

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-197-210

УДК 629.5.036:629.5.067.2

М.С. Сергеев, В.И. Таровик, [Н.А. Вальдман](#) , А.Г. Лабузов 

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

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕАКТИВНО-ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ДВИЖИТЕЛЯ В СОСТАВЕ АРКТИЧЕСКОЙ СПАСАТЕЛЬНОЙ ШЛЮПКИ

Объект и цель научной работы. В статье приведен обзор результатов, которые были получены в процессе работы по обоснованию эффективности применения реактивно-пневматического движителя (РПД) в составе арктической спасательной шлюпки. На основании полученных результатов делаются выводы о перспективах применения нестандартного типа движителя на этапе экстренного выхода за пределы зоны действия поражающих факторов аварии.

Материалы и методы. Приведенные результаты основываются на хорошо исследованных, зарекомендовавших себя множественной верификацией методах механики твердого тела, механики тела переменной массы, теплопередачи. Информация об актуальности проблематики эвакуации людей с морских объектов в ледовых условиях основывается на обобщении статей и патентов, посвященных данной проблеме, и на опыте работы сотрудников ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Основные результаты. Получены данные о кинематических характеристиках спасательной шлюпки, зависимости кинематических характеристик от типа рабочего тела движителя, рассмотрены вопросы устойчивости движителя на программном (заданном) режиме при тепловом и инерционных возмущениях. Результаты адаптируются под этап экстренного выхода спасательной шлюпки закрытого типа из зоны поражения, и на этом основании делаются выводы о перспективах применения рассматриваемого движителя.



Заключение. Применение реактивно-пневматического движителя на этапе экстренного выхода из зоны действия поражающих факторов аварии может существенно повысить эффективность процесса эвакуации. Простота конструкции и принципа действия позволяет сократить время подготовки к экстренному выходу, движитель также является устойчивым на длительных тепловых возмущениях относительно программного режима движения. Варьированием термодинамических параметров рабочего тела можно обеспечить заранее заданный радиус безопасности.

Ключевые слова: реактивно-пневматический движитель, этапы эвакуации, арктическая спасательная шлюпка, параметры рабочего тела, тепловое взаимодействие.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-197-210

UDC 629.5.036:629.5.067.2

M. Sergeev, V. Tarovik, [N. Valdman](#) , A. Labuzov 

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

PNEUMATIC-JET PROPULSOR FOR ARCTIC LIFEBOAT: EFFICIENCY JUSTIFICATION

Object and purpose of research. This paper reviews the findings of efficiency justification study for pneumatic-jet propulsion of Arctic lifeboat. These results lead to the conclusion that this non-conventional type of propulsion could be a promising solution for fast escape beyond the hazard zone in case of emergency.

Materials and methods. The results presented in this paper are based on well-studied and proven methods of solid mechanics, variable-mass mechanics and heat transfer. The relevance of the task of personnel evacuation from marine facilities

Для цитирования: Сергеев М.С., Таровик В.И., Вальдман Н.А., Лабузов А.Г. Обоснование эффективности применения реактивно-пневматического движителя в составе арктической спасательной шлюпки. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 1(399): 197–210.

For citations: Sergeev M., Tarovik V., Valdman N., Labuzov A. Pneumatic-jet propulsor for Arctic lifeboat: efficiency justification. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 1(399): 197–210 (in Russian).

in ice conditions is confirmed by the summary analysis of publications and patents about this topic, as well as by the experience of KSRC researchers.

Main results. The study yielded the data on the lifeboat's kinematics, as well as the curves of kinematic parameters for various types of the propellant. It also analysed the stability of pneumatic-jet propulsor operation in design conditions under effect of thermal and inertial disturbances. The results obtained for the closed lifeboat's emergency escape from the hazard zone have shown that this type of lifeboat propulsion surely has practical potential.

Conclusion. Pneumatic-jet propulsion might considerably increase the evacuation process efficiency in terms of the fast escape from the hazard zone. Simple design and operation principle reduce the time needed to prepare for the emergency escape. Also, this type of propulsion features robustness against long-term thermal disturbances with respect to its design conditions. Pre-defined safety radius may be ensured through variation of the propellant's thermodynamic properties.

Keywords: pneumatic-jet propulsion, evacuation stages, Arctic lifeboat, propellant parameters, thermal interaction.
The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Термин «эвакуация» в обычном представлении сопоставляется с устранением угрозы для жизни и здоровья людей или с нивелированием возникающих рисков в аварийных и экстремальных условиях. Однако с технической стороны данный термин не является тривиальным, поскольку подразумевает собой совокупность действий, для реализации которых необходимо проведение обширного комплекса подготовительных операций, применение вспомогательных технических средств различного уровня сложности и современное оснащение спасательными комплексами.

В соответствии с [1] термин «эвакуация» может быть определен как процесс перемещения людей с помощью технических устройств и средств из помещений морского сооружения в зону безопасности за пределы области действия поражающих факторов аварии. Эвакуация может считаться завершенной после транспортировки персонала в такое место, в котором обеспечен уровень безопасности, аналогичный доаварийному [1]. При этом сам процесс эвакуации на морских объектах и с них можно разделить на следующие этапы:

- Этап сбора людей вблизи спасательной шлюпки с последующим размещением в ней. Частичное устранение/сокращение рисков, связанных с данным этапом, достигается путем проведения постоянных тренировок по сбору людей в местах локализации спасательных средств.
- Этап спуска спасательной шлюпки на воду/лед при помощи спусковых устройств. Основные риски на данном этапе связаны с возможностью гибели спасательной шлюпки при соударении с бортом судна или морским нефтегазопромышленным гидротехническим сооружением (МНГС), выходом из строя спускового устройства. Устранение рисков, связанных с данным

этапом, достигается путем включения в конструкцию спускового устройства амортизирующих (противоударных) элементов или ограничивающих жестких связей, исключающих ударное взаимодействие спускаемой шлюпки с бортом судна или МНГС. Например, в [2] предложена конструкция демпфера спускового устройства спасательных шлюпок, где в качестве амортизатора используется гидравлическая жидкость.

- Этап экстренного выхода спасательной шлюпки за пределы зоны действия поражающих факторов аварии. Основные риски на данном этапе сопряжены с возможностью гибели спасательной шлюпки при поражении элементами аварийного судна или морского сооружения и ее затягиванием при расположении вблизи тонущего морского объекта. Устранение рисков, связанных с этим этапом, достигается путем сокращения времени ввода энергетической установки спасательной шлюпки в рабочее состояние и времени разгона спасательной шлюпки, применения нестандартных движительных комплексов в составе энергетической установки, использования концепции двухкорпусной (гидродинамической и ледостойкой) конструкции корпуса спасательной шлюпки.

Эффективность эвакуации персонала зависит от эффективности проведения каждого из перечисленных этапов, что отображает широкий спектр взаимосвязей между успешной реализацией операции и уровнем технических решений, принимаемых превентивных мер по усовершенствованию технических возможностей систем и внедрению новых концепций, а также уровнем подготовки персонала.

С некоторыми существующими концепциями арктических спасательных шлюпок можно ознакомиться, используя источники [3–5].

Описание концепции арктической спасательной шлюпки с реактивно-пневматическим двигателем, теоретических результатов, результатов натурных испытаний

Description of the concept of an arctic lifeboat with jet-pneumatic propulsion, theoretical results, results of full-scale tests

В данной статье представлены основные результаты исследований, проведенных авторами в отношении применения реактивно-пневматического двигателя (РПД) в составе энергетической установки арктической спасательной шлюпки. Из перечисленных выше этапов, по мнению авторов, применение данного устройства, нестандартного для морских спасательных средств, наиболее эффективно на экстренном, наиболее ответственном этапе выхода спасательной шлюпки от аварийного морского объекта. При этом реактивно-пневматический двигатель запускается одним поворотом рычага клапана высокого давления.

Результаты натурных испытаний и теоретических исследований были получены сотрудниками 5-НИО ФГУП «Крыловский государственный научный центр» при выполнении ОКР «Разработка системы экстренной эвакуации персонала с морских нефтегазовых сооружений в ледовых условиях», шифр «Лодка-система», реализованной по гос. контракту № 14411.1879999.09.034 в рамках ФЦП «Развитие гражданской морской техники».

На рис. 1 представлены изображения арктической спасательной шлюпки с РПД при подготовке к испытаниям и на начальном этапе движения после открытия запорных клапанов баллонов. Испытания арктической спасательной шлюпки с РПД проводились в условиях чистой воды [7].

С целью обеспечения выживания спасательной шлюпки в условиях ледового сжатия на следующем



a)



b)

Рис. 1. Арктическая спасательная шлюпка с реактивно-пневматическим двигателем: а) при подготовке к испытаниям; б) на начальном этапе движения после открытия запорных клапанов баллонов

Fig. 1. Arctic lifeboat with pneumatic-jet propulsion: а) preparation for tests; б) initial stage of running (after release of the bottles' lock valves)

этапе реализации проекта ее корпус предполагается выполненным в двухкорпусном варианте. При этом внешний легкий корпус обеспечивает гидродинамические качества спасательной шлюпки, а внутренний прочный корпус при ледовом сжатии и разрушении легкого корпуса выталкивается на ледовую поверхность без потери герметичности, что обеспечивает выживаемость находящихся в нем людей.

На рис. 2 представлена концепция двухкорпусной арктической спасательной шлюпки с интегрированным РПД в межбортное пространство [6].

Корпус спасательного средства

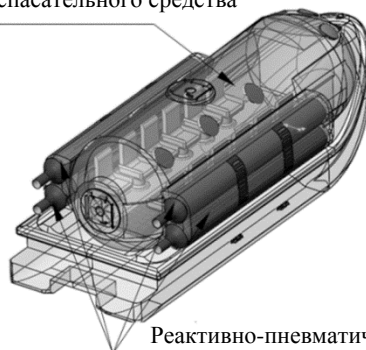
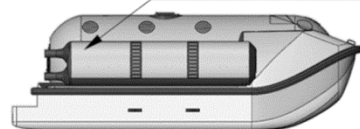


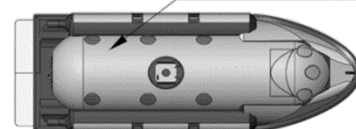
Рис. 2. Концепция арктической спасательной шлюпки с интегрированным в жесткий корпус реактивно-пневматическим двигателем

Fig. 2. A concept of Arctic lifeboat with pneumatic-jet propulsor embedded to rigid hull

Вид сбоку



Вид сверху



Реактивно-пневматический двигатель

Таблица 1. Основные технические характеристики спасательной шлюпки с реактивно-пневматическим двигателем

Table 1. Main performance parameters of the lifeboat with pneumatic-jet propulsion

№	Название параметра	Значение	№	Название параметра	Значение	№	Название параметра	Значение
1	Длина корпуса, м	6–8	4	Масса со снабжением и людьми, т	5–7	7	Объем баллона V , м ³	До 1
2	Ширина корпуса, м	3–5	5	Вместимость, чел.	20–25	8	Вариант открытия клапанов	Механическая передача, система автоматики, клапаны высокого давления
3	Высота корпуса, м	3–3,5	6	Материал двигателя (баллонов)	Стеклопластик, стеклополимеры, металлопластик, металлокомпози́ты	9	Количество баллонов n , шт.	В зависимости от радиуса безопасности

Основные технические характеристики однокорпусной арктической спасательной шлюпки (шлюпки, используемой в натуральных испытаниях) с РПД представлены в табл. 1 [8].

По своей сути РПД представляет собой совокупность емкостей высокого давления (баллоны высокого давления), снабженных элементами открытия выпускных клапанов и элементами крепления к жесткому корпусу спасательной шлюпки. Емкости (баллоны) выполняются из стеклопластика, стеклополимеров, металлопластиков, металлокомпози́тов в целях устранения взрыва и поражения осколками емкости (баллона) при воздействии запроектных нагрузок.

Принцип действия РПД заключается в преобразовании внутренней энергии рабочего тела в меха-

ническую энергию струй истекающего газа. В момент открытия запорных клапанов возникает реактивная сила, за счет которой происходит движение спасательной шлюпки. Величина реактивной силы максимальна в момент открытия клапанов и достигает своего минимума в момент завершения критического режима истечения при $\beta = \beta_{кр}$ (β – параметр давления, характеризующий смену режимов истечения рабочего тела). Таким образом, для приведения двигателя в действие необходимо только открытие запорных клапанов.

На рис. 3 представлены графики изменения скорости и ускорения арктической спасательной шлюпки при проведении испытаний в условиях чистой воды.

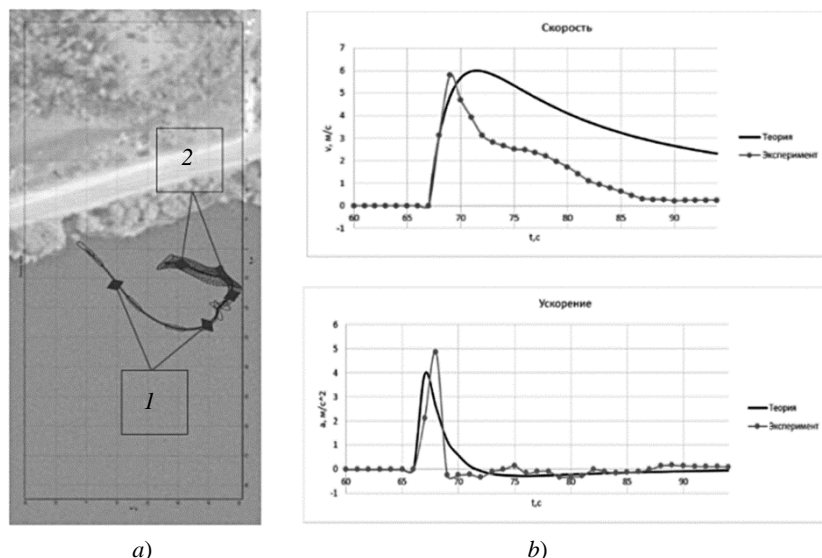


Рис. 3. Траектория движения арктической спасательной шлюпки (а) и графики изменения ее скорости и ускорения (б) при проведении испытаний в условиях чистой воды: 1 – кривая движения спасательной шлюпки в процессе выработки ресурса рабочего тела реактивно-пневматического двигателя; 2 – зона дрейфа спасательной шлюпки после выработки ресурса рабочего тела реактивно-пневматического двигателя

Fig. 3. Open-water speed and acceleration curves of the lifeboat during the tests: 1 – boat trajectory as the propellant expires; 2 – boat drift zone after the propellant expires

Таблица 2. Параметры рабочего тела

Table 2. Propellant data

Внутри баллона	ρ_0 , кг/м ³	p_0 , бар	T_0 , К	k	R , Дж/кг·К
Численное значение	246,66	200	273	1,4	287,0
Снаружи баллона	ρ_a , кг/м ³	p_a , бар	T_a , К	k	R , Дж/кг·К
Численное значение	1,221	1	273	1,4	287,0

В дополнение к графикам изменения скорости и ускорения на рис. 3 приведена траектория движения арктической спасательной шлюпки. Анализируя траекторию движения, следует объяснить смысл участков 1 и 2. Основной целью проведенного эксперимента была верификация математической модели прямолинейного движения арктической спасательной шлюпки в условиях чистой воды в процессе выработки ресурса рабочего тела РПД. Согласованность результатов эксперимента с результатами математической модели позволяет подбирать параметры рабочего тела ρ , p , T и конструктивные параметры движителя d , V (диаметр сечения выходных патрубков и объем баллонов) таким образом, чтобы обеспечивался гарантированный выход за радиус поражения R в случае гибели морского объекта. Участок 1 отображает движение арктической спасательной шлюпки за счет истечения рабочего тела РПД, а участок 2 отображает состояние дрейфа после завершения процесса. На участке 1 можно выделить траекторию движения, близкую к прямолинейной (траектория верификации), и криволинейный участок траектории, соответствующий постепенному развороту шлюпки. Появление криволинейного участка траектории объясняется вращающим моментом относительно центра масс шлюпки, который возникает при асинхронности открытия запорных клапанов побортно установленных баллонов. Асинхронность открытия может быть нивелирована применением автоматических запорных клапанов, т.к. используемый в процессе проведения эксперимента механический способ открытия априори связан с возникновением временной задержки. При механическом открытии асинхронность может быть устранена за счет вывода потоков истекающего газа в единое сопловое устройство, что также имеет смысл, если присутствует вероятность появления неравнозначности значений параметров рабочего тела ρ , p , T в баллонах движителя.

Траектория участка 2 отображает дрейфующее/неуправляемое состояние спасательной

шлюпки после полной выработки ресурса рабочего тела РПД и не представляет экспериментальной ценности.

Параметры рабочего тела, используемые во время испытаний и при теоретических расчетах, представлены в табл. 2.

В качестве рабочего тела движителя был выбран азот. Выбор данного типа газа обосновывается его инертными свойствами, соотношением энергоэффективность/цена и доступностью. Параметры азота связаны между собой уравнением состояния идеального газа, что существенно упрощает исследование задачи об истечении газа из сосуда с ограниченным объемом. Газодинамические особенности истечения рабочего тела РПД были рассмотрены на основании теории квазистационарного изэнтропического истечения газа.

На рис. 4 представлены расчетные зависимости координаты спасательной шлюпки от времени при использовании азота, аргона, гелия, неона в качестве рабочего тела движителя.

На рис. 5 представлены графики расчетных зависимостей, описывающие изменения давления в баллоне и времени завершения критического режима истечения рабочего тела в зависимости от диаметра патрубка.

На рис. 6 представлены расчетные графики изменения положения арктической спасательной шлюпки с РПД при прямолинейном движении по ледовой поверхности.

Использование РПД в качестве основного движительного комплекса входит в противоречие с требованиями Международной конвенции по охране человеческой жизни на море [9], поскольку не удовлетворяет условию обеспечения управления и маневрирования на длительных временных промежутках. Следовательно, как компромиссное решение, может быть предложена концепция комбинирования движителей (стартовый РПД в связке с основным пропульсивным комплексом). При этом на экстренном этапе отхода от аварийного морского

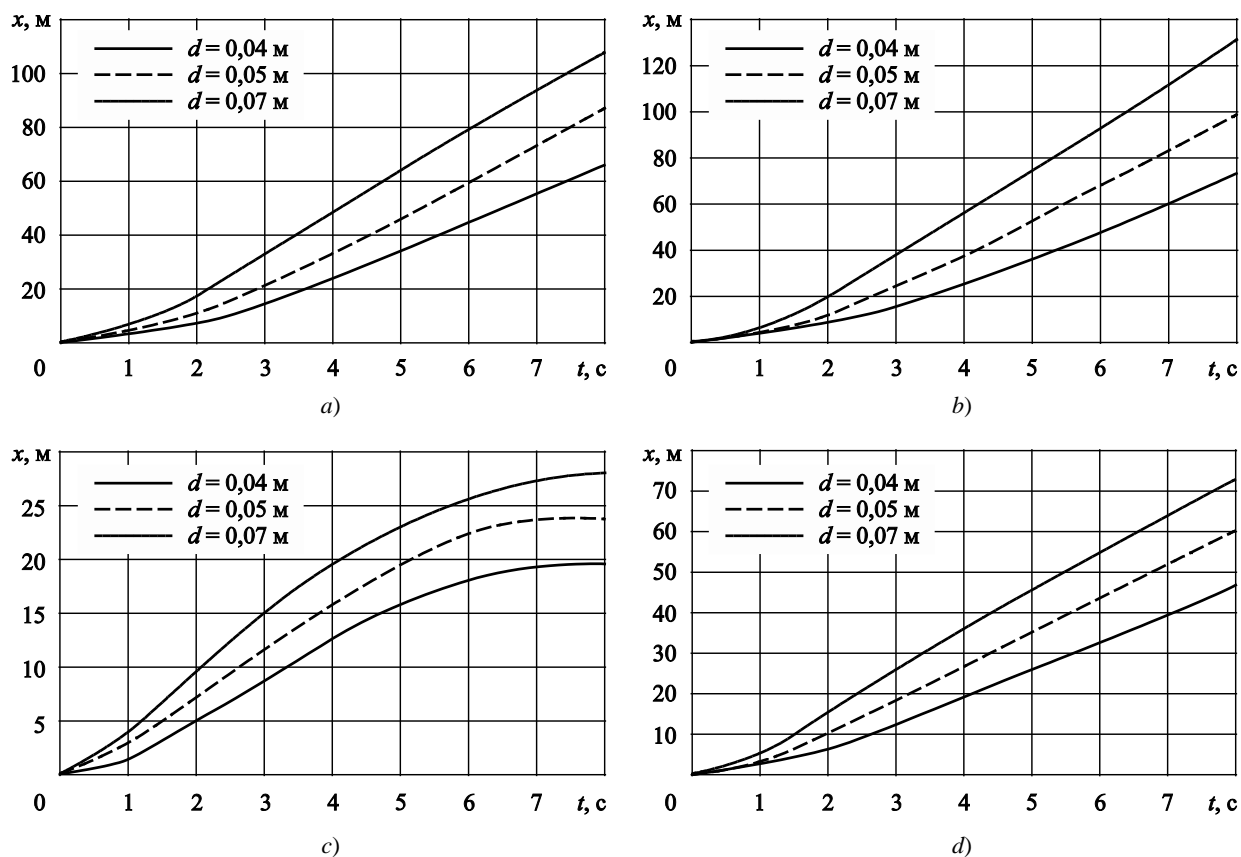


Рис. 4. Расчетные зависимости координаты спасательной шлюпки от времени при использовании азота (а), аргона (b), гелия (c), неона (d) в качестве рабочего тела движителя

Fig. 4. Calculated time histories of the lifeboat's position for various propellants (N, Ar, He, Ne)

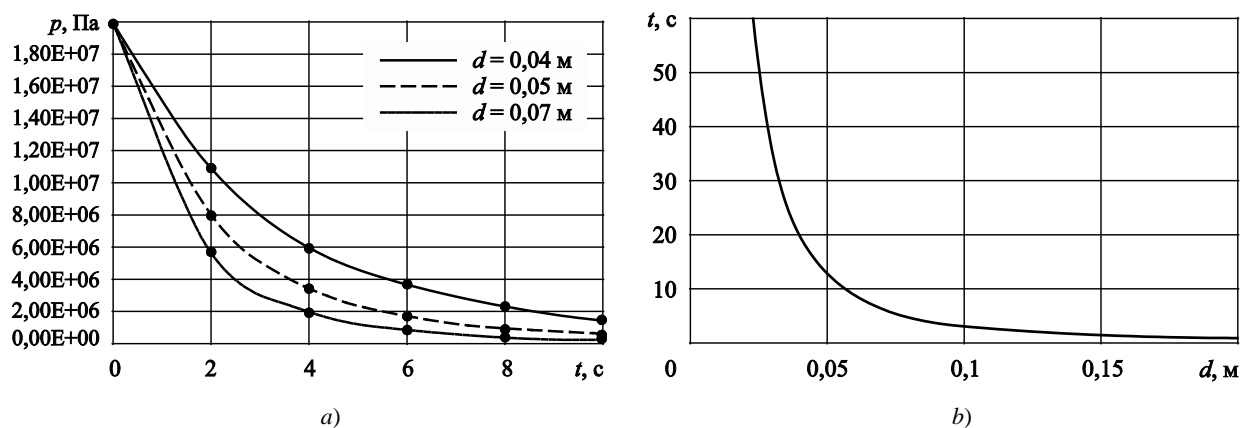


Рис. 5. Расчетные зависимости изменения давления в баллоне (а) и времени завершения критического режима истечения (b) рабочего тела в зависимости от диаметра патрубка

Fig. 5. Bottle pressure cure and the time of critical propellant expiry

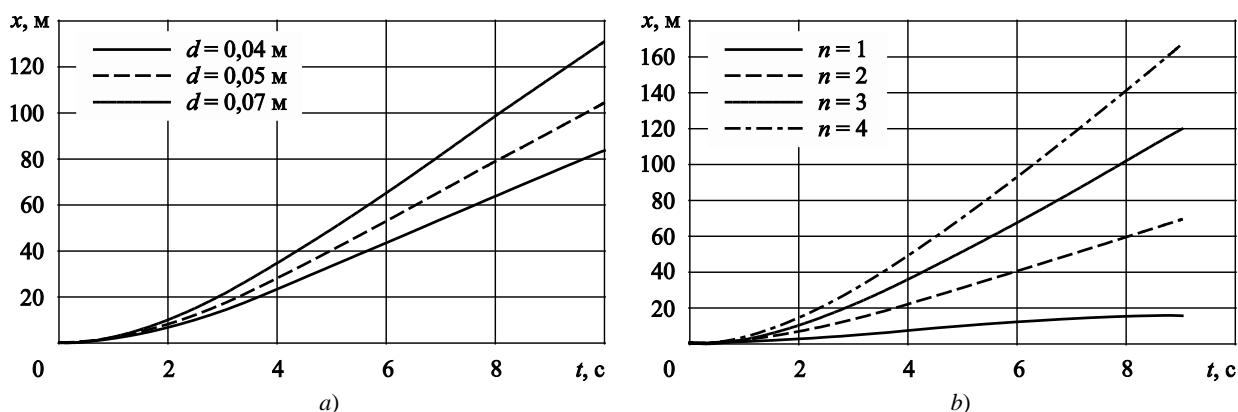


Рис. 6. Графики изменения положения арктической спасательной шлюпки с реактивно-пневматическим движителем при прямолинейном движении по ледовой поверхности: а) зависимость координаты от диаметра патрубка d ; б) зависимость координаты от количества баллонов n

Fig. 6. Positions of the Arctic lifeboat with pneumatic-jet propulsion running straight ahead on the ice

объекта планируется использование РПД. За пределами зоны воздействия аварии после запуска дизельного двигателя спасательной шлюпки может быть реализован сценарий ее движения в соответствии с конвенциональными требованиями [9]. Графические зависимости, представленные на рис. 3–6, в полной мере отображают возможность реализации активного разгонного участка на третьем эвакуационном этапе.

На рис. 7 представлены графики изменения расчетного диаметра выходного патрубка при изменении давления рабочего тела с условием сохранения стартового ускорения и координаты спасательной шлюпки в момент завершения критического режима в зависимости от массы рабочего тела.

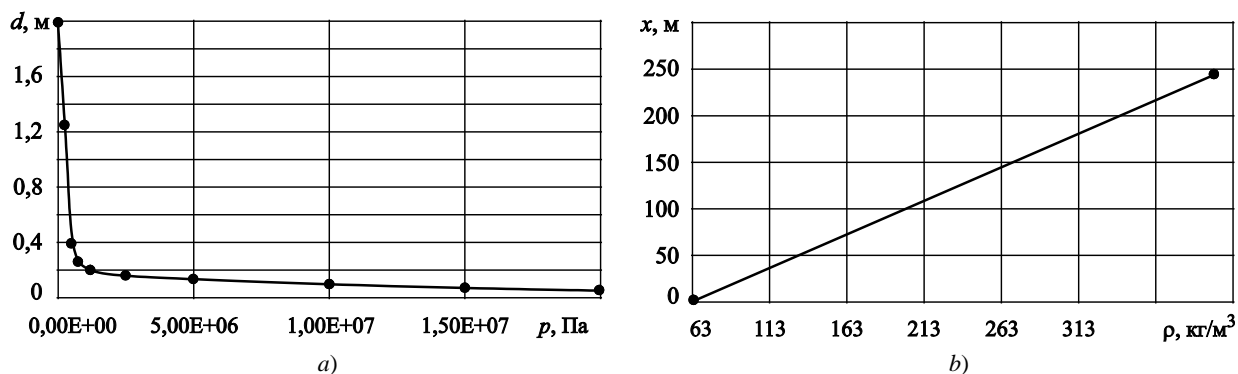


Рис. 7. Графики изменения расчетного диаметра выходного патрубка при изменении давления рабочего тела с условием сохранения стартового ускорения (а) и координаты спасательной шлюпки в момент завершения критического режима в зависимости от начальной массы рабочего тела (б)

Fig. 7. Design diameters of exhaust pipe depending on the propellant pressure (provided that initial acceleration and the lifeboat's coordinate at the moment of critical propellant expiry remain the same) with respect to the propellant mass

Качественные свойства реактивно-пневматического движителя в отношении сохранения программного (заданного) движения

Qualitative properties of pneumatic-jet propulsor in terms of maintaining design movement conditions

Следует более подробно остановиться на аспектах реализации активного разгонного участка на экстренном этапе эвакуации. С одной стороны, сокращение времени выхода за радиус поражения снижает риски поражения и увеличивает вероятность успеха этапа, а с другой стороны, кинематические

характеристики спасательной шлюпки (ускорение, скорость) имеют ограничения. Дело в том, что фактор сокращения времени выхода за радиус поражения связан с увеличением значений ускорения, скорости спасательной шлюпки. Согласно [10] при значениях ускорения, превышающих $a_{гр}$, эксплуатация спасательной шлюпки сама сопряжена с большими рисками для жизни и здоровья людей. Обеспечение движения спасательной шлюпки со значениями скорости и ускорения из заданного диапазона требует сопряжения с системой управления и маневрирования после выхода за радиус поражения система управления является обязательной. Для стартового движительного комплекса, работающего на небольшом временном интервале, интеграция системы управления является нежелательной, поскольку приводит к значительному удорожанию системы. Поэтому в данном случае стартовый движительный комплекс должен обладать способностью предварительной «настройки» на программный (заданный) режим движения и способностью сохранять программный режим при действии внешних возмущающих факторов. Проведем оценку РПД относительно способности «настройки» на программный режим движения и сохранения его при воздействии внешних возмущений.

Простота конструкции РПД позволяет выделить основные управляемые конструктивные параметры. К ним можно отнести d – диаметр сечения выходных патрубков баллонов и V – объем баллонов. Значение стартового ускорения будет определяться параметрами рабочего тела p, T . Теперь вопрос о реализации программного режима движения и его сохранении можно переформулировать следующим образом.

Пусть заданы начальные параметры рабочего тела движителя p, T и управляемые конструктивные параметры d, V . Каким образом должны быть связаны между собой параметры p, T, V, d для реализации и сохранения заданного режима движения? Очевидно, что зная уравнение движения спасательной шлюпки с РПД, мы сможем связать воедино значения параметров p, T, V, d для реализации программного режима движения. Следует дополнительно отметить, что т.к. значение реактивной силы струй рабочего тела является максимальным в момент открытия клапанов баллонов, то и значение ускорения спасательной шлюпки будет максимальным в данный момент времени и будет монотонно убывать в течение процесса истечения. Программный режим движения будет формироваться за счет обеспечения стартового ускорения спасательной шлюпки $a(0)$.

Для прямолинейного движения по ледовой поверхности связь стартового ускорения с параметрами p, T, V, d будет иметь вид [11]:

$$a(0) = \frac{R_1 d^2 p}{m} - fg, \quad (1)$$

$$\text{где } m = m_{т6} + 2V\rho, \quad R_1 = -\frac{5}{4} C_V \pi k \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{3k-1}{2k-2}} \cdot (1-k)},$$

где p, ρ – параметры рабочего тела в момент начала стартового участка при $t = 0$, f_g – удельная сила трения, $m_{т6}$ – полная масса спасательной шлюпки с РПД без учета массы рабочего тела, $C_V = 0,95$ – коэффициент расхода, $k = 1,4$ – показатель адиабаты двухатомного газа.

Выделим основные возмущающие факторы, которые могут привести к отклонениям от заданного стартового значения ускорения $a(0)$.

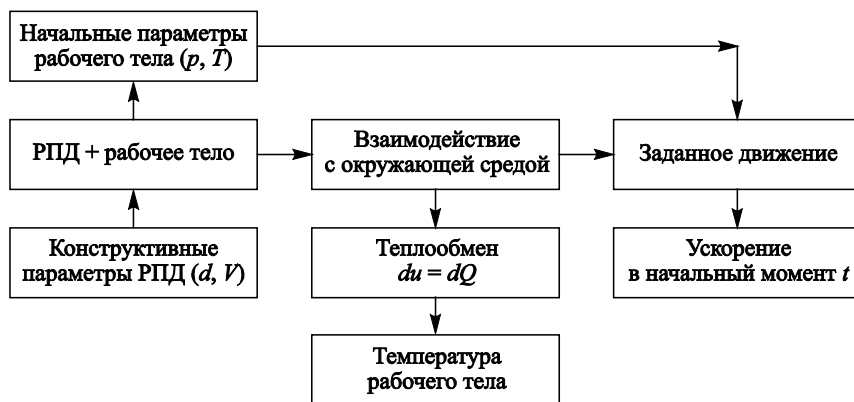
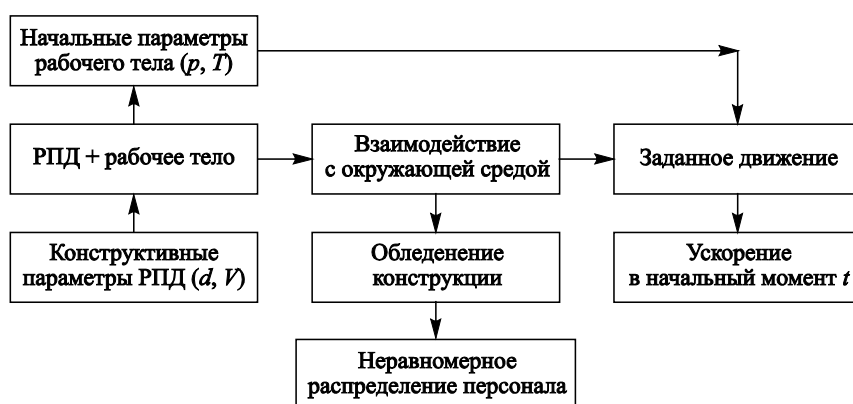


Рис. 8. Диаграмма теплового взаимодействия рабочего тела реактивно-пневматического движителя с окружающей средой

Fig. 8. Diagram of thermal interaction between the pneumatic-jet propellant and the environment

Рис. 9. Диаграмма массового взаимодействия спасательной шлюпки с окружающей средой

Fig. 9. Diagram of mass interaction between the lifeboat and the environment



Для случая действия системы сил сопротивления уравнение (1) будет принимать форму

$$a(0) = \frac{R_1 d^2 p}{m} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n F_i(0), \quad (2)$$

где $m = m_{T0} + 2V\rho$.

1. В процессе хранения РПД является закрытой термодинамической системой, только с тепловым энергетическим обменом с окружающей средой. При этом параметры рабочего тела p , T и параметры двигателя d , V подбираются таким образом, чтобы обеспечить стартовое ускорение $a(0)$. При сезонных колебаниях температурного поля будет происходить отвод/подвод теплового потока к РПД и от него, при этом параметры p , T будут принимать значения p_1 , T_1 , при которых стартовое ускорение может переместиться в область недопустимых значений. Данный тип возмущений можно пояснить при помощи следующей диаграммы (рис. 8).

2. В процессе длительного хранения спасательной шлюпки с РПД возможно изменение массово-инерционных характеристик системы в сторону увеличения из-за обледенения конструкции. Также изменение массово-инерционных характеристик системы в сторону увеличения возможно из-за неравномерного распределения персонала по спасательным шлюпкам. Динамика массово-инерционных характеристик системы будет приводить к отклонениям от заданного стартового ускорения $a(0)$. Данный тип возмущений можно пояснить при помощи диаграммы (рис. 9).

Для оценки характера отклонений от заданного стартового ускорения $a(0)$ были введены критерий термодинамической эффективности Δ_T и массовой эффективности Δ_m .

Критерии термодинамической Δ_T и массовой Δ_m эффективности отображают влияние факторов окру-

жающей среды на способность сохранять спасательной шлюпкой программное движение (заданное движение). В первую очередь эти критерии затрагивают особенности теплообмена системы (движитель – рабочее тело) и изменения массы системы.

Условия заданного движения спасательной шлюпки можно представить в виде [11]:

$$a(0) = a_{np}, v(0) = 0, x(0) = 0, \quad (3)$$

Интервалы областей термодинамической и массовой эффективности представлены в табл. 3.

В координатах (d, T) и (d, m) границы областей термодинамической и массовой эффективности будут иметь вид:

- граница области полной неэффективности:

$$d_n(T) = \sqrt{\frac{T_0 f g m}{R_1 p_0}} \left(\frac{1}{T}\right)^{1/2}, \quad d_n(m) = \sqrt{\frac{f g}{R_1 p_0}} (m)^{1/2}, \quad (4)$$

- запрограммированное ускорение:

$$d_{np}(T) = \sqrt{\frac{T_0 (f g + a_{np}) m}{R_1 p_0}} \left(\frac{1}{T}\right)^{1/2}, \quad (5)$$

$$d_{np}(m) = \sqrt{\frac{(f g + a_{np})}{R_1 p_0}} (m)^{1/2},$$

- граница области развивающейся эффективности:

$$d_{rp}(T) = \sqrt{\frac{T_0 (f g + a_{rp}) m}{R_1 p_0}} \left(\frac{1}{T}\right)^{1/2}, \quad (6)$$

$$d_{rp}(m) = \sqrt{\frac{(f g + a_{rp})}{R_1 p_0}} (m)^{1/2}.$$

Таблица 3. Интервалы областей термодинамической и массовой эффективности

Table 3. Intervals of thermodynamic and mass efficiency domains

Название области, границы	Коэффициент термодинамической эффективности, Δ_T	Коэффициент массовой эффективности, Δ_m
Область полной неэффективности	$\Delta_{el} \leq \Delta_T \leq 0$	$\frac{m_H - m_{ГР}}{m_0 - m_{ГР}} + 1 < \Delta_m < +\infty$
Область неопределенной эффективности	$0 < \Delta_T < 1$	$1 < \Delta_m < \frac{m_H - m_{ГР}}{m_0 - m_{ГР}} + 1$
Запрограммированное ускорение	$\Delta_T = 1$	$\Delta_m = 1$
Область развивающейся эффективности	$1 < \Delta_T < \frac{T_{ГР} - T_H}{T_0 - T_H} + 1$	$0 < \Delta_m < 1$
Граница области развивающейся эффективности	$\Delta_T = \frac{T_{ГР} - T_H}{T_0 - T_H} + 1$	$\Delta_m = 0$
Область непредсказуемых результатов	$\frac{T_{ГР} - T_H}{T_0 - T_H} + 1 < \Delta_T \leq \Delta_{eh}$	$\Delta_{ml} < \Delta_m < 0$

где $\Delta_{el} = \frac{T_{el} - T_H}{T_0 - T_H}$, T_{el} – минимальная средняя температура окружающей среды в регионе, если $T_{el} < T_H$; $\Delta_{ml} = \frac{m_{Г6} - m_{ГР}}{m_0 - m_{ГР}}$,

$m_{Г6}$ – полная масса спасательной шлюпки с РПД без учета массы рабочего тела.

Значения температуры и массы на границе области полной неэффективности определяются по формулам:

$$T_H = \frac{T_0 f g m}{R_1 p_0 d_{пр}^2}, \quad m_H = \frac{R_1 p_0 d_{пр}^2}{f g}. \quad (7)$$

Значения температуры и массы на границе области развивающейся эффективности дают следующие выражения:

$$T_{ГР} = \frac{T_0 (f g + a_{ГР}) m}{R_1 p_0 d_{пр}^2}, \quad m_H = \frac{R_1 p_0 d_{пр}^2}{(f g + a_{ГР})}. \quad (8)$$

Выражение для коэффициента термодинамической эффективности Δ_T реактивно-пневматического движителя имеет вид:

$$\Delta_T = \frac{T(t) - T_H}{T_0 - T_H} + \frac{T(t) - T_0}{T_{ГР} - T_0} \left(\frac{1}{f_{об}} \int_{-\infty}^{T-T_0} \delta(z) dz \right), \quad (9)$$

где $\Theta(T - T_0) = \int_{-\infty}^{T-T_0} \delta(z) dz$ – функция Хевисайда,

$\delta(z)$ – дельта-функция Дирака, $1/f_{об} = 1$ – безразмерный множитель, T_H – значение температуры на границе области полной неэффективности,

$T_{ГР}$ – значение температуры на границе области развивающейся эффективности.

Выражение для коэффициента массовой эффективности Δ_m реактивно-пневматического движителя имеет вид:

$$\Delta_M = \frac{m(t) - m_{ГР}}{m_0 - m_{ГР}} + \frac{m(t) - m_0}{m_H - m_0} \left(\frac{1}{f_{об}} \int_{-\infty}^{m-m_0} \delta(z) dz \right). \quad (10)$$

На рис. 10 представлены диаграммы характеристик областей термодинамической и массовой эффективности РПД.

На рис. 11 представлены зависимости, отображающие изменение значения заданного ускорения $a(0)$ при изменении температуры окружающей среды T и полной массы системы m .

Синим треугольником на кривой запрограммированного ускорения на рис. 10 изображено состояние рабочего тела при начальных параметрах рабочего тела T, p, ρ . Ускорение $a(0)$ практически не отклоняется от заданного значения при колебаниях температурного поля в широком диапазоне (рис. 11а), и можно утверждать, что РПД является устойчивым относительно тепловых возмущений. Отклонение ускорения $a(0)$ от заданного значения является более чувствительным при увеличении массово-инерционных характеристик

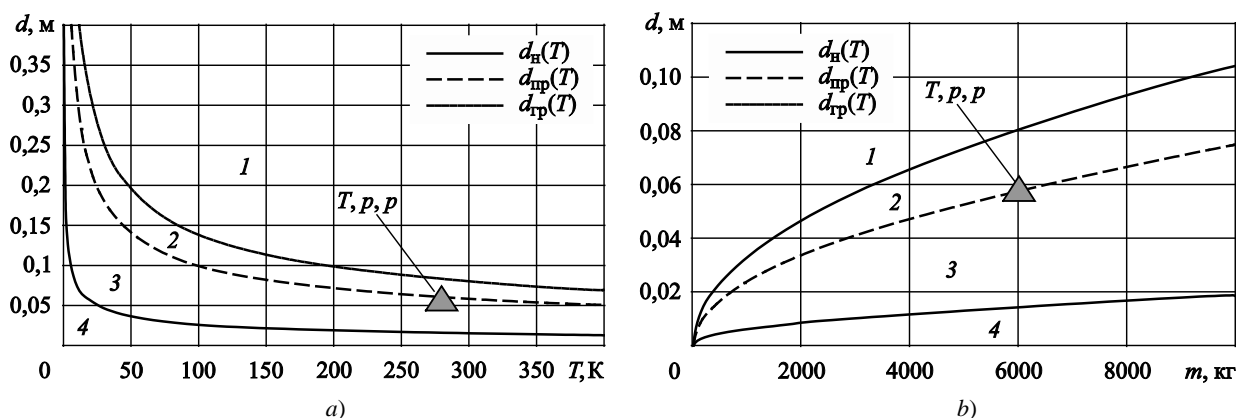


Рис. 10. Диаграммы характеристик областей термодинамической (а) и массовой (б) эффективностей РПД: 1 – область непредсказуемых результатов; 2 – область развивающейся эффективности; 3 – область неопределенной эффективности; 4 – область полной неэффективности

Fig. 10. Diagrams of domain properties for thermodynamic and mass efficiencies of pneumatic-jet propulsion: 1 – results unpredictable, 2 – efficiency grows, 3 – efficiency uncertain, 4 – total inefficiency

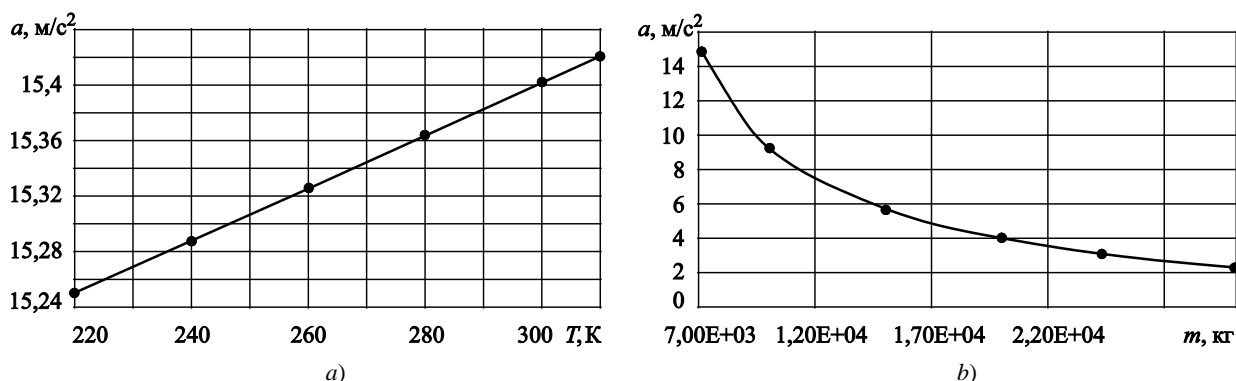


Рис. 11. Зависимости заданного ускорения $a(0)$ от температуры окружающей среды T (а) и полной массы системы m (б)

Fig. 11. Design acceleration $a(0)$ as function of ambient temperature T and total system mass m

спасательной шлюпки. Из рис. 11b видно, что неравномерное распределение персонала по спасательным шлюпкам не будет иметь значимого влияния на величину $a(0)$, однако всячески следует избегать обледенения конструкции и принимать своевременные меры по устранению ледовых образований.

Заключение

Conclusion

Основной целью работы было обоснование перспективности применения РПД в составе энергетической установки арктической спасательной шлюпки на экстренном этапе операции эвакуации

по данным теоретических моделей и натурных экспериментов. Анализируя теоретические и экспериментальные результаты, можно сделать вывод о том, что за счет действия РПД спасательная шлюпка может в кратчайшие сроки начать движение и оказаться за пределами радиуса поражения R . Простота конструкции позволяет свести к минимуму риски, связанные с возможностью отказа системы, поскольку для приведения РПД в действие необходимо только открытие запорных клапанов. Также исследования показали, что РПД является устойчивым относительно сохранения программного движения при длительном тепловом взаимодействии и при малых изменениях массово-инерционных характеристик. Математи-

ческая модель прямолинейного движения в достаточной мере согласуется с результатами натурного эксперимента на прямолинейном участке движения, чтобы использовать ее для определения параметров рабочего тела ρ , p , T и конструктивных параметров движителя d , V на широком диапазоне значений радиуса поражения R . Возникновение вращающего момента относительно центра масс спасательной шлюпки согласно конструктивной компоновке из рис. 1*b* устраняется при помощи вывода потока истекающего газа в единое сопловое устройство или, дополнительно, использованием автоматических запорных клапанов. При нештатной смене траектории движения, например при соударении шлюпки с торосами, возможна стабилизация за счет перехода на основную тип движителя.

Следует отметить, что интеграция РПД в спасательную шлюпку не влияет на гидродинамическое сопротивление формы корпуса. Последнее утверждение было озвучено по той причине, что в настоящее время существуют перспективные концепции арктических спасательных шлюпок [12], обладающие существенными преимуществами при маневрировании в ледовой обстановке за радиусом поражения R . Однако данные геометрические конфигурации движительных комплексов существенно увеличивают гидродинамическое сопротивление и время выхода спасательной шлюпки за радиус поражения. Тем самым мы приходим к заключению о целесообразности применения РПД на этапе экстренного выхода спасательной шлюпки за пределы зоны действия поражающих факторов аварии. РПД, выполняя функции стартового движителя, обеспечивает экстренный выход за радиус поражения, а временной период эксплуатации РПД может быть использован для подготовки к работе основного движительного комплекса.

Список использованной литературы

1. Актуальные проблемы функциональной устойчивости и новые проектные решения для временного убежища морского нефтегазового сооружения / В.И. Таровик, С.И. Косьмин, В.И. Димитров, С.М. Сняков, П.А. Утямишев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2019. № 56–57. С. 115–122.
2. Спусковое устройство спасательной шлюпки персонала морского сооружения : пат. 2740323 Рос. Федерация / Н.А. Вальдман, А.А. Карелин, Р.И. Кильдеев, М.С. Сергеев, В.И. Таровик. № 2020117105; заявл. 12.05.2020; опубл. 13.01.2021. Бюл. № 2. 10 с.
3. Сазонов К.Е. Спасательные средства для ледовых условий: состояние вопроса и возможные пути решения // Арктика : экология и экономика. 2013. № 4(12). С. 32–39.
4. Staalesen O.E., Eshler S. An evaluation of evacuation systems for arctic waters // Maritime-Port Technology and Development : proceedings of the Conference on Maritime-Port Technology (MTEC 2014). Boca Raton : CRC, 2015. P. 171–183.
5. Попов С.Д., Комиссаров Д.С., Важенин Д.В. Безопасная Арктика // Транспортная стратегия – XXI век. 2016. № 33. С. 30–31.
6. Двухкорпусная спасательная шлюпка закрытого типа для эвакуации и спасания персонала и экипажа морских объектов в ледовых условиях : пат. 2708067 Рос. Федерация / Вальдман Н.А., Карелин А.А., Кильдеев Р.И., Сергеев М.С., Таровик В.И. № 2018146625; заявл. 25.12.2018; опубл. 04.12.2019. Бюл. № 34. 9 с.
7. Оценка эффективности спасательных шлюпок арктических морских нефтегазовых сооружений и возможные перспективные проектные решения / В.И. Таровик, С.И. Косьмин, В.И. Димитров, С.М. Сняков, П.А. Утямишев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2020. № 58–59. С. 114–122.
8. Аварийное спасательное средство для экстренной эвакуации персонала с морских платформ в ледовых условиях / В.И. Таровик, Н.А. Вальдман, В.А. Павловский [и др.] // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2013. № 74(358). С. 107–116.
9. International Convention for the Safety of Life at Sea : [SOLAS] // Arctic Portal Library : [site]. Akureyri, 2021. URL: http://library.arcticportal.org/1696/1/SOLAS_consolidated_edition2004.pdf (Accessed: 26.11.2021).
10. Александров М.Н. Эффективность судовых спасательных средств и проблема их нормирования: дис. ... д-ра техн. наук : 05.08.03 / М.Н. Александров ; Ленингр. кораблестроит. ин-т. Ленинград, 1972. 330 с.
11. Сергеев М.С. Получение коэффициента термодинамической эффективности реактивно-пневматического движителя // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2017. Вып. 2(380). С. 49–53. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-2-380-49-53.
12. Шапкин В.А., Кошурина А.А., Крашенинников М.С. Концепция и методика создания универсального коллективного спасательного средства с роторно-винтовым движителем // Труды 11-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и кон-

тинентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore 2013). Санкт-Петербург : Химиздат, 2013. С. 445–450.

References

1. V. Tarovik, S. Kosmin, V. Dimitrov, S. Sinyakov, P. Utyamishv. Current issues of functional sustainability and new design solutions for temporary refuge of offshore oil and gas facilities // *RS Research Bulletin*, 2019, No. 56–57, pp. 115–122 (in Russian).
2. N. Valdman, A. Karelin, R. Kildeev, M. Sergeev, V. Tarovik. Crew rescue facility lifeboat launching device. Russian Patent No. 2740323, filing date May 12, 2020, publication date January 13, 2021. Bull. No. 2, 10 pp. (in Russian).
3. K. Sazonov. Rescue equipment for ice conditions: the current situation and potential solutions // *Arctic: Ecology and Economy*, 2013, No. 4(12), pp. 32–39 (in Russian).
4. Staalesen O.E., Eshler S. An evaluation of evacuation systems for arctic waters // *Maritime-Port Technology and Development: proceedings of the Conference on Maritime-Port Technology (MTEC 2014)*. Boca Raton : CRC, 2015. P. 171–183.
5. S. Popov, D. Komissarov, D. Vazhenin. Safe Arctic // *Transportnaya Strategiya – XXI vek (Transport Strategy – 21st century)*, 2016, No. 33, pp. 30–31 (in Russian).
6. N. Valdman, A. Karelin, R. Kildeev, M. Sergeev, V. Tarovik. Double-housing lifeboat of closed type for evacuation and rescue of personnel and crew of sea objects in ice conditions. Russian Patent No. 2708067, application No. 2018146625, appl. date 25.12.2018, publ. date, 04.12.2019, Bull. No. 34, 9 pp. (in Russian).
7. V. Tarovik, S. Kosmin, V. Dimitrov, S. Sinyakov, P. Utyamishv. Effectiveness assessment for lifeboats of Arctic offshore oil and gas facilities and possible promising design solutions // *RS Research Bulletin*, 2020, No. 58–59, pp. 114–122 (in Russian).
8. V. Tarovik, N. Valdman, V. Pavlovsky et al. Life saving equipment for personnel emergency evacuation from offshore platforms in ice conditions // *Transactions of Krylov State Research Centre*, 2013, No. 74 (358), pp. 107–116 (in Russian).
9. International Convention for the Safety of Life at Sea : [SOLAS] // *Arctic Portal Library* : [site]. Akureyri, 2021. URL: http://library.arcticportal.org/1696/1/SOLAS_consolidated_edition2004.pdf (Accessed: 26.11.2021).
10. M. Alexandrov. Efficiency of ship rescue equipment and development of standards for them. Doctoral Theses, 05.08.03. Leningrad Shipbuilding Institute, Leningrad, 1972, 330 pp. (in Russian).
11. M. Sergeev. Obtaining thermodynamic efficiency coefficient for pneumatic-jet propulsor // *Transactions of Krylov State Research Centre*, 2017, Issue 2(380), pp. 49–53 (in Russian).
12. V. Shapkin, A. Koshurina, M. Krashennnikov. The concept and methodology of creating the universal collective life-saver with rotary-screw mover // *Proceedings of the 11th International Conference & Exhibition for Oil and Gas Resources Development of the Russian Arctic and CIS Continental Shelf (RAO / CIS Offshore 2013)*. St. Petersburg, Khimizdat, 2013, pp. 445–450 (in Russian).

Сведения об авторах

Сергеев Максимильян Сергеевич, к.т.н., научный сотрудник лаборатории техногенного подводного шума, математического моделирования и гидроакустики океана ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-30-40. E-mail: sergeevms1988@mail.ru.

Таровик Владимир Иванович, к.т.н., начальник лаборатории техногенного подводного шума, математического моделирования и гидроакустики океана ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-81. E-mail: v_tarovik@ksrc.ru.

Вальдман Николай Александрович, к.т.н., начальник сектора лаборатории техногенного подводного шума, математического моделирования и гидроакустики океана ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-58. E-mail: N_Valdman@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7778-0605>.

Лабузов Андрей Георгиевич, ведущий инженер лаборатории техногенного подводного шума, математического моделирования и гидроакустики океана ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-33-68. E-mail: a_labuzov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3919-9024>.

About the authors

Maximilian S. Sergeev, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Man-Made Underwater Noise, Mathematical Simulation and Ocean Hydroacoustics Laboratory KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-30-40. E-mail: sergeevms1988@mail.ru.

Vladimir I. Tarovik, Cand. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskov-

skoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.:
+7 (812) 415-46-81. E-mail: v_tarovik@ksrc.ru.

Nikolay A. Valdman, Cand. Sci. (Eng.), Head of Man-Made Underwater Noise, Mathematical Simulation and Ocean Hydroacoustics Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-45-58. E-mail: N_Valdman@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7778-0605>.

Andrey G. Labuzov, Lead Engineer, Man-Made Underwater Noise, Mathematical Simulation and Ocean Hydroacoustics Laboratory KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-33-68. E-mail: a_labuzov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3919-9024>.

Поступила / Received: 07.12.21
Принята в печать / Accepted: 14.03.22
© Коллектив авторов, 2022