. Ship jet gas supply method and jet gas control device : Pat. 5403648 Japan / *T. Fukuda* [et al.]. № 2008186588; appl. 17.07.2008; publ. 29.01.2014. 24 p.
38. Air Lubrication Device and Ship : Pat. 2930098 Europe / *K. Tanaka, K. Watanabe, T. Inoue.* № 13860109.1; appl. 24.09.2013; publ. 14.10.2015, Bul. 2015/42. 12 p.
39. Air Supply Device for Air-lubricated Ship : Pat. EP2778039A1 Europe / *T. Fukuda* [et al.]. № JP2012006856W; appl. 25.10.2012; publ. 17.09.2014, Bul. 2014/38. 25 p.
40. Device for Reducing Resistance of Ship Body : Pat. 2679481 Europe / *K. Shiraiishi.* № 12749892.1; appl. 01.02.2012; publ. 01.01.2014, Bul. 2014/01. 13 p.
41. Schiffsantriebssystem und damit ausgerüstetes Schiff : Pat. 102009022711 Germany / *O. Löwlein.* № 102009022711.3; anmel. 26.05.2009; publ. 03.02.2011. 10 s.
42. Frictional resistance reducing vessel and gas delivering method therefor : Pat. 2001048082 Japan / *Y. Takahashi.* № 11220566; appl. 03.08.1999; publ. 20.02.2001.
43. Ship having air lubrication system using engine scavenge air : Pat. 20200055517 South Korea / *J.-K. Hwang.* № 1020180139252; appl. 13.11.2018; publ. 21.05.2020. 9 p.

44. An air supply system for a hull of a vessel and a vessel comprising the air supply system : Pat. 2022073908 WIPO / *M. Preem*. № PCT/EP2021/077249; appl. 04.10.2021; publ. 14.04.2022. 27 p.
45. Air lubrication system for ship : Pat. 20140047768 South Korea / *Lee D.-G.* [et al.]. № 1020120113684; appl. 10.12.2012; publ. 23.04.2014. 9 p.
46. Air lubrication system for ship : Pat. 20140083944 South Korea / *Lee D.-G.* [et al.]. № 20140064286; appl. 28.05.2014; publ. 04.07.2014. 8 p.
47. Ship compressed air supply system and apparatus : Pat. 5294135 Japan / *R. Suenaga, H. Shimaya*. № 2012064833; appl. 22.03.2012; publ. 18.09.2013. 10 p.
48. Air supply device for a marine vessel, marine vessel comprising the same and method of supplying air to an air lubrication apparatus : Pat. 113710573 China / *J. Keinaenen*. № 201980094808; appl. 28.03.2019; publ. 26.11.2021. 9 p.
49. Compressed air energy storage system and method for ship with air lubrication system : Pat. 115285277 China / *Zhu Z.* [et al.]. № 202210934099; appl. 04.08.2022; publ. 04.11.2022. 7 p.
50. Method and large turbocharged two-stroke internal combustion engine for delivering mechanical energy and pressurized gas : Pat. 181374 Denmark / *Schmuttermair H.* № 202270080; appl. 02.03.2022; publ. 14.09.2023. 43 p.
51. Hull resistance reduction system and hull resistance reduction method : Pat. 5805044 Japan / *K. Shiraishi, A. Zaito*. № 2012226888; appl. 12.10.2012; publ. 04.11.2015. 11 p.
52. Combustion and emission characteristics for a marine low-speed diesel engine with high-pressure SCR system / *Y. Zhu, C. Xia, M. Shreka* [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 12851–12865. DOI: 10.1007/s11356-019-04194-2.
53. Waste Heat Recycling System for Ship Resistance Reducing Apparatus : Pat. 101247762 South Korea / *Lee S., Park G., Choi J.* № 20110017073; appl. 25.02.2011; publ. 25.03.2013. 11 p.
54. Air supply system and method using the exhaust gas of the ship: Pat. 20140070814 South Korea / *G. Kim, D. Kim, K. Lee*. № 1020120135630; appl. 27.11.2012; publ. 11.06.2014. 5 p.
55. Air lubricating system of ship : Pat. 2013129406 Japan / *Katsuhiko Kubo, Masahiko Mino, Shinichi Takano*. № 2011282282; appl. 22.12.2014; publ. 04.07.2013. 10 p.
56. Apparatus for reducing ship resistance : Pat. 101588679 South Korea / *Y. Kim, J. Kim*. № 1020140033419; appl. 21.03.2014; publ. 27.01.2016. 12 p.

## References

1. *Sverchkov A.V., Pustoshny A.V., Gorbachev Yu.N.* Experimental study and design activities on application of air cavities for coastal shipping vessels // *Transactions of Krylov Central Research Institute*. 2012. Vol. 69(353). P. 23–38 (in Russian).
2. *Gorbachev Yu.N., Buyanov A.S., Sverchkov A.V.* A promising way of improving designs of inland and mixed (river-sea) navigation vessels // *River transport (XXI century)*. 201. No. 6. P. 28–34 (in Russian).
3. *Gorbachev Yu.N., Sverchkov A.V., Galushina M.V.* Propulsion qualities of water displacing vessels with integrated air cavern on bottom // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2015. No. 1. P. 17–23 (in Russian).
4. *Gorbachev Yu.N., Buyanov A.S., Sverchkov A.V.* Air-cavity ships: a real way for improving power efficiency and environmental safety // *Morskoy Flot (Maritime Fleet)*. 2015. No. 2. P. 28–37 (in Russian).
5. Device for generation of continuous air cavity on tanker hull for energy saving purposes / *Ye.V. Malov, A.V. Sverchkov, N.V. Strelnikov, A.A. Terentyev* // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2016. Vol. 91(375). P. 125–138 (in Russian).
6. Friction reducing device and ship comprising same : Pat. 2018016863 WIPO / *Han S.-H., Kim C.-H.* № PCT/KR2017/007754; appl. 19.07.2017; publ. 25.01.2018. 23 p.
7. Air lubrication system for ship and method for reducing frictional resistance of ship applied with air lubrication system : Pat. 20220098858 South Korea / *Son S.-J.* [et al.]. № 10-2021-0000682; appl. 05.01.2025; publ. 12.07.2022. 7 p.
8. Ship with reduced frictional drag and frictional drag reduction device for ship : Pat. 2692623 Europe / *S. Takano, M. Kawabuchi, C. Kawakita* [et al.]. № 12764684.2; appl. 29.03.2012; publ. 05.02.2014, Bul. 2014/06. 52 p.
9. Frictional resistance reduction device for ship : Pat. 3098156 Europe / *C. Kawakita, S. Takano, T. Kubo* [et al.]. № 15754608.6; appl. 06.02.2015; publ. 30.11.2016, Bul. 2016/48. 53 p.
10. Frictional resistance-reducing device and ship including same : Pat. 3385155 Europe / *J.H. Jang, S.M. Kim, S.H. Choi* [et al.]. № 16870858.4; appl. 08.01.2016; publ. 10.10.2018, Bul. 2018/41. 21 p.
11. Frictional resistance reduction device and ship including same : Pat. 20180354587 United States / *Jin Ho Jang* [et al.]. № 15/780600; appl. 08.01.2016; publ. 13.12.2018. 17 p.
12. Air lubrication system and vessel comprising such a system : Pat. 2915735 Europe / *J. Johannesson*,

- N. Silberschmidt, J. Clausen.* № 14157871.6; appl. 05.03.2014; publ. 04.05.2016, Bul. 2016/18. 15 p.
13. Air lubrication system : Pat. 9545978 United States / *J. Johannesson.* № 14/753095; appl. 29.06.2015; publ. 17.07.2017. 9p.
14. Air lubrication device of ships : Pat. 20220013104 South Korea / *Nam B.-T., Oh D.-J.* № 10-20200092168; appl. 24.07.2020; publ. 04.02.2022. 13 p.
15. Air lubrication device of ships : Pat. 20220013518 South Korea / *Nam B.-T.* [et al.]. № 10-20200092169; appl. 24.07.2020; publ. 04.02.2022. 14 p.
16. Air Cavity Vessel : Pat. 7789030 United States / *J.P. Winkler, K. Marveev.* № 11/995253; appl. 23.05.2007; publ. 07.09.2010. 7 p.
17. Air cavity vessel : Pat. 2388188 Europe / *Y.M. Lee, Y.B. Choi, Y.H. Jang.* № 10197434; appl. 30.12.2010; publ. 23.11.2011, Bul. 2011/47. 37 p.
18. Bubble lubrication drag reduction system and ship using internal combustion engine exhaust gas as gas source : Pat. 218858636 China / *Guo S., Jiang S., Xu H., Wang D.* № 202320203862.9; appl. 14.02.2023; publ. 14.04.2023. 7 p.
19. Steam assisted air supply system for a hull of a vessel and a vessel comprising the air supply system : Pat. 2022073900 WIPO / *M. Preem.* № PCT/EP2021/0772322022-04-14; appl. 04.10.2021; publ. 14.04.2022. 25 p.
20. Ship drag reduction system and ship : Pat. 116022280 China / *Sun Y., Sun M.* № 202310097245.X; appl. 01.02.2023; publ. 28.04.2023. 20 p.
21. Propulsion system for ships and method for operating same : Pat. 3933180 Europe / *J. Lauterbach.* № 21178463.2; appl. 09.06.2021; publ. 05.01.2022. 7 p.
22. Exhaust gas blowout device for ship : Pat. 2001233281 Japan / *Y. Ito, S. Sugiya.* № 2000045783; appl. 23.02.2000; publ. 28.08.2001.
23. Exhaust gas blowout device for ship : Pat. 2001233282 Japan / *A. Tsuo, S. Abe.* № 2000049164; appl. 25.02.2000; publ. 28.08.2001.
24. Underwater discharge device for exhaust gas from ship : Pat. 2001233292 Japan / *S. Yamaguchi, S. Abe.* № 2000045801; appl. 23.02.2000; publ. 28.08.2001.
25. Underwater discharge device for exhaust gas in ship : Pat. 2001239994 Japan / *S. Abe, Y. Ito.* № 2000053942; appl. 29.02.2000; publ. 04.09.2001.
26. Underwater discharge devices for exhaust gas in ship : Pat. 2001239995 Japan / *S. Abe, S. Yamaguchi.* № 2000053943; appl. 29.02.2000; publ. 04.09.2001.
27. Frictional resistance reducing device for ship : Pat. 5631340 Japan / *H. Ishida.* № 2012007794; appl. 18.01.2012; publ. 26.11.2014. 8 p.
28. Frictional resistance-reducing device for air-lubricated ship, and ship : Pat. 6484902 Japan / Mitsubishi Heavy Industries. № 2015073479; appl. 31.03.2015; publ. 20.03.2019. 28 p.
29. Ship drag reduction system based on waste gas utilization : Pat. 111746710 China / *Zhu H.* [et al.]. № 202010495940; appl. 03.06.2020; publ. 09.10.2020. 12 p.
30. A device that generates bubbles from the bottom of the ship : Pat. 5697192 Japan. № 1979180109; appl. 24.12.1979; publ. 01.08.1981.
31. Apparatus for Discharging Exhaust Gas for Ship : Pat. 101505571 South Korea / *Lim I.* [et al.]. № 20130067506; appl. 13.06.2013; publ. 24.03.2015. 10 p.
32. An air supply system for a hull of a vessel and a vessel comprising the air supply system : Pat. 2022069627 WIPO / *M. Preem.* № PCT/EP2021/076940; appl. 30.09.2021; publ. 07.04.2022. 43 p.
33. An air supply apparatus for a ship including the same and method of supplying air to an air lubrication device : Pat. 20230150405 South Korea / *J.-F. Tissot* [et al.]. № 1020237035458; appl. 17.03.2022; publ. 30.10.2023. 20 p.
34. Modern crosshead engines // Web site MirMarine. URL: <https://mirmarine.net/dvs/1618-sovremennye-krejskopfnye-dvigateli?ysclid=lpw06z8fp30497354> (Accessed:10.12.2023) (in Russian).
35. *Bondarenko O., Fukuda T.* An Efficient Utilization of Main Engine Scavenging Air for Air Lubrication System. Part 1: Experiment and Simulation // Proceedings of the 7<sup>th</sup> Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics in Naval Architecture, Ocean Technology and Subsea Technology. Vladivostok, 2014. P. 146–151.
36. Method and apparatus for reducing marine frictional resistance : Pat. 5311565 Japan / *H. Kawashima* [et al.]. № 2009080676; appl. 27.03.2009; publ. 09.10.2013. 43 p.
37. Frictional Resistance Reduction Device for Ship. Ship jet gas supply method and jet gas control device : Pat. 5403648 Japan / *T. Fukuda* [et al.]. № 2008186588; appl. 17.07.2008; publ. 29.01.2014. 24 p.
38. Air Lubrication Device and Ship : Pat. 2930098 Europe / *K. Tanaka, K. Watanabe, T. Inoue.* № 13860109.1; appl. 24.09.2013; publ. 14.10.2015, Bul. 2015/42. 12 p.
39. Air Supply Device for Air-lubricated Ship : Pat. EP2778039A1 Europe / *T. Fukuda* [et al.]. № JP2012006856W; appl. 25.10.2012; publ. 17.09.2014, Bul. 2014/38. 25 p.
40. Device for Reducing Resistance of Ship Body : Pat. 2679481 Europe / *K. Shiraiishi.* № 12749892.1; appl. 01.02.2012; publ. 01.01.2014, Bul. 2014/01. 13 p.
41. Schiffsantriebssystem und damit ausgerüstetes Schiff : Pat. 102009022711 Germany / *O. Löwlein.*

- № 102009022711.3; anmel. 26.05.2009; publ. 03.02.2011. 10 s.
42. Frictional resistance reducing vessel and gas delivering method therefor : Pat. 2001048082 Japan / *Y. Takahashi*. № 11220566; appl. 03.08.1999; publ. 20.02.2001.
43. Ship having air lubrication system using engine scavenge air : Pat. 20200055517 South Korea / *J.-K. Hwang*. № 1020180139252; appl. 13.11.2018; publ. 21.05.2020. 9 p.
44. An air supply system for a hull of a vessel and a vessel comprising the air supply system : Pat. 2022073908 WIPO / *M. Preem*. № PCT/EP2021/077249; appl. 04.10.2021; publ. 14.04.2022. 27 p.
45. Air lubrication system for ship : Pat. 20140047768 South Korea / *Lee D.-G.* [et al.]. № 1020120113684; appl. 10.12.2012; publ. 23.04.2014. 9 p.
46. Air lubrication system for ship : Pat. 20140083944 South Korea / *Lee D.-G.* [et al.]. № 20140064286; appl. 28.05.2014; publ. 04.07.2014. 8 p.
47. Ship compressed air supply system and apparatus : Pat. 5294135 Japan / *R. Suenaga, H. Shimaya*. № 2012064833; appl. 22.03.2012; publ. 18.09.2013. 10 p.
48. Air supply device for a marine vessel, marine vessel comprising the same and method of supplying air to an air lubrication apparatus : Pat. 113710573 China / *J. Keinaenen*. № 201980094808; appl. 28.03.2019; publ. 26.11.2021. 9 p.
49. Compressed air energy storage system and method for ship with air lubrication system : Pat. 115285277 China / *Zhu Z.* [et al.]. № 202210934099; appl. 04.08.2022; publ. 04.11.2022. 7 p.
50. Method and large turbocharged two-stroke internal combustion engine for delivering mechanical energy and pressurized gas : Pat. 181374 Denmark / *Schmuttermair H.* № 202270080; appl. 02.03.2022; publ. 14.09.2023. 43 p.
51. Hull resistance reduction system and hull resistance reduction method : Pat. 5805044 Japan / *K. Shiraiishi, A. Zaitzu*. № 2012226888; appl. 12.10.2012; publ. 04.11.2015. 11 p.
52. Combustion and emission characteristics for a marine low-speed diesel engine with high-pressure SCR system / *Y. Zhu, C. Xia, M. Shreka* [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 12851–12865. DOI: 10.1007/s11356-019-04194-2.
53. Waste Heat Recycling System for Ship Resistance Reducing Apparatus : Pat. 101247762 South Korea / *Lee S., Park G., Choi J.* № 20110017073; appl. 25.02.2011; publ. 25.03.2013. 11 p.
54. Air supply system and method using the exhaust gas of the ship: Pat. 20140070814 South Korea / *G. Kim, D. Kim, K. Lee*. № 1020120135630; appl. 27.11.2012; publ. 11.06.2014. 5 p.
55. Air lubricating system of ship : Pat. 2013129406 Japan / *Katsuhiko Kubo, Masahiko Mino, Shinichi Takano*. № 2011282282; appl. 22.12.2014; publ. 04.07.2013. 10 p.
56. Apparatus for reducing ship resistance : Pat. 101588679 South Korea / *Y. Kim, J. Kim*. № 1020140033419; appl. 21.03.2014; publ. 27.01.2016. 12 p.

---

#### Сведения об авторе

*Сверчков Андрей Владимирович*, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-26. E-mail: ksri@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9006-8812>.

#### About the author

*Andrey V. Sverchkov*, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector of Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-26. E-mail: ksri@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9006-8812>.

Поступила / Received: 25.11.23  
Принята в печать / Accepted: 27.02.24  
© Сверчков А.В., 2024