

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА  
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА»

# **ВЕСТНИК**

**ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА  
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

**Том 13. № 2**

**Vestnik Gosudarstvennogo universiteta  
morskogo i rechnogo flota  
imeni admirala S. O. Makarova**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2021

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2021. — Т. 13. — № 2. — 150 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

«Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации СМИ от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В Вестнике публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: «Эксплуатация водного транспорта, судовождение», «Водные пути сообщения и гидрография»; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: «Судостроение и судоремонт», «Судовые энергетические установки, системы и устройства»; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе «Электротехнические комплексы и системы».

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте, публикуются на русском и английском языках. Статьи рецензируются независимыми экспертами. Кроме того, в Вестнике публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний, сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

Вестник включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Индекс для подписки в каталоге «Газеты. Журналы» агентства Роспечать: 37276.



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ</b> .....	157
<i>Кузнецов А. Л., Семенов А. Д., Оја Н.</i> Влияние каргоплана судна-контейнеровоза на складские операции терминала .....	157
<i>Изотов О. А.</i> Принципы формирования транспортных систем доставки сборных грузов .....	169
<i>Меньшиков В. И., Развозов С. Ю., Анисимов А. Н.</i> Процедура синтеза источников информации по безопасности в прибрежных районах восточной части Северного морского пути .....	176
<i>Ивакин Я. А., Потапычев С. Н., Пелевин А. Е.</i> Обеспечение статистической устойчивости ретроспективных исследований использования судов на основе геохронологического трекинга .....	184
<i>Ксенофонтов Н. М., Саушев А. В., Темкин А. А.</i> Исследование рабочих характеристик электроприводов основных двусторчатых ворот судоводных шлюзов .....	197
<i>Царик Р. С.</i> Оценка влияния аппликаты центра тяжести контейнера на нагрузки палубного контейнерного штабеля .....	207
<b>ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ</b> .....	222
<i>Алёшин А. А., Кубрин С. С.</i> Функциональная схема оперативного расчета оптимального маршрута судна в ледовых условиях .....	222
<b>СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ</b> .....	232
<i>Пашеева Т. Ю., Попов Л. В.</i> Технический контроль как один из способов управления качеством судоремонта .....	232
<b>СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА</b> .....	244
<i>Безюков О. К., Жуков В. А., Капустянский М. С.</i> Газотурбинные двигатели на флоте: история и перспективы .....	244
<i>Крюков А. А., Чехранов С. В.</i> Сравнение значений коэффициентов скорости в турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса .....	257

Том 13. № 2

2021

### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

#### Гл. редактор

**С. О. Барышников**

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

#### Зам. гл. редактора

**А. П. Нырк**

д.т.н., проф.

NyrkowAP@gumrf.ru

#### С. Гуцма

Морская академии (г. Щецин, Польша), д.т.н., проф.

#### Г. В. Егоров

ген. директор ЗАО «Морское инженерное бюро — СПб», д.т.н., проф.

#### Р. Качиньски

проректор по развитию и сотрудничеству Технического университета (г. Белосток, Польша), д.т.н., проф.

#### А. И. Пошивай

заместитель руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта

#### А. Е. Сазонов

д.т.н., проф.,

чл.-кор. РАН

#### Р. М. Юсупов

научный руководитель Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

#### РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-54734 от 17.07.2013 г.

Адрес редакции: 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

**Члены  
редколлегии:**

*О. К. Безюков*, д.т.н.  
*А. Т. Беккер*, д.т.н.  
*Н. И. Ватин*, д.т.н.  
*П. А. Гарибин*, д.т.н.  
*Д. П. Голоскоков*, д.т.н.  
*В. А. Жуков*, д.т.н.  
*Ю. М. Искандеров*, д.т.н.  
*О. Г. Каратаев*, д.т.н.  
*В. В. Каретников*, д.т.н.  
*А. В. Кириченко*, д.т.н.  
*М. Н. Кирсанов*, д.ф.-м.н.  
*М. А. Колосов*, д.т.н.  
*Е. А. Королева*, д.э.н.  
*И. И. Костылев*, д.т.н.  
*А. Л. Кузнецов*, д.т.н.  
*С. Е. Кузнецов*, д.т.н.  
*Е. А. Лаврентьева*, д.э.н.  
*В. А. Логиновский*, д.т.н.  
*В. Е. Марлей*, д.т.н.  
*А. М. Никитин*, д.т.н.  
*Т. А. Пантина*, д.э.н.  
*Л. И. Погодаев*, д.т.н.  
*В. И. Решняк*, д.т.н.  
*В. В. Романовский*, д.т.н.  
*А. В. Саушев*, д.т.н.  
*С. В. Смоленцев*, д.т.н.  
*А. Л. Степанов*, д.т.н.  
*М. В. Сухотерин*, д.т.н.  
*Е. Г. Трунин*, к.э.н.  
*А. Л. Тезиков*, д.т.н.  
*В. Б. Чистов*, д.т.н.

<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....</b>	<b>266</b>
<i>Тырва В. О.</i> Моделирование эргатической системы совместного управления движением судна .....	266
<i>Сорокин И. В., Семенов Д. С., Шарашкин С. В.</i> Анализ вариантов комплекса судового электрооборудования для выдачи электроэнергии.....	278
<i>Григорьев А. В., Малышев С. М., Воробьев С. В.</i> Результаты проектирования и испытаний комбинированной пропульсивной установки лоцмейстерского катера .....	290

## CONTENTS

<b>OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION</b> .....	157
<i>Kuznetsov A. L., Semionov A. D., Oja H.</i> Influence of a cargo plan on port operations .....	157
<i>Izotov O. A.</i> Principles of forming the transport systems for the groupage cargoes delivery .....	169
<i>Menshikov V. I., Razvozov S. Yu., Anisimov A. N.</i> Procedure for synthesizing sources of safety information in the coastal areas of the Northern Sea Route eastern part .....	176
<i>Ivakin Y. A., Potapichev S. N., Pelevin A. E.</i> Statistical robustness support of retrospective ships use research based on the geochronological tracking .....	184
<i>Ksenofontov N. M., Saushev A. V., Temkin A. A.</i> Study of actuators performance of the main miter gate of navigable locks .....	197
<i>Tsarik R. S.</i> Evaluation of container center of gravity height influence on deck container stack loads .....	207
<b>WATERWAYS AND HYDROGRAPHY</b> .....	222
<i>Aleshin A. A., Kubrin S. S.</i> Functional scheme of operative route optimization during ice navigation .....	222
<b>SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR</b> .....	232
<i>Pasheeva T. Yu., Popov L. V.</i> Technical control as one of the ways of quality management in ship repair .....	232
<b>SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES</b> .....	244
<i>Bezjukov O. K., Zhukov V. A., Kapustyansky M. S.</i> Prospects for the use of gas turbine engines in marine power plants .....	244
<i>Kryukov A. A., Chekhranov S. V.</i> Comparison of the velocity coefficients values in the turbine stage with partial blading of the runner .....	257

Volume 13. № 2

2021

EDITOR-IN-CHIEF

**S. O. Baryshnikov**  
doctor of technical Sciences, Prof.  
rector@gumrf.ru

**Deputy Editor-in-Chief**

**A. P. Nyrkov**  
doctor of technical Sciences, Prof.  
NyrkovAP@gumrf.ru

**S. Gutsma**  
Maritime Academy (g.Schetsin,  
Poland), doctor of technical Sci-  
ences, Prof.

**G. V. Yegorov**  
General Director of "Marine  
Engineering Bureau - St.  
Petersburg", doctor of technical  
Sciences, Prof.

**R. Kachin'ski**  
Vice-Rector for Development  
and Cooperation of the Technical  
University (Bialystok, Poland),  
doctor of technical Sciences, Prof.

**A. I. Poshivay**  
Deputy Head of the Federal  
Agency of Sea and River Trans-  
port

**A. Ye. Sazonov**  
doctor of technical Sciences,  
Prof., corresponding member of  
the Russian Academy of Sciences

**M. Yusupov**  
scientific leader  
of "St. Petersburg Institute  
for Informatics and Automation  
of RAS", doctor of technical  
Sciences, Prof., corresponding  
member of the Russian Academy  
of Sciences

*EDITORIAL STAFF:*  
E-mail: journal@gumrf.ru  
<http://journal.gumrf.ru>

<b>Editorial Collegium:</b>	
<i>O. K. Bezyukov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. T. Bekker,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>N. I. Vatin,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>P. A. Garibin,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>D. P. Goloskokov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. A. Zhukov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>Y. M. Iskanderov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>O. G. Karatayev,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. V. Karetnikov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. V. Kirichenko,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>M. N. Kirsanov,</i>	
doctor of phys.-math. Sciences	
<i>M. A. Kolosov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>Ye. A. Koroleva,</i>	
doctor of economic Sciences	
<i>I. I. Kostylev,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. L. Kuznetsov,</i>	
doctor of technical Sciences	
S. Ye. Kuznetsov,	
doctor of technical Sciences	
<i>Ye. A. Lavrentyeva,</i>	
doctor of economic Sciences	
<i>V. A. Loginovskiy,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. Ye. Marley,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. M. Nikitin,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>T. A. Pantina,</i>	
doctor of economic Sciences	
<i>L. I. Pogodayev,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. I. Reshnyak,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. V. Romanovskiy,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. V. Saushev,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>S. V. Smolentsev,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>A. L. Stepanov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>M. V. Sukhoterin,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>Ye. G. Trunin,</i>	
candidate of economic Sciences	
<i>A. L. Tezikov,</i>	
doctor of technical Sciences	
<i>V. B. Chistov,</i>	
doctor of technical Sciences	

<b>ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS.....</b>	<b>266</b>
<i>Tyrva V. O.</i> Modeling an ergatic system for joint control of ship motion .....	266
<i>Sorokin I. V., Semenov D. S., Sharashkin S. V.</i> Concept studies of vessel electrical power transmission unit .....	278
<i>Grigoryev A. V., Malyshev S. M., Vorobyev S. V.</i> The results of design and trials of combined propulsion plant for a buoy boat .....	290

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-157-168

## INFLUENCE OF A CARGO PLAN ON PORT OPERATIONS

**A. L. Kuznetsov<sup>1</sup>, A. D. Semionov<sup>2</sup>, H. Oja<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

<sup>3</sup> — Konecranes Finland Corp., Hyvinkää, Finland

Nowadays, with overall introduction of patented technologies for the production of goods, the possibility of reducing their cost in order to maintain a competitive position in the commodity markets is supported by the rational organization of transportation. Thus, the transport component in the final cost of transported goods has to be reduced. At the same time, when using the same handling, lifting and transporting equipment from a limited number of the global manufacturers, the possibility of reducing the cost of transport operations (both shipping and handling, including loading/unloading) exclusively depends on not on the set, but on the rational use of the equipment. One of the possible mechanisms for rationalizing the loading and unloading operations carried out on container terminals is the rationalization of cargo plans of the serviced container ships. The versatility of their implementation is explained, first of all, by severe requirements for the safety of navigation, which determine the provision of the necessary stability, unsinkability, the absence of a heel and different that could interfere with the berth operations, the required sitting of the ship in the water, etc. On the other hand, the rational allocation of containers in the hold slots and on the hatches covers of the container ships, corresponding to the voyage rotation (the sequence of visiting terminals on the trip in progress), provides an increase in the share of productive movements of handling, lifting and transporting equipment, reduces the required time for a ship to be under loading and unloading operations, which reduces the time of a group of ship trips on a string.

Such calculations are complicated by the fact that the handling equipment, used for loading and unloading operations on a ship, operates relatively autonomously, with each unit allocated for its own section of the ship (bay). Thus, the task can be solved only in a complex manner, in the context of the task of cranes allocation over the berth. The issues of cargo planning of liner container ships from the standpoint of reducing the time of ship's turnaround time due to rational assignment and use of terminal handling equipment are studied in the paper.

*Keywords:* container shipping, cargo plan, handling of ships in the port, turnaround time.

### For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semionov, and Hannu Oja. "Influence of a cargo plan on port operations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 157–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-157-168.

УДК 656.615

## ВЛИЯНИЕ КАРГОПЛАНА СУДНА-КОНТЕЙНЕРОВОЗА НА СКЛАДСКИЕ ОПЕРАЦИИ ТЕРМИНАЛА

**А. А. Кузнецов<sup>1</sup>, А. Д. Семенов<sup>2</sup>, Н. Оја<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> — ООО «Логистический парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

<sup>3</sup> — Konecranes Finland Corp., Hyvinkää, Finland

Проанализирован один из вариантов современных унифицированных технологий производства потребительских товаров, предусмотренных для снижения их конечной стоимости, которая, в свою очередь, является основой рыночной устойчивости компании-производителя, в основном лишь логистической

составляющей, и в первую очередь стоимости транспортировки товаров от места производства к месту потребления. Отмечается, что в то же время использование для перевозки, перевалки и внутртерминальной транспортировки грузов унифицированного оборудования, получаемого от ограниченного числа производителей, переводит эту задачу в плоскость рациональной организации его использования. Рассмотрен один из наиболее значимых механизмов оптимизации погрузочно-разгрузочных операций в этих условиях, такой как согласование порядка выполнения технологических процедур контейнерного склада с содержанием «Грузового плана» обрабатываемого терминалом контейнерного судна. Подчеркивается, что вариативность способов формирования «Грузового плана» обусловлена жесткими требованиями обеспечения мореходности судна (его устойчивости, отсутствия крена, дифферента, изгибающих, прогибающих, скручивающих моментов, размещения специальных грузов и др.). Размещение контейнеров в слотах судна под палубой и на люковых крышках, выполняемое в соответствии с ротацией портов на маршруте, определяет доли производительных и вспомогательных операций всего состава подъемного и транспортного оборудования, размещение которого для причальных операций определяет время обработки судна в порту и, соответственно, рациональное количество судов на конкретном маршруте (стринге). Отмечается, что эти расчеты осложняются тем, что размещение оборудования для причальных операций обработки судна производится в группе относительно независимых секций (беев), что требует решения не локальной, а глобальной задачи оптимизации размещения кранажа на причале.

В работе проанализировано влияние, оказываемое каргопланированием контейнерных судов, на темп причальных и складских операций. Показано, что заблаговременное получение информации о «Грузовом плане» позволяет к моменту подхода судна сформировать специальный штабель престакинга, представляющий собой инверсную структуру по отношению к плану погрузки, что позволяет выполнять погрузку судна без дополнительного перемещения блокирующих контейнеров, т. е. за минимально возможное число движений. Как следствие, погрузка судна выполняется в кратчайший интервал времени, повышая тем самым качество оказываемых терминалом услуг и укрепляя его рыночную позицию. Отмечается, что результатом является рост общего количества перемещений контейнеров, поскольку формирование штабеля престакинга требует примерно такого же количества движений, как и прямая доставка контейнеров из штабелей склада, и погрузка на судно, к которому добавляются движения для перемещения из штабеля престакинга на борт судна. Тем не менее полученные в результате исследования результаты позволяют использовать для обработки груза существенно меньшее количество оборудования, концентрируя его в период обслуживания судна у причала.

*Ключевые слова:* контейнерные перевозки, грузовой план, обработка судна в порту, время стоянки.

#### **Для цитирования:**

Кузнецов А. Л. Влияние каргоплана судна-контейнеровоза на складские операции терминала / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, Н. Оја // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 157–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-157-168.

## **Introduction**

The issues of rationalizing cargo planning are well represented in modern applied scientific researches. Modern works are dedicated both directly to the ships' cargo planning task [1] and connecting land vehicles [2], [3]. A number of studies cover the optimization of the interaction of terminal equipment involved in the production of loading and unloading operations [4]–[7]. In this context, the issues of improving the organization and control of terminals operations are considered [8]. A number of ongoing studies are tied to specific terminals or geographic areas [9]–[11].

Consignors and consignees, although they are the principals of transportation, delegate the organization of this process to specialized intermediaries, most often freight forwarders. The freight forwarder directly or indirectly (through yet other intermediaries) enters into negotiations with the commercial services of the shipping line, stipulating the cost and time parameters of transportation. The cargo accepted by the shipping line for transportation is delivered to the seaport specified in the terms of the contract for delivery to the specified port of destination. The transportation of containerized cargo itself is most often carried out along a predetermined route (string), the configuration of which is chosen by the marketing departments of the shipping line according to the criterion of guaranteed availability of cargo flows.

When transporting containers in this pattern, each ship operating on the line moves from port to port along some predetermined route, which is usually looped (pendulum route). When the ship navigates

from a port to the next port over this route, there are both containers that must be unloaded at the nearest point as well as containers that will remain on board after calling this port (fig. 1).

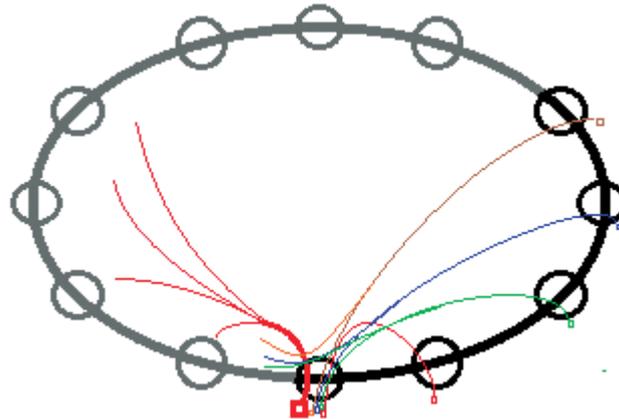


Fig. 1. Routes of passage of containers through a separate port

As can be seen from this figure, from logistic point of view all containers on a ship entering the port can be divided into three categories:

- containers arriving by ship and bound to the given port (unloaded);
- containers remaining on board designated further ports of the route (transit);
- containers departing by ship and following to further ports of the route (loaded).

Information about the availability of cargo at each port of the route and the final point of their delivery is transmitted to a general line management service. At each moment in time, the *line manager* has complete (for a specific moment in time) information about all received orders for the carriage of goods between points of the circular route. This allows him to ensure rational loading of the ship at each site, more or less appropriate amount for taking on board in each port. The cargo remaining not loaded onto the ship is waiting for its turn, i. e. for the next ship of the line to come.

The information to the line manager is provided by the *local planner* which maintains direct communication with the relevant port forwarder. The actual transportation is performed by the ship, the *administration* of which ensures the safety of navigation and the security of cargo. Loading and unloading of the agreed cargo at the port is performed by the *terminal operator*. The position on board of the vessel and the attributes of each transported container are recorded in a special document shared by all participants in of the transportation process called a cargo plan (stowage plan, bayplan, loading plan). The cargo plan is primarily intended to guarantee safety of navigation: to ensure the permissible values of heel, trim, metacentric height, breaking and twisting moments, the proper allocation of dangerous goods, visibility from the bridge and other parameters important for the ship's administration (fig. 2).

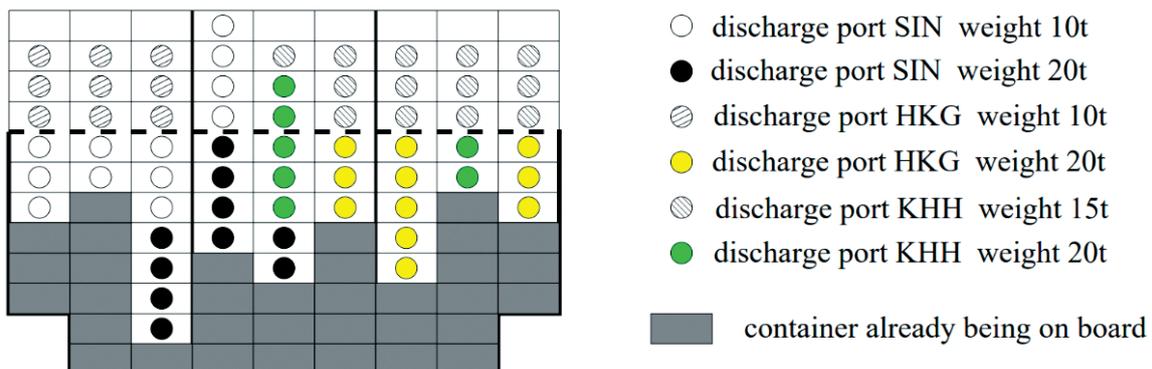


Fig. 2. Example of one bay's cargo plan

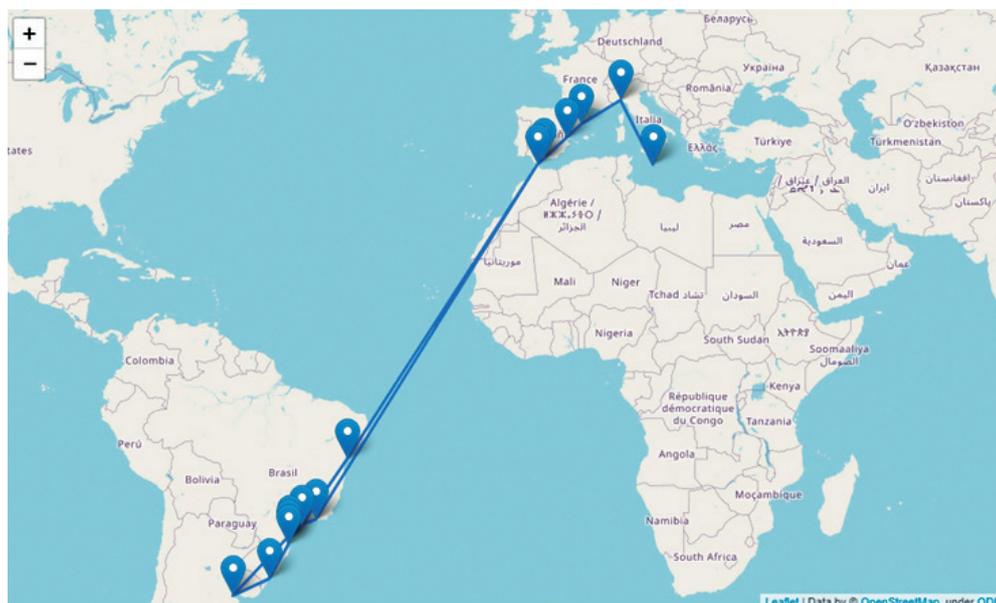


Fig. 3. Example of the string

In addition, to simplify discharging, containers bound for discharging at the nearest port preferably should tend to be located in the upper tiers of the stacks above the deck, and/or entirely fill one bay. The peculiarities of the organization of liner shipping and the number of ports of call make the task even more complex (fig. 3).

### Methods and materials

The problem is that after unloading at a port, the cargo plan will have to be rebuilt: some containers will remain on board in their unchanged position, some of them will be moved to new positions to provide access to the unloaded ones. The situation is no simpler with containers awaiting loading: some of them may not yet arrive at the port, while others may not have reliable information on weight and commercial parameters. As a rule, having a complete understanding of the unloaded containers and a general understanding of the containers awaiting loading, the line manager forms a preliminary cargo plan, which indicates only the general weight characteristics of the containers expected to be loaded (light, medium, heavy) and, possibly, the port of destination.

The local planner, having more complete operational information about the available containers and their status, fills this preliminary plan with specific containers, forming an accurate (“final”) plan, or rather its draft. This draft is sent to the central planner for approval, since the available containers, refined parameters and the wishes of the local forwarders may cause deviations from the expected characteristics of both the preliminary and the proposed final cargo plan. In the course of the procedure for agreeing on the introduced changes between the line manager and the local planner, an important role is assigned to the ship administration, which has the decisive word in the approval of the cargo plan from the point of view of the safety of navigation.

As a rule, by the time the ship is prepared for unloading, the cargo plan of the trip to the next point of the route must be agreed upon. At the same time, the cargo plan upon arrival and the cargo plan upon departure from the port are but static lists reflecting the initial and final state of the cargo on board the vessel during its handling port. For the port operator, it is not these static states that are more important, but the operating procedures themselves, by which these states are achieved. First of all, these include the plan for unloading the vessel — the sequence of removing containers from the ship, possible movement of blocking containers to new positions on the ship, temporary unloading of blocking containers to the berth. All these operations must be carried out taking into account the factors mentioned above — permissible values of heel, trim, metacentric height, breaking and twisting moments, visibility conditions for ship-to-

shore crane operators, safety precautions during work, etc. An incorrect sequence of unloading or loading containers onto a ship can lead to dire consequences (fig. 4).

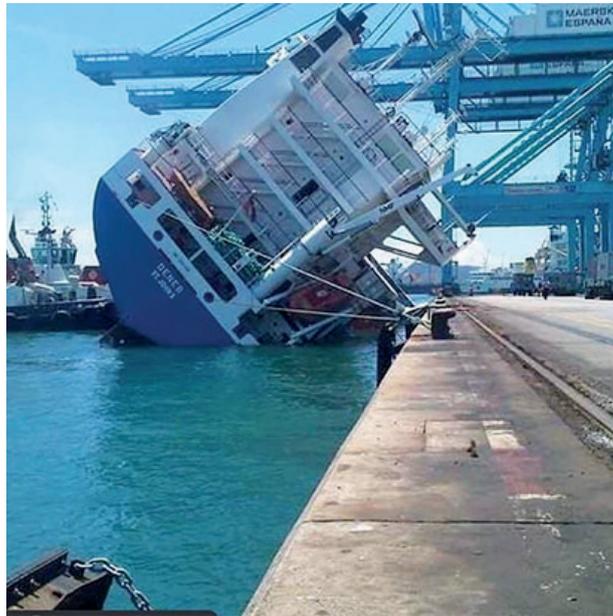


Fig. 4. The consequence of a wrong cargo planning

In addition, cargo operations are not carried out in a single sequence: they are divided into separate sub-sequences corresponding to the allocation of ship-to-shore cranes for work at the zones of the ship's bays. Exactly the same problems arise when loading containers, supplemented by the problem of ensuring maximum loading of the handling equipment distributed for work on the ship. Thus, in addition to static cargo plans of entry and exit, handling a ship in port requires two operational sequences: an *unloading plan* and a *loading plan*.

The dispatch service of the container yard (CY) of the container terminal must timely ensure the implementation of the relevant transport and cargo operations, for which it must formulate plans for their implementation in one form or another (fig. 5).

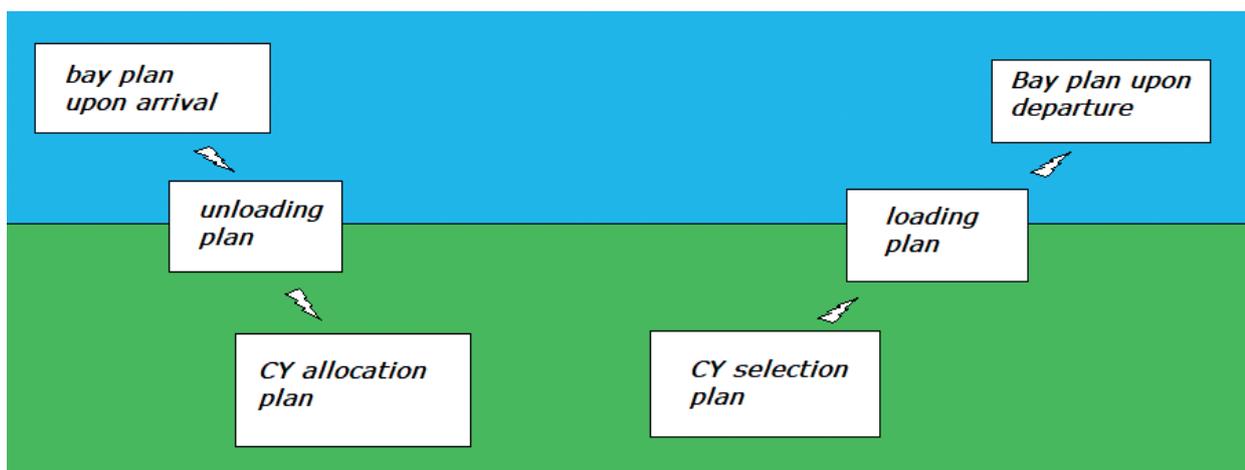


Fig. 5. Operational plans for handling the ship in the port

The solution to all the above problems is already quite difficult, but this is not all: for the timely supply of containers for loading onboard the ship, the container operator must perform a lot of technological operations to unblock target containers, picking them from stacks, and transport them to the operation area

of ship-to-shore cranes. Simply specifying the sequence of containers to be moved does not mean solving the problem: as a rule, it is impossible to perform these actions at the pace of berth operations, and the only solution is to form a special pre-stacking stack: containers pre-selected from the total field of stacks of a container warehouse and moved to a stack located in the immediate vicinity from the area of berthing operations.

However, simply moving all export containers onto a stack closer to the loading area does not provide a solution. In this stack, containers, which, according to the cargo plan, should be located in the lower tiers of the stack on the ship, must be located above, i. e. the structure of the pre-stacking stack should be strictly inverse to the cargo plan on departure. More precisely, it must be the inverse of the order indicated in the loading plan (fig. 6).

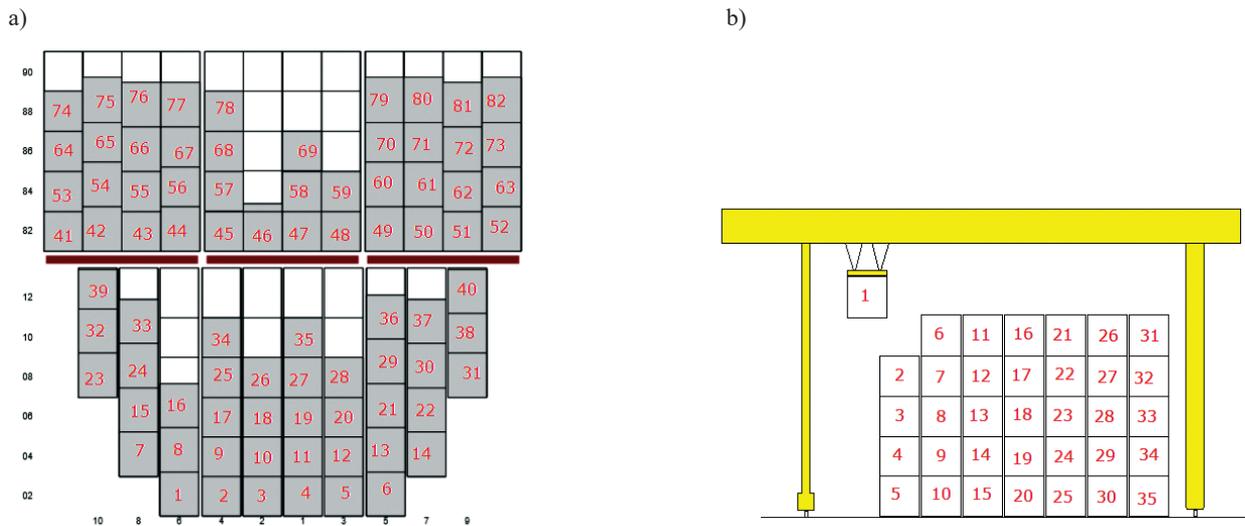


Fig. 6. Stack structure on board the vessel and terminal pre-stacking area:  
a — ship's bay; b — container stack

At the same time, the formed sequence of loading on board the vessel is not a strictly linear sequence: its constituent containers are distributed over separate zones of the bays, determined by the placement of berthing equipment for working on the vessel. As a result, the specified sequence is split into the corresponding number of parallel and independent sub-sequences. Each such sub-sequence specifies the operation procedure for one technological line (STS handler). Moreover, the handler can serve the bays assigned to it in a different order, which leads to the splitting of the specified sub-sequence at one more level, which determines the order of handling bays (which of them will be handled first, second, etc.). Finally, the cargo plan of the bay and the chosen loading procedure (horizontal or vertical) determines the sequence of containers that must be supplied to the working area of the handling equipment (taken from the pre-stacking stack). And this sequence, finally, completely determines the structure of the latter: dividing the entire sequence into segments equal in length to the technical height of the stack, taken in inverse order, which form the position of the containers over each slot. The pre-stacking sequence must be inverse to these particular subsequences. In turn, the maximum height of one section of the pre-stacking stack splits these subsequences into even smaller parallel subsequences (fig. 7).

By the official norms of technological design of commercial seaports, the handling time of the design vessel  $T_{handl.M}$  in hours is prescribed to be determined by the formula:

$$T_{handl.M} = \frac{2Dk}{M_m}, \quad (1)$$

where  $D$  — container capacity of the vessel, boxes;

$k$  — the capacity utilization factor of a container ship, which is recommended to be 0,85;

$M_m$  — the intensity of cargo operations (net) in containers per hour, determined by the formula

$$M_m = P_l N_l, \quad (2)$$

where  $P_l$  — operational productivity of the technological line, cont./h;

$N_l$  — the average designed number of allocated technologic lines is taken according to table 1, as well as the values of technical performance.

Table 1

**Normative reference data from the Technological Design Standards**

Type of container ship	Average no of lines, $N_l$	Technical rate, $P_l$
CS-300–400	1,4	25–28
CS-700	1,8	25–28
CS-1200–1400	1,9	28–32
CS-1800–2500	2,5–2,7	30–35

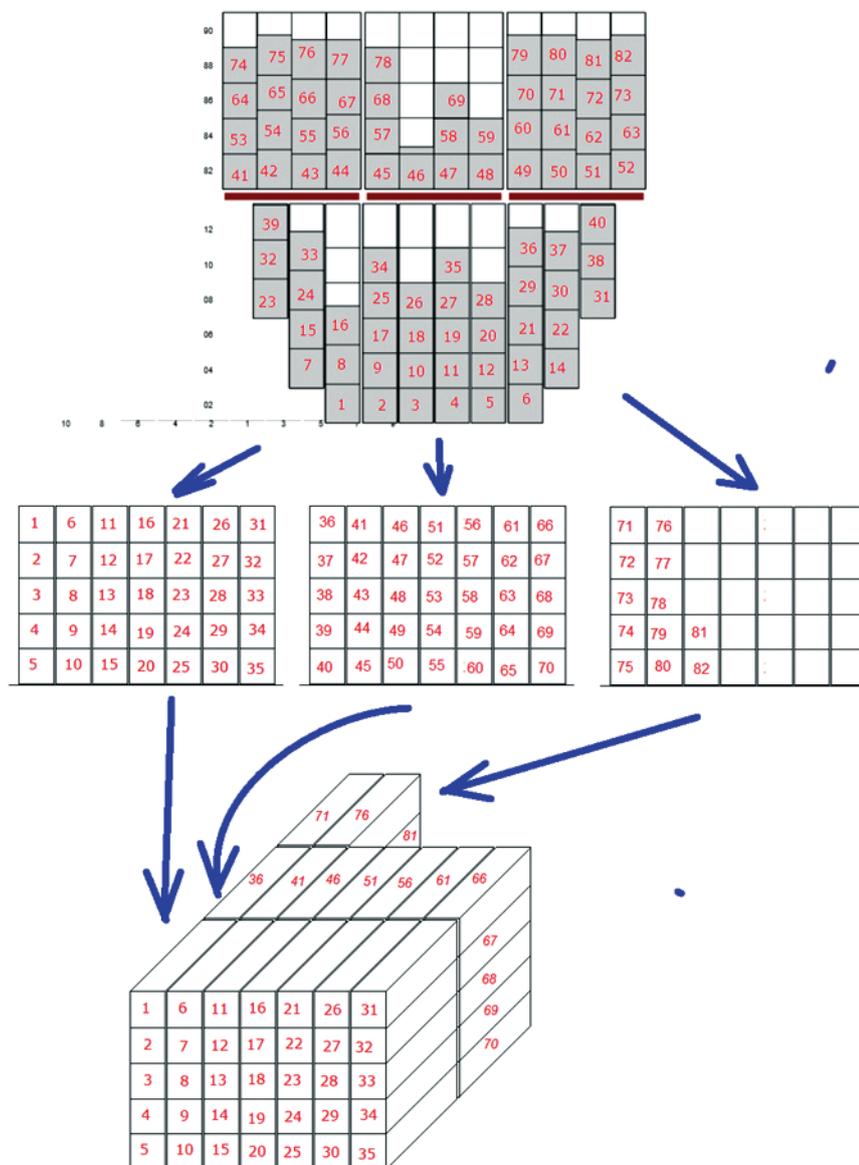


Fig. 7. Stack structure on board the vessel and terminal pre-staking area

An approximate calculation of the ship's handling time at berth, based on these data and serving as the basis for assessing the capacity of berths and ports, is given in table 2.

Table 2

**Normative reference data from the Technological Design Standards**

Capacity, box	Average no of lines	Technical rate, moves/h	Berth time, h
350	1,4	25	20
700	1,8	26	30
1300	1,9	28	49
2150	2,6	32	52

At the same time, in almost no specialized container port, specially built ships with a capacity of more than 1,500 TEU are unloaded and loaded completely. Moreover, the determining factor of the “size of a ship call” (the total number of unloaded and loaded containers) is the ability to process it in 20–22 hours. In this case, taking into account unproductive operations (mooring and unmooring, idle and downtime, commission work, etc.), the ship’s turnaround time is limited by one day, which is extremely convenient for planning the work of ships on the lines. Based on the foregoing, the time of the ship’s berth time will be determined by the duration of the unloading and subsequent loading of the limiting line, i. e. the unloader handling the longest sequence of handling a group of bays. It is no longer possible to reduce this time, since the placement of the second unloader over the selected group of bays is unacceptable.

Calculations carried out on the basis of the collection of statistical data on of container ships’ voyages show that several hundred containers from one bay are unloaded and loaded in an average port, and one STS handler allocated for 2–3 bays. Thus, one handler is expected to perform about 300 movements to complete the prescribed task. With an average productivity of 25 movements per hour, this requires 12 hours of work per ship. Taking into account work interruptions and unproductive movements (removal and installation of hatch covers, movement of stevedores on board and back, transfer of gears between the ship and the shore, shifting on board or over the berth, etc.), this fits well with the commercial requirements for completion of work in 24 hours on the most labor-intensive link. This is fully confirmed by the collected statistics on the handling of ships in the port.

As it follows from the discussion above, the structure of containers allocation in the slots of pre-stack from the container operators’ point of view is totally dictated by the requirements of cargo plan and loading plan associated with it. This set not only the structure, but also the sequence of the pre-stack formation, i. e. the order of selection and transportation of the required containers that would allow to realize the designated structure of the stack taking into account the technologic equipment used in the terminal.

The conducted considerations show that this sequence from the terminal point of view is pseudo-stochastic, since the terminal operator is not involved in the selection of containers to be loaded onboard the ship. Accordingly, for the purpose of the study of inner regularities of container selection from the stacks this sequence could be gained by the random generation mechanisms without violation of any general principles of terminal operations.

An important circumstance is that forming the pre-stack by the stacking machines with the access from above (RTG, RMG, SC) there is no rigid sequence of container allocation. For placement into the ground tier of the pre-stack any listed container (fig. 8) could be selected from the stacks of the main container yard.

1	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71	76			:		
2	7	12	17	22	27	32	37	42	47	52	57	62	67	72	77					
3	8	13	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	73	78			:		
4	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	81				
5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	82		:		

Fig. 8. Possible candidates for selection on the first step of pre-stack formation

Furthermore, if at any further step of this procedure a certain amount of container is placed in the pre-stack, the possibility to select one container from several one remains (fig. 9).

1	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61	66	71	76						
2	7	12	17	22	27	32	37	42	47	52	57	62	67	72	77						
3	8	13	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63	68	73	78						
4	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64	69	74	79	81					
5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	82					

Fig. 9. Possible candidates for selection on middle step (10<sup>th</sup>) of pre-stack formation

From the candidates marked yellow in Fig. 8 and 9 for the transition from the mains stack area those are selected which are easiest to pick up. For example, it could be the container sitting in the upper tier of the stacks. If there are several containers like that, the one closest to the pre-stack area will be selected. When there are no requested containers in upper tiers, the ones blocked by minimum of other containers will be searched. The shifting of the blocking containers to clear the access should be done so that it would cause minimal problems of the candidates on the following steps. In other words, the algorithms of destination position should not be “greedy”, optimizing the criteria oa current step only.

### Discussion

As we have showed, the ship handling time is determined by the time needed to serve the bay with maximal call size (i. e. number of unloaded/loaded container). Accordingly, for the purpose of this study we could address only one bay demanding the maxima; amount of containers for loading. The number of technological lines working on ship is determined by the number of STS handlers allocated for berth operations. A line consists of one STS (for loading), horizontal transportation vehicles (transit between CY and the berth), stacking machines (selecting the containers from the stacks). The equipment of the technological line should enable permanent operation of STS. Mathematically this condition is:

$$Q = k_{util}^{sts} N^{sts} P^{sts} T = k_{util}^{TT} N^{TT} P^{TT} T = k_{util}^{CY} N^{CY} P^{CY} T, \quad (3)$$

where  $Q$  — cargo flow, boxes;

$k_{util}^x$  — utilization of operation link  $x$ ;

$N^x$  — number of machines engaged in link  $x$ ;

$P^x$  — productivity of one machine in link  $x$ , move/h;

$T$  — time of operation.

This condition states that through the loading operation (STS), transportation (TT) and selection (CY) for the time  $T$  there passes the same container flow  $Q$ . Since for the case of one bay that we study  $N^{sts} = 1$  and  $k_{учен}^{sts} = 1$  (there are breaks and no travels between the bays), these conditions could be written as:

$$1 \cdot 1 P^{sts} T = k_{util}^{TT} N^{TT} P^{TT} T = k_{util}^{CY} N^{CY} P^{CY} T; \quad (4)$$

$$P^{sts} T = k_{util}^{TT} N^{TT} P^{TT} T = k_{util}^{CY} N^{CY} P^{CY} T; \quad (5)$$

$$P^{sts} = k_{util}^{TT} N^{TT} P^{TT} = k_{util}^{CY} N^{CY} P^{CY}. \quad (6)$$

Eventually,  $N^{TT} = \frac{P^{sts}}{k_{util}^{TT} P^{TT}}$  и  $N^{CY} = \frac{P^{sts}}{k_{util}^{CY} P^{CY}}$  where  $k_{util}^x \leq 1$  is determined by the condition of the

integer number of equipment pieces. Here  $P^{CY}$  is the commercial productivity, i. e. the number of containers, passing from the CY through inner transportation to berth operational area. The commercial productivity is connected to the effective productivity of the stacking equipment by equation  $P^{CY} = s \cdot P_0^{CY}$ , where  $s$  is

the selectivity (ratio between number of commercial moves and total number of moves  $N$ , or  $s = \frac{1}{N} \leq 1$ ). If, for example,  $s = 0,5$ , then the commercial productivity is only a half of the effective productivity, which would require the increase in the number of stacking machines involved in handling:

$$k_{util}^{sts} P^{sts} = k_{util}^{TT} N^{TT} P^{TT} = N^{CY} P^{CY}. \quad (7)$$

If the number of machines engaged in transportation or selection is not sufficient (i. e. lower than the calculated values), then respectfully limited would be the cargo flow that could pass through this link. In this case the full utilization of equipment will be observed in this limitative link. For example, the deficit of stacking machines could be described as:

$$k_{util}^{sts} P^{sts} = k_{util}^{TT} N^{TT} P^{TT} = N^{CY} P^{CY}. \quad (8)$$

Accordingly, the commercial productivity of the STS handler would drop from its effective productivity due to idle time, or  $P_1^{sts} = k_{util}^{sts} \cdot P^{sts}$ . As the consequence the time of the bay loading will increase in respect to the estimated value or  $T_1 = \frac{E}{P_1^{sts}} \geq \frac{E}{P^{sts}} = T_0$ .

When working with the containers in pre-stacking mode, the selectivity always  $is = 1$ , so the commercial productivity remains equal the efficient one. Respectively, this in one case enables to provides the full utilization of the STS handler by lower number of stacking machines, and in the other case (with the deficit of them) to reduce losses of the productivity.

### Conclusions

1. The sequence of tasks when handling a container ship in the port is determined by its cargo plan.
2. The practice of cargo planning and commercial operation of a ship on a container line determines the volume of loading and unloading operations for groups of adjacent bays, for work on which ship-to-shore cranes are allocated.
3. Estimation of the time of cargo operations when handling a container ship is determined by the limiting technological line that receives the maximum operational task.
4. Normative documents governing the rules for calculating the time of carrying out cargo operations and serving as the basis for calculating the throughput of a container terminal are based on incorrect assumptions about the nature and conditions of commercial operation of a container ship.
5. The research carried out by the authors makes it possible to clarify the methods for calculating the handling time of ships at specialized container terminals.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Korach A.* Matheuristics for slot planning of container vessel bays / A. Korach, B. D. Brouer, R. M. Jensen // *European Journal of Operational Research*. — 2020. — Vol. 282. — Is. 3. — Pp. 873–885. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.042.
2. *Kong L.* Joint optimization of container slot planning and truck scheduling for tandem quay cranes / L. Kong, M. Ji, Z. Gao // *European Journal of Operational Research*. — 2020 (In Press, Corrected Proof). DOI: 10.1016/j.ejor.2020.12.005.
3. *Gumuskaya V.* Dynamic barge planning with stochastic container arrivals / V. Gumuskaya, W. van Jaarsveld, R. Dijkman, P. Grefen, A. Veenstra // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2020. — Vol. 144. — Pp. 102161. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102161.
4. *Mar-Ortiz J.* A decision support system for a capacity management problem at a container terminal / J. Mar-Ortiz, N. Castillo-García, M. D. Gracia // *International Journal of Production Economics*. — 2020. — Vol. 222. — Pp. 107502. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.09.023.
5. *Yue L.* Optimizing configuration and scheduling of double 40 ft dual-trolley quay cranes and AGVs for improving container terminal services / L. Yue, H. Fan, M. Ma // *Journal of Cleaner Production*. — 2021. — Vol. 292. — Pp. 126019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126019.

6. Pérez I. Do specialisation and port size affect port efficiency? Evidence from cargo handling service in Spanish ports / I. Pérez, M. M. González, L. Trujillo // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. — 2020. — Vol. 138. — Pp. 234–249. DOI: 10.1016/j.tra.2020.05.022.

7. Kuznetsov A. L. Planning Simulation Experiments in the Tasks of Studying the Operational Strategies of Container Terminals / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. D. Semenov, H. Oja // *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2020. — Vol. 14. — No. 4. — Pp. 845–849. DOI: 10.12716/1001.14.04.08.

8. Zhen L. Integrated planning of ship deployment, service schedule and container routing / L. Zhen, S. Wang, G. Laporte, Y. Hu // *Computers & Operations Research*. — 2019. — Vol. 104. — Pp. 304–318. DOI: 10.1016/j.cor.2018.12.022.

9. Rødseth K. L. How do economies of density in container handling operations affect ships' time and emissions in port? Evidence from Norwegian container terminals / K. L. Rødseth, P. B. Wangsness, H. Schøyen // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. — 2018. — Vol. 59. — Pp. 385–399. DOI: 10.1016/j.trd.2017.12.015.

10. Iyer K. C. Technical efficiency analysis of container terminals in India / K. C. Iyer, V. P. S. N. Nanyam // *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. — 2021. — Vol. 37. — Is. 1. — Pp. 61–72. DOI: 10.1016/j.ajsl.2020.07.002.

11. Karakas S. Development of a multidimensional performance evaluation model for container terminals at Marmara Sea / S. Karakas, A. Z. Acar, M. Kirmizi // *Research in Transportation Business & Management*. — 2020. — Vol. 37. — Pp. 100498. DOI: 10.1016/j.rtbm.2020.100498.

## REFERENCES

1. Korach, Aleksandra, Berit Dangaard Brouer, and Rune Møller Jensen. “Matheuristics for slot planning of container vessel bays.” *European Journal of Operational Research* 282.3 (2020): 873–885. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.042.

2. Kong, Lingrui, Mingjun Ji, and Zhendi Gao. “Joint optimization of container slot planning and truck scheduling for tandem quay cranes.” *European Journal of Operational Research* (2020). In Press, Corrected Proof. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.12.005.

3. Gumuskaya, Volkan, Willem van Jaarsveld, Remco Dijkman, Paul Grefen, and Albert Veenstra. “Dynamic barge planning with stochastic container arrivals.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 144 (2020): 102161. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102161.

4. Mar-Ortiz, Julio, Norberto Castillo-García, and María D. Gracia. “A decision support system for a capacity management problem at a container terminal.” *International Journal of Production Economics* 222 (2020): 107502. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.09.023.

5. Yue, Lijun, Houming Fan, and Mengzhi Ma. “Optimizing configuration and scheduling of double 40 ft dual-trolley quay cranes and AGVs for improving container terminal services.” *Journal of Cleaner Production* 292 (2021): 126019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126019.

6. Pérez, Ivone, María Manuela González, and Lourdes Trujillo. “Do specialisation and port size affect port efficiency? Evidence from cargo handling service in Spanish ports.” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 138 (2020): 234–249. DOI: 10.1016/j.tra.2020.05.022.

7. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, A. D. Semenov, and H. Oja. “Planning Simulation Experiments in the Tasks of Studying the Operational Strategies of Container Terminals.” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 14.4 (2020): 845–849. DOI: 10.12716/1001.14.04.08.

8. Zhen, Lu, Shuaian Wang, Gilbert Laporte, and Yi Hu. “Integrated planning of ship deployment, service schedule and container routing.” *Computers & Operations Research* 104 (2019): 304–318. DOI: 10.1016/j.cor.2018.12.022.

9. Rødseth, Kenneth Løvold, Paal Brevik Wangsness, and Halvor Schøyen. “How do economies of density in container handling operations affect ships' time and emissions in port? Evidence from Norwegian container terminals.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 59 (2018): 385–399. DOI: 10.1016/j.trd.2017.12.015.

10. Iyer, K. Chandrasekhar, and V. P. S. Nihar Nanyam. “Technical efficiency analysis of container terminals in India.” *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 37.1 (2021): 61–72. DOI: 10.1016/j.ajsl.2020.07.002.

11. Karakas, Serkan, Avni Zafer Acar, and Mehmet Kirmizi. “Development of a multidimensional performance evaluation model for container terminals at Marmara Sea.” *Research in Transportation Business & Management* 37 (2020): 100498. DOI: 10.1016/j.rtbm.2020.100498.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Кузнецов Александр Львович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [thunder1950@yandex.ru](mailto:thunder1950@yandex.ru),  
[kuznetsoval@gumrf.ru](mailto:kuznetsoval@gumrf.ru)

**Семенов Антон Денисович** — диспетчер  
ООО «Логистический парк «Янино»  
Российская Федерация, Ленинградская область,  
Всеволожский район, д. Янино-1,  
Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1  
e-mail: [asemyonov054@gmail.com](mailto:asemyonov054@gmail.com)

**Оја Ханну** — вице-президент  
Konecranes Finland Corp.  
05800, Finland, Hyvinkää, Koneenkatu 8  
e-mail: [hannu.oja@konecranes.com](mailto:hannu.oja@konecranes.com)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Kuznetsov, Aleksandr L.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [thunder1950@yandex.ru](mailto:thunder1950@yandex.ru),  
[kuznetsoval@gumrf.ru](mailto:kuznetsoval@gumrf.ru)

**Semionov, Anton D.** — Dispatcher  
Yanino Logistics Park LLC  
Vsevolzhsky District, Yanino-1 village,  
Trade and logistics zone Yanino-1, No. 1,  
Leningrad Region, Russian Federation  
e-mail: [asemyonov054@gmail.com](mailto:asemyonov054@gmail.com)

**Oja, Hannu** — Vice President  
Konecranes Finland Corp.  
8 Koneenkatu, Hyvinkää, 05800, Finland  
e-mail: [hannu.oja@konecranes.com](mailto:hannu.oja@konecranes.com)

*Статья поступила в редакцию 28 февраля 2021 г.  
Received: February 28, 2021.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-169-175

## PRINCIPLES OF FORMING THE TRANSPORT SYSTEMS FOR THE GROUPAGE CARGOES DELIVERY

**O. A. Izotov**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*An assessment of the possibility of forming a transport system for delivery of groupage consignments from elements of the transport infrastructure existing on the domestic routes of the country involved in the movement of goods in sea containers and unitized form is made. In particular, the issues of constructing an optimal plan for functioning of the transport network by describing the planning object through a system of economic and mathematical models for planning the work of individual links of the transport infrastructure along the entire route of the cargo are considered. Thus the interrelation between assessing the potential of the transport means and the routing of goods flows is revealed; the proposed method combines the solution of such issues on the basis of assessing the elements of transport infrastructure of the considered transport space. As criteria for optimal functioning of the considered transport system, it is proposed to allocate the delivery speed, the distance of cargo delivery deep into the Hinterland, the time spent on transportation and the cost of transport services. At the same time, the main indicator of the usefulness of the introduction of new means of groupage cargo consolidation is the possibility of increasing the leg of cargo delivery using container technologies. It is noted that since the transport services market assumes a multivariate supply of transport works and services, as well as the determination of their capabilities, the search process is to determine the necessary technical and economic indicators of potential transport systems, since only the search implies acceptance of the result or the requirement for better indicator of matching the result obtained or the requirement satisfying the best indicator. As the main criterion for making a decision on the transportation of groupage consignments in intra-container modules, the use of cargo delivery, in which the proposed form of delivery is expedient, is proposed. As a mechanism for choosing from a variety of options for organizing the delivery of groupage cargoes, an enlarged block diagram of the methodology for studying the transport market before determining the search limits is proposed.*

*Keywords: groupage cargoes, container technologies, transport systems, quality indicators of transportation.*

**For citation:**

Izotov, Oleg A. "Principles of forming the transport systems for the groupage cargoes delivery." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 169–175. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-169-175.

**УДК 656.073.2**

## ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ДОСТАВКИ СБОРНЫХ ГРУЗОВ

**О. А. Изотов**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Выполнена оценка возможности формирования транспортной системы доставки сборных партий грузов из элементов транспортной инфраструктуры, существующей на внутренних маршрутах страны, участвующих в перемещении грузов в морских контейнерах и тарно-штучном виде. В частности, рассматриваются вопросы построения оптимального плана для функционирования транспортной сети путем описания объекта планирования через систему экономико-математических моделей планирования работы отдельных звеньев транспортной инфраструктуры на всем пути следования груза. При этом выявлена взаимосвязь вопросов оценки возможностей средств транспорта и маршрутизации потоков грузов, предложена методика совместного решения таких вопросов на основе оценки элементов транспортной инфраструктуры рассматриваемого транспортного пространства. В качестве критериев оптимальности функционирования рассмотренной транспортной системы предлагается выделить скорость доставки,*

дальность завоза груза вглубь хинтреленда, время, затраченное на перевозку и стоимость транспортных услуг. При этом основным показателем полезности внедрения новых средств укрупнения сборных грузов выступает возможность увеличения плеча доставки грузов с использованием контейнерных технологий. Отмечается, что поскольку рынок транспортных услуг предполагает многовариантность предложения транспортных работ и услуг, а также определение их возможностей, процессом поиска является определение необходимых технико-экономических показателей потенциальных транспортных систем, так как только поиск предполагает согласие с полученным результатом или требованием лучшего показателя соответствия полученному результату или требованию, удовлетворяющему лучшему показателю. В качестве основного критерия принятия решения на перевозку сборных партий грузов во внутриконтейнерных модулях предложено использование завоза грузов, при котором предлагаемая форма доставки является целесообразной. В качестве механизма выбора из множества вариантов организации доставки сборных грузов предложена укрупненная блок-схема методики исследования транспортного рынка до определения пределов поиска.

*Ключевые слова:* сборные грузы, контейнерные технологии, транспортные системы, качественные показатели перевозки.

**Для цитирования:**

Изотов О. А. Принципы формирования транспортных систем доставки сборных грузов / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 169–175. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-169-175.

### **Введение (Introduction)**

Инициатором построения транспортной системы в целях организации доставки своих грузов в адрес получателя выступает, как правило, грузоотправитель или по его поручению экспедитор. При этом на рынке транспортных услуг грузоотправитель или экспедитор рассматривает некоторое множество возможных вариантов, выбирая оптимальный исходя из его количественных и качественных характеристик. Такой подход обуславливает принципиальную разницу позиций грузовладельца от владельца средств транспорта на этапе планирования перевозки. В частности, применительно к привлекаемому математическому аппарату, в процессе выполнения расчетов возможности перевозок грузопотоков перевозчики прибегают к теории массового обслуживания, что позволяет на должном уровне учитывать вероятностные характеристики совместного функционирования ряда независимых параметров процесса перевозки и сглаживать неравномерное поступление грузов на тот или иной транспортных узел. При этом грузовладелец стремится к большей определенности (детерминированности) в процессе построения графиков перевозок, поскольку вынужден планировать также и дальнейшее продвижение грузов на рынок потребления. Данное противоречие, вызванное расхождением интересов грузовладельцев и владельцев средств транспорта, требует более детального рассмотрения процесса планирования перевозки.

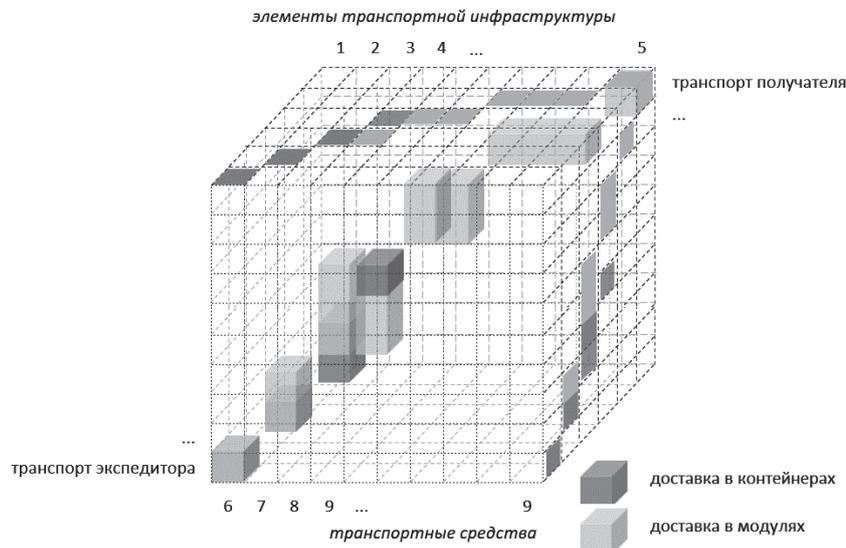
Практикой использования экономико-математических методов сформировано две концепции построения оптимального плана функционирования транспортной системы. Первая описывает объект планирования как единую «глобальную» модель, необходимую для построения, в частности, магистральных и международных транспортных коридоров. Вторая концепция рассматривает вопросы построения оптимального плана для функционирования транспортной сети путем описания объекта планирования через систему экономико-математических моделей планирования работы отдельных звеньев транспортной инфраструктуры на всем пути следования груза.

Таким образом, на основе транспортных систем может быть организован многоступенчатый процесс планирования самой перевозки, для чего необходимо рассмотреть производственные возможности видов транспорта и их перегрузочных (складских) узлов на маршруте доставки во взаимосвязи со смежными видами транспорта. При организации нескольких маршрутов каждый из них оценивается отдельно с тем, чтобы затем выбрать такой, в котором отсутствует необходимость пересмотра параметров его полезности.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Вопросы оценки возможностей средств транспорта и маршрутизации потоков грузов являются взаимосвязанными, так как, с одной стороны, маршрутизацией вводятся ограничения, определяю-

щие пропускную способность и другие параметры, а с другой — именно маршрут характеризует скорость доставки грузов [1], [2]. Оценку возможности совместного решения указанных ранее вопросов предлагается выполнять на основе анализа элементов транспортной инфраструктуры имеющегося транспортного пространства (рис. 1).



*Рис. 1.* Принципы формирования транспортных систем доставки сборных грузов из элементов транспортной инфраструктуры: 1 — контейнерный терминал; 2 — сухой порт; 3 — железнодорожные пути; 4 — пункт растарки контейнеров; 5 — пункт растарки модулей; и транспортных средств; 6 — контейнерные перегружатели; 7 — автоконтейнеровозы; 8 — железнодорожные платформы; 9 — погрузчики

Таким образом, транспортное пространство включает в себя объединение взаимосвязанных транспортных элементов, из которых можно сформировать определенное количество альтернативных транспортных систем [3], [4].

В качестве критериев оптимальности функционирования рассмотренной транспортной системы могут выступать скорость доставки, дальность завоза груза вглубь хинтреленда, время, затраченное на перевозку и стоимость транспортных услуг. При этом основным показателем полезности внедрения новых средств укрупнения сборных грузов [5]–[7] является возможность увеличения плеча доставки грузов с использованием контейнерных технологий, а значит, соответственно, и других преимуществ этого наиболее передового способа транспортировки грузов (рис. 2).

### Результаты (Results)

Рынок транспортных услуг предполагает многовариантность предложения работ и услуг связанн с перевозкой грузов. Поэтому определение возможностей, т. е. необходимых технико-экономических показателей потенциальных транспортных систем, является процессом поиска, так как только он предполагает соответствие полученному



*Рис. 2.* Оценка внедрения новых средств укрупнения сборных грузов в пространстве качественных показателей эффективности перевозки

результату или требованию лучшего показателя. Например, из рис. 2 видно, что стоимость перевозки сборной партии груза вглубь хинтерленда до максимальной возможности использования линейного контейнера (восемь суток в обе стороны) ниже, чем перевозка той же партии груза во внутриконтейнерных модулях. Однако доставка грузов в модулях обеспечивает перевозку на более дальние расстояния без дополнительных перегрузок, т. е. используя совокупность возможностей контейнерных технологий [8]–[10]. Вместе с тем по истечении срока использования линейного контейнера сборная партия грузов может следовать по маршруту и в тарно-штучном виде, что приведет к повышению стоимости такой организации перевозки. В данном случае остается найти предел (в рассматриваемом случае это плечо завоза грузов  $L'$ ) при котором целесообразна та или иная форма доставки — рис. 3.

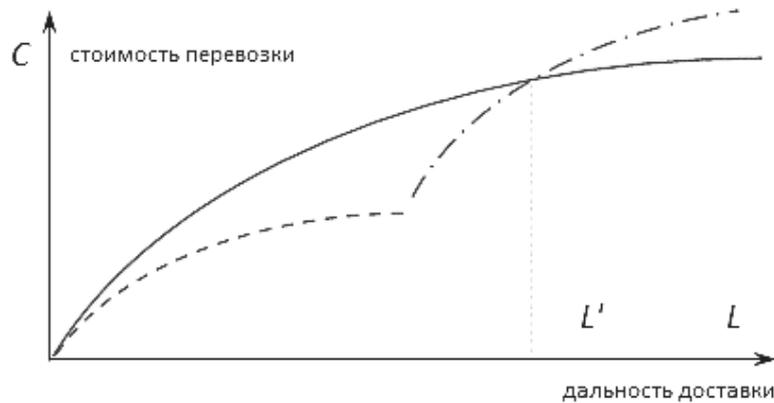


Рис. 3. Условия принятия решения на перевозку сборных грузов

Условные обозначения:

- — — — — доставка в контейнерах; - - - - - доставка в модулях;  
- · - · - · доставка в тарно-штучном виде после растарки из контейнера

### Обсуждение (Discussion)

Для возможности принятия решения о перевозке предлагается использовать следующий численный критерий. Пусть  $e$  — эффективность (снижение затрат) варианта транспортной системы [11]. В процессе исследования рынка ожидаемой емкости  $j$ -варианта получим  $n$  первых ( $n < j$ ) случайных наблюдений (расчетов) величины  $e$ . Среднее значение величины  $e$  может быть определено в виде

$$\bar{e} = \frac{\sum_{j=1}^n e_j}{n}. \quad (1)$$

Дисперсия  $D_n$  находится из соотношения

$$\sigma = \frac{\sum_{j=1}^n (e_j - \bar{e})^2}{n-1}. \quad (2)$$

Среднеквадратичная ошибка  $\sigma$  определяется следующим образом:

$$\sigma = \sqrt{D_n} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (e_j - \bar{e})^2}{n-1}}. \quad (3)$$

Таким образом, наиболее вероятная достаточно высокая величина  $e$  может быть определена по формуле

$$e'_{\max} = \bar{e} + \sigma = \frac{\sum_{j=1}^n e_j}{n} + \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (e_j - \bar{e})^2}{n-1}}. \quad (4)$$

Аналогично, при необходимости наиболее вероятная достаточно высокая малая величина  $e$  находится как  $e'_{\max} = \bar{e} - \sigma$ . Поэтому заданную последовательность расчетов целесообразно выполнять на предварительной стадии исследования транспортного рынка. В дальнейшем, в ходе целевого поиска варианта транспортной системы, расчеты следует прекратить, когда  $e_j \geq e'_{\max}$  ( $e_j \leq e'_{\min}$ ). В данном случае необходимость исследования всего рынка может отпасть. Таким образом, использование методики исследования транспортного рынка, которая укрупненно может быть представлена в виде алгоритма (рис. 4), позволяет получить начальный перечень вариантов для рациональной транспортной системы.

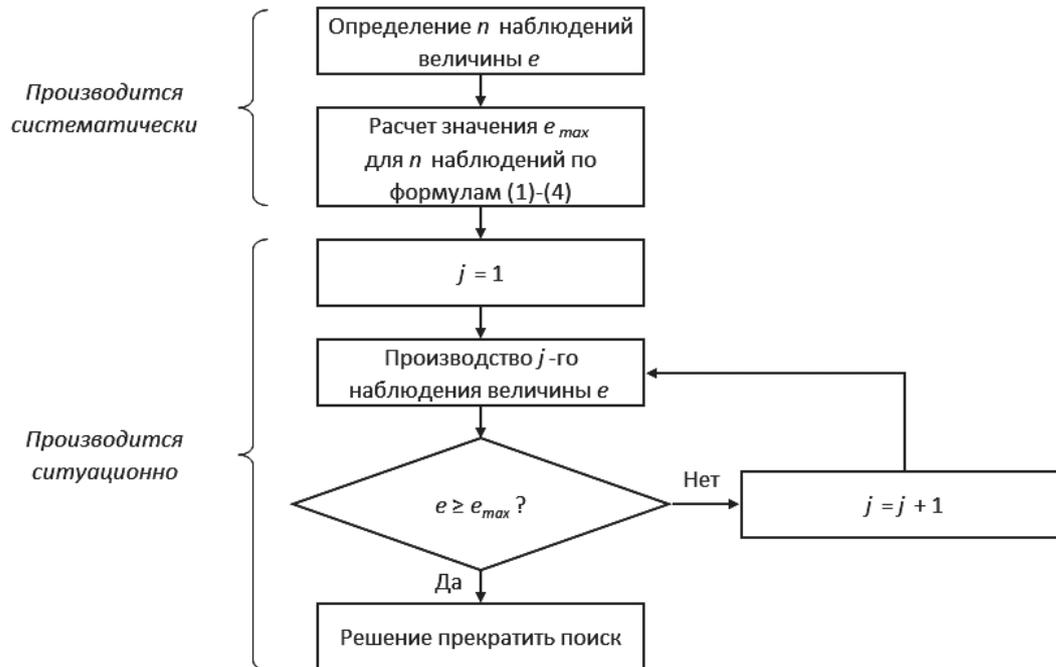


Рис. 4. Укрупненная блок-схема методики исследования транспортного рынка до этапа определения пределов поиска

### Выводы (Summary)

Выполненное в статье исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Внедрение новых средств укрупнения сборных партий грузов в контейнерную транспортно-технологическую систему не потребует коренных изменений в принятой технологии перевозки контейнеризированных грузов.
2. Из элементов транспортной инфраструктуры, сложившейся на транспортном пространстве страны, может быть сформирован ряд вариантов транспортных систем доставки малых партий грузов во внутриконтейнерных модулях [12]–[14].
3. Применение новых средств укрупнения сборных партий грузов позволит увеличить плечо завоза сборных партий грузов вглубь материка с применением контейнерных технологий.
4. Основным критерием оценки качественных показателей перевозки сборных грузов во внутриконтейнерных модулях является по-прежнему стоимость доставки груза.
5. Подбор оптимального варианта организации перевозки сборных партий грузов может быть выполнен путем выбора одного из предложенных вариантов. Для этого предложена методика исследования транспортного рынка до определения пределов поиска.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириченко А. В. Перевозка экспортно-импортных грузов. Организация логистических систем / А. В. Кириченко. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2004. — 506 с.

2. Кузнецов А. Л. Классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.

3. Изотов О. А. Роль транспортно-логистических кластеров в формировании контейнерных коридоров перевозок сборных грузов / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, Д. Л. Головцов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 2. — С. 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136.

4. Кузнецов А. Л. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: моногр. / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 320 с.

5. Изотов О. А. Технологические решения для организации отправок сборных грузов посредством контейнерных транспортно-технологических систем / О. А. Изотов, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.

6. Изотов О. А. Процессы формирования сборных контейнерных партий груза / О. А. Изотов, Ю. И. Васильев, О. А. Ражев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.

7. Изотов О. А. Перспективы экспедирования морских контейнерных перевозок / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, А. В. Гультаев // Транспортное дело России. — 2019. — № 4. — С. 130–133.

8. Изотов О. А. Перспективы развития технологий перевозки сборных грузов в контейнерах / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 1. — С. 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148.

9. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

10. Изотов О. А. Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гультаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-506.

11. Морис У. Т. Наука об управлении. Байесовский подход / У. Т. Морис. — М.: Издательство «Мир», 1971. — 304 с.

12. Irannezhad E. A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time / E. Irannezhad, C. Prato, M. Hickman // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2017. — Vol. 121. — Pp. 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.

13. Saeed N. Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines / N. Saeed, O. I. Larsen // Case Studies on Transport Policy. — 2016. — Vol. 4. — Is. 2. — Pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.02.001.

14. Lv B. Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport / B. Lv, B. Yang, X. Zhu, J. Li // Computers & Industrial Engineering. — 2019. — Vol. 129. — Pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.

## REFERENCES

1. Kirichenko, A. V. *Perevozka eksportno-importnykh грузов. Organizatsiya logisticheskikh sistem*. 2<sup>nd</sup> edition. SPb.: Piter, 2004.

2. Kuznetsov, Aleksandr Lvovich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Aleksandr Aleksandrovich Davydenko. “Classification and functional modeling of echeloned container terminals.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.

3. Izotov, Oleg Albertovich, Alexander Lvovich Kuznetsov, and Dmitriy Lvovich Golovtsov. “Role of transport and logistics clusters in creating container corridors for groupage cargo transportation.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2020): 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136.

4. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and A. A. Davydenko. *Morskaya konteiner'naya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.

5. Izotov, Oleg A., Aleksandr V. Kirichenko, and Aleksandr L. Kuznetsov. "Technological solutions for cargo shipment through the container transport and technological systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.

6. Izotov, Oleg A., Yuri I. Vasiliev, and Oleg A. Razhev. "Processes for forming groupage container consignments." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.

7. Izotov, O., A. Kuznetsov, and A. Gulyaev. "The prospects for freight forwarding container shipping." *Transport business of Russia* 4 (2019): 130–133.

8. Izotov, Oleg Albertovich, and Alexander Lvovich Kuznetsov. "Development prospects of technologies of grouped cargo containerization." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2020): 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148.

9. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Simulation in the tasks of sea port operational analyses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.

10. Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. "Assessment of required technological resources by statistical simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-50.

11. Morris, William T. *Management Science: A Bayesian Introduction*. 1st Edition. Prentice Hall, 1968.

12. Irannezhad, Elnaz, Carlo Prato, and Mark Hickman. "A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 121 (2017): 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.

13. Saeed, Naima, and Odd I. Larsen. "Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines." *Case Studies on Transport Policy* 4.2 (2016): 143–149. DOI: 10.1016/j.cstp.2016.02.001.

14. Lv, Bowen, Bin Yang, Xiaolin Zhu, and Jun Li. "Operational optimization of transit consolidation in multi-modal transport." *Computers & Industrial Engineering* 129 (2019): 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Изотов Олег Альбертович** —  
 кандидат технических наук  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf\_pgt@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Izotov, Oleg A.** —  
 PhD  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf\_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 08 февраля 2021 г.

Received: February 8, 2021.

## PROCEDURE FOR SYNTHESIZING SOURCES OF SAFETY INFORMATION IN THE COASTAL AREAS OF THE NORTHERN SEA ROUTE EASTERN PART

**V. I. Menshikov<sup>1</sup>, S. Yu. Razvozov<sup>2</sup>, A. N. Anisimov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — Murmansk State Technical University, Murmansk, Russian Federation

<sup>2</sup> — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> — FSUE “Hydrographic Enterprise”, St. Petersburg, Russian Federation

*The justification for the need to introduce the NAVTEX system, providing vessels with the navigation safety information, relating directly to the navigation area of the vessel, into the areas of the Northern Sea Route that are poorly equipped in terms of navigation, is given. It will improve the safety and efficiency of shipping in the coastal areas of the Arctic Ocean. The task of synthesizing sources of safety information (Navtex system) for the under-equipped areas of the Arctic Ocean adjacent to the Northern Sea Route is considered. The cumulative imbalance of counter information flows from the NAVTEX stations can be the main reason for the information oversupply of the navigational data needed to make decisions on maritime safety and it is selected as a criterion for assessing the synthesis quality. It is proposed to solve this problem on the basis of an optimization-simulation approach to the synthesis of the large-scale systems, in which at formalization of this task is recommended to use the limitations of two types: the analytical limitations, presented in the form of requirements for the parameters of the synthesized NAVTEX system and the algorithmic limitations, reflecting the requirements for the functional parameters of the NAVTEX system (usually, the complexity of these parameters does not allow to express them analytically). A graphic version of the procedure for the synthesis of the system of navigational information sources, which includes solving two specific problems, is presented. Firstly, it is the problem of finding the splitting of many stations into specific service areas, minimizing the target function at the specified restrictions, and secondly, it is the problem of assessing the total information activity for receiving, processing and broadcasting safety information in the zone of a particular station when transmitting signals from a nearby station.*

*Keywords: synthesis procedure, information sources, optimization-simulation approach, safety of navigation, poorly equipped areas of the NSR.*

### **For citation:**

Menshikov, Vyacheslav I., Sergey Yu. Razvozov, and Aleksandr N. Anisimov. “Procedure for synthesizing sources of safety information in the coastal areas of the Northern Sea Route eastern part.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 176–183. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-176-183.

**УДК 656.61.052**

## ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ ПО БЕЗОПАСНОСТИ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

**В. И. Меньшиков<sup>1</sup>, С. Ю. Развозов<sup>2</sup>, А. Н. Анисимов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — ФГБОУ ВО «Мурманский государственный технический университет»,  
г. Мурманск, Российская Федерация

<sup>2</sup> — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup> — ФГУП «Гидрографическое предприятие», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Приведено обоснование необходимости внедрения в недостаточно оборудованных в навигационном плане районах Северного морского пути системы НАВТЕКС, обеспечивающей суда информацией по безопасности плавания, привязанной непосредственно к району плавания судна, что позволяет повы-*

сить безопасность и эффективность морских перевозок в прибрежных районах Северного Ледовитого океана. Рассматривается задача синтеза источников информации по безопасности (система НАВТЕКС) для слабо оборудованных в навигационном плане районов Северного Ледовитого океана, прилегающих к Северному морскому пути. В качестве критерия оценки качества синтеза выбран суммарный дисбаланс встречных информационных потоков от станций НАВТЕКС, поскольку он может являться основной причиной избытка навигационной информации, необходимой в процессе принятия решений по обеспечению безопасности мореплавания. Предлагается процедура решения данной задачи на основе оптимизационно-имитационного подхода к синтезу крупномасштабных систем, в которой при формализации рекомендовано использовать ограничения двух видов: аналитические ограничения, предоставляемые в виде требований к параметрам синтезируемой системы НАВТЕКС, и алгоритмические ограничения, отражающие требования к функциональным параметрам системы НАВТЕКС (как правило, сложность этих параметров не позволяет выразить их аналитически). Представлен графический вариант модели процедуры синтеза системы источников навигационной информации, которая включает решение двух конкретных задач: во-первых, задачи поиска разбиения множества станций на конкретные зоны обслуживания с минимизацией целевой функции при заданных ограничениях и, во-вторых, задачи оценки суммарной информационной деятельности по приему, обработке и трансляции информации по безопасности в зоне конкретной станции при передаче сигналов с соседней станции.

*Ключевые слова:* процедура синтеза, источники информации, оптимизационно-имитационный подход, безопасность мореплавания, слабо оборудованные районы СМП.

**Для цитирования:**

Меньшиков В. И. Процедура синтеза источников информации по безопасности в прибрежных районах восточной части Северного морского пути / В. И. Меньшиков, С. Ю. Развозов, А. Н. Анисимов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 176–183. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-176-183.

### **Введение (Introduction)**

Развитие морской деятельности в Российской Федерации представляет приоритетную задачу в области реализации многих экономических проектов в Арктике. «Государственная программа развития судостроения на 2013–2030 гг.» подтверждает применение СМП в качестве международной транзитной магистрали как одного из направлений государственной политики. Успех практического внедрения этих направлений напрямую связан, во-первых, с разработкой новых технологий, разработкой и созданием современных проектов морских транспортных, специальных судов и ледоколов, конструктивно соответствующих требованиям безопасного их использования на акватории Арктического бассейна, и, во-вторых, с реализацией задач оборудования СМП устройствами, обеспечивающими мореплавателей надежной и достоверной информацией по обеспечению безопасности (система НАВТЕКС) для недостаточно оборудованных в навигационном плане районов СМП [1].

Текст Международного кодекса для судов, эксплуатируемых в полярных водах [2] (далее — Полярный кодекс), был принят в 2014 г. и затем в виде новой гл. XIV «Меры безопасности для судов, эксплуатирующихся в полярных водах» введен в Международный кодекс СОЛАС-74 в январе 2017 г. Полярный кодекс ставит задачи по разработке национальных норм и правил, обеспечивающих и регламентирующих безопасное ледовое плавание судов на СМП. Обзор навигационных аварий и инцидентов с судами [3] при плавании во льдах показывает, что наблюдаемый уровень аварийности в основном обусловлен ошибками судовождения (38,7 %) и недостатками в организации ледового плавания судов. Отмечается недостаточная компетентность судоводителей в оценке складывающейся ледовой обстановки и технических возможностей своего суда.

Нестандартные навигационные ситуации в процессе ледового плавания судов по СМП можно предотвратить, обеспечивая безопасность судоходства современными надежными средствами навигации. Считается, что полностью избежать ледовых инцидентов невозможно [4], однако уменьшить их появление можно при условии владения особыми приемами управления судном во льдах капитаном и его помощниками. Судоводительский опыт ледового плавания наработан в течение длительного периода времени безаварийной работы, и сегодня капитаны вынуждены компенсировать своим профессиональным мастерством как недостаток плавучих и береговых СНО, невозможность получения информации по безопасности мореплавания, так и отсутствие данных

маневренных элементов судна при плавании во льдах. В работах [5]–[8] исследованы проблемы СМП и пути их решения.

Находящееся в структуре Госкорпорации по атомной энергии «Росатом» ФГУП «Гидрографическое предприятие» в процессе своей деятельности выполняет сбор, анализ и передачу информации по безопасности мореплавания в арктических морских районах НАВАРЕА XX и НАВАРЕА XXI, однако оперативное научно-техническое обслуживание района не соответствует надлежащему уровню.

Развитие навигационно-гидрографического обеспечения СМП может быть достигнуто только созданием системы НАВТЕКС для недостаточно оборудованных в навигационном плане районов Северного Ледовитого океана. Внедрение в этих районах системы НАВТЕКС должно дать возможность получать на судах, идущих по СМП, информацию по безопасности, привязанную непосредственно к району плавания судна. Это позволит значительно повысить как безопасность, так и эффективность морских перевозок особенно в малоизученных прибрежных районах Северного Ледовитого океана [9].

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Создание единой информационной системы станций НАВТЕКС в недостаточной степени навигационно-оборудованных районах СМП предусматривает последовательное решение двух видов задач:

- поиск разбиения множества информационно-образующих и информационно-поглощающих элементов на зоны принадлежности к СМП, минимизирующих суммарный дисбаланс информационных потоков между станциями в передаче информации по безопасности;
- определение мест размещения станций НАВТЕКС, минимизирующих объем информационной деятельности коммуникационной системы.

В качестве критерия оптимизации задачи был выбран суммарный дисбаланс встречных информационных потоков от станций НАВТЕКС, так как он может являться основной причиной информационного избытка навигационных данных, необходимых для принятия решений по обеспечению безопасности мореплавания в недостаточно оборудованных районах Северного Ледовитого океана по трассе СМП [10].

Пусть далее  $R = \{E_j / j = 1, 2^n\}$  — семейство всех подмножеств  $E_j$  множества станций НАВТЕКС в рассматриваемом регионе СМП:

$$E^n = \{1, 2, \dots, i, n\},$$

где  $n$  — количество станций в этом регионе.

Для определения  $k$ -го разбиения множества  $E^n$  используем множество индексов  $J_k$  подмножеств  $E_j$ , составляющих  $k$ -разбиение  $E^n$ , причем  $J_k$  является таким множеством индексов  $E_j$ , которое должно отвечать условиям вида:

$$\cup_{j \in J_k} E_j = E^n; E_j \cap E_{j'} = \emptyset \forall j, j' \in J_k.$$

Тогда  $k$ -разбиением множества  $E^n$  будет являться подмножество  $P_k (P_k \subseteq P)$ :

$$P_k = \{E_j / j \in J_k\}.$$

В качестве величины, способной охарактеризовать дисбаланс от встречных информационных потоков зоны обслуживания  $j$ -й станции, можно принять значение

$$\alpha_j = \left| \sum_{i \in E} \sum_{i' \in E} (\alpha_{ii'} - \alpha_{i'i}) \right|, \quad (1)$$

где  $\alpha_{ii'}$  — информационный поток от станции  $i$  к станции  $i'$ .

Суммарный дисбаланс между станциями НАВТЕКС для  $k$ -го варианта разбиения можно определить следующим образом:

$$Z = \sum \alpha_j x_j, \quad (2)$$

если

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{если } j \in J_k; \\ 0, & \text{если } j \notin J_k, \end{cases}$$

где  $J$  — множество индексов из подмножества  $E_j$ , которые могут быть включены в зоны обслуживания станциями НАВТЕКС.

При формализации задачи синтеза системы станций НАВТЕКС должны использоваться ограничения, которые следует разделить на следующие два типа:

– *аналитические ограничения*, представляемые в виде требований к параметрам системы НАВТЕКС;

– *алгоритмические ограничения*, отражающие требования к функциональным параметрам системы НАВТЕКС (как правило, сложность этих параметров не позволяет выразить их аналитически).

При решении поставленной задачи синтеза цепи станций НАВТЕКС в первую очередь, необходимо учитывать следующие требования, предъявляемые к аналитическим ограничениям:

1. Выполнение условий непересекаемости подмножеств в разбиении и полноты покрытия подмножествами разбиения всего множества пунктов в рассматриваемом районе СМП

$$\sum_{j \in J} t_{ij} x_j = 1, \quad i \in E^n, \quad (3)$$

где  $t_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i \in \hat{I}E_j; \\ 0, & \text{если } i \notin \hat{I}E_j. \end{cases}$

2. Ограничение количества зон обслуживания станциями НАВТЕКС:

$$Q_{\min}^T \leq \sum_{j \in J} x_j \leq Q_{\max}^T, \quad (4)$$

где  $Q_{\min}^T, Q_{\max}^T$  — соответственно минимально и максимально допустимое количество зон в системе в недостаточно оборудованном в навигационном отношении районе СМП.

3. Ограничение количества станций, осуществляющих передачу информации по безопасности в каждой зоне, где это возможно:

$$\sum_{i \in E} b_i t_{ij} x_j \geq 1, \quad j \in J, \quad (5)$$

где  $b_i = \begin{cases} 1, & \text{если в } i\text{-й зоне возможна установка станции НАВТЕКС;} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$

4. Ограничение количества станций в  $j$ -й зоне обслуживания движения судов по трассе СМП:

$$Q_{\min}^A \leq \sum_{i \in E} t_{ij} \leq Q_{\max}^A, \quad j \in J, \quad (6)$$

где  $Q_{\min}^A$  и  $Q_{\max}^A$  — соответственно минимально и максимально допустимые количества станций НАВТЕКС в обслуживаемой зоне.

5. Соблюдение допустимых расстояний между станциями в  $j$ -й зоне:

$$d_{ii'} t_{ij} \leq L^A, \quad \forall i, i' \in E^n, \quad j \in J, \quad (7)$$

где  $L^A$  — допустимое расстояние между станциями в зоне обслуживания;  $d_{ii'}$  — расстояние между станциями  $i$  и  $i'$ .

6. Соблюдение дальности действия между  $j$ -й станцией и станциями  $j$ -й зоны:

$$d_{ii'} t_{ij} \leq L_T^A \forall i' : b_{i'} = 1, \quad j \in J, \quad i \in E^n, \quad (8)$$

где  $L_T^A$  — допустимое расстояние между  $j$ -й станцией и станциями  $j$ -й зоны обслуживания.

7. Соблюдение допустимой величины суммарного информационного потока, получаемого и излучаемого на  $j$ -й станции:

$$\sum_{i \in E} \sum_{i' \in E} (\alpha_{ii'} + \alpha_{i'i}) t_{ij} (1 - t_{ij}) \leq \langle W_j \rangle, j \in J, \quad (9)$$

где  $\langle W_j \rangle$  — мощность излучения  $j$ -й станции, определяемая мощностью сигнала за период  $\tau_j$ .

Кроме того, при решении поставленной задачи должны дополнительно учитываться следующие алгоритмические ограничения:

– величины коэффициента использования информационного потока:

$$K_{\text{гр}}(P_k, N_A A^{\Gamma} D, n_j^{\text{пр.м}}) \geq K_{\text{гр}}^{\text{н}}; \quad (10)$$

– величины коэффициента прохождения сообщений:

$$K_{\text{пр}}(P_k, N_A A^{\Gamma} D, n_j^{\text{пр.м}}) \geq K_{\text{пр}}^{\text{н}}; \quad (11)$$

– времени поступления сообщений в судовую аппаратуру (судовой приемник НАВТЕКС):

$$T_{\text{т}}(P_k, N_A A^{\Gamma} D, n_j^{\text{пр.м}}) \leq T^{\text{н}}, \forall m \in M; \quad (12)$$

– величины временной задержки сигналов на станциях:

$$\tau_{\text{т}j}(P_k, N_A A^{\Gamma} D, n_j^{\text{пр.м}}) \leq \tau^{\text{н}}, \forall m \in M; \quad (13)$$

– средней скорости прохождения сигналов по радиотрассам:

$$V_{\text{тех}}(P_k, N_A A^{\Gamma} D, n_j^{\text{пр.м}}) \geq V_{\text{тех}}^{\text{н}}, \quad (14)$$

где  $K_{\text{гр}}$  и  $K_{\text{гр}}^{\text{н}}$  — соответственно фактический и нормативный коэффициенты использования информационного потока;  $K_{\text{пр}}$  и  $K_{\text{пр}}^{\text{н}}$  — соответственно фактический и требуемый коэффициенты передачи сообщений по безопасности;  $T_{\text{т}}$  и  $T^{\text{н}}$  — соответственно фактический срок доставки  $n$ -го сообщения и требуемый срок доставки сообщения в судовую спутниковую аппаратуру (СНА);  $M$  — множество индексов сообщений;  $V_{\text{тех}}$  и  $V_{\text{тех}}^{\text{н}}$  — соответственно фактическая и требуемая средняя скорость прохождения сигналов;  $\tau_{\text{т}j}$  — фактическая инерционность станции прослеживания  $t$ -сообщения на  $j$ -й станции;  $\tau^{\text{н}}$  — нормативная инерционность станции;  $N_A$  — множество характеристик навигационного сообщения (количество параметров и распределение их по сообщениям);  $A^{\Gamma}$  — матрица информационных потоков в регионе,  $A^{\Gamma} = |\alpha_{ii'}|$ ;  $D$  — матрица расстояний между станциями в регионе по трассе СМП;  $D = |d_{ii'}|$ ;  $N_j^{\text{пр}}$  — количество сообщений, обрабатываемых и транслируемых  $j$ -й станцией.

Таким образом, первая задача, состоящая в поиске разбиения множества станций на конкретные зоны обслуживания, заключается в минимизации целевой функции (2) при ограничениях (3)–(14). В то же время для формализации второй задачи необходимо ввести понятие *суммарной информационной деятельности* по приему, обработке и трансляции информации по безопасности в зоне  $j$ -й станции при передаче сигналов с  $n$ -й станции.

## Результаты (Results)

Для формализации второй задачи определения мест размещения станций НАВТЕКС, минимизирующих объем информационной деятельности коммуникационной системы, необходимо использовать понятие суммарной информационной работы по приему информации и ее трансляции в зоне  $j$ -й станции при размещении данной информации на  $i$ -й станции. Эту суммарную информационную работу определим в виде

$$\beta_{ij} = \sum_{i^* \in E} \sum_{i' \in E} (\alpha_{i^*i'} + \alpha_{i'i^*}) d_{ii'} t_{i'j} (1 - t_{i^*j}), j \in J, i : b_i = 1. \quad (15)$$

Тогда вторую задачу можно сформулировать следующим образом:

$$\sum_k \sum_j^{j^* \in J} \beta_{ij} y_{ij} \rightarrow \min, \quad (16)$$

где  $y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если в } i\text{-й зоне размещается } j\text{-я станция НАВТЕКС;} \\ 0, & \text{если в } i\text{-й зоне не размещается } j\text{-я станция НАВТЕКС.} \end{cases}$

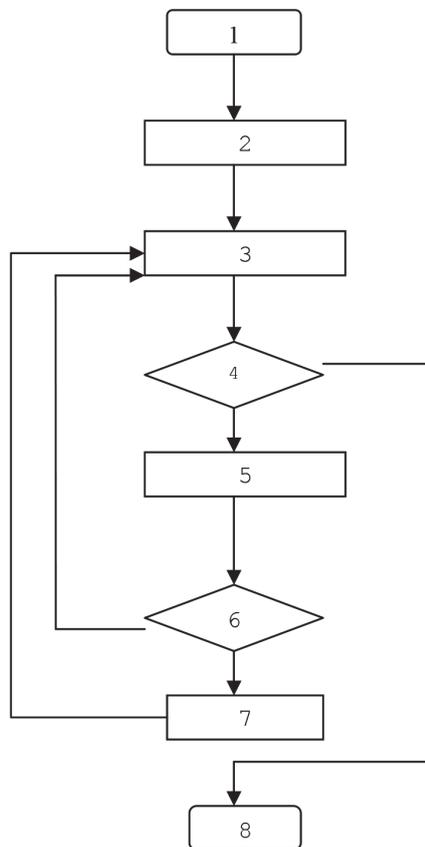
В данном случае при ограничениях количества станций в каждой зоне:

$$\sum_i^{i:b=1} y_{ij} = 1, j \in J_k, \quad (17)$$

и ограничении расстояния между ними в этой же зоне:

$$L_{\min} \leq d_{i'i} y_{ij} y_{i'j'} \leq L_{\max}, \text{ где } i \in E_j, i' \in E_j, j, j' \in J_k, \quad (18)$$

формализованные постановки первой и второй задачи ограничения (4)–(8) и (18) отражают требования в соответствии с техническим заданием к процедуре синтеза системы НАВТЕКС в недостаточно оборудованных в навигационном плане районах СМП (рисунок). Данные требования связаны как с ограничениями, установленными для капитальных вложений, используемых для создания самих станций, так и с ограничениями, связанными с количеством судов, принимающих информацию от станции, и с дальностью действия этих станций.



Блок-схема процедуры синтеза станций НАВТЕКС  
 в единую информационную систему  
 для недостаточно оборудованных районов СМП

Процедура синтеза станций НАВТЕКС в единую систему для недостаточно оборудованных районов СМП может быть представлена блок-схемой процедуры в виде восьми последовательных этапов:

- этап 1 — ввод исходных данных;
- этап 2 — генерация семейства станций НАВТЕКС в недостаточно оборудованных зонах обслуживания СМП;
- этап 3 — определение с помощью оптимизационного алгоритма варианта системы, отвечающей вводимым аналитическим ограничениям;

этап 4 — проверка, получения допустимого варианта структуры со значением критерия не хуже рекорда;

этап 5 — проведение машинного эксперимента с имитационной моделью системы для полученного варианта структуры;

этап 6 — проверка допустимости варианта структуры формально заданным ограничениям;

этап 7 — запоминание варианта структуры системы, из вариации рекордов;

этап 8 — вывод полученных данных.

### **Заключение (Conclusion)**

При синтезе структуры станций НАВТЕКС в процессе передачи информации по безопасности на суда в недостаточно оборудованных в навигационном плане районах Северного Ледовитого океана, кроме указанных ограничений, которые должны быть представлены в виде аналитических функций от системных характеристик и элементов самой структуры, должны быть заданы дополнительные ограничения, являющиеся сложными функциями характеристик синтезируемой информационной системы НАВТЕКС, представленными в формализованном виде. Данные ограничения должны отражать существенные динамические аспекты функционирования синтезируемой системы НАВТЕКС и ее отдельных элементов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Лысенко Ю. Н.* Метод обеспечения безопасности плавания судов на основе оценки функционального состояния судоводителя / Ю. Н. Лысенко, А. И. Соколов, И. А. Соколова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1003–1010. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1003-1010.

2. *Афонин А. Б.* Концепция развития судоходных трасс акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.

3. *Лобанов В. А.* Ледовые качества и ледовая аварийность флота внутреннего и смешанного плавания / В. А. Лобанов // Науковедение: интернет-журнал. — 2013. — № 4 (17). — С. 69.

4. *Апполонов Е. М.* Безопасность эксплуатации крупнотоннажных судов в арктической транспортной системе / Е. М. Апполонов, К. Е. Сазонов, О. Я. Тимофеев // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. — 2010. — № 1 (80). — С. 149–153.

5. *Андреева Е. В.* Учет влияния гидрографической изученности на безопасность плавания крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, К. Я. Исаулова, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 856–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.

6. *Андреева Е. В.* Обоснование выбора количественных показателей зон маневрирования в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 951–959. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-951-959.

7. *Ольховик Е. О.* Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.

8. *Афонин А. Б.* Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.

9. *Ершов А. А.* Теоретические основы и методы решения приоритетных проблем безопасности мореплавания: автореф. дис... д-ра техн. наук / А. А. Ершов. — СПб., 2000. — 44 с.

10. *Хенли Э. Дж.* Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. — М.: Машиностроение, 1984. — 528 с.

## REFERENCES

1. Lisenko, Uriy N., Andrei I. Sokolov, and Irina A. Sokolova. "Assessment of the functional states of biological objects by the gas-discharge visualization method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1003–1010. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1003-1010.
2. Afonin, Andrej B., and Aleksandr L. Tezikov. "The concept of development of shipping routes along the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
3. Lobanov, Vasily Alekseevich. "Ice performances and ice accidents fleet inland and river-sea navigation." *Internet-zhurnal Naukovedenie* 4(17) (2013): 69.
4. Appolonov, E., K. Sazonov, and O. Timofeev. "Safety of exploitation large deadweight vessels in arctic transport system." *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva* 1(80) (2010): 149–153.
5. Andreeva, Ekaterina V., Kristina Y. Esaulova, and Aleksandr L. Tezikov. "Accounting the impact of hydrographic studies on the safety of navigation of large-tonnage vessels in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 856–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
6. Andreeva, Ekaterina V., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezikov. "The rationale for the selection of quantitative indicators zones of maneuvering in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 951–959. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-951-959.
7. Ol'khovik, Evgeniy O. "Research of the density of transports flows on the Northern Sea Route in 2018 year." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
8. Afonin, Andrej B. "A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
9. Ershov, A. A. *Teoreticheskie osnovy i metody resheniya prioritnykh problem bezopasnosti moreplavaniya*. Abstract of Dr. diss. SPb., 2000.
10. Henley, E. J., and H. Kumamoto. *Reliability engineering and risk assessment*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1981.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Меньшиков Вячеслав Иванович** —  
 доктор технических наук, профессор  
 ФГБОУ ВО «Мурманский государственный  
 технический университет»  
 183001, Российская Федерация, г. Мурманск,  
 ул. Спортивная, 13  
 e-mail: [kseniamgtu@rambler.ru](mailto:kseniamgtu@rambler.ru)  
**Развозов Сергей Юрьевич** —  
 доктор технических наук, профессор  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: [razvozov.su@mail.ru](mailto:razvozov.su@mail.ru), [RazvozovSJ@gumrf.ru](mailto:RazvozovSJ@gumrf.ru)  
**Анисимов Александр Николаевич** —  
 кандидат технических наук, капитан  
 ФГУП «Гидрографическое предприятие»  
 190031, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 Московский пр., 12  
 e-mail: [anisimov.54@inbox.ru](mailto:anisimov.54@inbox.ru)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Menshikov, Vyacheslav I.** —  
 Dr. of Technical Sciences, professor  
 Murmansk State Technical University,  
 13 Sportivnaya Str., Murmansk, 183001,  
 Russian Federation  
 e-mail: [kseniamgtu@rambler.ru](mailto:kseniamgtu@rambler.ru)  
**Razvozov, Sergey Yu.** —  
 Dr. of Technical Sciences, professor  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [razvozov.su@mail.ru](mailto:razvozov.su@mail.ru),  
[RazvozovSJ@gumrf.ru](mailto:RazvozovSJ@gumrf.ru)  
**Anisimov, Aleksandr N.** —  
 PhD, captain  
 FSUE "Hydrographic Enterprise"  
 12 Moskovsky Ave., St. Petersburg, 190031,  
 Russian Federation  
 e-mail: [anisimov.54@inbox.ru](mailto:anisimov.54@inbox.ru)

Статья поступила в редакцию 25 января 2021 г.  
 Received: January 25, 2021.

## STATISTICAL ROBUSTNESS SUPPORT OF RETROSPECTIVE SHIPS USE RESEARCH BASED ON THE GEOCHRONOLOGICAL TRACKING

**Y. A. Ivakin<sup>1,2</sup>, S. N. Potapichev<sup>1,2</sup>, A. E. Pelevin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — Concern OCEANPRIBOR, JSC, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> — State Research Center of the Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC,  
St. Petersburg, Russian Federation

*Geochronological tracking has been accorded wide recognition as an appropriate scientific and methodological toolkit and an effective information technology for retrospective research in the interests of substantiating and rationalizing transport route networks, transportation logistics, analyzing the facts of population migration and movements of individual historical figures. Dispatching for geospatial processes of maritime transport with implementation of geochronological tracking tools is tightly related with completion of more developed model of data processing in the automated vessel traffic control system. Geochronological tracking is an effective information technology for digital cartographic spatial data sets processing. Software component of geochronological tracking is becoming one of the most popular GIS-integrated applications. A procedure based on the geochronological tracking for statistical verification of research hypotheses about robust trends in the development of various spatiotemporal processes has been developed. The reliability and validity of accepting a particular hypothesis within the framework of a retrospective study is determined by the representativeness of the initial dataset on geographic movements, considered as a sample from the general population. The statistical significance (robustness) of the retrospective study results based on the geochronological tracking depends on the sufficiency of the considered initial data on the movements of the objects under study. The analysis of this dependence and the development of an algorithm for assessing the specified robustness (or significance) are considered in the paper. The paper is dedicated to the thorough consideration of this feature.*

*Keywords: Geographic information systems, GIS-technologies for historic research, geochronological track and tracking, graphs isomorphism, optimal algorithm, refinement of algorithm, GIS-based interdisciplinary research, statistical inference robustness.*

### For citation:

Ivakin, Yan A., Sergei N. Potapichev, and Alexander E. Pelevin. "Statistical robustness support of retrospective ships use research based on the geochronological tracking." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 184–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-184-196.

УДК 681.1.003

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУДОВ НА ОСНОВЕ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО ТРЕКИНГА

**Я. А. Ивакин<sup>1,2</sup>, С. Н. Потапычев<sup>1,2</sup>, А. Е. Пелевин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> — АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР», Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup> — ГНИЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Предметом исследования в работе является геохронологический трекинг, получивший широкое признание как соответствующий научно-методический инструментальный и эффективная информационная технология ретроспективных исследований использования судов в интересах обоснования и рационализации маршрутных сетей водного транспорта, логистики перевозок, а также анализа фактов переме-*

щений отдельных объектов. Отмечается, что в настоящее время процедура геохронологического трекинга используется для анализа логистики современных транспортно-поставочных сетей, оптимизации транспортных потоков, систем диспетчеризации водного и других видов транспорта. Ретроспективные исследования процессов использования судов и других динамических объектов водного транспорта являются основой для обоснованного выстраивания соответствующих маршрутных сетей и логистики перевозок, а также одним из наиболее популярных пользовательских приложений в интегрируемых пакетах прикладных программ геоинформационных систем становятся программные средства геохронотрекинга. На базе геохронотрекинга разработана процедура статистической проверки исследовательских гипотез об устойчивых тенденциях в развитии различных пространственно-временных процессов. Отмечается надежность и достоверность принятия той или иной гипотезы в рамках ретроспективного исследования, определяемая представительностью (репрезентативностью) объема исходных данных о географических перемещениях, рассматриваемых как выборка из генеральной совокупности. При этом статистическая значимость (устойчивость) результатов ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга зависит от достаточности учтенных исходных данных о перемещениях исследуемых объектов. В работе выполнен анализ указанной зависимости и выработан алгоритм оценки указанной устойчивости (значимости), а также определены основные параметры и условия оптимальности рассматриваемого алгоритма, учтены результаты последних разработок по тематике геохронологического трекинга.

*Ключевые слова:* географические информационные системы, ГИС-технологии для ретроспективных исследований, геохронологический трек и трекинг, изоморфизм графов, рациональный алгоритм, междисциплинарные исследования, база ГИС, статистическая устойчивость выводов.

**Для цитирования:**

Ивакин Я. А. Обеспечение статистической устойчивости ретроспективных исследований использования судов на основе геохронологического трекинга / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев, А. Е. Пелевин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 184–196. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-184-196.

### **Введение (Introduction)**

Ретроспективный статистически-значимый анализ перемещений судов в географическом пространстве является базой для принятия решений по организации различных пространственно-временных систем. Геохронологический трекинг получил широкое признание как соответствующий научно-методический инструментарий и эффективная информационная технология ретроспективных исследований использования судов в интересах обоснования и рационализации маршрутных сетей водного транспорта, логистики перевозок, анализа фактов перемещений отдельных специализированных объектов и др. Основные принципы, процедуры и алгоритмы геохронологического трекинга описаны в работах [1]–[5]. Его математическая сущность сводится к поиску и оценке статистической значимости изоморфизма соответствующих графов. В частности, итоговый граф геохронотрекинга представляется как граф-базис, в структуре которого выявляется подграф, изоморфный заданному, т. е. устанавливается наличие взаимно однозначного отображения одного графа на подграф другого, при котором сохраняется отношение инцидентности [3]. Граф, на изоморфность к которому в составе базового графа геохронологического трекинга определяется подграф, топологически описывает ту или иную определенную гипотезу исследования об устойчивой особенности в перемещениях исторических личностей, объектов или других сущностей в географическом пространстве. Далее определяется степень устойчивости в признании гипотезы исследования о выявляемой особенности в перемещениях судна (класса судов) с использованием статистического аппарата доверительной вероятности и доверительных интервалов [4].

Вместе с тем надежность и достоверность принятия той или иной гипотезы в рамках ретроспективного исследования определяется представительностью (репрезентативностью) объема исходных данных о географических перемещениях, рассматриваемых как выборка из генеральной совокупности. Статистическая значимость (устойчивость) результатов ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга зависит от достаточности учтенных исходных данных о перемещениях исследуемых объектов. Иными словами, для принятия исследовательских гипотез ретроспективного исследования на базе геохронотрекинга с заданной доверительной вероятностью должно быть обеспечено необходимое и достаточное (релевантное) число учтенных

единичных геопространственных перемещений, рассматриваемых как единичные статистические испытания. Обоснованная выработка математико-статистического аппарата и методики увязывания доверительной вероятности принятия гипотез исследований на базе геохронотрекинга с исходным числом учитываемых перемещений составляет предмет обеспечения статистической устойчивости (значимости) выводов данных исследований.

Разработка и обоснование математико-статистического аппарата и методики определения необходимого и достаточного (релевантного) числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к итоговым результатам осуществляются при помощи последовательной реализации следующих логических шагов:

1. Теоретическая разработка и адаптация к условиям исследования математико-статистических основ определения необходимых и достаточных объемов выборки из генеральной совокупности данных о единичных перемещениях в географическом пространстве для обеспечения заданного значения доверительной вероятности получаемых выводов проводимого ретроспективного исследования.

2. Интерпретация выделенного математико-статистического аппарата как аппарата обеспечения требуемого уровня надежности получаемых выводов проводимого ретроспективного исследования применительно к подходам и моделям геохронотрекинга.

3. Конкретизация и описательное представление алгоритма расчета релевантного числа учитываемых перемещений объектов — единичных испытаний в ходе ретроспективных исследований методом геохронотрекинга для обеспечения приемлемого уровня рисков в процессе принятия итоговых решений.

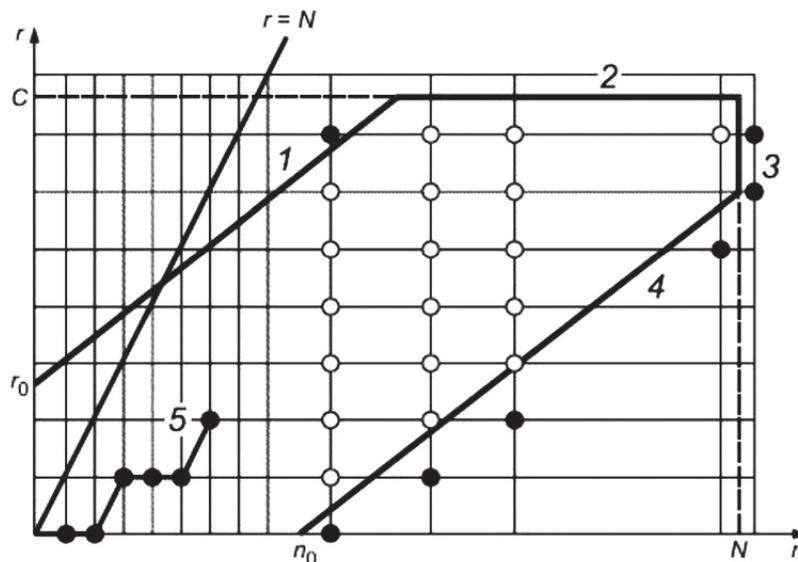
Детализация указанных шагов позволяет раскрыть суть методики определения необходимого и достаточного числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на основе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к результатам и выводам исследования в целом.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

В рамках постановки ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга в работах [4], [5] в качестве генеральной совокупности данных рассматривается теоретическое число выборочных значений учитываемых перемещений рассматриваемых объектов, обеспечивающее доверительную вероятность принятия решений о выводе частного исследования, равное единице. Очевидно, что размер генеральной совокупности при данной постановке теоретически неограничен, однако на практике объем данных, положенных в основу геохронотрека, всегда конечен и ограничен. Тогда частная задача определения релевантного, т. е. необходимого и достаточного, объема выборки из генеральной совокупности данных о перемещениях в географическом пространстве в течение определенного промежутка времени для обеспечения заданного уровня доверия к выводам исследования сводится к математическому увязыванию значения доверительной вероятности правильного вывода в оценке исследуемого параметра с таким числом единичных испытаний, которое обеспечивает построение требуемого доверительного интервала в разбросе искомого параметра. В своей информационно-логической сущности данная задача детально рассмотрена и теоретически решена в работах, посвященных информационным технологиям компьютерного моделирования, трудах по теории вероятности и прикладной статистике, например, таких как [6]–[10].

Суть теоретического решения данной задачи заключается в построении (оценке) доверительного интервала исследуемого параметра, обусловленного заранее заданной доверительной вероятностью, как некоторого двумерного функционала, определяемого разницей между теоретическим значением искомого параметра и выборочным значением накопленной статистики его оценок. В работах [7], [8], [10] решение указанной частной математической задачи сведено к построению конкретизированных эллипсов рассеивания выборочных значений исследуемых параметров применительно к назначаемым величинам доверительной вероятности.

Очевидно, что в условиях гехронологического трекинга, т. е. дискретного прироста объема значений данных по итогам разовых испытаний, а также объективной ограниченности генеральной совокупности, в силу конечности учитываемых данных о географических перемещениях анализируемых объектов, сводная теоретическая картина решения указанной частной математической задачи может быть преобразована к дискретному варианту представления. В частности, отношение числа  $r$  выбросов в экспериментально полученных значениях параметра вне обоснованного эллипса среднеквадратического отклонения к общему числу единичных испытаний (наблюдений) эксперимента  $N$  в рамках эксперимента позволяет формализовать решение указанной частной задачи (для дискретного варианта) в виде, приведенном на рисунке. Так, фигура, ограниченная линиями 1–2–3–4, является дискретной интерпретацией эллипса среднеквадратического отклонения, определяемого доверительным интервалом и интервалом допуска, соответствующими задаваемой доверительной вероятности правильного принятия решения в ретроспективном исследовании на базе геохронотрекинга. Соответственно линии 1 и 2 обозначают границы зоны, за которыми регистрируемые экспериментальные значения параметра нельзя считать соответствующими теоретическому значению. Линии 3 и 4 обозначают границы зоны избыточного числа единичных испытаний при обоснованном принятии решения с заданной доверительной вероятностью того, что принимаемые значения параметра геохронотрека следует считать соответствующими теоретическому значению. Линия 5 обозначает дискретный процесс накопительного учета выбросов в экспериментально полученных значениях исследуемого параметра вне обоснованного эллипса среднеквадратического отклонения при геохронотрекинге в зависимости от текущего суммарного числа одиночных испытаний (наблюдений) в ходе исследования. При этом очевидно, что линия дискретного учета выбросов 5 в экспериментально полученных значениях исследуемого параметра не может попадать в область, расположенную на рисунке выше границы  $r = N$ .



Интерпретация наблюдаемых выборочных значений исследуемого параметра при накоплении его статистики в ходе геохронотрекинга

Приведенная графическая интерпретация решения логико-математической задачи определения релевантного объема выборки из генеральной совокупности данных многократных испытаний-перемещений для обеспечения заданного уровня доверия к выводам ретроспективного исследования позволяет рассматривать указанный объем выборки как ключевой показатель обеспечения требуемой надежности выводов проводимого исследования. Т. е. релевантным является такое неизбыточное число единичных испытаний (учитываемых перемещений в географическом пространстве), которое обеспечивает заданную в виде доверительной вероятности надежность результатов проведения ретроспективных исследований. Именно такое понимание задачи определения релевантного объема

выборки из генеральной совокупности данных геохронотрекинга для обеспечения заданного уровня доверия к выводам исследования позволило интерпретировать ее в рамках подходов к определению надежности статистических выводов в рамках эксперимента на базе ГИС.

### Результаты (Results)

В общенаучном смысле надежность выводов исследования — это свойство такого объекта инфосферы, как вновь полученное знание, позволяющее устойчиво и неизменно вырабатывать функционально пригодные и достоверные результаты при заданных начальных данных и входных условиях [11]. Применительно к условиям проведения ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга показателем количественной меры для оценки указанной надежности выступает доверительная вероятность истинности результатов частного испытания (исследования). При этом доверительная вероятность истинности результатов задается априорно и обеспечивается в ходе проведения ретроспективных исследований путем выполнения релевантного (прежде всего достаточного) числа элементарных испытаний.

Описанный в работе вариант рассмотрения статистической сущности проводимого исследования позволил интерпретировать ее в рамках стандартизированного аппарата обеспечения и расчета показателей надежности в технике [12]. Указанный аппарат разработан, апробирован и рекомендован к применению в рамках действующей национальной системы нормативно-технического регулирования и применим к предметной области ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга в ГИС.

Интерпретация математико-статистического аппарата обеспечения требуемого уровня доверительной вероятности к получаемым выводам проводимого исследования на базе геохронотрекинга сводится к определению основных входных и выходных переменных указанного аппарата в категориях проводимого в ходе ГИС-анализа перемещений исследуемых сущностей (объектов), а также заданию общих граничных условий его применения. В частности, объемы испытаний  $N$  (общее число одиночных учитываемых перемещений в составе трека (наблюдений)), установленные в разработанной методике, основаны на предположении о том, что единичные испытания являются статистически независимыми и значение доверительной вероятности истинности получаемых выводов является постоянным.

На основе результатов полного объема испытаний  $N$  по каждой из исследуемых характеристик геохронотрека принимается одно из следующих альтернативных исследовательских решений:

1. Наблюдаемое (регистрируемое) и осредненное по  $N$  единичным актам испытаний значение численного параметра (качественного проявления) геохронотрека принимается истинным с доверительной вероятностью  $P$  (принятие значения как истинного с определенным уровнем доверия).
2. Наблюдаемое (регистрируемое) и осредненное по  $N$  единичным актам испытаний значение численного параметра (качественного проявления) геохронотрека не принимается истинным (отклонение значения как истинного с определенным уровнем доверия).

В рамках геохронотрекинга вторая альтернатива означает необходимость либо снижения априорного уровня требуемой доверительной вероятности правильного принятия исследовательского решения, либо дальнейшего наращивания общего числа  $N$  одиночных испытаний (учитываемых перемещений) для подтверждения надежности принимаемых исследовательских решений. В отдельных случаях необходимо изменение постановки организации ретроспективного исследования.

Применительно к методике определения необходимого и достаточного (релевантного) числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к итоговым результатам приняты следующие обозначения входных и выходных величин переменных используемого научно-методического аппарата:

$P$  — апостериорная, т. е. накопленная в треке доверительная вероятность истинности частного результата ретроспективного исследования, значения численного параметра (качественного проявления) той или иной дуги трека;

$P_\alpha$  — априорный уровень вероятности доверительного принятия значения численного параметра (качественного проявления) той или иной дуги трека;

$P_\beta$  — априорный уровень вероятности доверительного отклонения (несоответствия, непризнания истинности) значения численного параметра той или иной дуги трека;

$Q$  — апостериорное значение вероятности риска некорректного принятия частного результата ретроспективного исследования, значения численного параметра (качественного проявления) дуги геохронотрека;

$Q_\alpha$  — априорное значение вероятности-дополнения до единицы уровня вероятности доверительного принятия значения численного параметра (качественного проявления) той или иной дуги трека:

$$Q_\alpha = 1 - P_\alpha; \quad (1)$$

$Q_\beta$  — априорное значение вероятности дополнений до единицы уровня вероятности доверительного отклонения (несоответствия, непризнания истинности) значения численного параметра той или иной дуги трека:

$$Q_\beta = 1 - P_\beta. \quad (2)$$

Наличие заданных параметров ретроспективного исследования (1) и (2) на базе геохронотрекинга, согласно [13], определяет так называемый *разрешающий коэффициент*  $D$ , равный отношению значений дополнений до единицы уровня вероятности доверительного принятия наблюдаемого значения в исследовании к уровню вероятности отклонения:

$$D = Q_\beta / Q_\alpha = (1 - P_\beta) / (1 - P_\alpha); \quad (3)$$

$N$  — общее (суммарное) число единичных испытаний (объем учитываемых перемещений объектов или артефактов в составе геохронотрека);

$n$  — учитываемое апостериорное число фактов корректной реализации единичных испытаний, т. е. учитываемых перемещений объектов, артефактов и др., и успешного принятия наблюдаемого значения, результата каждого единичного испытания;

$r$  — учитываемое апостериорное число фактов отклонения в силу различных причин наблюдаемого значения, результата каждого единичного испытания из числа учитываемых перемещений объектов, артефактов и др.

При этом очевидно, что в каждый конкретный момент учета данных в составе геохронотрека верно соотношение

$$N = n + r; \quad (4)$$

$c$  — предельное (максимально допустимое, пороговое) суммарное учитываемое число фактов отклонений, в силу различных причин, результата каждого единичного перемещения, учитываемого в процессе ретроспективного исследования;

$\alpha$  — априорное (директивно заданное, исходное для ретроспективного исследования) значение риска некорректного принятия наблюдаемого значения и результата геохронотрекинга;

$\alpha_1$  — апостериорное (фиксируемое в ходе исследования) значение риска некорректного принятия результата геохронотрекинга;

$\beta$  — априорное (директивно заданное, исходное для ретроспективного исследования) значение риска некорректного отклонения при необходимости принятия наблюдаемого значения;

$\beta_1$  — апостериорное (фиксируемое в ходе эксперимента) значение риска некорректного отклонения при необходимости принятия результата геохронотрекинга;

$P_3$  — заданная в нормативных (априорная для всей гаммы исследований) документах требуемая доверительная вероятность обеспечения надежности результатов ретроспективного исследования на базе геохронотрекинга.

Исходными априорными данными для определения релевантного объема испытаний  $N$ , т. е. объема учитываемых перемещений объектов или артефактов в составе геохронотрека, с целью подтверждения вероятностных показателей надежности выводов ретроспективного исследования их составляющих параметров являются:

– значения априорных уровней вероятности доверительных принятия  $P_\alpha$  и отклонения  $P_\beta$  наблюдаемых значений численного параметра (качественного проявления) той или иной дуги геохронотрека, которые определяют собой разрешающий коэффициент  $D$ .

– априорные значения рисков некорректного принятия значений, результатов ретроспективного исследования  $\alpha$  и некорректного отклонения при необходимости принятия значения или качественных результатов указанного исследования  $\beta$ .

В общем случае методика определения необходимого и достаточного (релевантного) числа разовых испытаний (учитываемых перемещений объектов или артефактов) в ходе ретроспективных исследований на базе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к итоговым результатам включает три основных обобщенных этапа:

1-й этап — подготовка и подбор исходных данных для расчета необходимого и достаточного числа единичных испытаний в ходе геохронотрекинга ретроспективного исследования;

2-й этап — расчет и оценка доверительного интервала для принятия наблюдаемого значения, а также результата каждого единичного испытания (перемещения) при назначенных (априорных) значениях риска (или доверительной вероятности);

3-й этап — принятие итогового исследовательского решения по релевантному числу (объему) единичных испытаний.

Последовательное описание каждого из указанных этапов позволяет раскрыть содержание предлагаемой методики в целом.

1-й этап — подготовка и подбор исходных данных для определения объема испытаний — необходимо осуществлять в приведенной последовательности:

1. На основании анализа ранее полученного опыта экспериментирования с аппаратом геохронологического трекинга, а также исходя из объективной ограниченности ресурсов ретроспективных исследований априорно устанавливаются значения вероятности доверительного принятия  $P_\alpha$  и доверительного отклонения (несоответствия, непризнания истинности)  $P_\beta$  наблюдаемого значения параметров анализируемого или синтезируемого геохронотрека.

2. Априорно устанавливаются значения рисков некорректного принятия значения, результата ретроспективного исследования  $\alpha$  и некорректного отклонения при необходимости принятия значения  $\beta$ . Значения указанных уровней  $P_\alpha$  и  $P_\beta$  изначально устанавливаются, исходя из предельных возможностей накопления пространственно-временной информации о перемещениях объектов, учитываемых в процессе геохронотрекинга. Рекомендуется  $P_\alpha$  и  $P_\beta$  устанавливать таким образом, чтобы значение  $P_\beta$  находилось в интервале  $[(P_\beta + P_\alpha) / 2, P_\alpha]$  ближе к априорному уровню  $P_\alpha$  вероятности доверительного принятия наблюдаемого значения параметра (качественного проявления) геохронотрека. Уровни допускаются устанавливать двумя равнозначными способами:  $P_\alpha$  и  $P_\beta$  или  $P_\alpha$  и  $D$ . При втором способе значение разрешающего коэффициента  $D$  рекомендуется выбирать из ряда: 1,5; 1,75; 2,0; 3,0.

3. Значения рисков  $\alpha$  и  $\beta$  устанавливаются следующим образом: значение риска некорректного отклонения при необходимости принятия наблюдаемого значения  $\beta$  устанавливается субъективно, применительно к особенностям реализуемой архитектуры геохронотрека в соответствии с принятыми нормативами или стандартами предметной области будущего применения результатов ретроспективного исследования. Традиционно значение риска некорректного принятия наблюдаемого значения результата испытания  $\alpha$  априорно устанавливаются по субъективному усмотрению, равным  $\beta$  или больше него. В настоящей методике, на основании принципа равной вероятности несмещенных статистических ошибок, принято  $\alpha = \beta$ . На основании этого допущения в табл. 1 и 2 приняты значения  $\alpha = \beta$ . Значения рисков, в соответствии с [14], рекомендуется выбирать из ряда: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3. Согласно [14], не рекомендуется устанавливать исходные данные, сочетающие большие значения разрешающего коэффициента  $D$  с малыми значениями рисков  $\alpha$  и  $\beta$ . Такие исходные данные следует изменять путем уменьшения значения разрешающего коэффициента  $D$  и увеличения значений рисков  $\alpha$  и  $\beta$ . Соответственно рекомендуемые соотношения исходных данных для определения объема испытаний, т. е. объема учитываемых перемещений объектов или артефактов в составе геохронотрека, приведены в табл. 1.

2-й этап — расчет и оценка доверительного интервала для принятия значений и результатов каждого единичного перемещения при назначенных (априорных) значениях риска (или доверительной вероятности) — необходимо осуществлять в указанной далее последовательности:

1. В силу несмещенного характера оценки  $P_\alpha$  относительно значения  $P_3$  в качестве точечной оценки для апостериорной доверительной вероятности истинности частного результата ретроспективного исследования значения параметра (качественного проявления) геохронотрека принимается частота  $P$ , определяемая в виде

$$P = n / N. \quad (5)$$

Таблица 1

**Рекомендуемые соотношения исходных данных для анализа геохронотрека**

№ п/п.	$D$	$P_\alpha$	$\alpha = \beta$
1	1,50–1,75	0,9995	0,05
2		0,9990	0,10
3		0,9950	0,20
4	1,75–2,00	0,99–0,90 с шагом 0,01	0,10
5			0,20
6			0,30
7	2,00–2,50	0,8500	0,20
8			0,30
9	3,00	0,8000	0,20

2. Объем единичных испытаний, т. е. учитываемых перемещений объектов или артефактов в составе геохронотрека  $N$  для подтверждения выводов ретроспективного исследования, является параметром, определяющим размер доверительного интервала  $I$  для вероятности  $P$ , т. е. задача расчета  $N$ , достаточного для подтверждения априорно требуемой надежности оценки истинности частного результата ретроспективного исследования значения численного параметра (качественного проявления) геохронотрека, сводится к типовой математической задаче построения доверительного интервала и оценки надежности некоторой вероятности по частоте события, наблюдаемого в процессе итеративного ретроспективного исследования. Детализированное математическое решение данной задачи приведено в [6], [12], [14].

3. В общем виде при  $N$ -испытаниях доверительный интервал  $I$ , в который с доверительной вероятностью  $1 - \alpha$  (при  $\alpha = \beta$ ) попадают несмещенная оценка истинности частного результата ретроспективного исследования и значение параметра (качественного проявления) геохронологического трека, определяется из сводного соотношения:

$$I = \frac{P + \frac{D}{2N} \pm D \sqrt{P \frac{1-P}{N} + \frac{D^2}{4N^2}}}{1 + \frac{D^2}{N}}. \quad (6)$$

4. Соотношения (5), (6) позволяют в рамках данной частной методики алгоритмически связать общее (суммарное) число единичных перемещений объектов (общий объем единичных испытаний)  $N$  и предельное (максимально допустимое, пороговое) суммарное учитываемое число фактов отклонения в силу различных причин анализируемого значения результата каждого единичного испытания-перемещения, наблюдаемого в процессе геохронотрекинга ( $c$ ), с исходными данными, указанными в табл. 1. Принимая значение уровня вероятности  $P_\alpha$  качественного проявления геохронотрека за априорно соответствующее целям подтверждения уровня требуемой доверительной вероятности обеспечение надежности результатов в комплексном ретроспективном исследовании  $P_3$ , заданное для всей гаммы исследований, определены соотношения ранее указанных значений

испытаний для подтверждения искомых характеристик геохронотрекинга. Некоторые результаты этого определения приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения объема учитываемых перемещений объектов (артефактов) в геохронотреке с обеспечиваемой доверительной вероятностью результатов ретроспективных исследований**

$P_\alpha$	$D$	$\alpha = \beta = 5 \%$		$\alpha = \beta = 10 \%$		$\alpha = \beta = 20 \%$		$\alpha = \beta = 30 \%$	
		$N$	$c$	$N$	$c$	$N$	$c$	$N$	$c$
0,9	1,5	474	58	288	35	134	16	53	6
	1,75	227	30	138	18	64	8	27	3
	2	135	19	86	12	39	5	18	2
	3	41	7	23	4	14	2	8	1
0,85	1,5	294	54	181	33	79	14	35	6
	1,75	141	28	87	17	42	8	18	3
	2	85	18	53	11	21	4	12	2
	3	26	7	16	4	9	2	5	1
0,8	1,5	204	50	127	31	55	13	26	6
	1,75	98	26	61	16	28	7	13	3
	2	60	17	36	10	19	5	9	2
	3	17	6	9	3	4	1	4	1

3-й этап — принятие исследовательского решения по релевантному числу (объему) единичных испытаний (учитываемых перемещений объектов (артефактов) в геохронотреке) — осуществляется при помощи выполнения следующих логических шагов:

1. На основании трактовки смыслового значения дуг геохронотрека и накопительного характера учета единичных перемещений выполняется определение и предметная интерпретация исходных данных для расчета релевантного объема учитываемых перемещений. При этом рекомендуется придерживаться соотношений исходных данных, приведенных в табл. 1.

2. По выбранным параметрам исходных данных осуществляется вход в табл. 2 настоящей методики, на основе которой появляется возможность определить общее (суммарное) число единичных испытаний (объем учитываемых перемещений объектов (артефактов) в геохронотреке)  $N$  и предельное (максимально допустимое (пороговое)) суммарное учитываемое число фактов отклонения (в силу различных причин) результата каждого единичного испытания, наблюдаемых в процессе ретроспективных исследований  $c$ , недостижение которого в процессе реализации всего объема единичных испытаний означает факт принятия первой альтернативы. При этом наблюдаемое и осредненное по  $N$  единичным актам испытаний-перемещений значение параметра (качественного проявления) геохронотрека принимается истинным с доверительной вероятностью  $P$ . Достижение или превышение текущего значения  $c$  над табулированным значением означает факт принятия второго альтернативного исследовательского решения, при котором наблюдаемое и осредненное по  $N$  единичным актам испытаний-перемещений значения параметра (качественного проявления) геохронотрека не принимаются истинными.

3. Для многоэтапных ретроспективных исследований оценка уровня доверия к апостериорным значениям параметров геохронотреков проводится применительно к каждому этапу такого исследования. Далее сводная оцененная доверительная вероятность к результатам многоэтапного ретроспективного исследования, соотносимая с априорной для всей гаммы исследований, т. е. требуемой доверительной вероятностью обеспечения надежности результатов в серии однотипных этапов-испытаний комплексного исследования  $P_3$ , рассчитывается согласно формулам условной и полной вероятностей. Суть задачи указанного расчета детально раскрыта в работах [15], [16].

### Обсуждение (Discussion)

Решение задачи достижения необходимой статистической значимости (устойчивости) результатов ретроспективного исследования использования судов на основе геохронологического

трекинга заключается в обеспечении достаточности учтенных исходных данных о перемещениях исследуемых объектов при построении соответствующего геохронотрека. При решении указанной задачи введена понятная и традиционная мера указанной значимости (устойчивости) результатов ретроспективного исследования в виде доверительной вероятности. Для различных градаций указанной вероятности и уровня риска ее принятия определен объем (релевантное количество) учитываемых перемещений объектов или артефактов в составе геохронотрека, рассматриваемый как суммарное число единичных испытаний, которое должно быть обеспечено при синтезе соответствующего указанного трека. При непревышении выявленного соотношения указанного объема и числа фактов отклонений тех или иных единичных перемещений гипотеза ретроспективного исследования принимается с искомой доверительной вероятностью.

Граничные условия для полученного решения задачи достижения статистической устойчивости результатов ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга определены как границы применимости приложений теории вероятности и математической статистики. Дальнейшие направления совершенствования методики определения необходимого и достаточного (релевантного) числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований на основе геохронотрекинга для обеспечения требуемого уровня доверия к результатам и выводам исследования связаны с ее алгоритмизацией и автоматизацией, интеграцией в состав современных геоинформационных систем, ориентированных на прикладные исследования и решение пространственно-временных аналитических задач в смежных областях [17]–[21].

Таким образом, приведенный вариант методики решения задачи достижения статистической устойчивости результатов ретроспективного исследования на основе геохронологического трекинга позволяет обеспечить и значительно расширить применимость научно-методического аппарата геохронологического трекинга на новые классы приложений. В свою очередь, проведенное исследование позволяет расширить применимость математического аппарата проверки гипотез ретроспективных исследований на основе геохронологического трекинга для различных предметных областей и новых объектов изучения, добиться более эффективной его интеграции в соответствующие программные приложения для геоинформационных систем.

### **Заключение (Conclusion)**

Разработка математико-статистического аппарата и методики определения необходимого и достаточного (релевантного) числа разовых испытаний в ходе ретроспективных исследований использования судов на базе геохронотрекинга позволит развить соответствующий научно-методический инструментарий и соответствующие информационные технологии ретроспективных и исторических геопространственных исследований в интересах развития и оптимизации транспортных сетей, логистики, а также систем поддержки диспетчерских служб. Также очевидна перспективность работ в области развития прикладной алгоритмики геохронотрекинга как такового. К указанным работам следует отнести внедрение и интеграцию соответствующих информационных технологий искусственной интеллектуальности, интеграции и слияния информации, виртуализации и других механизмов в соответствующие геоинформационные приложения.

### **Благодарности (Acknowledgements)**

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19–07–00006).*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Ивакин Я. А.* Рациональный алгоритм проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного транспорта на базе геохронологического трекинга / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев, Р. Я. Ивакин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 448–460. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-448-460.
2. *Ивакин Я. А.* Геохронологический трекинг — специализированный ГИС-инструментарий исторического исследования / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Историческая информатика. Информационные

технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании. — 2016. — № 1–2 (15–16). — С. 3–11.

3. *Ивакин Я. А.* Информационная технология геохронологического трекинга для проверки гипотез ретроспективных исследований использования водного транспорта / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 452–461. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461.

4. *Ивакин Р. Я.* Оптимизированный алгоритм статистической проверки гипотез ретроспективных исследований на основе геохронологического трекинга / Р. Я. Ивакин, Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Труды учебных заведений связи. — 2020. — Т. 6. — № 1. — С. 86–93. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-86-93.

5. *Ивакин Я. А.* Информационная технология исследований особенностей применения изделий гидроакустической техники на основе геохронологического трекинга / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2020. — Т. 8. — № 2. — С. 109–119. DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-2-109-119.

6. *Codescu M.* DO-ROAM: Activity-Oriented Search and Navigation with OpenStreetMap / M. Codescu, G. Horsinka, O. Kutz, T. Mossakowski, R. Rau // International Conference on GeoSpatial Semantics. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. — Pp. 88–107. DOI: 10.1007/978-3-642-20630-6\_6.

7. Sigma Knowledge Engineering Environment [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://sigmakee.sourceforge.net> (дата обращения: 01.01.2020).

8. *Советов Б. Я.* Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — 7-е изд. — М.: ООО «Издательство Юрайт», 2019. — 343 с.

9. *Юсупов Р. М.* Концептуальные и научно-методологические основы информатизации / Р. М. Юсупов, В. П. Заболотский. — СПб.: Наука, 2009. — 541 с.

10. *Советов Б. Я.* Информационные технологии / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский. — 6-е изд., перераб. — М.: ООО «Издательство Юрайт», 2016. — 263 с.

11. *Шмид А. В.* Big Data: Революция в области философии и технологиях принятия корпоративных решений [Электронный ресурс] / А. В. Шмид. — Режим доступа: <http://docplayer.ru/26545900-Big-data-revoluciya-v-oblasti-filosofii-i-tehnologiy-prinyatiya-korporativnyh-resheniy.html> (дата обращения: 19.02.2021).

12. *Хлебенских Л. В.* Автоматизация производства в современном мире / Л. В. Хлебенских, М. А. Зубкова, Т. Ю. Саукова // Молодой ученый. — 2017. — № 16 (150). — С. 308–311.

13. *McConnel S.* Code Complete: A Practical Handdook of Software Construction / S. McConnel. — NewYork: MicrosoftPress, 2004. — 889 p.

14. *Фаулер М.* Рефакторинг: улучшение проекта существующего кода / М. Фаулер [и др.]. — СПб.: Диалектика, 2019. — 448 с.

15. *Макконнелл С.* Совершенный код. Мастер-класс / С. Макконнелл; пер. с англ. — М.: Изд-во «Русская редакция», 2010. — 896 с.

16. *McConnel S.* Software Estimation: Demystifying the Black Art (Developer Best Practices) / S. McConnel. — NewYork, Microsoft Press, 2006. — 610 p.

17. *Шатохин А. В.* Информационно-сопроводительная сеть — новый подход к эксплуатации гидроакустического вооружения / А. В. Шатохин // Национальная оборона. — 2020. — № 1 (28). — С. 81–88.

18. *Коротков А. В.* Государственная политика Российской Федерации в области развития информационного общества / А. В. Коротков, Б. В. Кристальный, И. Н. Курносов. — М.: ООО «Трейн», 2007. — 472 с.

19. *Потапычев С. Н.* Использование геопространственных данных для интеллектуальной поддержки принятия диспетчерских решений / С. Н. Потапычев, Я. А. Ивакин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. — 2018. — № 2. — С. 24–31.

20. *Шатохин А. В.* Координирование сервисных услуг предприятий морского приборостроения / А. В. Шатохин, Ян. А. Ивакин, В. С. Нештенко // Морской сборник. — 2020. — № 11 (2084). — С. 39–47.

21. *Шатохин А. В.* Современный подход к участию предприятий морского приборостроения в поддержании технической готовности гидроакустического вооружения ВМФ / А. В. Шатохин, Я. А. Ивакин // Морская радиоэлектроника. — 2020. — № 2 (72). — С. 2–9.

## REFERENCES

1. Ivakin, Yan A., Sergei N. Potapychiev, and Roman Y. Ivakin. "Optimal algorithm of hypotheses testing at the ship use research based on the geochronological tracking." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.3 (2019): 448–460. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-448-460.
2. Ivakin, Yan A., and Sergey N. Potapichev. "Geochronology tracking — specialized GIS-tool for history researches." *Istoricheskaya informatika. Informatsionnye tekhnologii i matematicheskie metody v istoricheskikh issledovaniyakh i obrazovanii* 1–2 (15–16) (2016): 3–11.
3. Ivakin, Yan A., and Sergei N. Potapichev. "Information technology of geochronological tracking for hypotheses testing in research of ship use." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.2 (2018): 452–461. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-452-461.
4. Ivakin, R. Y., Y. A. Ivakin, and S. N. Potapichev. "Refinement algorithm of hypotheses testing research based on geochronological tracking." *Proceedings of Telecommunication Universities* 6.1 (2020): 86–93. DOI: 10.31854/1813–324X-2020-6-1-86-93.
5. Ivakin, Y., and S. Potapychiev. "Information technology of research of the features of the use of products of hydroacoustic equipment based on geochronological tracking." *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii* 8.2 (2020): 109–119. DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-2-109-119.
6. Codescu, Mihai, Gregor Horsinka, Oliver Kutz, Till Mossakowski, and Rafaela Rau. "DO-ROAM: Activity-oriented search and navigation with OpenStreetMap." *International Conference on GeoSpatial Semantics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. 88–107. DOI: 10.1007/978-3-642-20630-6\_6.
7. Sigma Knowledge Engineering Environment. Web. 1 Jan. 2020 <<http://sigmakee.sourceforge.net>>.
8. Sovetov, B. Ya., and S. A. Yakovlev. *Modelirovanie sistem*. 7<sup>th</sup> ed. M.: Izdatel'stvo Yurait, 2019.
9. Yusupov, R. M., and V. P. Zabolotskii. *Kontseptual'nye i nauchno-metodologicheskie osnovy informatizatsii*. SPb.: Nauka, 2009.
10. Sovetov, B. Ya., and V. V. Tsekhanovskii. *Informatsionnye tekhnologii*. 6<sup>th</sup> ed. M.: Izdatel'stvo Yurait, 2016.
11. Schmid, A. V. Big Data: Revolyutsiya v oblasti filosofii i tekhnologiyakh prinyatiya korporativnykh reshenii. Web. 19 Feb. 2021 <<http://docplayer.ru/26545900-Big-data-revolyuciya-v-oblasti-filosofii-i-tehnologiy-prinyatiya-korporativnyh-resheniy.html>>.
12. Khlebenskikh, L. V., M. A. Zubkova, and T. Yu. Saukova. "Avtomatizatsiya proizvodstva v sovremennom mire." *Molodoi uchenyi* 16(150) (2017): 308–311.
13. McConnell, Steve. *Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction*. New York: Microsoft Press, 2004.
14. Fowler, Martin, Kent Beck, John Brant, William Opdyke, and Don Roberts. *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*. Addison-Wesley Professional, 1999.
15. McConnell, Steve. *Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction*. Second Edition. Microsoft Press, 2004.
16. McConnell, Steve. *Software Estimation: Demystifying the Black Art (Developer Best Practices)*. New York, Microsoft Press, 2006.
17. Shatokhin, A. V. "Informatsionno-soprovoditel'naya set' — novyi podkhod k ekspluatatsii gidroakusticheskogo vooruzheniya." *Natsional'naya oborona* 1(28) (2020): 81–88.
18. Korotkov, A. V., B. V. Kristal'nyi, and I. N. Kurnosov. *Gosudarstvennaya politika Rossiiskoi Federatsii v oblasti razvitiya informatsionnogo obshchestva*. M.: ООО «Трейн», 2007.
19. Potapychiev, S. N., and Ya. A. Ivakin. "Using geophysical data for intelligent support of acceptance of control board decisions." *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series I. Natural and technical science* 2 (2018): 24–31.
20. Shatohin, A., Ya. Ivakin, and V. Neshtenko. "Coordination of sea appliance manufacturing services." *Morskoi sbornik* 11(2084) (2020): 39–47.
21. Shatokhin, A. V., and Ya. A. Ivakin. "A modern approach to the participation of marine instrumentation enterprises in maintaining the technical readiness of the Russian navy's hydroacoustic weapons." *Morskoi sbornik* 2(72) (2020): 2–9.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Ивакин Ян Альбертович** —

доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник  
Санкт-Петербургский Федеральный  
исследовательский Центр Российской академии  
наук (СПб ФИЦ РАН)  
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
14-я линия В. О., 39  
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»  
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
Чкаловский пр., 46  
e-mail: [yan\\_a\\_ivakin@mail.ru](mailto:yan_a_ivakin@mail.ru)

**Потапычев Сергей Николаевич** —

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Санкт-Петербургский Федеральный  
исследовательский Центр Российской академии  
наук (СПб ФИЦ РАН)  
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
14-я линия В. О., 39  
АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР»  
198226, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
Чкаловский пр., д. 46  
e-mail: [potapychev@mail.ru](mailto:potapychev@mail.ru)

**Пелевин Александр Евгеньевич** —

доктор технических наук, профессор,  
начальник сектора  
ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
197046, Российская Федерация,  
г. Санкт-Петербург,  
ул. Малая Посадская, 30  
e-mail: [aepelevin@mail.ru](mailto:aepelevin@mail.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Ivakin, Yan A.** —

Dr. of Technical Sciences, professor,  
leading researcher  
St. Petersburg Federal Research Center  
of the Russian Academy of Sciences  
39 14<sup>th</sup> Line V. O., St. Petersburg, 199178,  
Russian Federation  
Concern OCEANPRIBOR, JSC  
46 Chekalovskiy Ave.,  
St. Petersburg, 198226,  
Russian Federation  
e-mail: [yan\\_a\\_ivakin@mail.ru](mailto:yan_a_ivakin@mail.ru)

**Potapychev, Sergei N.** —

PhD,  
senior researcher  
St. Petersburg Federal Research Center  
of the Russian Academy of Sciences  
39 14<sup>th</sup> Line V. O.,  
St. Petersburg, 199178, Russian Federation  
Concern OCEANPRIBOR, JSC  
46 Chekalovskiy Av.,  
St. Petersburg, 198226,  
Russian Federation  
e-mail: [potapychev@mail.ru](mailto:potapychev@mail.ru)

**Pelevin, Alexander E.** —

Dr. of Technical Sciences, professor,  
head of sector  
State Research Center of the Russian Federation —  
Concern CSRI Elektropribor, JSC  
30 Malaya Posadskaya Str.,  
St. Petersburg, 197046, Russian Federation  
e-mail: [aepelevin@mail.ru](mailto:aepelevin@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 20 февраля 2021 г.*

*Received: February 20, 2021.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-197-206

## STUDY OF ACTUATORS PERFORMANCE OF THE MAIN MITER GATE OF NAVIGABLE LOCKS

**N. M. Ksenofontov, A. V. Saushev, A. A. Temkin**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The maneuvering of the main miter gate of navigable locks by means of electric drives implemented according to the various kinematic schemes is considered. It is noted that the available information about the main characteristics of the exploited drive mechanisms allows you to make the assumption about the values of their set carrying capacity and power on metal structures of the locks gate that are similar in design and perceived loads. The aim of this work is to determine the compliance of the design values of the main parameters of the operated key actuators of the main miter gate with the designed ones using the example of locks with widths of 18–30 m, located on the Volga-Baltic waterway and the Volga-Don shipping channel. The calculated studies are carried out using the classical methods described in the industry technical literature and regulatory documents. Preliminary calculations have shown that for an enlarged calculation, it is sufficient to determine the moment of hydrostatic resistance at the total difference between the pressure and non-pressure sides of the leafs, since the remaining moments of resistance have significantly lower values. The values obtained as a result of the calculation are compared with the established values of the studied characteristics. As a result of the comparative analysis, it is determined that for most of them, the established design carrying capacity and power significantly exceed the calculated values. In some cases, the reserve factor exceeds 1.8. At the same time, the absence of such reserve is established at some facilities, but there is no information about the lack of power at these facilities. In order to prevent such phenomena, it is proposed to develop the common industry requirements for the design of gates electric drives and valves of shipping hydraulic structures, as well as in the development of projects for reconstruction of operated actuators to perform field studies to determine the actually required carrying capacity and power.*

*Keywords: Shipping lock, miter gate, mechanical equipment, electric drive, kinematic scheme, carrying capacity, power, reserve factor.*

**For citation:**

Ksenofontov, Nikolay M., Alexander V. Saushev, and Anton A. Temkin. "Study of actuators performance of the main miter gate of navigable locks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 197–206. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-197-206.

**УДК 621.3, 627, 626.4**

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ОСНОВНЫХ ДВУСТВОРЧАТЫХ ВОРОТ СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ

**Н. М. Ксенофонтов, А. В. Саушев, А. А. Темкин**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Рассмотрено маневрирование створками двухстворчатых ворот судоходных шлюзов, осуществляемое с помощью электроприводов, реализованных по различным кинематическим схемам. Отмечается, что имеющиеся сведения об основных характеристиках эксплуатируемых приводных механизмов позволяют сделать предположение об отличии их установленных значений грузоподъемности и мощности на близких по конструктивному исполнению и воспринимаемым нагрузкам металлоконструкциях ворот судоходных шлюзов. Целью настоящей работы является определение соответствия проектных значений основных параметров эксплуатируемых приводов основных двухстворчатых ворот расчетным на примере судоходных шлюзов с шириной камеры 18–30 м, расположенных на Волго-Балтийском водном пути и Волго-Донском судоходном канале. Расчетные исследования выполнены с помощью классических методов, изложенных в отраслевой технической литературе и нормативных документах. Предварительные расчеты показали, что для укрупненного расчета достаточно определения момента гидростатического*

сопротивления при общем перепаде между напорной и безнапорной сторонами створок, так как остальные моменты сопротивления имеют значительно меньшие значения. Выполнено сравнение значений, полученных в результате расчета, с установленными значениями исследуемых характеристик. В результате сравнительного анализа определено, что для большинства из них установленные проектная грузоподъемность и мощность значительно превышают расчетные значения. В отдельных случаях коэффициент запаса превышает 1,8. При этом на отдельных сооружениях установлено отсутствие такого запаса, однако сведения о недостатке мощности на этих сооружениях отсутствуют. Предлагается для предупреждения подобных явлений разработать общие отраслевые требования по проектированию электроприводов ворот и затворов судоходных гидротехнических сооружений, а также при разработке проектов реконструкции эксплуатируемых приводных механизмов выполнять натурные исследования по определению фактически требуемых грузоподъемности и мощности.

*Ключевые слова:* судоходный шлюз, двустворчатые ворота, механическое оборудование, электропривод, кинематическая схема, грузоподъемность, мощность, коэффициент запаса.

**Для цитирования:**

Ксенофонтов Н. М. Исследование рабочих характеристик электроприводов основных двустворчатых ворот судоходных шлюзов / Н. М. Ксенофонтов, А. В. Саушев, А. А. Темкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 197–206. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-197-206.

**Введение (Introduction)**

Маневрирование основными двустворчатыми воротами (ОДВ) судоходных шлюзов осуществляется с помощью электромеханических приводов (ЭМП) и электрогидравлических приводов (ЭГП), реализованных в соответствии с различными кинематическими схемами, среди которых наиболее распространенными являются *кривошипно-штанговая* (рис. 1) и *штоковая* (рис. 2).

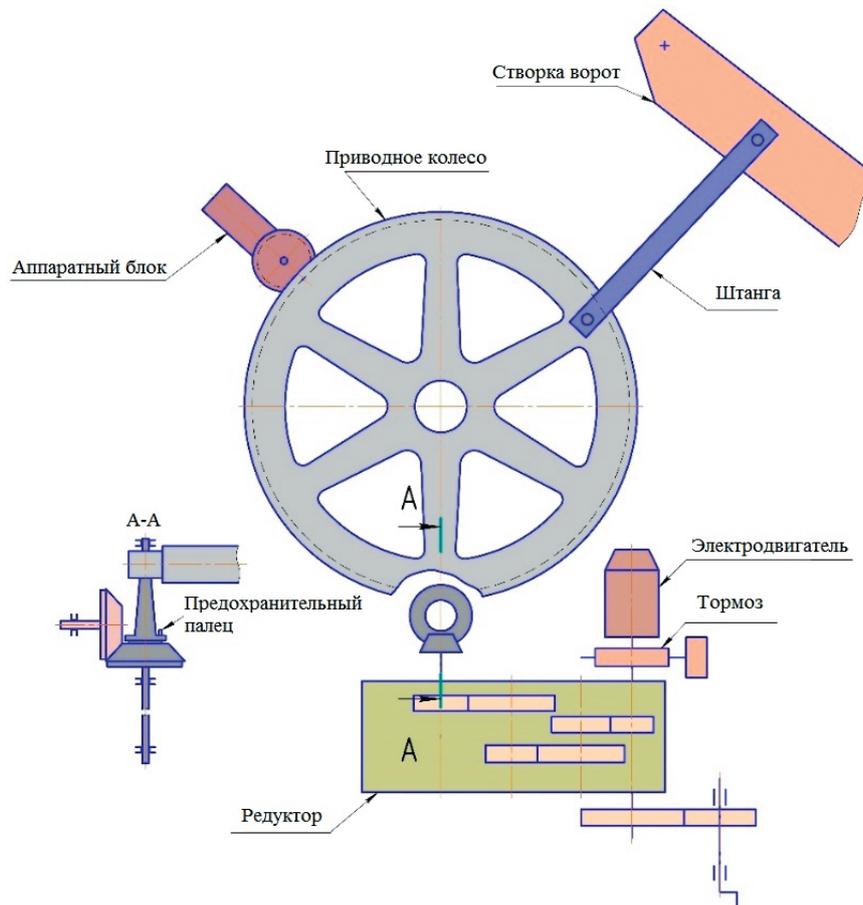


Рис. 1. Типовая кинематическая схема кривошипно-штангового электромеханического привода основных двустворчатых ворот

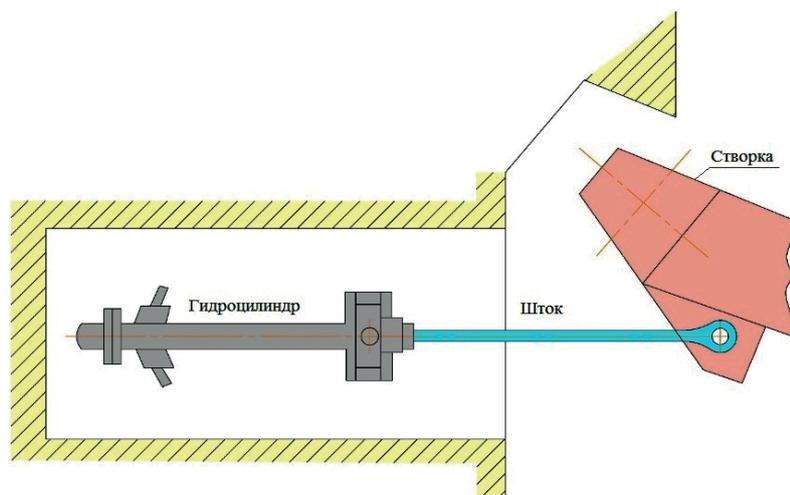


Рис. 2. Классическая кинематическая схема штокового электрогидравлического привода основных двустворчатых ворот

Имеющиеся сведения об основных характеристиках эксплуатируемых приводных механизмов позволяют сделать предположение об отличии, в частности, их установленных значений грузоподъемности и мощности на близких по конструктивному исполнению и воспринимаемым нагрузкам металлоконструкциях. Например, грузоподъемность привода нижних ОДВ шлюза № 25–26 Балаковского гидроузла Волжского бассейна составляет  $100 \text{ т} \cdot \text{с}$ , а шлюза № 17–18 Чебоксарского гидроузла того же бассейна —  $230 \text{ т} \cdot \text{с}$  при одинаковых ширине камеры, конструкции ворот и воспринимаемых нагрузках.

В современной практике также имеют место случаи необоснованного увеличения параметров привода при его замене. Так, при реконструкции шлюза № 5 Северо-Двинской шлюзованной системы возросла в два раза грузоподъемность привода ОДВ (рис. 3) при отсутствии какого-либо обоснования.



Рис. 3. Пример установки электромеханического привода типа электроцилиндр шлюза № 5 Северо-Двинской шлюзованной системы

Приведенный пример в отечественной практике не является единичным. В работе [1] отмечается, что для схожих по техническим характеристикам ОДВ с ЭМП проектная мощность ЭГП возросла в 2–5 раз. При этом существующие отраслевые нормативные документы: РТМ 212.0106–81

«Руководящий технический материал. Расчет и выбор электрооборудования гидротехнических сооружений» и РД-212-171-93 «Гидроприводы затворов шлюзов, требования к проектированию», содержащие основные требования к проектированию приводов ворот и затворов, не нашли широкого применения, в том числе ввиду неопределенности их правового статуса. На момент проектирования большинства из эксплуатируемых приводных механизмов не существовало единых требований, подобных РТМ 212.0106-81 и РД-212-171-93. В связи с этим в проектной документации, как правило, отсутствуют расчетные обоснования по выбору типа привода, его кинематической схемы и основных характеристик. Указанное обстоятельство свидетельствует о наличии вероятности завышения значений основных рабочих параметров рассматриваемых элементов механического оборудования. К таким параметрам, например, относятся *грузоподъемность и мощность*. Завышение значений этих параметров неизбежно приведет к увеличению массогабаритных показателей электропривода, стоимости его изготовления, монтажа и обслуживания, а также снижению его ремонтпригодности.

Типы электроприводов металлоконструкций гидротехнических сооружений и их описание изложены в литературе [2], [3]. Основные положения по определению расчетных характеристик ворот и затворов судоходных шлюзов изложены, в частности, в технической литературе [4]–[6] и научных публикациях [7]–[9]. Результаты исследований в области совершенствования приводных механизмов рассматриваемых конструкций представлены в работах [10]–[13].

*Целью работы* является анализ и разработка рекомендаций по оценке соответствия проектных значений основных параметров эксплуатируемых приводов ОДВ расчетным. Данная оценка выполнена на примере наиболее широко распространенных судоходных шлюзов с шириной камеры 18–30 м, расположенных на Волго-Балтийского водного пути (ВБВП) и Волго-Донском судоходном канале (ВДСК). Причиной выбора данных объектов явились их массовость и продолжительность эксплуатации, которая в большинстве случаев превышает 60 лет. С учетом указанного срока службы данные элементы механического оборудования, скорее всего, будут заменены в ближайшие 10–20 лет.

Для решения поставленной в настоящей работе цели необходима реализация ряда практических задач:

- формирование сведений, необходимых для проведения расчетного исследования;
- определение расчетных значений основных параметров электроприводов;
- выбор коэффициента запаса с учетом рекомендаций технической литературы;
- выполнение сравнительной оценки основных характеристик приводов двустворчатых ворот, согласно установленным грузоподъемности и мощности, с расчетными значениями.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Определение необходимых значений грузоподъемности и мощности электроприводов ОДВ требует наличия большого количества исходных данных, часть из которых является индивидуальной для конкретного сооружения. Сбор и обработка такого массива информации обязательны при проектировании приводов, но не являются необходимыми для сравнительного анализа эксплуатируемых механизмов ОДВ. Поэтому в настоящей работе принята методика укрупненного расчета фактического сопротивления движению створок ворот в соответствии с положениями, изложенными в работах [2]–[4], [5]–[7].

Для определения силы сопротивления движению створок ворот использовались рекомендации работ [2]–[4], [5], [6]. Предварительные расчеты показали, что для укрупненного расчета достаточно определения момента гидростатического сопротивления  $M_2$  при общем перепаде  $Z$  между напорной и безнапорной сторонами створок, так как остальные моменты сопротивления, в частности обусловленные движением створки в воде, ветровой нагрузкой, силами инерции и трением в пяте и гальсбанте, имеют значительно меньшие значения.

Величина момента сопротивления  $M_2$  определялась по формуле

$$M_2 = 0,5h_k l^2 c Z, \quad (1)$$

где  $h_k$  — высота подводной части створки при нормальном уровне нижнего бьефа, м;  $l_c$  — длина створки, м;  $Z$  — разность уровня воды перед воротами и за ними, м:

$$Z = Z_1 + Z_2.$$

Здесь  $Z_1$  — перепад при открытии ворот и вытеснении ими воды из шкафной части, м;  $Z_2$  — перепад, вызванный инерционными колебаниями уровня воды в камере и в подходном канале, м.

На основе результатов наблюдений установлено, что у приводов ОДВ максимальная величина  $Z_1$  соответствует моменту времени от начала открытия ворот до момента  $t_1 = 0,3t_0$  и может быть рассчитана по формуле

$$Z_1 = \left( 2,5 \frac{l_c^2}{b_n t_0} \right)^2, \quad (2)$$

где  $b_n$  — ширина камеры шлюза, м;  $t_0$  — полное время открытия ворот, с.

При расчетах момента  $M_2$  значения  $Z$  принимались в диапазоне 0,1–0,4 м в зависимости от размеров камеры шлюза и площади нижнего подходного канала.

Необходимое расчетное тяговое усилие для вращения створки определялось по формуле

$$F_p = \frac{M_2}{a}, \quad (3)$$

где  $M_2$  — момент гидростатического сопротивления, Н·м;  $a$  — расстояние от оси крепления штанги привода на створке до оси вращения створки, м.

Требуемая мощность приводов ворот и затворов при укрупненном расчете определялась по формуле

$$N_p = \frac{F_p l_a}{\eta t}, \quad (4)$$

где  $F_p$  — расчетное тяговое усилие, тс;  $l_a$  — длина пути перемещения точки положения силы  $F_p$  при маневрировании воротами и затворами, м:

$$l_a = a \cdot \text{рад}, \quad (5)$$

где рад — полный угол поворота створки;  $t$  — время маневрирования, с;  $\eta$  — КПД, в соответствии с рекомендациями [4], принят равным 0,7.

Формула (5) является корректной при условии  $F = \text{const}$  и  $t = \text{const}$ . Фактически при маневрировании створками ворот эти величины не являются постоянными. Данное обстоятельство подтверждает необходимость изучения при проектировании приводов циклограмм нагружения<sup>1</sup>, согласно проведенным исследованиям в работах [6], [17].

Величина коэффициента запаса привода по грузоподъемности рассчитывалась по формуле (6), по мощности — формуле (7):

$$k_F = \frac{F_y}{F_p}; \quad (6)$$

$$k_N = \frac{N_y}{N_p}. \quad (7)$$

В работе [4] рекомендуемое значение коэффициента запаса рассчитываемых параметров выбран равным 1,2. С учетом принятых в настоящей работе допущений представляется целесообразным увеличить его до 1,5.

Необходимые для выполнения укрупненных расчетов исходные данные принимались в соответствии с данными, представленными в табл. 1.

<sup>1</sup> ГОСТ 17752–81. Гидропривод объемный и пневмопривод. Термины и определения. Введ. с 01.01.82 взамен ГОСТ 17752-72.

Таблица 1

## Исходные данные для определения параметров электроприводов основных двухстворчатых ворот судодходных шлюзов

Наименование шлюза	Наименование ворот	Наименование параметров										Полное время открытия ворот, с
		Тип привода	Рабочий набор, м	Размер перекрываемого отверстия, Ш×В, м	Размер створки, Д×В, м	$h_k$ , м	Масса створки, т	$a$ , м	$F_y$ , тс	$N_y$ , кВт		
Нижне-Свировский	Верхние	ЭМП	7,00	21,50'7,30	12,36'7,36	7,00	52,00	2,88	16	7,5	120	
	Нижние		12,70	21,50'19,28	12,37'19,84	8,00	160,00	2,88	16	7,5	120	
	Нижние		16,30	21,50'21,62	12,75'21,62	5,15	190,00	3,30	50	22,0	120	
			13,70	18,00'18,69	10,89'16,69	4,30	133,70	3,31	50	11,0	157	
			13,25	18,00'17,80	10,89'17,80	4,55	133,15	3,31	50	11,0	157	
			13,10	18,00'17,99	10,89'17,99	4,18	131,30	3,31	50	11,0	157	
			13,60	18,00'17,99	10,89'17,99	5,07	131,30	3,31	50	11,0	157	
			12,75	18,00'18,10	10,89'18,10	4,20	133,70	3,31	50	11,0	157	
17,70	18,00'23,50	10,89'23,50	5,50	159,15	3,31	50	11,0	157				
13,50	18,00'18,02	10,89'18,02	6,25	128,71	3,31	75	11,0	117				
№ 8	Нижние	ЭГП	15,00	21,50'20,35	12,55'20,35	7,80	199,00	2,92	190	4'37,0	130	
ФБУ «Администрация Волго-Дон»												
№ 1, 10–12	Нижние	ЭМП*	11,40	18,00'15,00	10,90'15,19	4,50	136,00	3,31	60	15,00	60	
№ 2–9			10,40	18,00'14,00	10,90'14,22		123,00					
№ 13			13,50	18,00'16,50	10,90'16,84		129,00					
№ 15			14,20	18,00'17,00	10,90'17,20		129,00					
№ 14	Верхние	ЭГП	14,20	18,00'16,50	10,90'17,20	8,00	92,00	1,81	50	40	140,00	
Константинский	Нижние		13,50	18,00'11,00	10,90'11,25		129,00					
	Верхние		8,30	18,00'11,30	10,86'11,35		58,00					
№ 30, 31	Верхние		5,20	18,00'13,60	10,86'13,65		4,50					85,00
№ 30, 31	Нижние	ЭГП	13,50	30,00'13,50	17,56'14,05	13,00	225,00	5,65	100	28	120	
	Средние		18,50	30,00'19,50	17,56'19,89	7,00	343,00					
№ 30, 31	Нижние	ЭГП	16,50	30,00'25,00	17,56'17,35	4,00	381,00	5,65	100	28	120	

Примечания:

 $F_y$  — установленная грузоподъемности привода;  $N_y$  — установленная мощность основного электродвигателя привода;

\* — на шлюзе № 7 ВДСК установлен ЭМП типа электроцилиндр с основными рабочими характеристиками идентичными заменному.

## Результаты (Results)

Результаты расчета сил сопротивления движению створок основных двустворчатых ворот, требуемой расчетной мощности электроприводов ОДВ, а также расчетных величин коэффициентов запаса сведены в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты расчета

Наименование шлюза	Тип привода	$F_y$ , т·с	$F_p$ , т·с	$k_F$	$t_0$ , с	$N_y$ , кВт	$N_p$ , кВт	$k_N$
ФБУ «Администрация «Волго-Балт»								
Нижне-Свирский:								
Верхние	ЭМП	16	17,9	0,9	120	7,5	7,5	1,0
Нижние	ЭМП	16	20,5	0,8	120	7,5	8,6	0,9
Верхне-Свирский	ЭМП	50	25,6	<b>1,9</b>	120	22,0	12,3	<b>1,8</b>
№ 2	ЭМП	50	24,5	<b>2,0</b>	117	11,0	9,0	1,2
№ 3	ЭМП	50	22,5	<b>2,2</b>	117	11,0	8,3	1,3
№ 4	ЭМП	50	27,5	<b>1,8</b>	117	11,0	10,1	1,1
№ 5	ЭМП	50	22,6	<b>2,2</b>	117	11,0	8,3	1,3
№ 6	ЭМП	50	29,6	<b>1,7</b>	117	11,0	10,9	1,0
№ 7	ЭМП	75	33,6	<b>2,2</b>	117	11,0	16,6	0,7
№ 8	ЭГП	190	62,0	<b>3,1</b>	130	72,0	24,3	<b>2,9</b>
ФБУ «Администрация «Волго-Дон»								
№ 1–15	ЭМП	60	24,2	<b>2,5</b>	60	11,0/15,0	23,3	0,5
Константиновский:								
Верхние	ЭГП	50	26,3	<b>1,95</b>	140	40,0	5,9	<b>6,8</b>
Нижние	ЭГП	50	44,3	1,15	140	40,0	10,0	<b>4,0</b>
№ 30, 31:								
Верхние	ЭГП	100	35,5*	<b>2,8</b>	120	28,0	29,1	0,9
Средние	ЭГП	100	19,1*	<b>5,2</b>	120	28,0	15,7	<b>1,8</b>
Нижние	ЭГП	100	43,0*	<b>3,1</b>	120	28,0	26,8	1,0

#### Примечания:

$F_p$  — расчетная грузоподъемности привода;  $N_p$  — расчетная мощности основного электродвигателя привода;  $k_F$ ,  $k_N$  — коэффициенты запаса по грузоподъемности и мощности;  $t_0$  — полное время открытия ворот;  $h_k$  — высота подводной части створки при нормальном уровне нижнего бьефа, варьируется от 2,1 м до 13,0 м;  $a$  — расстояние от оси вращения створки до оси крепления штанги составляет 1,85–5,6 м; \* —  $a = 5,6$  м.

Из представленных в табл. 2 результатов расчета основных параметров рассматриваемых электроприводов следует, что для большинства из них установленная грузоподъемность значительно превышает расчетные значения. Средняя величина коэффициентов запаса по грузоподъемности  $k_F$  составила для ЭМП  $\bar{k}_F^M = 1,9$ , для ЭГП —  $\bar{k}_F^Г = 2,8$ . Приведенные значения значительно превышают принятое, равное 1,5.

Как отмечалось ранее, в 70–80-е гг. XX в. в Ленинградском институте водного транспорта под руководством Н. М. Жулина был проведен комплекс натурных исследований по определению фактических значений нагрузок и потребляемой мощности в электроприводах ворот и затворов ВБВП и динамики их изменения в процессе маневрирования. В результате исследований [14], [15] было определено максимальное тяговое усилие ЭМП ОДВ шлюзов № 1–5, а также Нижне-Свирского (НСШ) и Верхне-Свирского (ВСШ). Из полученных в ходе натурных исследований результатов следует, что фактические коэффициенты запаса по грузоподъемности для ЭМП шлюзов № 1–5 и ВСШ совпали с расчетными значениями, приведенными в табл. 2, а для НСШ находятся в близком диапазоне ( $k_F^n = 0,5 - 1,1$ ). Следует также отметить, что несмотря на отсутствие запаса электропривода ОДВ НСШ по грузоподъемности, случаев его недостаточности в течение всего периода эксплуатации сооружения не установлено.

Анализ данного показателя по табл. 2 позволяет выделить приводы с заведомо завышенными значениями грузоподъемности, это, в первую очередь, шлюз № 8 ВБВП. Проектные характеристики

привода его ОДВ при ширине камеры шлюза 21,5 м значительно превышают аналогичные значения для сооружений ВДСК (шлюз № 30–31) и Волжского бассейна (шлюз № 24–25 Балаковского района гидросооружений и судопропуска), ширина камеры которых составляет 30 м.

Для многих приводов ОДВ запас по мощности отсутствует. Однако необходимо отметить, что значения  $k_N < 1$  не привели к сбоям и отказам приводов, что свидетельствует о превышении расчетных значений  $N_p$  над фактически необходимыми. Наиболее высокие значения запаса по мощности получены для приводов ОДВ Константиновского шлюза ВДСК, где  $k_N$  для верхних ворот составил 6,8, нижних — 4,0. На шлюзе № 8 ВВП мощность привода почти в три раза выше требуемой. Среднее значение коэффициента запаса мощности для ЭМП составило  $\bar{k}_N^M = 0,78$ , для ЭГП —  $\bar{k}_N^r = 1,92$ .

### Выводы (Conclusion)

На основе представленных в данной работе результатов сравнительного анализа основных характеристик рассмотренных электроприводов ОДВ можно сделать следующие выводы:

– проектные значения грузоподъемности и мощности эксплуатируемых электроприводов имеют большой диапазон значений, включая близкие технические характеристики ворот и условия нагружения;

– имеет место необоснованное значительное завышение проектных значений основных параметров электроприводов;

– расчетные относительные показатели запасов грузоподъемности и мощности позволяют количественно оценить несоответствие основных характеристик, установленных (проектируемых) приводов двустворчатых ворот их оптимальным значениям.

Для предупреждения в дальнейшем подобных явлений представляется необходимым проведение следующих мероприятий:

1. Разработка общих требований по проектированию электроприводов ворот и затворов судоходных гидротехнических сооружений;
2. При разработке проектов реконструкции эксплуатируемых приводных механизмов выполнение натурных исследований по определению фактически требуемых грузоподъемности и мощности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмицкий М. Л. Анализ опыта эксплуатации и технического состояния эксплуатируемых гидроприводов ворот и затворов СГТС на внутренних путях России и систем их управления / М. Л. Кузьмицкий // Гидропривод ворот и затворов шлюзов судоходных гидротехнических сооружений: сб. науч.-техн. материалов технического совещания по оптимизации конструкции гидропривода. — Самара: Изд-во «АСГАРД», 2013. — С. 110–121.

2. Селезнев С. В. Поверхностные затворы больших пролетов судопропускных сооружений, шлюзов и доков / С. В. Селезнев, Г. П. Лохматиков. — СПб.: Энергоатомиздат (СПб. отд.), 1995. — 695 с.

3. Полонский Г. А. Механическое оборудование гидротехнических сооружений / Г. А. Полонский. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1974. — 344 с.

4. Семанов Н. А. Судоходные каналы, шлюзы и судоподъемники / Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин. — М.: Транспорт, 1972. — 352 с.

5. Daniel R. Lock gates and other closures in hydraulic projects / R. Daniel, T. Paulus. — 1st edition. — Butterworth-Heinemann, 2018. — 993 p.

6. Колосов М. А. Механическое оборудование судоходных шлюзов / М. А. Колосов, П. А. Гарибин. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 148 с.

7. Тырва В. О. Построение и применение интервальной модели нагрузок электропривода ворот шлюза / В. О. Тырва // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2019. — С. 199–206.

8. Gerritse A. Load Principles for Drive Mechanisms of Miter Gates: Master Thesis Report / A. Gerritse. — Delft university of Technology, 2016. — 206 p.

9. McKinley B. F. Miter Gate Machinery, Design Options and State of the Art / B. F. McKinley // *PIANC-World Congress Panama City*. — 2018.

10. Морозов В. Н. Модернизация гидроприводов судоходных гидротехнических сооружений технико-экономические проблемы и пути решения / В. Н. Морозов, В. В. Гнеденко, И. Л. Павлович // *Проблемы развития предприятий: теория и практика*. — 2018. — № 1. — С. 197–201.

11. Морозов В. Н. Перспективные направления развития экспериментальной базы для испытания гидроприводов судоходных гидротехнических сооружений / В. Н. Морозов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. — 2016. — Т. 18. — № 1–2. — С. 242–246.

12. Zhou J. Analytical and experimental research on stability of large slenderness ratio horizontal hydraulic hoist / J. Zhou, D. W. Shi, Z. L. Sun, T. Bi, X. H. Cheng, D. Chen, Y. Lu // *Advances in Mechanical Engineering*. — 2018. — Vol. 10. — Is. 10. — Pp. 1687814018803472. DOI: 10.1177/1687814018803472.

13. Жулин Н. М. Совершенствование механического оборудования шлюзов и систем управления земснарядов, в том числе исследование режимов механизмов ворот Верхне-Свирского шлюза: Отчет о НИР (промежуточный), тема № 83–720 (доп. соглашение) / Н. М. Жулин, В. Э. Шнейдер. — 1986. — 44 с.

14. Жулин Н. М. Совершенствование механического оборудования шлюзов и систем управления земснарядов, в том числе исследование режимов механизмов ворот Нижне-Свирского шлюза: отчет о НИР (заключит.), тема № 83–720 (доп. соглашение) / Н. М. Жулин, В. Э. Шнейдер, Н. А. Муленко. — 1987. — 46 с.

15. Жулин Н. М. Исследовать техническое состояние механического оборудования судоходных гидротехнических сооружений и выполнить работы по совершенствованию его контроля. Задание 2. Анализ технического состояния механизмов шлюзов ВБВП им. В. И. Ленина с разработкой предложений по их модернизации: Отчет о НИР (заключит.), тема № 90–421 / Н. М. Жулин. — 1991. — 46 с.

16. Ивановский Ю. К. Основы теории гидропривода / Ю. К. Ивановский, К. П. Моргунов. — СПб.: ФГБОУ ВПО ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2014. — 200 с.

17. Фролов К. В. Машиностроение : энцикл.: в 40 т. — Разд. 4: Расчет и конструирование машин. — Т. 4–2: Электропривод. Гидро- и виброприводы. — Кн. 2: Гидро- и виброприводы / К. В. Фролов [и др.]. — М.: Машиностроение, 2012. — 305 с.

## REFERENCES

1. Kuz'mitskii, M. L. "Analiz opyta ekspluatatsii i tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh gidroprivodov vorot i zatvorov SGTS na vnutrennikh putyakh Rossii i sistem ikh upravleniya." *Sbornik nauchno-tekhnicheskikh materialov tekhnicheskogo soveshchaniya po optimizatsii konstruktсии gidroprivoda «Gidroprivod vorot i zatvorov shlyuzov sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii»*. Izdatel'stvo AS Gard, 2013. 110–121.

2. Seleznev, S. V., and G. P. Lokhmatikov. *Poverkhnostnye zatvory bol'shikh proletov sudopropusknykh sooruzhenii, shlyuzov i dokov*. SPb.: Energoatomizdat, s.-peterb. otd-nie, 1995.

3. Polonskii, G. A. *Mekhanicheskoe oborudovanie gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. 2<sup>nd</sup> ed. M.: «Energiya», 1974.

4. Semanov, N. A., N. N. Varlamov, and V. V. Balanin. *Sudokhodnye kanaly, shlyuzy i sudopod'emniki*. M.: Transport, 1972.

5. Daniel, Ryszard, and Tim Paulus. *Lock gates and other closures in hydraulic projects*. Butterworth-Heinemann, 2018.

6. Kolosov, M. A., and P. A. Garibin. *Mekhanicheskoe oborudovanie sudokhodnykh shlyuzov*. SPb.: Izdatel'stvo «Lan», 2017.

7. Tyrva, V. O. "Construction and application of interval model loads of electric drive for sluice gate." *Sbornik nauchnykh statei natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova"*. SPb.: FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova", 2019. 199–206.

8. Gerritse, Anouk. Load Principles for Drive Mechanisms of Miter Gates. Master Thesis Report. Delft university of Technology, 2016.

9. McKinley, Brenden F. "Miter Gate Machinery, Design Options and State of the Art." *PIANC-World Congress Panama City*. 2018.

10. Morozov, Victor Nikolaevich, Vladimir Vasilevich Gnedenko, and Igor Lvovich Pavlovich. "Modernization of hydraulic drives of navigable hydraulic structures. Technical and economic problems and solutions." *Problems of Enterprise Development: Theory and Practice* 1 (2018): 197–201.

11. Morozov, Viktor, Igor Krasnocshchekov, Dmitriy Krasinskiy, Lev Pavlovich, Igor Pavlovich, Evgeniy Melnikov, and Roman Klinov. "Perspective directions of development of experimental base for tests the hydraulic drives of navigable hydrotechnical facilities." *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 18.1–2 (2016): 242–246.

12. Zhou, Ji, Duan-Wei Shi, Zhi-Lin Sun, Tao Bi, Xiong-Hao Cheng, Dong Chen, and Yang Lu. "Analytical and experimental research on stability of large slenderness ratio horizontal hydraulic hoist." *Advances in Mechanical Engineering* 10.10 (2018): 1687814018803472.

13. Zhulin, N. M., and V. E. Shneider. Sovershenstvovanie mekhanicheskogo oborudovaniya shlyuzov i sistem upravleniya zemsnyaradov, v tom chisle issledovanie rezhimov mekhanizmov vorot Verkhne-Svirskogo shlyuza. Research report. 1986.

14. Zhulin, N. M., V. E. Shneider, and N. A. Mulenko. Sovershenstvovanie mekhanicheskogo oborudovaniya shlyuzov i sistem upravleniya zemsnyaradov, v tom chisle issledovanie rezhimov mekhanizmov vorot Nizhne-Svirskogo shlyuza. Research report. 1987.

15. Zhulin, N. M. Issledovat' tekhnicheskoe sostoyanie mekhanicheskogo oborudovaniya sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii i vpolnit' raboty po sovershenstvovaniyu ego kontrolya. Zadanie 2. Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya mekhanizmov shlyuzov VBVP im. V. I. Lenina s razrabotkoi predlozhenii po ikh modernizatsii. Research report. 1991.

16. Ivanovskii, Yu. K., and K. P. Morgunov. *Osnovy teorii gidroprivoda*. SPb.: FGBOU VPO GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2014.

17. Frolov, K. V., et al., eds. *Mashinostroenie. Entsiklopediya v 40 tomakh. Razdel 4. Raschet i konstruirovaniye mashin. Tom 4–2. Elektropriwod. Gidro- i vibroprirody. Kniga 2. Gidro- i vibroprirody*. M.: Mashinostroenie, 2012.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ксенофонтов Николай Михайлович** —

кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [ksen\\_nm@mail.ru](mailto:ksen_nm@mail.ru), [ksenofontovnm@gumrf.ru](mailto:ksenofontovnm@gumrf.ru)

**Саушев Александр Васильевич** —

доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [saushev@bk.ru](mailto:saushev@bk.ru), [SaushevAV@gumrf.ru](mailto:SaushevAV@gumrf.ru)

**Темкин Антон Андреевич** — аспирант

*Научный руководитель:*  
Саушев Александр Васильевич  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [temkinaa@yandex.ru](mailto:temkinaa@yandex.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ksenofontov, Nikolay M.** —

PhD  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [ksen\\_nm@mail.ru](mailto:ksen_nm@mail.ru), [ksenofontovnm@gumrf.ru](mailto:ksenofontovnm@gumrf.ru)

**Saushev, Alexander V.** —

Dr. of Technical Sciences, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [saushev@bk.ru](mailto:saushev@bk.ru), [SaushevAV@gumrf.ru](mailto:SaushevAV@gumrf.ru)

**Temkin, Anton A.** — Postgraduate

*Supervisor:*  
Saushev, Alexander V.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [temkinaa@yandex.ru](mailto:temkinaa@yandex.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2021 г.  
Received: February 9, 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-207-221

## EVALUATION OF CONTAINER CENTER OF GRAVITY HEIGHT INFLUENCE ON DECK CONTAINER STACK LOADS

**R. S. Tsarik**

Maritime State University named after admiral G. A. Nevelskoy,  
Vladivostok, Russian Federation

*The loads acting on the deck container stack, which are one of the most important factors for ensuring the safe containers transportation, are considered. It is noted that at present, the assigned standard values of the container center of gravity height are used to calculate the deck container stacks lashing arrangement. It is expressed in the fact that the programs used for calculating the loads acting on container stacks take into account a single value of container center of gravity height, without taking into account the actual values for each individual container. The purpose of this study is a comparative evaluation of the effect of the standard and actual container center of gravity height on the loads acting on the deck container stack. For this purpose, the methods of calculating loads on container stacks according to the rules of classification societies are analyzed. The relationships between all the factors used to calculate the loads are revealed. Experimental calculations of loads on deck container stacks of different configurations and taking into account different initial data that may be encountered in practice are performed. As a result, it was confirmed that the container center of gravity height has a significant influence on the values of the forces that form the loads on deck container stack. It is concluded that the combined effect of the actual metacentric height and the actual container center of gravity height can lead to both an increase and a decrease in the loads acting on the deck container stack. The necessity to take into account the values of the actual container center of gravity height when calculating the stability and lashing arrangement of deck container stacks is justified. A recommendation to take into account the actual center of gravity height of each container in specialized programs for calculating container lashing arrangement on the ship is proposed.*

*Keywords: container ship, container, center of gravity, stability, metacentric height, container stack, load.*

**For citation:**

Tsarik, Ruslan Stanislavovich. "Evaluation of container center of gravity height influence on deck container stack loads." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 207–221. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-207-221.

**УДК 656.61.052**

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АППЛИКАТЫ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ КОНТЕЙНЕРА НА НАГРУЗКИ ПАЛУБНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ШТАБЕЛЯ

**Р. С. Царик**

ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского», Владивосток, Российская Федерация

*Рассмотрены нагрузки, действующие на палубный контейнерный штабель, которые являются одним из важнейших факторов в обеспечении сохранной перевозки контейнеров. Отмечается, что в настоящее время для расчета схемы крепления палубных контейнерных штабелей используются принятые стандартные значения аппликаты центра тяжести контейнера. Это выражается в том, что программы расчета нагрузок, действующих на контейнерные штабели, используют единое значение аппликаты центра тяжести контейнера, не учитывая фактические значения для каждого отдельного контейнера. Целью данного исследования является сравнительная оценка влияния стандартной и фактической аппликаты центра тяжести контейнера на нагрузки, действующие на палубный контейнерный штабель. Для этого в работе были проанализированы методики расчета нагрузок на контейнерные штабели согласно правилам классификационных обществ, выявлены зависимости между всеми факторами, используемыми для расчета нагрузок, выполнены экспериментальные расчеты нагрузок на палубные контейнерные штабели различной конфигурации с учетом разных исходных данных, которые могут встретиться на практике. В результате было подтверждено, что аппликата центра тяжести контейнера оказывает существенное влияние на величину сил, формирующих нагрузки на палубный контейнерный штабель. Сделан*

вывод о том, что совокупное влияние фактической метацентрической высоты и фактической аппликаты центра тяжести контейнеров может приводить как к увеличению, так и к уменьшению нагрузок, действующих на палубный контейнерный штабель. Обоснована необходимость учета значения фактической аппликаты центра тяжести контейнера при расчетах устойчивости и схем крепления палубных контейнерных штабелей. Предложена рекомендация по учету фактической аппликаты центра тяжести каждого контейнера в специализированных программах расчета схем крепления контейнеров на судне.

*Ключевые слова:* контейнеровоз, контейнер, центр тяжести, устойчивость, метацентрическая высота, контейнерный штабель, нагрузка.

**Для цитирования:**

Царик Р. С. Оценка влияния аппликаты центра тяжести контейнера на нагрузки палубного контейнерного штабеля / Р. С. Царик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 207–221. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-207-221.

### Введение (Introduction)

Особую актуальность в отрасли морских контейнерных перевозок приобретает потеря контейнеров за борт или их повреждение в результате крушения палубных контейнерных штабелей. Так, с октября 2020 г. по февраль 2021 г. произошло не менее девяти аварий, в результате которых были потеряны за борт около 3300 контейнеров. Для сравнения за период 2008–2016 гг. количество потерянных контейнеров в среднем не превышало 700 единиц в год, не считая потерь в результате катастрофы и гибели судна, когда в результате крушения контейнеровоза MOL Comfort в 2013 г. было потеряно около 4300 контейнеров. Следует отметить, что причиной потери контейнеров за борт является неудовлетворительная система крепления, неспособная выдержать нагрузки, возникающие в палубных контейнерных штабелях, и совокупность факторов, приводящих к недостаточности систем крепления.

Нагрузка на палубный контейнерный штабель зависит от внешних и внутренних факторов. К *внешним факторам* относится воздействие волнения и ветра, заставляющее судно испытывать качку и оказывающее непосредственное давление на контейнерный штабель, к *внутренним* — метацентрическая высота (МЦВ) судна и аппликата центра тяжести (ЦТ) контейнеров. От величины поперечной МЦВ зависит период бортовой качки, который, в свою очередь, определяет ускорение ЦТ судна. Это ускорение лежит в основе всех нагрузок, действующих на судно в целом, и на палубный контейнерный штабель в частности. Для крупнотоннажных контейнеровозов часто характерной является избыточная МЦВ, усугубляющая нагрузки на палубный контейнерный штабель, что отмечено в работе [1].

Проблема учета нагрузок на контейнерные штабели, рассматриваемая в данной работе, достаточно популярна в научной среде, что во многом обусловлено аварийностью, требующей поиска эффективных решений. Выполняемые исследования в основном направлены на изучение природы нагрузок, возникающих в контейнерных штабелях при движении судна на волнении, моделирование различных возможных ситуаций и выполнение расчетных экспериментов, направленных на определение характеристик средств крепления с целью их последующего усовершенствования.

В работах [2]–[4] описан подход к моделированию контейнерного штабеля, учитывающий взаимодействие сил тяжести и сил инерции, возникающих в разных условиях. Были использованы два метода: испытание на вибростенде и моделирование методом конечных элементов. Авторами указанных ранее работ была проведена серия экспериментов для изучения нагрузок, возникающих в контейнерном штабеле. В результате была создана математическая модель, способная прогнозировать нагрузки, которые могут испытывать контейнерный штабели при перевозке на судне. Однако в своих исследованиях авторы не учитывали влияние фактических аппликат ЦТ контейнеров. В работе [5] рассмотрен новый подход к численному моделированию критических параметров движения судна, учитывающий их соответствующие нелинейности и представлен метод оценки динамических нагрузок на систему крепления контейнеров, учитывающий ускорения, возникающие при движении судна. Авторы данной работы предложили использовать разработанный ими

метод при проектировании систем крепления контейнеров для учета реальных ускорений и сил, возникающих при перевозке контейнеров на судне. Достоинством этой работы является то, что в ней уделяется достаточное внимание влиянию МЦВ судна на нагрузки в контейнерном штабеле. Однако при этом не были учтены фактические аппликаты ЦТ каждого контейнера, при наличии допущения о том, что общий ЦТ контейнерного штабеля находится примерно на 1/3 его высоты, что является не вполне корректным в контексте исследуемой в настоящей работе проблемы.

Требования к системам и средствам крепления контейнеров, указанные в соответствующих правилах классификационных обществ, являются результатами научно-исследовательских работ. Так, в работе [6] представлены результаты исследований по разработке автоматических твистлоков и надежных схем крепления контейнеров, которые затем были учтены в правилах Международного классификационного общества DNV. Характеристики средств крепления контейнеров и их влияние на эффективность системы крепления контейнерного штабеля проанализированы в работе [7], в которой выполнен сравнительный анализ внутренней и внешней систем крепления контейнеров с учетом массы штабеля и показаны их достоинства и недостатки в различных условиях эксплуатации. На основе полученных результатов сформулированы практические критерии для проектирования средств крепления.

Проблема расчета нагрузок на контейнерные штабели с точки зрения применения разных методик, используемых в правилах разных классификационных обществ, исследована авторами в работе [8]. Подчеркивается, что расчетные алгоритмы, используемые в специализированных программах, скрыты, и доступ к ним имеют только эксперты классификационного общества. При этом критически важно, чтобы все стороны, участвующие в планировании загрузки контейнерова, использовали единую методику расчета системы крепления контейнеров. Для решения этой проблемы предлагается модель извлечения параметров системы крепления из практических примеров для ее последующего машинного обучения с целью прогнозирования нагрузок на контейнерные штабели без их явного расчета. В подавляющем большинстве случаев исследования рассматриваемой проблемы основаны на принятых нормах в отношении аппликаты ЦТ контейнера. Представляется, что отношение к установленным нормам как к правилам, не подлежащим критической оценке, препятствует решению данной проблемы.

В работах [9], [10] исследовано влияние фактического положения ЦТ контейнеров на значение МЦВ судна. В настоящий момент в расчетах остойчивости и схем крепления контейнеров применяются стандартные значения аппликаты ЦТ контейнера. Это означает, что рассчитанные критерии остойчивости и нагрузки, действующие на контейнерные штабели, не соответствуют фактическим — они могут быть как меньше их, так и больше. Очевидно, что несоответствие установленным требованиям и превышение допустимых значений не отвечает требованиям безопасности и может привести к аварии.

*Целью настоящего исследования* является проверка предложенной гипотезы о существенном влиянии аппликаты ЦТ каждого контейнера, формирующего контейнерный штабель, на нагрузки, действующие на него. Гипотеза основана на том, что понижение или повышение аппликаты ЦТ контейнеров приводит, соответственно, к увеличению или уменьшению МЦВ судна, что, в свою очередь, отражается на динамике бортовой качки и ускорениях, а в итоге и на нагрузках, действующих на контейнеры в штабеле. Для достижения поставленной цели в работе выполнена сравнительная оценка влияния фактической аппликаты ЦТ контейнера на нагрузки, действующие на палубный контейнерный штабель.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

В процессе выполнения данного исследования были проанализированы правила расчета крепления контейнеров разных классификационных обществ, в частности DNV, NK, LR и ABS. Каждое из этих классификационных обществ имеет большой опыт нормативного обеспечения безопасности морской перевозки контейнеров. При этом разработанные ими правила имеют и свои особенности. Например, методика расчета, предлагаемая LR, включает большое количество

коэффициентов, которые, с одной стороны, позволяют избегать дополнительных вычислений, но с другой, — не дают в полной мере понять, каким образом эти коэффициенты были получены, что не очень удобно с точки зрения выполняемого исследования. Международное классификационное общество DNV предлагает для свободного использования программу расчета крепления контейнеров StowLash, позволяющую выполнить расчет крепления для заданных условий. Однако эта программа не позволяет устанавливать индивидуальное значение аппликаты центра тяжести контейнеров, что с учетом цели настоящего исследования является основным недостатком существующих методик расчета.

Поскольку настоящая работа является продолжением исследований, выполненных в работе [10], в качестве экспериментального судна здесь также используется крупнотоннажный контейнеровоз С-класса японской компании Mitsui O.S.K. Line MOL Courage (ex. APL Poland) вместимостью 8110 ДФЭ, находящегося под надзором Международного классификационного общества НК, в данном исследовании предпочтение было отдано методике расчетов, разработанной классификационным обществом НК<sup>1</sup>. Эта методика позволила учесть следующие аспекты, необходимые для данного исследования.

*Нагрузки, действующие на контейнер при бортовой качке.* При бортовой качке каждый контейнер в палубном штабеле испытывает нагрузки, действующие по следующим четырем сценариям:

1. Вертикальное ускорение (подъем) в восходящем направлении. Ускорение вращения (крен) в восходящем направлении.

2. Вертикальное ускорение (подъем) в восходящем направлении. Ускорение вращения (крен) в нисходящем направлении.

3. Вертикальное ускорение (подъем) в нисходящем направлении. Ускорение вращения (крен) в восходящем направлении.

4. Вертикальное ускорение (подъем) в нисходящем направлении. Ускорение вращения (крен) в нисходящем направлении.

Расчет схематически указанных на рис. 1 сил выполняется по формулам:

$$1. F_v = M(g \cos \theta + 0,1a_{heave} + |y_i| a_{roll}); \quad (1)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc}) a_{roll}). \quad (2)$$

$$2. F_v = M(g \cos \theta + 0,1a_{heave} - |y_i| a_{roll}); \quad (3)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc}) a_{roll}). \quad (4)$$

$$3. F_v = M(g \cos \theta - 0,1a_{heave} + |y_i| a_{roll}); \quad (5)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc}) a_{roll}). \quad (6)$$

$$4. F_v = M(g \cos \theta - 0,1a_{heave} - |y_i| a_{roll}); \quad (7)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc}) a_{roll}), \quad (8)$$

где  $F_v$  — нераспределенная (общая) сила, действующая на контейнер в вертикальном направлении;  
 $F_t$  — нераспределенная (общая) сила, действующая на контейнер горизонтально в поперечном направлении;

$M$  — масса контейнера;

$z_i$  — аппликата ЦТ контейнера от основной плоскости;

$y_i$  — расстояние от диаметральной плоскости (ДП) судна до ЦТ контейнера;

$Z_{rc}$  — аппликата центра вращения бортовой качки судна от основной плоскости;

$C_y$  — коэффициент, учитывающий ускорение носовой оконечности судна при рыскании.

<sup>1</sup> Guidelines for Container Stowage and Securing Arrangements (Edition 2.1) [English], July 2020, ClassNK.

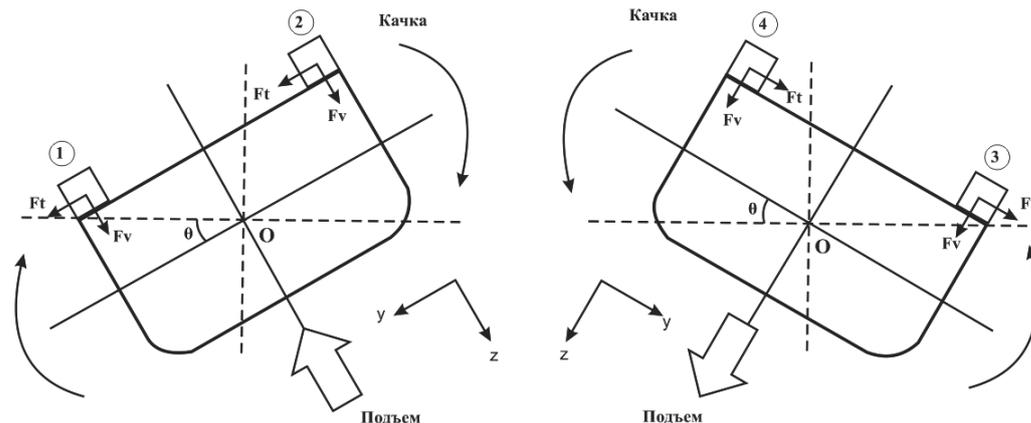


Рис. 1. Схема действия сил на палубный контейнерный штабель при бортовой качке

В данной работе в качестве расчетного был использован первый сценарий, предполагающий большие значения нагрузок, действующих на контейнерный штабель.

*Нагрузки, действующие на элементы конструкции контейнера.* С точки зрения воздействия нагрузок, разделяют два вида контейнерных штабелей: незакрепленный и закрепленный. Крепление штабеля предполагает использование специальных крепежных штанг. Незакрепленный штабель фиксируется только с помощью твистлоков. С точки зрения воздействия ветровой нагрузки различают внешний и внутренний штабель так, что внешний штабель подвержен ветровой нагрузке в отличие от внутреннего.

В данном исследовании рассмотрен вариант с незакрепленным штабелем. Такой выбор обусловлен тем, что исследуемые принципы и взаимодействия имеют место и в том и в другом варианте, но расчеты незакрепленного штабеля являются менее громоздкими при равной показательности. Далее рассмотрены нагрузки, действующие на незакрепленный контейнерный штабель.

1. Поперечная нагрузка, действующая на верхние угловые фитинги  $F_{ti}$  и нижние угловые фитинги  $F_{tbi}$  контейнера:

$$F_{ti} = r_{VCG} \frac{F_t}{2} + \frac{P_i}{2}; \quad (9)$$

$$F_{tbi} = (1 - r_{VCG}) \frac{F_t}{2} + \frac{P_i}{2}, \quad (10)$$

где  $r_{VCG}$  — отношение аппликаты ЦТ контейнера к его высоте (стандартное значение составляет 0,5 (50 % высоты контейнера));  $P_i$  — сила давления ветра на боковую стенку контейнера.

2. Вертикальная нагрузка  $F_{vi}$ , действующая на каждый днищевой угловой фитинг контейнера в  $i$ -м ярусе, рассчитывается с использованием вертикальной нагрузки ( $F_v$ ):

$$F_{vi} = \frac{F_v}{4}. \quad (11)$$

3. Сила поперечной деформации (Racking Load), действующая на верхний угловой фитинг с одной стороны торцевых стенок контейнера в  $i$ -м ярусе, за счет поперечных продольных нагрузок:

$$F_{rc} = \sum_{i=j}^n F_{ti} + \sum_{i=j+1}^n F_{tbi}. \quad (12)$$

4. Сдвигающая сила (Shear Load), действующая на каждый нижний угловой фитинг контейнера в  $i$ -м ярусе, за счет поперечных продольных нагрузок:

$$F_{sh} = 0,5 \sum_{i=j}^n (F_{ti} + F_{tbi}). \quad (13)$$

5. Сжимающая сила (Compressive Load), действующая на угловую стойку контейнера в  $i$ -м ярусе, за счет вертикальных нагрузок и опрокидывающих моментов, действующих на контейнеры:

$$F_{cp} = \sum_{i=j+1}^n F_{vi} + \sum_{i=j}^n \left( F_{mi} \frac{Z_i - Z_{j-1}}{W} \right) + \sum_{i=j}^{n-1} \left( F_{ib(i+1)} \frac{Z_i - Z_{j-1}}{W} \right). \quad (14)$$

6. Сжимающая сила (Compressive Load), действующая на нижний угловой фитинг контейнера в  $i$ -м ярусе, за счет вертикальных нагрузок и опрокидывающих моментов, действующих на контейнеры:

$$F_{ct} = \sum_{i=j}^n F_{vi} + \sum_{i=j}^n \left( F_{mi} \frac{Z_i - Z_{j-1}}{W} \right) + \sum_{i=j}^{n-1} \left( F_{ib(i+1)} \frac{Z_i - Z_{j-1}}{W} \right). \quad (15)$$

7. Подъемная сила (Lifting Load), действующая на угловую стойку контейнера в  $i$ -м ярусе, за счет вертикальных нагрузок и опрокидывающих моментов, действующих на контейнеры:

$$F_{lp} = - \sum_{i=j+1}^n F_{vi} + \sum_{i=j}^n \left( F_{mi} \frac{Z_i - Z_{j-1}}{W} \right) + \sum_{i=j}^{n-1} \left( F_{ib(i+1)} \frac{Z_i - Z_{j-1}}{W} \right). \quad (16)$$

8. Подъемная сила (Lifting Load), действующая на нижний угловой фитинг контейнера в  $i$ -м ярусе, за счет вертикальных нагрузок и опрокидывающих моментов, действующих на контейнеры:

$$F_{lt} = - \sum_{i=j}^n F_{vi} + \sum_{i=j}^n \left( F_{mi} \frac{Z_i - Z_{j-1}}{W} \right) + \sum_{i=j}^{n-1} \left( F_{ib(i+1)} \frac{Z_i - Z_{j-1}}{W} \right). \quad (17)$$

Схематически действующие силы представлены на рис. 2.

*Планирование эксперимента.* Для проведения эксперимента использовались следующие варианты формирования и размещения палубных контейнерных штабелей:

1. Параметры палубного контейнерного штабеля:

а) контейнерный штабель состоит из одного ряда и семи ярусов;

б) контейнеры в штабеле крепятся только с помощью твистлоков (дополнительные средства крепления не используются);

в) контейнерный штабель является внешним.

2. Размещение палубных контейнерных штабелей:

а) контейнерный штабель расположен в крайнем левом ряду в одном из носовых бэев;

б) контейнерный штабель расположен в ряду, близком к ДП судна, в одном из носовых бэев;

в) контейнерный штабель расположен в крайнем левом ряду в одном из бэев, близких к миделю;

г) контейнерный штабель расположен в ряду, близком к ДП судна, в одном из бэев, близких к миделю;

д) контейнерный штабель расположен в крайнем левом ряду в одном из кормовых бэев;

е) контейнерный штабель расположен в ряду, близком к ДП судна в одном из кормовых бэев.

3. Сочетание МЦВ и аппликаты ЦТ контейнера:

а) стандартная МЦВ, стандартная аппликата ЦТ контейнера;

б) стандартная МЦВ, пониженная аппликата ЦТ контейнера;

в) увеличенная МЦВ, стандартная аппликата ЦТ контейнера;

г) увеличенная МЦВ, пониженная аппликата ЦТ контейнера.

4. Сочетание массы и аппликаты ЦТ контейнера:

а) контейнеры с одинаковой массой и одинаковой аппликацией ЦТ;

б) контейнеры с одинаковой массой и разной аппликацией ЦТ;

в) контейнеры с разной массой и одинаковой аппликацией ЦТ;

г) контейнеры с разной массой и разной аппликацией ЦТ.

Таким образом, с учетом запланированных комбинаций, были составлены и просчитаны 96 вариантов экспериментальных расчетных контейнерных штабелей.

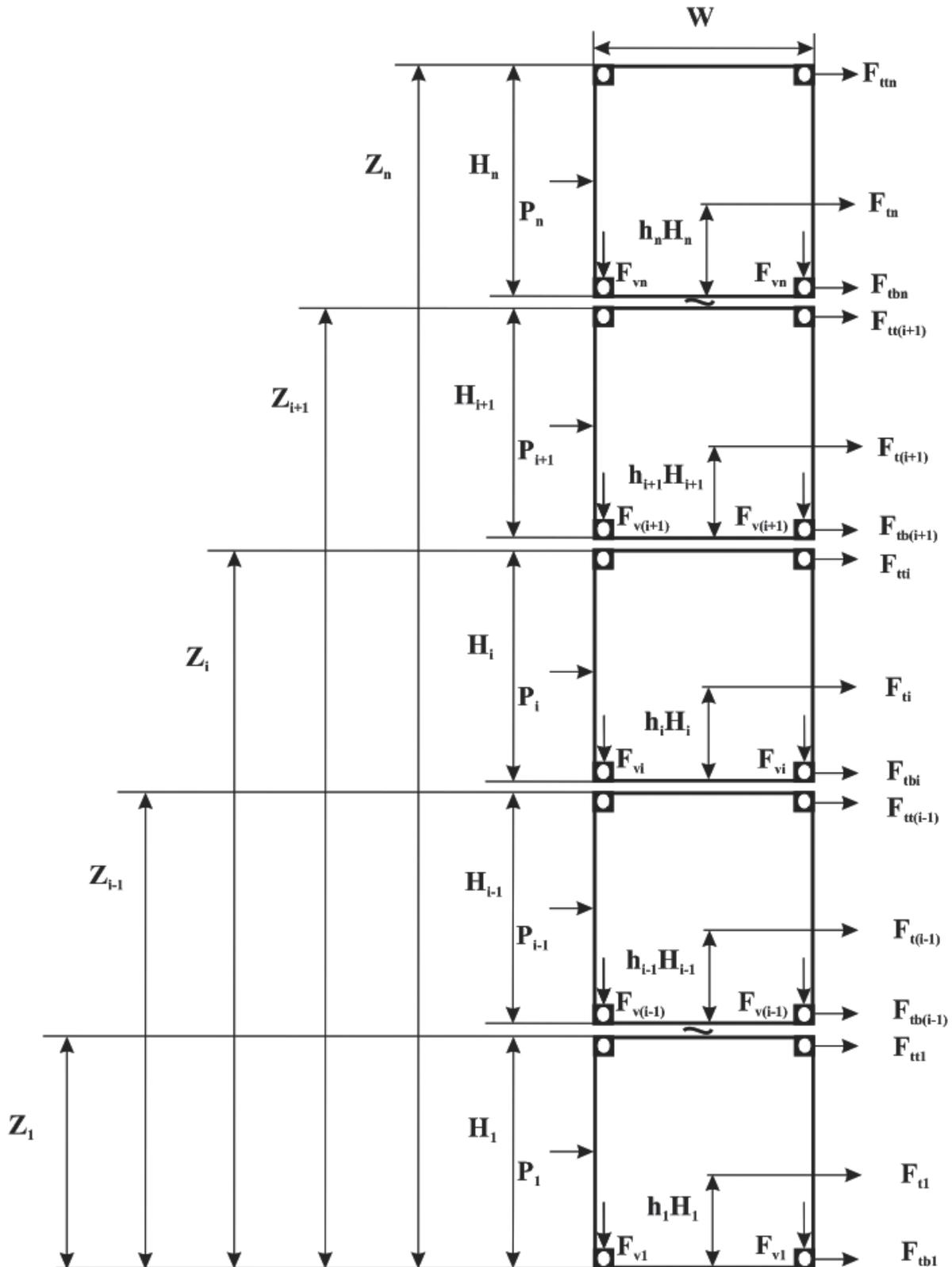


Рис. 2. Силы, действующие на внешний контейнерный штабель на палубе

### Результаты (Results)

Из рассмотренных 96 вариантов экспериментальных расчетных контейнерных штабелей более подробно были изучены результаты двенадцати вариантов, включающих штабели с контейнерами разной массы и с разными аппликатами ЦТ, что более характерно для практической

ситуации перевозки контейнеров. Также дополнительно были рассмотрены еще несколько вариантов формирования контейнерных штабелей с более значительным изменением МЦВ и аппликаты ЦТ контейнеров, которые могут встретиться на практике. Основные результаты некоторых характерных вариантов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные результаты расчета нагрузок на контейнерные штабели**

Параметр	Номер варианта формирования и размещения штабеля									
	1	1,1	2	2,1	3	3,1	3,2	4	4,1	4,2
Исходные параметры										
МЦВ	5,00	5,42	5,00	5,42	5,00	5,64	5,64	5,00	5,64	6,00
$y_i$	1,25	1,25	21,55	21,55	21,55	21,55	21,55	21,55	21,55	21,55
$x_i$	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8	244,8
$r_{VCG1}$	0,50	0,45	0,50	0,45	0,50	0,10	0,40	0,50	0,40	0,40
$r_{VCG2}$	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,10	0,40	0,50	0,40	0,40
$r_{VCG3}$	0,50	0,35	0,50	0,35	0,50	0,20	0,41	0,50	0,41	0,41
$r_{VCG4}$	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,25	0,41	0,50	0,41	0,41
$r_{VCG5}$	0,50	0,25	0,50	0,25	0,50	0,30	0,42	0,50	0,42	0,42
$r_{VCG6}$	0,50	0,10	0,50	0,10	0,50	0,35	0,42	0,50	0,42	0,42
$r_{VCG7}$	0,50	0,44	0,50	0,44	0,50	0,44	0,42	0,50	0,42	0,42
$M_1$	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
$M_2$	25,00	25,00	25,00	25,00	30,00	30,00	30,00	25,00	25,00	25,00
$M_3$	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	30,00	30,00	30,00
$M_4$	15,00	15,00	15,00	15,00	20,00	20,00	20,00	10,00	10,00	10,00
$M_5$	14,00	14,00	14,00	14,00	10,00	10,00	10,00	15,00	15,00	15,00
$M_6$	10,00	10,00	10,00	10,00	6,00	6,00	6,00	3,00	3,00	3,00
$M_7$	5,00	5,00	5,00	5,00	3,00	3,00	3,00	6,00	6,00	6,00
Нераспределенная вертикальная нагрузка										
$F_{v1}$	282,13	281,75	320,46	<b>323,87</b>	320,46	<b>325,69</b>	<b>325,69</b>	320,46	<b>325,69</b>	<b>328,72</b>
$F_{v2}$	235,11	234,79	267,05	<b>269,89</b>	320,46	<b>325,69</b>	<b>325,69</b>	267,05	<b>271,41</b>	<b>273,94</b>
$F_{v3}$	188,09	187,83	213,64	<b>215,92</b>	213,64	<b>217,13</b>	<b>217,13</b>	320,46	<b>325,69</b>	<b>328,72</b>
$F_{v4}$	141,07	140,88	160,23	<b>161,94</b>	213,64	<b>217,13</b>	<b>217,13</b>	106,82	<b>108,56</b>	<b>109,57</b>
$F_{v5}$	131,66	131,48	149,55	<b>151,14</b>	106,82	<b>108,56</b>	<b>108,56</b>	160,23	<b>162,85</b>	<b>164,36</b>
$F_{v6}$	94,04	93,92	106,82	<b>107,96</b>	64,09	<b>65,14</b>	<b>65,14</b>	32,05	<b>32,57</b>	<b>32,87</b>
$F_{v7}$	47,02	46,96	53,41	<b>53,98</b>	32,05	<b>32,57</b>	<b>32,57</b>	64,09	<b>65,14</b>	<b>65,74</b>
Нераспределенная поперечная нагрузка										
$F_{r1}$	169,85	<b>174,71</b>	169,85	<b>174,71</b>	169,85	<b>175,06</b>	<b>177,08</b>	169,85	<b>177,08</b>	<b>181,53</b>
$F_{r2}$	146,49	<b>150,76</b>	146,49	<b>150,76</b>	175,78	<b>181,89</b>	<b>183,92</b>	146,49	<b>153,27</b>	<b>157,40</b>
$F_{r3}$	121,15	<b>124,74</b>	121,15	<b>124,74</b>	121,15	<b>126,27</b>	<b>127,22</b>	181,72	<b>90,82</b>	<b>196,31</b>
$F_{r4}$	93,83	<b>96,98</b>	93,83	<b>96,98</b>	125,10	<b>131,05</b>	<b>131,77</b>	62,55	<b>65,89</b>	<b>67,89</b>

Таблица 1  
 (Продолжение)

$F_{i5}$	90,34	<b>93,10</b>	90,34	<b>93,10</b>	64,53	<b>67,92</b>	<b>68,19</b>	96,80	<b>102,28</b>	<b>105,55</b>
$F_{i6}$	66,51	<b>68,36</b>	66,51	<b>68,36</b>	39,91	<b>42,19</b>	<b>42,28</b>	19,95	<b>21,14</b>	<b>21,85</b>
$F_{i7}$	34,24	<b>35,63</b>	34,24	<b>35,63</b>	20,55	<b>21,84</b>	<b>21,82</b>	41,09	<b>43,65</b>	<b>45,16</b>
Нагрузка на верхние угловые фитинги контейнеров										
$F_{it1}$	48,20	45,04	48,20	45,04	48,20	14,47	41,14	48,20	41,14	42,02
$F_{it2}$	42,36	35,88	42,36	35,88	49,69	14,82	42,51	42,36	36,38	37,19
$F_{it3}$	36,03	27,56	36,03	27,56	36,03	18,35	31,80	51,17	44,84	45,95
$F_{it4}$	29,20	25,12	29,20	25,12	37,02	22,10	32,74	21,38	19,23	19,63
$F_{it5}$	28,33	17,37	28,33	17,37	21,87	15,91	20,04	29,94	27,20	27,88
$F_{it6}$	22,37	9,15	22,37	9,15	15,72	13,10	14,60	10,73	10,16	10,30
$F_{it7}$	14,30	13,57	14,30	13,57	10,88	10,53	10,30	16,01	14,89	15,19
Нагрузка на нижние угловые фитинги контейнеров										
$F_{ib1}$	48,20	<b>53,77</b>	48,20	<b>53,77</b>	48,20	<b>84,50</b>	<b>58,85</b>	48,20	<b>58,85</b>	<b>60,17</b>
$F_{ib2}$	42,36	<b>50,96</b>	42,36	<b>50,96</b>	49,69	<b>87,57</b>	<b>60,90</b>	42,36	<b>51,70</b>	<b>52,93</b>
$F_{ib3}$	36,03	<b>46,27</b>	36,03	<b>46,27</b>	36,03	<b>56,23</b>	<b>43,25</b>	51,17	<b>62,01</b>	<b>63,62</b>
$F_{ib4}$	29,20	<b>34,82</b>	29,20	<b>34,82</b>	37,02	<b>54,87</b>	<b>44,60</b>	21,38	<b>25,16</b>	<b>25,74</b>
$F_{ib5}$	28,33	<b>40,64</b>	28,33	<b>40,64</b>	21,87	<b>29,49</b>	<b>25,50</b>	29,94	<b>35,38</b>	<b>36,32</b>
$F_{ib6}$	22,37	<b>36,49</b>	22,37	<b>36,49</b>	15,72	<b>19,43</b>	<b>17,98</b>	10,73	<b>11,85</b>	<b>12,05</b>
$F_{ib7}$	14,30	<b>15,71</b>	14,30	<b>15,71</b>	10,88	<b>11,84</b>	<b>12,05</b>	16,01	<b>18,38</b>	<b>18,81</b>
Сила поперечной деформации										
$F_{rc1}$	393,38	<b>398,56</b>	393,38	<b>398,56</b>	390,61	368,71	<b>397,40</b>	391,40	<b>398,32</b>	<b>407,62</b>
$F_{rc2}$	302,81	302,57	302,81	302,57	292,72	266,67	<b>295,36</b>	300,83	<b>305,48</b>	<b>312,68</b>
$F_{rc3}$	224,42	220,42	224,42	220,42	207,00	195,62	<b>209,61</b>	207,30	<b>207,09</b>	<b>211,86</b>
$F_{rc4}$	159,20	158,04	159,20	158,04	133,96	122,40	133,21	134,75	<b>137,09</b>	<b>140,17</b>
$F_{rc5}$	101,67	92,27	101,67	92,27	75,07	70,81	74,98	83,43	82,48	<b>84,22</b>
$F_{rc6}$	50,97	38,42	50,97	38,42	37,47	35,47	36,96	42,76	<b>43,43</b>	<b>44,30</b>
$F_{rc7}$	14,30	13,57	14,30	13,57	10,88	10,53	10,30	16,01	14,89	15,19
Сдвигающая сила										
$F_{sh1}$	220,79	<b>226,17</b>	220,79	<b>226,17</b>	219,41	<b>226,60</b>	<b>228,12</b>	219,80	<b>228,58</b>	<b>233,90</b>
$F_{sh2}$	172,59	<b>176,76</b>	172,59	<b>176,76</b>	171,20	<b>177,12</b>	<b>178,13</b>	171,60	<b>178,59</b>	<b>182,80</b>
$F_{sh3}$	130,22	<b>133,34</b>	130,22	<b>133,34</b>	121,52	<b>125,92</b>	<b>126,43</b>	129,24	<b>134,55</b>	<b>137,74</b>
$F_{sh4}$	94,20	<b>96,43</b>	94,20	<b>96,43</b>	85,49	<b>88,64</b>	<b>88,90</b>	78,06	<b>81,13</b>	<b>82,95</b>
$F_{sh5}$	65,00	<b>66,46</b>	65,00	<b>66,46</b>	48,47	<b>50,15</b>	<b>50,24</b>	56,68	<b>58,93</b>	<b>60,27</b>
$F_{sh6}$	36,67	<b>37,45</b>	36,67	<b>37,45</b>	26,60	<b>27,45</b>	<b>27,47</b>	26,74	<b>27,64</b>	<b>28,17</b>
$F_{sh7}$	14,30	<b>14,64</b>	14,30	<b>14,64</b>	10,88	<b>11,18</b>	<b>11,18</b>	16,01	<b>16,63</b>	<b>17,00</b>
Сжимающая сила, действующая на угловую стойку										
$F_{cp1}$	630,45	<b>635,66</b>	658,87	<b>666,90</b>	655,82	636,15	<b>666,94</b>	656,75	<b>668,04</b>	<b>680,24</b>

Таблица 1  
 (Окончание)

$F_{cp2}$	475,50	475,03	495,94	<b>497,50</b>	471,75	446,36	<b>477,17</b>	493,82	<b>501,60</b>	<b>510,93</b>
$F_{cp3}$	344,33	339,90	358,39	355,34	326,34	315,82	<b>330,84</b>	313,31	<b>314,57</b>	<b>320,54</b>
$F_{cp4}$	239,06	237,72	248,32	247,90	194,53	182,95	<b>194,55</b>	208,73	<b>212,29</b>	<b>216,20</b>
$F_{cp5}$	144,40	134,26	149,19	139,53	104,61	100,43	<b>104,91</b>	113,58	112,96	<b>115,05</b>
$F_{cp6}$	66,47	52,98	68,07	54,73	48,23	46,21	47,81	61,92	<b>62,90</b>	<b>63,99</b>
$F_{cp7}$	15,35	14,56	15,35	14,56	11,68	11,30	11,06	17,19	15,98	16,31
Сжимающая сила, действующая на твистлок										
$F_{ct1}$	700,98	<b>706,10</b>	738,99	<b>747,87</b>	735,93	717,57	<b>748,36</b>	736,87	<b>749,46</b>	<b>762,42</b>
$F_{ct2}$	534,28	533,73	562,70	<b>564,97</b>	551,87	527,78	<b>558,59</b>	560,58	<b>569,45</b>	<b>579,42</b>
$F_{ct3}$	391,36	386,86	411,80	409,32	379,75	370,10	<b>385,12</b>	393,42	<b>395,99</b>	<b>402,72</b>
$F_{ct4}$	274,32	272,94	288,38	<b>288,39</b>	247,94	237,23	<b>248,84</b>	235,43	<b>239,43</b>	<b>243,59</b>
$F_{ct5}$	177,31	167,13	186,57	177,31	131,31	127,57	<b>132,05</b>	153,64	<b>153,67</b>	<b>156,14</b>
$F_{ct6}$	89,98	76,46	94,77	81,72	64,26	62,50	64,09	69,93	<b>71,04</b>	<b>72,20</b>
$F_{ct7}$	27,11	26,30	28,70	28,06	19,69	19,44	19,20	33,21	32,26	32,75
Подъемная сила, действующая на угловую стойку										
$F_{lp1}$	211,95	<b>217,73</b>	183,52	<b>186,49</b>	180,46	153,03	<b>183,83</b>	181,40	<b>184,92</b>	<b>192,64</b>
$F_{lp2}$	174,56	174,50	154,11	152,03	156,63	126,09	<b>156,90</b>	151,99	<b>154,19</b>	<b>160,30</b>
$F_{lp3}$	137,44	133,28	123,38	117,84	118,04	104,12	<b>119,13</b>	131,71	130,01	<b>134,27</b>
$F_{lp4}$	102,69	101,54	93,43	91,36	93,04	79,82	91,42	80,54	<b>82,01</b>	<b>84,71</b>
$F_{lp5}$	73,86	63,82	69,07	58,56	56,54	51,58	56,05	65,51	64,11	<b>65,75</b>
$F_{lp6}$	42,96	29,50	41,36	27,74	32,21	29,93	31,52	29,87	<b>30,33</b>	<b>31,11</b>
$F_{lp7}$	15,35	14,56	15,35	14,56	11,68	11,30	11,06	17,19	15,98	16,31
Подъемная сила, действующая на твистлок										
$F_{lt1}$	141,41	<b>147,29</b>	103,40	<b>105,52</b>	100,35	71,61	<b>102,40</b>	101,28	<b>103,50</b>	<b>110,45</b>
$F_{lt2}$	115,78	<b>115,80</b>	87,35	84,56	76,51	44,67	75,48	85,23	<b>86,34</b>	<b>91,81</b>
$F_{lt3}$	90,41	86,32	69,97	63,86	64,63	49,84	<b>64,85</b>	51,59	48,58	<b>52,09</b>
$F_{lt4}$	67,42	66,33	53,37	50,88	39,63	25,53	37,13	53,84	<b>54,87</b>	<b>57,31</b>
$F_{lt5}$	40,95	30,95	31,68	20,77	29,83	24,43	28,91	25,46	23,39	24,66
$F_{lt6}$	19,45	6,02	14,66	0,75	16,19	13,64	15,24	21,86	<b>22,19</b>	<b>22,90</b>
$F_{lt7}$	3,60	2,82	2,00	1,07	3,66	3,16	2,92	1,17	-0,30	0,13

$x_i$  — продольное отстояние от кормового перпендикуляра до ЦТ контейнера.

Примечания:

1. Жирным шрифтом выделены значения сил, увеличившихся относительно соответствующих исходных значений.
2. Варианты 1–4 являются исходными, варианты с номерами 1.1, 2.1 и т. д. — модифицированными на основе исходных.
3. Вариант 1 соответствует варианту с условиями 1б – 2а – 3г. Вариант 1.1 соответствует варианту с условиями 1б – 2г – 3г. Вариант 2 соответствует вариантам 1а – 2а – 3 г. Вариант 1.1 соответствует вариантам 1а – 2г – 3 г. Вариант 3 является модифицированным вариантом 2 с изменением распределения контейнеров по массе. Варианты 3.1 и 3.2 являются модифицированными вариантами 3 с изменением МЦВ и распределения аппликат ЦТ контейнеров. Вариант 4 является модифицированным вариантом 2 с изменением распределения контейнеров по массе. Варианты 4.1 и 4.2 являются модифицированными вариантами 4 с изменением МЦВ и распределения аппликат ЦТ контейнеров.

Анализ рассмотренных вариантов показал следующие результаты:

1. При понижении аппликаты ЦТ контейнеров в штабеле и одновременном увеличении МЦВ наблюдалось увеличение значений некоторых сил, действующих на контейнерный штабель:

а) общая вертикальная нагрузка  $F_v$  увеличилась для всех случаев размещения штабелей в крайнем ряду;

б) общая поперечная нагрузка  $F_t$  увеличилась для всех случаев размещения штабелей как в крайнем ряду, так и вблизи ДП судна;

в) сила поперечной деформации  $F_{rc}$  увеличилась в некоторых случаях и с разными результатами, зависящими от конкретных характеристик штабеля (масса контейнеров, аппликата ЦТ и распределение по ярусам);

г) распределенная сдвигающая нагрузка  $F_{sh}$  увеличилась для всех случаев размещения штабелей как в крайнем ряду, так и вблизи ДП судна;

д) распределенные сжимающие нагрузки  $F_{cp}$  и  $F_{ct}$ , действующие на угловые стойки контейнеров и твистлоки, увеличились у контейнеров первого и второго ярусов;

е) распределенная подъемная сила, действующая на угловую стойку контейнера  $F_{lp}$ , увеличилась у контейнеров первого яруса;

ж) распределенная подъемная сила, действующая на твистлок контейнера  $F_{lt}$ , увеличилась у контейнеров первого яруса при размещении в крайнем ряду и у контейнеров первого и второго яруса при размещении в ряду, близком к ДП судна.

2. При размещении контейнерного штабеля в носовой части судна, все действующие на него нагрузки, за исключением вертикальной нагрузки, увеличиваются по сравнению с такими же контейнерными штабелями, расположенными на миделе и в корме.

3. При размещении контейнерного штабеля в крайнем ряду действующие на него вертикальная  $F_v$  и сжимающие  $F_{cp}$  и  $F_{ct}$  нагрузки увеличиваются, а подъемные силы  $F_{lp}$  и  $F_{lt}$  уменьшаются по сравнению с таким же штабелем, расположенном ближе к ДП. Другие нагрузки практически не изменяются.

4. Варианты 3.1, 4.1 и 4.2 являются наиболее неблагоприятными по нагрузкам на контейнерные штабели из числа рассмотренных вариантов и содержат наибольшее количество увеличенных нагрузок: 46, 51 и 57 увеличений соответственно.

5. Анализ максимальных увеличений сил приведен в табл. 2.

Таблица 2

Анализ максимальных увеличений нагрузок на контейнерные штабели

Сила (нагрузка)	Норма, кН	Максимальное увеличение, кН (% от нормы)	Вариант
$F_{tti}$	150	Нет	Нет
$F_{tbi}$	150	37,88 (25,25 %)	3.1
$F_{rc}$	150	16,22 (10,81 %)	4.2
$F_{sh}$	150	14,10 (9,4 %)	4.2
$F_{cp}$	942	23,49 (2,49 %)	4.2
$F_{ct}$	942	25,55 (2,71 %)	4.2
$F_{lp}$	250	11,24 (4,51 %)	4.2
$F_{lt}$	250	9,17 (3,67 %)	4.2

### Обсуждение (Discussion)

В данном исследовании выполнена оценка МЦВ и аппликаты ЦТ контейнеров на нагрузки, возникающие в палубном контейнерном штабеле. Для этого на основе используемых в работе расчетных формул сформулирована схематическая зависимость, приведенная на рис. 3, где стрелками показаны воздействия одного фактора на другой. Каждому воздействию был присвоен свой

номер и знак «+» или «-», означающий прямую и обратную зависимости соответственно. Например, воздействие 1 подразумевает такое влияние аппликаты ЦТ контейнера ( $VCG_c$ ) на МЦВ судна ( $GM$ ), что увеличение  $VCG_c$  приводит к уменьшению  $GM$ , и наоборот; воздействие 16 подразумевает, что увеличение поперечной силы  $F_{ti}$ , оказывающей влияние на торцевые стенки контейнера в ярусе  $i$ , приведет к увеличению поперечной силы, действующей на верхние угловые фитинги  $F_{tti}$  этого же контейнера, а ее уменьшение, соответственно, к уменьшению.

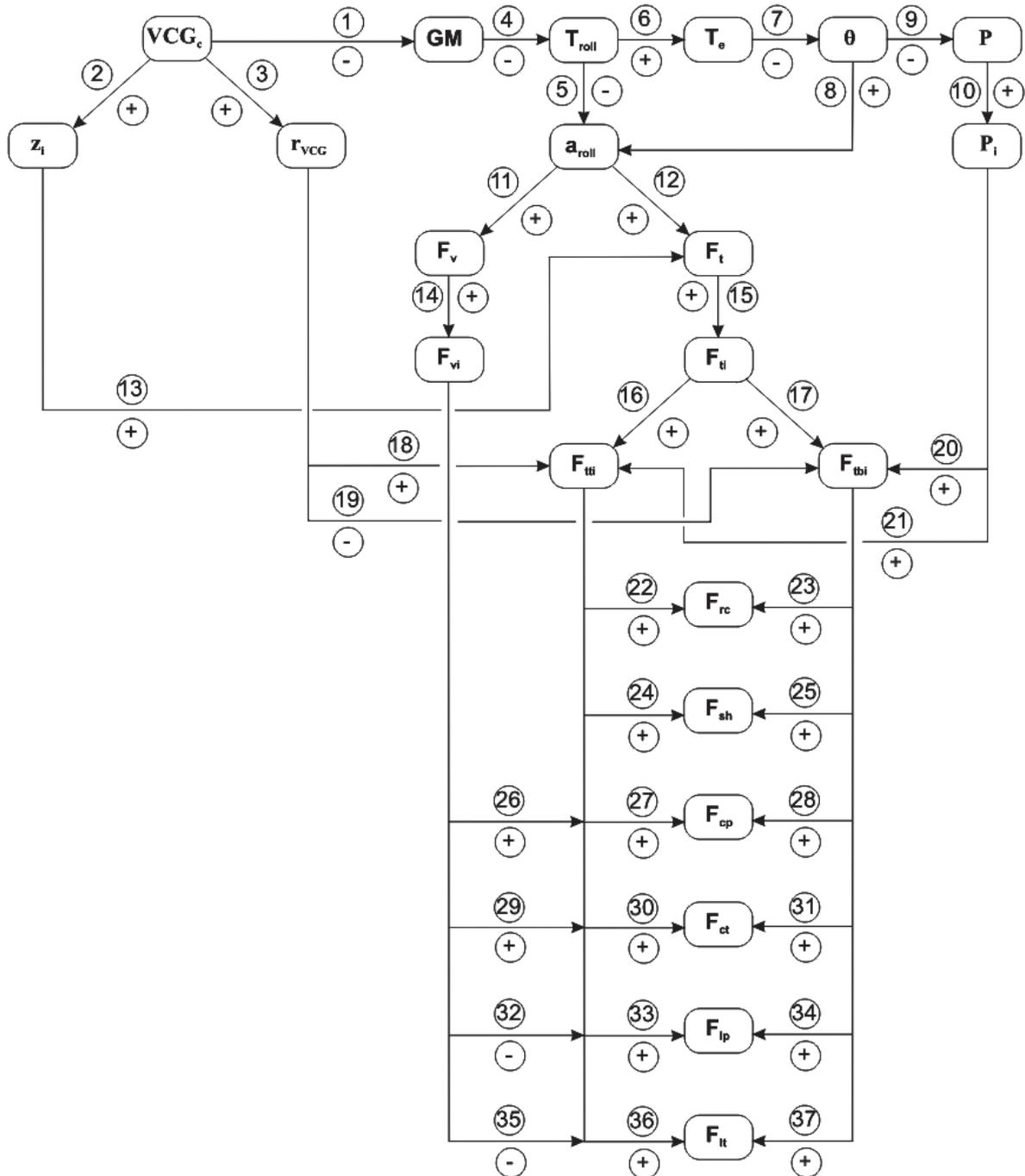


Рис. 3. Диаграмма зависимости нагрузок на палубный контейнерный штабель от МЦВ и аппликаты ЦТ контейнеров

Из приведенной на рис. 3 диаграммы можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение  $GM$  во всех случаях приводит к увеличению ускорения бортовой качки ( $a_{roll}$ ). При этом для более высоких ярусов контейнеров коэффициент ускорения будет больше.

2. Увеличение  $GM$  приводит к увеличению всех нагрузок, действующих на контейнерный штабель. При этом, однако, действуют два разнонаправленных фактора: факторы нагрузки, обусловленные увеличением  $a_{roll}$ , будут возрастать (воздействия  $I1$  и  $I2$ ), а факторы нагрузки, обусловленные давлением ветра  $p$ , будут снижаться, поскольку увеличение угла крена  $\theta$  при бортовой качке уменьшает эффективную площадь парусности контейнера (воздействие  $9$ ).

3. Влияние  $VCG_c$  на силы, действующие на контейнерный штабель, оценить сложнее. Уменьшение  $VCG_c$  само по себе ведет к уменьшению значения результирующей  $F_t$  (воздействие  $I3$ ). Но если рассматривать это воздействие в комплексе, т. е. учитывать, что уменьшение  $VCG_c$  способствует увеличению  $GM$  и соответствующему изменению зависимых факторов ( $\theta$  и  $a_{roll}$ ), то в итоге значение силы  $F_t$  может и уменьшиться, и увеличиться.

Уменьшение  $VCG_c$  в составе величины  $r_{VCG}$  приводит к уменьшению поперечных сил, действующих на верхние угловые фитинги контейнеров в штабеле ( $F_{ti}$ ) (воздействие  $I8$ ), но одновременно приводит к увеличению поперечных сил, действующих на нижние угловые фитинги ( $F_{tbi}$ ) (воздействие  $I9$ ). Это разнонаправленное воздействие отражается на всех нагрузках, обусловленных действием этих сил. От того, какое воздействие окажется больше, будет зависеть итоговое влияние нагрузок на контейнерный штабель, обусловленных значением  $VCG_c$ .

4. Одновременное изменение  $GM$  и  $VCG_c$  контейнеров оказывает еще более сложно прогнозируемое влияние на нагрузки контейнерного штабеля. Если увеличение  $GM$  вызвано только снижением  $VCG_c$  относительно стандартного значения, то большинство нагрузок на контейнеры, у которых  $VCG_c$  ниже, будут меньше, чем на контейнеры, у которых  $VCG_c$  выше. Таким образом, вполне реальна ситуация, при которой увеличение  $GM$  приведет к превышению допустимых нагрузок для одних контейнеров, при том, что для других эти нагрузки уменьшатся.

5. Повреждение даже одного контейнера в штабеле, из-за превышения допустимых нагрузок, может привести к обрушению всего штабеля и даже соседних штабелей. Поэтому критически важно учитывать нагрузки на каждый конкретный контейнер в штабеле.

### Заключение (Conclusion)

В основе проведенного исследования лежит подтвержденный в работах [9], [10] вывод о том, что аппликата ЦТ контейнера оказывает влияние на МЦВ судна, а также гипотеза о том, что и сама аппликата ЦТ контейнера, и МЦВ оказывают влияние на величину нагрузок, действующих на контейнерный штабель. Результаты, полученные в настоящей работе, подтверждают выдвинутую гипотезу. При этом экспериментальные расчеты показали, что влияние аппликаты ЦТ контейнера на нагрузки, действующие на контейнерный штабель, неоднозначно. Предполагалось, что увеличение ускорения бортовой качки, вызванное увеличением МЦВ из-за снижения аппликаты ЦТ контейнеров, приведет к увеличению всех нагрузок, действующих на контейнеры. Однако было установлено, что отдельно учитываемое снижение аппликаты ЦТ приводит к снижению некоторых нагрузок на контейнеры. При этом одновременное увеличение МЦВ влечет за собой увеличение этих нагрузок. Таким образом, снижение аппликаты ЦТ контейнера приводит к разнонаправленным изменениям нагрузок, а итоговое изменение будет зависеть от сочетания нескольких факторов, показанных на рис. 3.

Современные крупнотоннажные контейнеровозы могут перевозить на палубе более 500 штабелей контейнеров. Каждый штабель в большинстве случаев имеет свою конфигурацию по количеству контейнеров, их массе и аппликатам ЦТ. Одни и те же внешние и внутренние факторы могут привести к разным нагрузкам, действующим на каждый отдельный штабель. Это подтверждает необходимость учета аппликаты ЦТ для каждого контейнера на этапе составления «Грузового плана» контейнеровоза вместо использования стандартной аппликаты, как это принято в настоящее время. Как недостаточная, так и избыточная МЦВ, так же, как и пониженный или повышенный ЦТ контейнера, могут привести к неблагоприятным с точки зрения безопасности последствиям.

Методики расчета, разработанные классификационными обществами, предполагают учет индивидуальных значений аппликаты ЦТ контейнеров, но использование на практике специализированных

программ расчета систем крепления, в которых применяются стандартные значения аппликат ЦТ контейнеров, оставляет рассматриваемую проблему нерешенной. Для ее эффективного решения, в дополнение к рекомендациям, приведенным в работе [10], считается необходимым учитывать фактические значения аппликат ЦТ каждого отдельного контейнера в специализированных программах.

Данные о фактической аппликате ЦТ каждого контейнера так же, как и его проверенная масса брутто, могут включаться в грузовые документы и передаваться участникам процесса планирования загрузки в рамках системы оперативного контроля грузовых операций контейнероза, предложенной в работе [11].

Дальнейшие исследования планируется направить на выявление зависимостей для характерных сочетаний значений МЦВ и аппликат ЦТ контейнеров, при которых нагрузки на контейнерный штабель будут достигать минимальных и максимальных значений. Результаты исследований также планируется использовать для оценки влияния фактической МЦВ контейнероза на формирование условий, способствующих возникновению параметрической бортовой качки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Р. В. О нормировании ускорений при качке судов с избыточной остойчивостью / Р. В. Борисов, А. А. Лузянин // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2018. — № 4–1 (42). — С. 42–48.
2. De Souza V. A. Study on the dynamic response of container stack using non-linear finite element analysis. Doctor of philosophy thesis / V. A. de Souza. — University of Tokyo, 2010. — 96 p.
3. Kirkayak L. On the vibrational characteristics of a two-tier scaled container stack / L. Kirkayak, V. A. de Souza, K. Suzuki, H. Ando, H. Sueoka // *Journal of marine science and technology*. — 2011. — Vol. 16. — Is. 3. — Pp. 354–365. DOI: 10.1007/s00773-011-0129-y.
4. De Souza V. A. Experimental and numerical analysis of container stack dynamics using a scaled model test / V. A. de Souza, L. Kirkayak, K. Suzuki, H. Ando, H. Sueoka // *Ocean Engineering*. — 2012. — Vol. 39. — Pp. 24–42. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.10.004.
5. Acanfora M. On the estimation of the design loads on container stacks due to excessive acceleration in adverse weather conditions / M. Acanfora, J. Montewka, T. Hinz, J. Matusiak // *Marine Structures*. — 2017. — Vol. 53. — Pp. 105–123. DOI: 10.1016/j.marstruc.2017.01.003.
6. Wolf V. Rule development for container stowage on deck / V. Wolf, I. Darie, H. Rathjed // *Third International Conference on Marine Structures — MARSTRUCT*. — London: Taylor & Francis Group, 2011. — Vol. 1. — Pp. 715–722.
7. Bandeira Guimaraes Neto A. C. Feasibility and benefit of different lashing arrangements for sea transport of containers on weather deck / A. C. Bandeira Guimaraes Neto. — West Pomeranian University of Technology, 2013. — 149 p.
8. Lee C. Lashing Force Prediction Model with Multimodal Deep Learning and AutoML for Stowage Planning Automation in Containerships / C. Lee, M. K. Lee, J. Y. Shin // *Logistics*. — 2021. — Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 1. DOI: 10.3390/logistics5010001.
9. Царик Р. С. Оценка влияния положения центра тяжести контейнера на метацентрическую высоту контейнероза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 6 (40). — С. 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70.
10. Царик Р. С. Оценка влияния стандартного и фактического центров тяжести контейнера с типовым размещением груза на метацентрическую высоту контейнероза / Р. С. Царик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 17–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-17-28.
11. Царик Р. С. Система оперативного контроля грузовых операций контейнероза (СОКГОК) / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2015. — № 2 (75). — С. 16–23.

### REFERENCES

1. Borisov, Rudolf V., and Alexander A. Luzjanin. "About normalization of accelerations during the motions of vessels with excessive stability." *Marine Intelligent Technologies* 4–1(42) (2018): 42–48.

2. De Souza, Vinicius Aguiar. Study of the dynamic response of container stack using non-linear finite element analysis. Doctor of philosophy thesis. University of Tokyo, 2010.
3. Kirkayak, Levent, Vinicius Aguiar de Souza, Katsuyuki Suzuki, Hideyuki Ando, and Hidetoshi Sueoka. “On the vibrational characteristics of a two-tier scaled container stack.” *Journal of marine science and technology* 16.3 (2011): 354–365. DOI: 10.1007/s00773-011-0129-y.
4. De Souza, Vinicius Aguiar, Levent Kirkayak, Katsuyuki Suzuki, Hideyuki Ando, and Hidetoshi Sueoka. “Experimental and numerical analysis of container stack dynamics using a scaled model test.” *Ocean Engineering* 39 (2012): 24–42. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.10.004.
5. Acanfora, Maria, Jakub Montewka, Tomasz Hinz, and Jerzy Matusiak. “On the estimation of the design loads on container stacks due to excessive acceleration in adverse weather conditions.” *Marine Structures* 53 (2017): 105–123. DOI: 10.1016/j.marstruc.2017.01.003.
6. Wolf, V., I. Darie, and H. Rathjed. “Rule development for container stowage on deck.” *Third International Conference on Marine Structures — MARSTRUCT*. Vol. 1. London: Taylor & Francis Group, 2011. 715–722.
7. Bandeira Guimaraes Neto, Antonio Carlos. Feasibility and benefit of different lashing arrangements for sea transport of containers on weather deck. West Pomeranian University of Technology, 2013.
8. Lee, Chaemin, Mun Keong Lee, and Jae Young Shin. “Lashing Force Prediction Model with Multimodal Deep Learning and AutoML for Stowage Planning Automation in Containerships.” *Logistics* 5.1 (2021): 1. DOI: 10.3390/logistics5010001.
9. Tsarik, Ruslan Stanislavovich, and Denis Aleksandrovich Akmaykin. “Evaluation of influence of container’s center of gravity position on container ship’s metacentric height.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(40) (2016): 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70.
10. Tsarik, Ruslan Stanislavovich. “Evaluation of influence of standard and actual centers of gravity of the typically loaded container on the metacentric height of container ship.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.1 (2021): 17–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-17-28.
11. Tsarik, R.S., and D. Akmaykin. “Operational control system of container ship’s cargo operations (OCSCCO).” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(75) (2015): 16–23.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Царик Руслан Станиславович** — капитан, инструктор-преподаватель ДВМТЦ ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского» 690003, Российская Федерация, Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а  
 e-mail: [rex-infinity@yandex.ru](mailto:rex-infinity@yandex.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Tsarik, Ruslan Stanislavovich** — Master mariner, instructor-trainer Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoi 50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russian Federation  
 e-mail: [rex-infinity@yandex.ru](mailto:rex-infinity@yandex.ru)

*Статья поступила в редакцию 25 февраля 2021 г.  
 Received: February 25, 2021.*

# ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-222-231

## FUNCTIONAL SCHEME OF OPERATIVE ROUTE OPTIMIZATION DURING ICE NAVIGATION

**A. A. Aleshin<sup>1</sup>, S. S. Kubrin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — Christiania Shipping A/S, Copenhagen, Denmark

<sup>2</sup> — ICEMR RAS, Moscow, Russian Federation

*The development of the Russian Far North regions is one of the most significant national policy directions for the Russian Federation. Ongoing development of new oil and gas fields in the shelf area of the Arctic causes rapidly increasing ship's traffic and load on the local transportation network. Those circumstances highlight the growing importance of The Northeast. However, increasing ship's traffic causes concerns — more attention should be paid to the safety of navigation in this region with its harsh environment, like heavy ice conditions, sub-zero temperature, etc. The method of prompt finding of the optimal route in ice conditions onboard based on the methods of dynamic programming is developed; however, the additional solutions are required to manage implementation of this algorithm onboard. The functional scheme of operative route optimization during ice navigation is described in the paper. International regulations regarding passage planning and pollution prevention every year push to increase environmental and safety awareness of personnel involved, so that implementation of this algorithm meets those requirements permitted to use onboard. The following has to be developed: software for optimal route calculation, data management system, statement in safety management system onboard mentioning options, instructions, restrictions and benefits of the method. In this article special attention was paid to the data management. Database and its analysis may allow you to assess the various factors affecting the passage time, may identify situations when suboptimal planning took place. The following parameters are suggested for use — the maximal acceptable time loss, its possibility and the maximal level of acceptable economical risk caused by the time losses mentioned above. These parameters have to be added to safety management system onboard along with the procedures of using this optimization algorithm. Taking into account some restrictions of this method it will allow you to perform safe and effective voyage planning.*

*Keywords: Ice navigation, optimal routing, ice forecasts, data management, Arctic, dynamic programming.*

### For citation:

Aleshin, Alexander A., and Sergey S. Kubrin. "Functional scheme of operative route optimization during ice navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.2 (2021): 222–231. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-222-231.

**УДК 656.61.052**

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ОПЕРАТИВНОГО РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА СУДНА В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

**А. А. Алёшин<sup>1</sup>, С. С. Кубрин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — Christiania Shipping A/S, Копенгаген, Дания

<sup>2</sup> — ИПКОН РАН, Москва, Российская Федерация

*Отмечается, что международные требования, предъявляемые к планированию перехода, ежегодно ужесточаются в вопросах сокращения расхода топлива, вредных выбросов и повышения безопасности плавания, что обуславливает необходимость совершенствования методов по определению оптимальных маршрутов в море. В данной работе рассматривается функциональная схема алгоритма оперативного расчета оптимального по времени маршрута судна при плавании в ледовых условиях, разработанного на основе метода динамического программирования и учитывающего обеспеченность прогноза по продолжительности перехода. Особое внимание уделяется проблеме обработки данных, содержащих информацию о совершенных рейсах. Описана методика формирования базы данных о совершенных рейсах, благодаря которой анализ полученной информации позволяет давать более точную оценку различных факторов,*

оказывающих влияние на наступление критических потерь времени, таких как ледовые условия, метеорологические условия, особые районы плавания. Отмечается, что база данных и ее дальнейший анализ позволят давать более точную оценку различных факторов риска наступления критических потерь времени, а также выявлять случаи задержек на переходе, вызванные неоптимальным планированием. Предложены решения по вопросам применения метода в практических условиях, отвечающие международным требованиям относительно планирования перехода и управления безопасностью на борту судна и касающиеся системы управления безопасностью судна, информирования и подготовки экипажа относительно особенностей и ограничений работы метода. Предложено закрепить следующие параметры: «допустимая вероятность наступления критических потерь времени» и «допустимое значение экономического риска, связанного с потерями времени на переходе». Отмечены существующие ограничения алгоритма, учет которых необходим для его эффективного и безопасного использования.

*Ключевые слова:* ледовое плавание, оптимальный маршрут, ледовый прогноз, управление данными, Арктика, динамическое программирование.

**Для цитирования:**

Алёшин А. А. Функциональная схема оперативного расчета оптимального маршрута судна в ледовых условиях / А. А. Алёшин, С. С. Кубрин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 222–231. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-222-231.

### Введение (Introduction)

На протяжении последнего десятилетия в Арктическом регионе наблюдаются процессы, связанные с развитием перспективных нефтегазовых проектов, которые в долгосрочной перспективе должны обеспечить устойчивый рост объемов перевозки жидких углеводородов морем. С точки зрения экологического аспекта рост арктических морских грузоперевозок предполагает реализацию новых задач в морской транспортной отрасли. Исследования, проведенные Международной морской организацией (ИМО) и отраженные в циркуляре МЕРС58/INF.21, показали, что оптимизация маршрута судна может позволить сократить расход топлива и вредные выбросы в атмосферу на 2–4 %. В дополнение к этому требования «Международной конвенции МАРПОЛ 73/78» (прил. VI, правила 22 и 22А) подразумевают обязательную разработку и внедрение «Плана управления энергетической эффективностью судна»<sup>1</sup>. Этот документ является механизмом для проведения кампании по повышению энергетической эффективности судна, в котором с точки зрения подготовки и выполнения перехода должен быть указан комплекс мер по улучшению энергетической эффективности для конкретного судна, среди которых следующие:

- улучшенное планирование и выполнение рейса;
- выбор потенциально наиболее эффективных маршрутов с учетом погодных условий;
- оптимизация скорости хода судна с учетом предварительного взаимодействия с портом прибытия относительно доступности причала;
- выбор оптимальных установок двигателей с учетом предполагаемого времени прибытия.

Полярный кодекс<sup>2</sup>, вступивший в силу с 1 января 2017 г., предъявляет требования к планированию маршрута (I-A, 11), включающие в том числе учет текущей ледовой обстановки в районе плавания, а также статистических данных о ледовой обстановке и температуре в предшествующие годы в периоды, соответствующие предполагаемому времени плавания. Таким образом, в соответствии с международными требованиями, предъявляемыми к планированию перехода, сформулирована задача по определению оптимальных маршрутов в море с целью сокращения расхода топлива и вредных выбросов, при этом уделено необходимое внимание вопросам безопасности плавания. Вопросам выбора оптимальных маршрутов в различных условиях плавания посвящены работы [1]–[3]. Эффективное решение задачи предложено на основе метода Беллмана — Форда [4], генетического алгоритма [5], целочисленного линейного программирования [6]. Вопросам управления данными, в том числе при плавании в полярных водах, посвящены работы [7], [8]. Тем не менее

<sup>1</sup> Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней. СПб.: ЦНИИМФ, 2017. 412 с.

<sup>2</sup> Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах. СПб.: ЦНИИМФ, 2016. 232 с.

вопросы выбора оптимального по времени маршрута в ледовых условиях и внедрения его дальнейшего оперативного применения на борту судна были решены недостаточно полно. В связи с этим интерес представляет алгоритм по определению оптимального маршрута в ледовых условиях [9], разработанный на основе метода динамического программирования.

Данная работа имеет целью подробное описание функциональной схемы поиска оптимального маршрута судна в ледовых условиях, основанного на использовании метода динамического программирования, с учетом оценки вероятности наступления критических потерь времени на переходе, а также поиск варианта решения для применения метода в практических условиях. Особое внимание следует уделить управлению данными о совершенных рейсах, получаемыми от судов, совершающих ледовое плавание, их обработке и анализу с целью выявления закона распределения вероятности реализации критических потерь времени на переходе.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Для разъяснения процессов, происходящих в отдельных функциональных блоках метода по определению оптимального маршрута судна в ледовых условиях, с учетом оценки риска наступления критических потерь времени на переходе, была построена функциональная схема в виде алгоритма, где все основные вычисления представлены в виде программы в среде Matlab (пакет Simulink) — рис. 1.

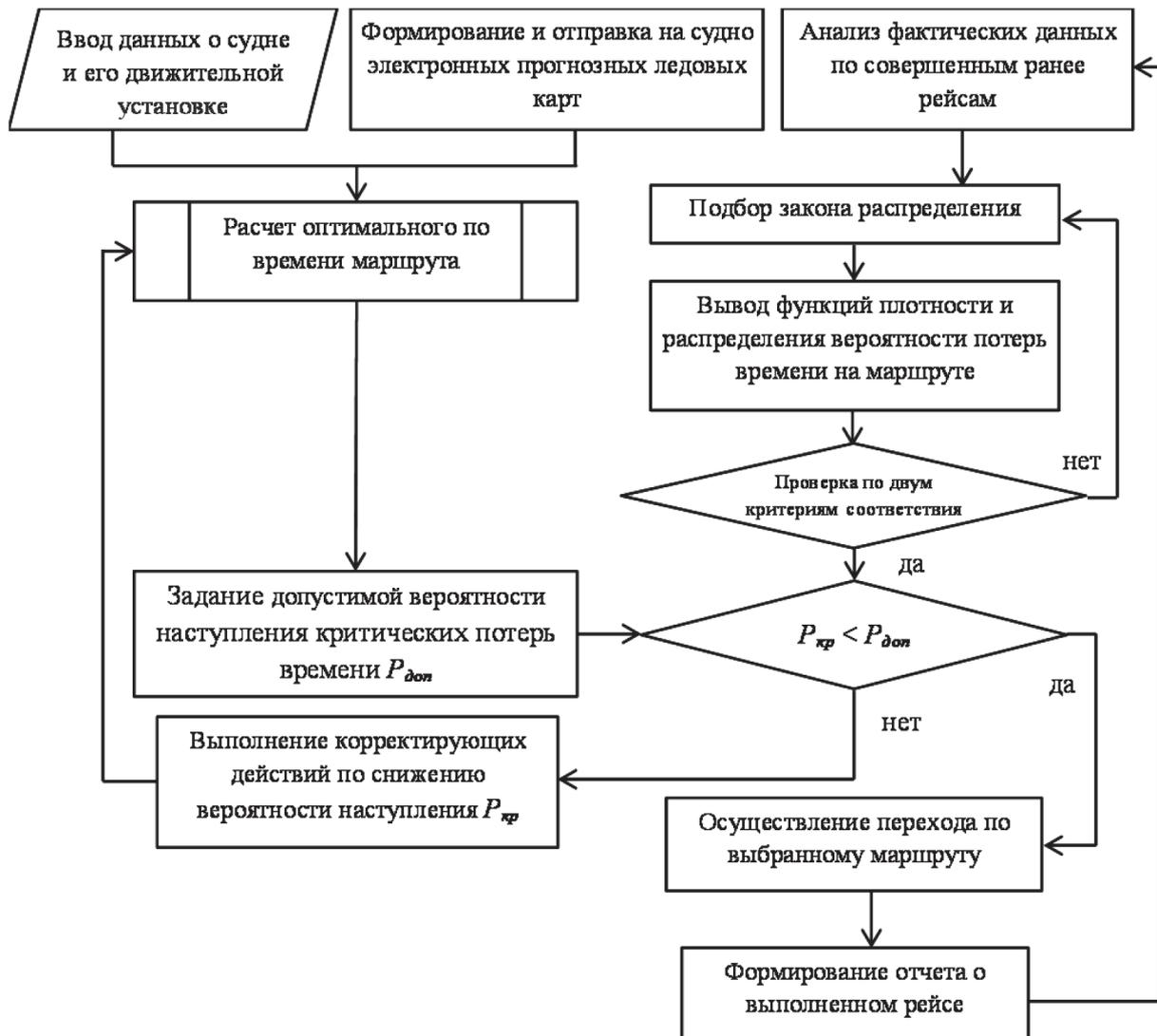


Рис. 1. Функциональная схема метода поиска оптимального маршрута судна в ледовых условиях с учетом обеспеченности прогнозов

Заблаговременно, до начала планирования перехода на конкретном судне, некоторый массив данных, содержащий сведения о ранее выполненных рейсах данного судна и однотипных судов в схожих условиях по соответствующему маршруту, подвергается обработке. Выполненный анализ позволяет получить необходимую в дальнейшем функцию плотности распределения вероятности наступления критических потерь времени, проверка подбора которого выполнена по двум критериям согласия (Колмогорова и Пирсона).

Непосредственно судоводитель вручную осуществляет ввод следующей информации перед запуском программы: данные о судне, ледоколе, пунктах отправления и прибытия, допустимая вероятность наступления критических потерь и риска  $P_{\text{доп}}$ ,  $R_{\text{доп}}$ , а также параметр  $a$ , соответствующий «критическому значению» потерь времени на переходе (последние три значения могут быть заданы чартером или судовладельцем).

После запуска программы происходит автоматическое вычисление оптимального по времени маршрута. При остановке программы судоводитель получает список путевых точек и схематичный рисунок маршрута на карте, а также расчетную продолжительность рейса и дистанцию между пунктами отправления и прибытия. В дополнение к этому, с учетом полученной ранее функции плотности распределения вероятности, а также заданных параметров  $P_{\text{доп}}$ ,  $R_{\text{доп}}$  и  $a$ , выполняется расчет риска наступления финансовых потерь, связанных с задержкой на переходе. Риск рассматривается в данной задаче как сочетание вероятности наступления нежелательного события и его последствий [10]. В случае, если риск, расчет которого основан на полученной вероятности, считается допустимым, полученный маршрут следует принять к использованию и приступить к прокладке полученных путевых точек на навигационных картах с целью осуществления по нему перехода в дальнейшем. В случае, если расчетный риск оказывается больше, чем заданное допустимое значение  $R_{\text{доп}}$ , следует предпринять корректирующие действия, позволяющие снизить возможный риск. Необходимо дать описание корректирующих действий, состоящих из следующих возможных шагов, не ограничиваясь ими:

- перенос начала перехода в том случае, если суммарная потеря времени в ожидании будет восполнена выигрышем времени на переходе;
- выбор альтернативных маршрутов;
- рассмотрение ледокольной проводки (при этом дополнительно необходим ввод технических данных о ледоколе).

После выполнения корректирующих действий полученный маршрут применяется к использованию (действия отражены в плане перехода судна). Важным элементом в данном случае является динамическая коррекция функции плотности распределения и вероятности потерь времени на маршруте на основе базы данных, содержащей информацию по каждому последующему выполненному аналогичному переходу. По окончании каждого перехода необходимо заполнить формуляр в соответствии с представленным образцом.

**Формуляр отчета о выполненном рейсе**

Данные о переходе	Пункт отхода	$A$	Аварийные ситуации	Причина	...
	Пункт прихода	$B$		Время остановки	$\Delta t_{\text{ав}}$
	Время отхода	$t_{\text{от}}$	Плановые остановки	Причина	...
	Время прибытия	$t_{\text{пр}}$		Время остановки	$\Delta t_{\text{пл}}$
	Время перехода	$t_{\text{пр}} - t_{\text{от}}$	Инструкции на переход	Да / Нет	
	Судно в грузу?	Да / Нет	Скорость	...	
	Ледокольная проводка?	Да / Нет	Ожидаемое время прибытия	...	
	Расход топлива		Расход топлива (т/сут)	...	

*Примечание.* Пустые графы формуляра должны быть заполнены актуальной информацией о переходе.

Сбор информации в базе данных (БД) с разделением по категориям на основе заполненного формуляра выполняется в соответствии с рис. 2.



Рис. 2. Процесс формирования базы данных о совершенных судном рейсах в зависимости от условий перехода

Группировка полученных данных в БД осуществляется по следующим критериям:

- пункт отхода и пункт назначения, что позволяет осуществить сортировку выполненных рейсов в зависимости от маршрута;
- время совершения перехода (в формате месяц–день) — вводится для группировки данных в зависимости от времени года;
- проведение ледокольной проводки либо самостоятельного плавания (данная информация необходима для дальнейшего анализа статистических данных в зависимости от способа плавания).

Для непосредственного анализа данных (в рамках массива для рейсов по определенному маршруту, в заданный месяц, с / без ледокольной проводки) необходимо наличие следующей информации:

- фактическая продолжительность перехода, подвергающаяся сравнению с полученным на основе предлагаемого метода расчетным значением;
- указание аварийных ситуаций или происшествий с уточнением их характера и времени остановки;
- указание плановых остановок, их причин и продолжительности.
- снижение хода до экономичного в соответствии с инструкциями чартера / судовладельца.

В данном случае необходимо указать следующие данные: скорость, расход топлива, продолжительность перехода, заданные чартером / судовладельцем.

- расход топлива в течение времени перехода.

Формируется база данных о совершенных данным судном и однотипными судами рейсах.

По каждому переходу должны быть получены следующие данные:

- применялась ли ледокольная проводка либо выполнялось самостоятельное плавание;
- пункт отхода и пункт назначения;
- общая продолжительность перехода;
- время совершения перехода (в формате месяц–день);
- наблюдались ли в течение рейса аварийные ситуации, описание их характера с указанием времени остановки (если применимо);

- происходили ли в течение перехода плановые остановки, их причины и продолжительность;
- наблюдалось ли снижение хода до экономичного в соответствии с инструкциями чартера / судовладельца (в этом случае необходимо указать скорость, расход топлива, продолжительность перехода, заданные чартером / судовладельцем);
- расход топлива в течение периода перехода.

База данных и ее дальнейший анализ позволят дать более точную оценку рразличных факторов риска наступления критических потерь времени, что позволит выявить наиболее проблемные факторы, обуславливающие потери времени на переходе, и отделить ситуации, когда определенная продолжительность перехода была задана заранее, от случаев, когда задержки на переходе были вызваны неоптимальным планированием.

Обработка данных выполняется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 3. Фактическая продолжительность перехода выбирается из определенного массива, полученного после формирования БД, затем выполняется вычисление разницы между фактическим и расчетным временем перехода  $\Delta t$ . В том случае, если заранее задано движение экономичным ходом, когда в качестве максимальной скорости вместо  $v_{\text{чв}}$  выступает  $v_{\text{эк}}$ , необходимо вначале выполнить перерасчет оптимального маршрута с учетом этого параметра. После перерасчета полученную разницу следует принять к формированию выборки.

События, связанные с некоторыми потерями времени и поддающиеся описанию, такие как плановые или аварийные остановки / задержки, необходимо учитывать дополнительно. Время, потерянное при плановых и / или аварийных задержках, предлагается исключить из вычислений для того, с целью выявления ошибок при планировании осуществления перехода. Рекомендуется вести по ним отдельную статистику для дальнейшего анализа аварийности, разработки и применения решений с целью минимизации подобного рода потерь в дальнейшем. Информация о характере аварийных ситуаций и причинах плановых остановок позволит выявить наиболее уязвимые в отношении потерь времени элементы процесса морских грузоперевозок.

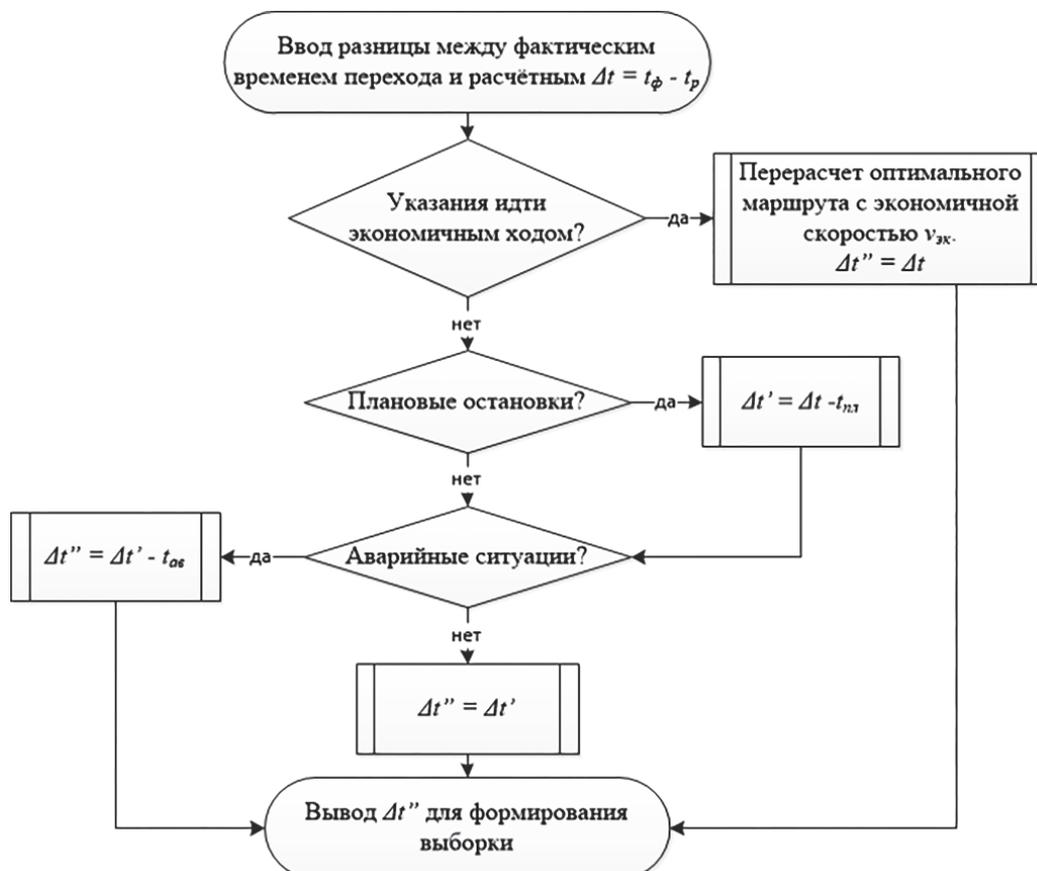


Рис. 3. Алгоритм обработки данных массива

В качестве выходных данных получено значение  $\Delta t''$ , которое сформирует выборку, позволяющую впоследствии определить закон распределения вероятности реализации критических потерь времени в соответствии с методикой, подробно описанной в работе [11]. Таким образом, предложен алгоритм, позволяющий получать откорректированную функцию плотности распределения вероятности наступления критических потерь времени при плавании в ледовых условиях после каждого выполненного рейса.

### Результаты (Results)

На основе представленной функциональной схемы необходимо отметить основные особенности данного метода:

- от судоводителя для получения необходимого результата требуется выполнение минимального количества действий по вводу основных характеристик судна и заданию необходимых значений допустимой вероятности и продолжительности задержки в рейсе;
- описываемый метод тесно связан с картами ледовых прогнозов, получаемыми на судне, поэтому адекватное его функционирование возможно только при своевременном получении ледовых прогнозов в необходимом формате и количестве с заданной периодичностью и гарантированной точностью. Получение карт может быть организовано с помощью аппаратуры радиосвязи либо с применением сети интернет, однако именно в последнем случае становится возможной передача информации в виде, наиболее удобном для дальнейшей обработки, не требующей предварительного преобразования в необходимый формат.

Разработанный метод выполнен в виде программы, реализованной в среде Matlab Simulink, и может быть преобразован в форму самостоятельного программного обеспечения (ПО) с помощью встроенного в Matlab пакета, поддерживающего DLL-библиотеки. Практическое применение самостоятельного ПО требует выполнения следующих условий:

- обеспечение надежной связи *судно — берег* для своевременного получения карт ледовых прогнозов и другой необходимой гидрометеорологической и навигационной информации;
- соответствующая подготовка штурманского состава, в особенности лиц, ответственных за организацию и составление плана перехода судна, возможностей, функций и ограничений предлагаемого метода;
- закрепление в системе управления безопасностью (СУБ) основных понятий и параметров, связанных с описываемым методом;
- учет применения данного метода при стандартной процедуре оценки риска во время планирования перехода.

В соответствии с требованиями «Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращению загрязнения» (МКУБ), на борту судна должна применяться к использованию СУБ, представляющая собой комплекс взаимосвязанных элементов, согласованное функционирование которых должно обеспечивать достижение поставленных в данном направлении целей, безопасную практику эксплуатации судов и защиту судна, груза, экипажа и окружающей среды от всевозможных опасностей. В связи с подготовкой к использованию метода определения оптимального по времени маршрута судна в СУБ предлагается принять следующие значения:

- параметра  $a$ , достижение или превышение которого указывает на «критическое значение» потерь времени на переходе;
- допустимой вероятности наступления критических потерь времени и допустимого риска:

$P_{\text{доп}}, R_{\text{доп}}$ ;  
– допустимого риска, связанного с потерями времени на переходе, —  $R_{\text{доп}}$ .

С точки зрения процедур в СУБ должны быть отражены:

- изменения в форме составления плана перехода, связанные с применением метода определения оптимального маршрута;
- дополнения в стандартной процедуре оценки риска при планировании перехода судна;

– корректирующие действия, направленные на то, чтобы минимизировать выявленные экономические риски, связанные с задержками судна на переходе.

Предполагается, что изменения, затрагивающие СУБ относительно внедряемого метода, не являются значительными по объему, и, следовательно, не создадут дополнительной значительной рабочей нагрузки на экипаж судна.

### **Обсуждение (Discussion)**

Подготовка экипажа, связанная с эксплуатацией внедряемых автоматизированных средств управления судном, имеет важное значение, позволяя снизить воздействие человеческого фактора на безопасность мореплавания. Поэтому необходимо сформулировать основные ограничения рассмотренного метода по определению оптимального маршрута в ледовых условиях, о которых необходимо знать персоналу:

- рассмотрено взаимодействие судна только со статичными объектами, а значит, метод не учитывает взаимодействие с такими подвижными объектами, как другие суда, платформы и др.;
- рассчитанный оптимальный маршрут следует считать безопасным только относительно тех факторов, которые были учтены при формировании информационного обеспечения метода. Таким образом, перед принятием маршрута к использованию необходимо убедиться в том, что другие факторы, не рассмотренные при решении задачи, не создают опасности при осуществлении перехода.

На основе функционирования построенного алгоритма оптимального маршрута вырабатываются рекомендации по снижению экономического риска, связанного с потерями времени на переходе, а учет ранее описанных ограничений обеспечит безопасное и эффективное планирование перехода.

### **Заключение (Conclusion)**

В работе приведено описание методики формирования базы данных о совершенных рейсах, благодаря которой анализ полученной информации позволяет давать более точную оценку различных факторов, оказывающих влияние на наступление критических потерь времени. Это позволяет выявить наиболее проблемные факторы, обуславливающие потери времени на переходе, отделив ситуации, когда определенная продолжительность перехода задана заранее, от случаев, когда задержки на переходе были вызваны неоптимальным планированием. Информация о характере аварийных ситуаций и причинах плановых остановок позволит выявить наиболее уязвимые в отношении потерь времени элементы процесса морской перевозки.

Описаны действия, которые необходимо предпринять с целью реализации изложенного в работе метода. Предложены решения для применения данного метода в практических условиях, касающиеся СУБ судна, информирования и подготовки экипажа относительно особенностей и ограничений его эффективности.

В рамках инициативы ИМО, касающейся безэкипажного судовождения, предлагаемый метод определения оптимального по времени маршрута судна в ледовых условиях представляется полезным, так как расчет может выполняться как на борту судна экипажем, так и береговым персоналом. Учитывая при расчете наиболее полный спектр факторов, оказывающих влияние на безопасность плавания, можно достичь эффективного планирования безопасных арктических морских перевозок с применением безэкипажных судов. В связи с тем, что для автоматизации судовождения необходима развитая информационная инфраструктура с целью обеспечения системы навигации важной и своевременной информацией, предложенный метод может явиться одним из важных шагов в этом направлении.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Petrie G. L. A new approach to vessel weather routing and performance analysis / G. L. Petrie, K. J. Bongort, W. M. Maclean // Marine Technology and SNAME News. — 1984. — Vol. 21. — Is. 01. — Pp. 19–40. DOI: 10.5957/mtl.1984.21.1.19*

2. Lin Y.-H. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multidynamic elements / Y.-H. Lin, M.-C. Fang, R. W. Yeung // *Applied Ocean Research*. — 2013. — Vol. 43. — Pp. 184–194. DOI: 10.1016/j.apor.2013.07.010.

3. Eskild H. Development of a Method for Weather Routing of Ships. Master thesis in Marine Technology / H. Eskild. — Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2014. — 143 p.

4. Чертков А. А. Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана – Форда / А. А. Чертков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.

5. Федоренко К. В. Исследование основных параметров генетического алгоритма применительно к задаче поиска оптимального маршрута / К. В. Федоренко, А. Л. Оловяников // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.

6. Сахаров В. В. Автоматизация поиска оптимальных маршрутов и грузовых потоков в транспортных сетях средствами целочисленного линейного программирования / В. В. Сахаров, И. А. Сикарев, А. А. Чертков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 647–657. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-647-657.

7. Ольховик Е. О. Анализ скоростных режимов СПГ-танкеров в акватории Северного морского пути в период зимней навигации 2017–2018 гг. / Е. О. Ольховик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.

8. Епихин А. И. Программные и аппаратные методы сбора и обработки данных в системах поддержки принятия решений современных судов-газовозов / А. И. Епихин // *Вестник Волжской государственной академии водного транспорта*. — 2016. — № 46. — С. 189–198.

9. Алёшин А. А. Оперативный расчет оптимального маршрута судна в ледовых условиях Арктики / А. А. Алёшин, С. С. Кубрин // *Транспортное дело России*. — 2018. — № 6. — С. 287–290.

10. Мойсеенко С. С. Управление рисками в мореплавании и промышленном рыболовстве / С. С. Мойсеенко, Л. Е. Мейлер. — М.: МОРКНИГА, 2017. — 385 с.

11. Алёшин А. А. Оценка потерь времени при совершении рейса в ледовых условиях / А. А. Алёшин, С. С. Кубрин // *Балтийский морской форум: материалы VII Международного Балтийского морского форума: в 6 т.* — Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2019. — Т. 2: Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии. — С. 4–11.

## REFERENCES

1. Petrie, George L., Kenneth J. Bongort, and Walter M. Maclean. “A new approach to vessel weather routing and performance analysis.” *Marine Technology and SNAME News* 21.01 (1984): 19–40. DOI: 10.5957/mtl.1984.21.1.19.

2. Lin, Yu-Hsien, Ming-Chung Fang, and Ronald W. Yeung. “The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements.” *Applied Ocean Research* 43 (2013): 184–194. DOI: 10.1016/j.apor.2013.07.010.

3. Eskild, Hege. Development of a Method for Weather Routing of Ships. Master thesis in Marine Technology. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2014.

4. Chertkov, Alexander A. “Automation selection shortcuts routes of ships on the basis of modified Bellman-Ford Algorithm.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.

5. Fedorenko, Kirill V., and Arkadii L. Olovyanikov. “Research of the main parameters of the genetic algorithm for the problem of searching the optimal route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.

6. Saharov, Vladimir V., Igor A. Sikarev, and Alexander A. Chertkov. “Automating search optimal routes and goods flows in transport networks means the integer linear programming.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 647–657. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-647-657.

7. Ol'khovik, Evgeniy O. "Analysis of speed regime LNG-tankers in the Northern sea route in period of winter navigation 2017–18." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.

8. Epikhin, A. I. "The algorithms of data collecting and processing in decision support systems for gas-carrying vessels." *Bulletin of VSAWT* 46 (2016): 189–198.

9. Aleshin, A., and S. Kubrin. "Automatized passage planning in the Arctic" *Transport business of Russia* 6 (2018): 287–290.

10. Moiseenko, S. S., and L. E. Meiler. *Upravlenie riskami v moreplavanii i promyshlennom rybolovstve*. M.: Morkniga, 2017.

11. Aleshin, Alexander Alexandrovich, and Sergey Sergeevich Kubrin. "Estimation of time loss during sea passage in ice conditions." *BALTIISKII MORSKOI FORUM: materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma*. Vol. 2. «Morskaya tekhnika i tekhnologii. Bezopasnost' morskoi industrii». Kaliningrad: Izd-vo BGARF FGBOU VO «KGTU», 2019. 4–11.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Алёшин Александр Александрович** —  
инженер, исследователь, 2-й помощник капитана  
Christiania Shipping A/S  
2100, Дания, Копенгаген, Amerika Platz, 38  
e-mail: [alexal280593@gmail.com](mailto:alexal280593@gmail.com)

**Кубрин Сергей Сергеевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ИПКОН РАН  
111020, Российская Федерация, г. Москва,  
Крюковский тупик, д. 4  
e-mail: [s\\_kubrin@mail.ru](mailto:s_kubrin@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aleshin, Alexander A.** —  
Engineer, researcher, 2-nd Officer  
Christiania Shipping A/S  
38 Amerika Platz, 2100, Copenhagen, Denmark  
e-mail: [alexal280593@gmail.com](mailto:alexal280593@gmail.com)

**Kubrin, Sergey S.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
ICEMR RAS  
4 Kryukovskiy tupik, Moscow, 111020,  
Russian Federation  
e-mail: [s\\_kubrin@mail.ru](mailto:s_kubrin@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 26 февраля 2021 г.  
Received: February 26, 2021.*

## СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-232-243

### TECHNICAL CONTROL AS ONE OF THE WAYS OF QUALITY MANAGEMENT IN SHIP REPAIR

**T. Yu. Pasheeva<sup>1</sup>, L. V. Popov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — Murmansk State Technical University, Murmansk, Russian Federation

<sup>2</sup> — Branch “35 Ship Repair plant” of Ship Repair Center “Zvezdochka”, JSC, Murmansk, Russian Federation

*The complex of issues related to the formation and operation of the quality management system in the branch «35 Ship Repair Plant» of JSC «Ship Repair Center «Zvezdochka» is considered. The experience of the branch «35 Ship Repair Plant» of JSC «Ship Repair Center «Zvezdochka» in improving the quality of repair works is analyzed. Attention is paid to the role, place and significance of technical control, and to improving its effectiveness. Recommendations for achieving and maintaining the required level of quality are formulated. New approaches to the implementation of technical quality control of ship repair works are proposed. It is indicated that the quality of repair works is largely determined by the technical level of ship repair production and the efficiency of the production process. The problem of improving the technical control at ship repair enterprises is caused by the increasing complexity of quality control of repair works and its costs. The reasons that determine the need to improve the effectiveness of quality control are identified. Basis for the technical control improvement is a technological preparation of production, from the organization of which the measurement accuracy and accuracy of control, the level of mechanization and automation control operations, performance, and quality of labour inspectors, the complexity and number of the personnel of the technical control Department, as well as economic performance of the ship repair production, depend on. The concept of restructuring the system of training, retraining and advanced training of personnel, systematic and continuous improvement of the skills of workers and engineering and technical personnel in order to ensure that their professional training corresponds to the constantly increasing level equipment and technology for creating marine equipment is proposed.*

*Keywords: ship repair production, technological processes, quality management, quality control, measuring instruments, defects.*

**For citation:**

Pasheeva, Tatyana Yu., and Leonid V. Popov. “Technical control as one of the ways of quality management in ship repair.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 232–243. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-232-243.

**УДК 629.5.083.5:658.562(470.21)**

### ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАК ОДИН ИЗ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СУДОРЕМОНТА

**Т. Ю. Пашеева<sup>1</sup>, Л. В. Попов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — ФГАОУ ВО «Мурманский государственный технический университет», Мурманск, Российская Федерация

<sup>2</sup> — Филиал «35 судоремонтный завод» АО «Центр судоремонта «Звездочка», Мурманск, Российская Федерация

*Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с формированием и работой системы управления качеством в филиале «35 СРЗ» АО «Центр судоремонта «Звездочка». Проанализирован опыт их работы в вопросах повышения качества ремонтных работ. Уделено внимание роли, месту и значению технического контроля, повышению его эффективности. Выделены причины, определяющие необходимость повышения эффективности контроля качества. Сформулированы рекомендации для достижения и поддержания тре-*

буемого уровня качества. Предложены новые подходы к осуществлению технического контроля качества судоремонтных работ. Указано, что качество ремонтных работ в значительной мере определяется техническим уровнем судоремонтного производства и эффективностью производственного процесса. Отмечается, что проблема совершенствования технического контроля на судоремонтных предприятиях обусловлена ростом трудоемкости контроля качества ремонтных работ и затрат на него. Основой совершенствования технического контроля является технологическая подготовка производства, от организации которой зависят точность измерений и достоверность контроля, уровень механизации и автоматизации контрольных операций, производительность и качество труда контролеров, трудоемкость и численность персонала отдела технического контроля, а также показатели экономической деятельности судоремонтного производства. Подчеркивается, что путь развития системы технического контроля лежит прежде всего в области совершенствования его организации, не требуя, как правило, значительных материальных затрат. Предлагается осуществлять повышение эффективности контроля качества ремонтных работ в двух направлениях: совершенствовании организации технического контроля и внедрении прогрессивных средств и методов контроля. Сделаны выводы о том, что современный этап обеспечения качества ремонтных работ характеризуется переходом от реализации отдельных разрозненных мероприятий к разработке и внедрению систем управления качеством, т. е. менеджмент качества является одним из элементов системы управления судоремонтным предприятием, что должно найти отражение в системе менеджмента предприятия. Предложена концепция перестройки системы подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров, планомерного и непрерывного совершенствования квалификации рабочих и инженерно-технических кадров с целью обеспечения соответствия их профессиональной подготовки постоянно возрастающему уровню и технологии создания морской техники.

*Ключевые слова:* судоремонтное производство, технологические процессы, управление качеством, контроль качества, средства измерения, дефекты.

**Для цитирования:**

Пашеева Т. Ю. Технический контроль как один из способов управления качеством судоремонта / Т. Ю. Пашеева, Л. В. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 232–243. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-232-243.

### **Введение (Introduction)**

Задачи по разработке и внедрению принципиальных и рабочих технологий ремонта приобрели первостепенное значение в связи с пополнением флота новыми типами судов. С развитием судов нового поколения возникает необходимость не только обновления, но и постоянного развития судоремонтной индустрии [1]. Количественные и качественные изменения состава морского флота, а также перспектива его развития обусловили появление ряда проблем в области судоремонта и наметили основные направления совершенствования его организации. Очевидно, что ускоренное выполнение работ при стоянке судов в доках может быть достигнуто за счет современной и тщательной подготовки производства, четкого планирования и управления ремонтами судов в доках, а также совершенствования организации труда.

Курс на техническое перевооружение судоремонтного производства, его комплексную автоматизацию и механизацию является в ближайшей перспективе главным средством достижения высокой производительности труда. Комплексная механизация и по возможности автоматизация трудоемких работ, способствующие повышению производительности труда и улучшению условий работы, обеспечивают выполнение работ с меньшими трудовыми, материальными и энергетическими затратами. Совершенствованию технологии судоремонта и качеству ремонта в последние годы уделяется большое внимание. В частности, проводится большая работа по внедрению современных технологических процессов, направленных на увеличение производительности и улучшение условий труда, сокращение трудоемкости и повышение качества ремонтных работ. Качественные показатели находятся в центре внимания ввиду того, что в настоящее время особенно актуальным является вопрос повышения качества судоремонтных работ и эффективности труда. Система качественного судоремонта позволяет уменьшить внеэксплуатационный период и суммарные затраты на техническую эксплуатацию флота, обеспечить установленный уровень качества отремонтированного

оборудования с целью снижения эксплуатационных расходов, освоение ремонта новых кораблей, судов и судовых технических средств [2].

Проблема качества является актуальной стратегической задачей, поскольку от ее решения зависит стабильность экономики государства. Поэтому важнейшей задачей управления качеством продукции является обеспечение его оптимального уровня и определение экономического эффекта на всех стадиях (производства, реализации, потребления и эксплуатации) [3]. Так, Ю. П. Адлер в статье [4] отмечает, что контроль не создает никакой ценности для клиента, для покупателя продукции или услуги, а всегда отражается на себестоимости продукции и может негативно отразиться на положении на рынке, занимаемом компанией, поскольку шансы на успех напрямую зависят от величины затрат на контроль.

Проблема совершенствования технического контроля на судоремонтных предприятиях обусловлена ростом трудоемкости контроля качества ремонтных работ и затрат на него, в связи с чем необходима реализация задач по обеспечению создания и освоения серийного выпуска средств неразрушающего контроля и комплексов новых приборов проверки качества ремонтных работ. Качество ремонтных работ в значительной мере определяется техническим уровнем и эффективностью производственного процесса. Несовершенные технологии и организация производства, использование малопроизводительного оборудования, значительная часть которого физически и морально устарела, не обеспечивают необходимых производительности труда и качества продукции. Кроме того, в большой степени на качество продукции оказывает влияние уровень культуры производства: чистота и порядок содержания оборудования, инструмента и рабочих мест; соблюдение правил транспортирования, складирования, хранения материалов, заготовок, тары, отходов; соблюдение безопасных условий труда и т. д.

Качество ремонтных работ зависит от многих факторов: качества исходных материалов, уровня технологических процессов изготовления и ремонта; состояния оборудования, оснастки, приспособлений и инструмента; квалификации рабочих и инженерно-технического персонала и т. д. Использование некачественных исходных материалов, отклонение от заданного технологического процесса изготовления (ремонта), плохая наладка оборудования, недопустимо высокая степень изношенности оборудования и инструмента, а также низкая, не соответствующая выполняемой работе, квалификация рабочих приводят к появлению дефектов, снижению качества выполняемых работ, а иногда и браку. Все это обуславливает многообразие способов, приемов и методов контроля, применяемых в судоремонтном производстве. Так как контроль качества судоремонтных работ осуществляется по значительному росту параметров, это требует применения новых более совершенных приборов, снабженных электронными устройствами, что способствует более оперативному управлению технологическими процессами судоремонтных работ, позволяет предупреждать отклонения и нарушения технологических процессов и появление брака. С учетом возможности решения рассматриваемой в данной статье проблемы на основе опыта работы филиала «35 СРЗ» АО «Центр судоремонта «Звездочка» сформулированы необходимые рекомендации для достижения и поддержания требуемого уровня качества.

*Целью и задачами* данного исследования является рассмотрение новых подходов к осуществлению технического контроля качества судоремонтных работ. Повышение качества судоремонтных работ означает сокращение потерь от брака, лучшее использование основных производственных фондов, а также большую эффективность судоремонтного производства. Целью планирования повышения качества ремонтируемых изделий в судоремонте является обеспечение динамики улучшения их показателей в соответствии с потребностями отраслей, эксплуатирующих суда.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Технический контроль в борьбе за качество играет существенную роль. При организации технического контроля, выборе наиболее рациональных технических средств и методов большое значение должна иметь оценка их экономической эффективности. В условиях современного судоремонтного производства контроль становится обязательной функцией систем управления

качеством. Контроль качества — это практика проверки товаров в процессе их производства на предмет соответствия действующим стандартам. Контроль является частью менеджмента качества (управления качеством), сфокусированной на выполнении установленных требований [5].

Под контролем качества продукции предлагается понимать проверку соответствия установленным требованиям, которые могут быть зафиксированы в стандартах, чертежах, технических условиях и других нормативных документах. Контрольные операции являются неотъемлемой составной частью судоремонтных работ. В настоящее время процессы и организационные формы технического контроля непрерывно совершенствуются, разрабатываются и внедряются новые, более прогрессивные методы и средства. Развиваются такие процессы, как технические методы контроля, неразрушающий контроль, механизация и автоматизация контрольных операций. В экономически развитых странах существует централизованная система управления производством, взаимодействующая с системой управления качеством продукции, основанная на единых требованиях, предъявляемых к продукции, и определяемая едиными общегосударственными стандартами и техническими условиями [6].

Основной целью технического контроля качества служит предотвращение сдачи заказчику (судовладельцу) прошедшего ремонт судна, судовые технические средства которого не соответствуют требованиям, нормам и правилам, содержащимся в действующих нормативно-технических и эксплуатационных документах, а также условиям договора на ремонт. Организация контроля качества судоремонтных работ — это система технических и административных мероприятий, направленных на обеспечение нормативного уровня качества. Рост требований к качеству продукции при недостаточном использовании прогрессивных средств и методов контроля неизбежно ведут к еще большему увеличению числа рабочих-контролеров и соответствующих расходов. При этом существующая организация технического контроля не обеспечивает снижения потерь от брака и во многих случаях не предотвращает выпуск продукции низкого качества. Поэтому необходимо уделять должное внимание вопросам совершенствования организации технического контроля, а также внедрению прогрессивных средств и методов контроля.

В настоящее время необходимо осуществлять совершенствование кооперации, развитие унификации, диверсификации, сертификации и систем обеспечения качества продукции [7]. На отечественных верфях необходимо формирование новой стратегии управления качеством и подготовкой производства. Управление качеством является одной из ключевых функций как корпоративного, так и проектного менеджмента, основным средством достижения и поддержания конкурентоспособности любого предприятия [8]. Внедрение и отладка на предприятии системы менеджмента качества потребуют значительных временных и материальных ресурсов, однако преимущества и экономическая эффективность реально работающей системы менеджмента качества в долгосрочной перспективе неоспоримы [9].

### **Результаты (Results)**

Судоремонт можно рассматривать как вторичное производство на основе использования конструкций, агрегатов, узлов и деталей, как новых, так и бывших в употреблении. Следовательно, организационные оценки уровня качества отремонтированных судов и судовых технических средств не могут принципиально отличаться от принятых при оценке уровня качества новых изделий. Снижение некоторых показателей качества отремонтированных изделий, объясняемое необратимыми износами в период их эксплуатации, не может оказать влияние на единство организационных принципов при оценке качества новых и отремонтированных изделий.

Судоремонт отличается увеличенной по сравнению с судостроением номенклатурой выпускаемой продукции, для изготовления которой требуются различные технологические процессы и операции (например, восстановление изношенных поверхностей деталей, сборка отремонтированных узлов и, как следствие, дополнительные контрольные операции, грузопотоки, связанные с доставкой судового оборудования в цеха для ремонта и обратно). Если учесть подготовительные

операции, присущие только судоремонту, то становится очевидной необходимость принятия дополнительных мер для стабилизации уровня качества. Достоверность контроля качества промышленной продукции, в том числе продукции судоремонтного производства, представляет собой проблему, существование которой обусловлено неизбежными погрешностями измерения при контроле [10].

В настоящее время на судоремонтных предприятиях применяют различные виды контроля качества, отличающиеся методом исполнения, местом расположения в производственном процессе, охватом контролируемой продукции и другими признаками. Контроль качества продукции в филиале «35 СРЗ» АО «Центр судоремонта «Звездочка» осуществляет отдел контроля качества, который является самостоятельным и не зависит от других служб судоремонтного производства.

Необходимость повышения эффективности контроля качества при выполнении ремонтных работ обусловлена следующими причинами:

- высокими требованиями к качеству и надежности судов;
- значительным усложнением судов, развитием механизации и автоматизации производственных процессов;
- увеличением масштабов судостроительного производства;
- повышением требований к качеству и надежности изделий на мировом рынке;
- значительным производственным браком;
- высокой трудоемкостью контроля;
- большим объемом ручного труда в процессе выполнения операций контроля;
- большим штатом контролеров.

Целями анализа и оценки функционирования системы менеджмента качества филиала «35 СРЗ» АО «Центр судоремонта «Звездочка» являются:

- обнаружение слабых мест и выявление недостатков;
- разработка мероприятий по устранению замечаний и несоответствий;
- определение необходимых мер и / или материальных ресурсов для обеспечения запланированного уровня качества выполнения работ;
- контроль за ходом реализации разработанных мероприятий по обеспечению качества выполняемых работ и их эффективностью, оценка эффективности функционирования систем качества.

В процессе анализа оцениваются:

- степень реализации политики в области качества;
- эффективность функционирования системы качества;
- качество поставляемых ресурсов;
- качество разрабатываемой технической и нормативной документации;
- эффективность корректирующих и предупреждающих действий в процессе технологической подготовки предприятия к ремонту судов и его выполнения;
- эффективность мероприятий по устранению недостатков, обнаруженных в результате внутренних проверок системы качества.

Повышение эффективности контроля качества является важной составной частью общей проблемы улучшения качества ремонтных работ. Основой совершенствования технического контроля является технологическая подготовка производства. К преимуществам единой системы технологической подготовки производства относится одновременная и взаимосвязанная деятельность всех служб подготовки производства, обеспечение роста производительности труда, повышение качества работ. Организация технологической подготовки производства оказывает влияние на точность измерений и достоверность контроля, уровень механизации и автоматизации контрольных операций, производительность и качество труда контролеров, трудоемкость и численность персонала отдела технического контроля, показатели экономической деятельности судоремонтного производства. Показатели экономической деятельности судоремонтного производства зависят от того, в какой мере контроль позволяет предотвратить выпуск недоброкачественной продукции, не соответствующей требованиям стандартов и технических условий, а также условиям поставки и договоров.

В единой системе технологической подготовки производства операции и процессы технического контроля рассматриваются как неотъемлемая часть технологии с использованием достижений в области типизации процессов, повышения точности, производительности и надежности технологических систем. При управлении качеством непосредственными объектами являются процессы, от которых зависит качество ремонтных работ. Выработка управляющих решений производится на основании составления информации о фактическом состоянии управляемого процесса. Схематично процесс технического контроля и надзора РМРС на судоремонтном предприятии представлен на рис. 1.

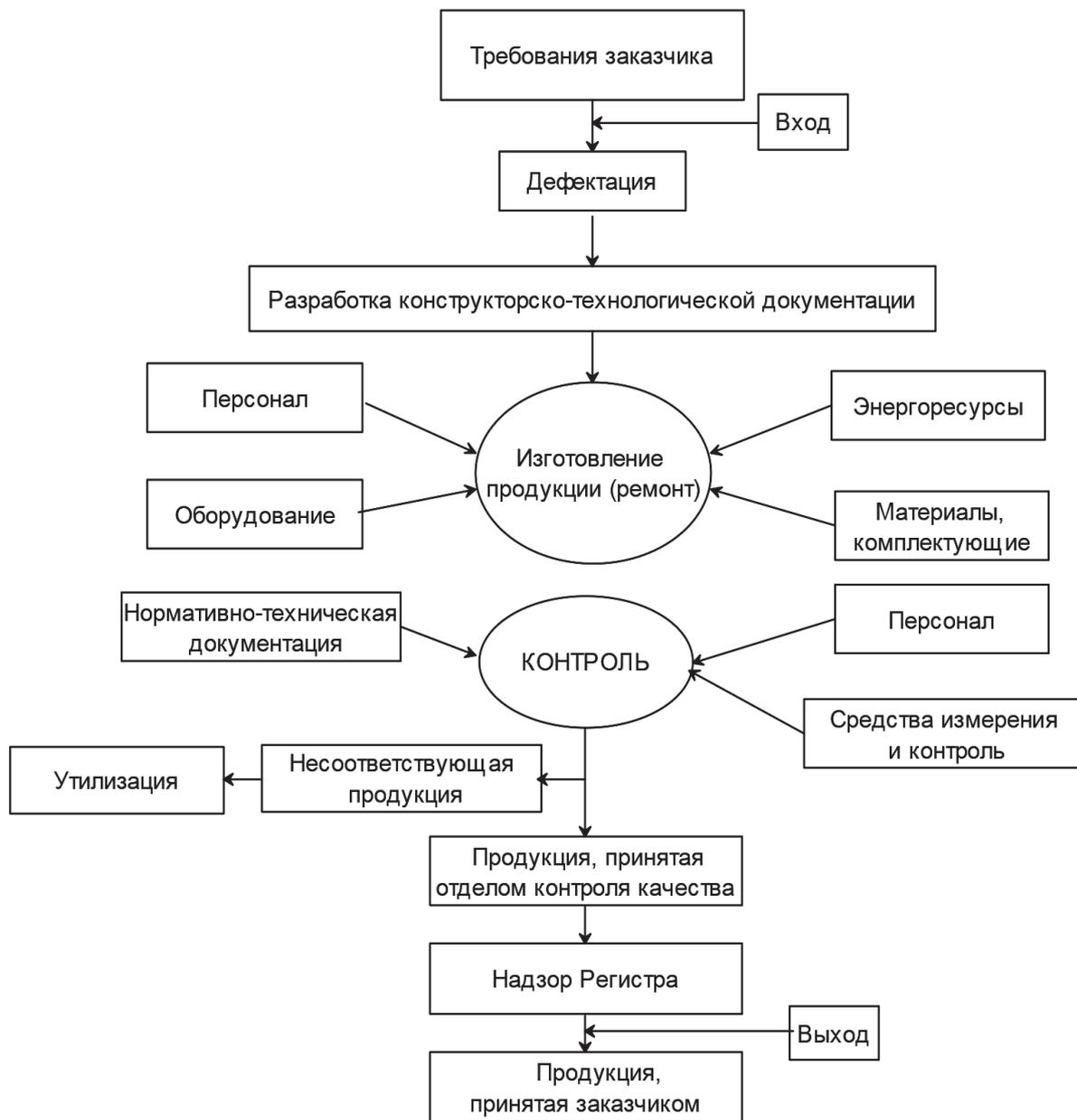


Рис. 1. Процесс технического контроля и надзора РМРС на судоремонтном предприятии

Следует отметить, что на судоремонтном предприятии в процессе контроля качества ремонтных работ допускается проведение многих лишних процедур. Это объясняется тем, что гарантией от недопущения производственного брака является *сплошной контроль*, к которому подчас стремятся, не учитывая его экономическую эффективность. Однако связанные с этим большие издержки, увеличение численности персонала и производственного цикла заставляют

отказаться от него. Несмотря на явные преимущества и высокую экономическую эффективность прогрессивных методов и средств технического контроля (статистических методов регулирования технологических процессов и статистического приемочного контроля качества продукции, средств механизации и автоматизации контроля и др.), их применение в судоремонтном производстве довольно ограничено. С точки зрения полноты охвата объектов в судоремонтном производстве, как правило, применяется сплошной контроль. Это вызвано тем, что судоремонт — это в основном единичное производство, когда на приемочный контроль одному исполнителю предъявляется, как правило, не партия однородных объектов, а один объект.

Содержание технического контроля качества, которое заключается в проверке соответствия судовых технических средств и процессов ремонта на всех его стадиях установленным техническим требованиям, состоит из двух основных этапов:

- 1-й этап — получение первичной информации о фактическом состоянии объекта контроля;
- 2-й этап — сопоставления первичной информации с заранее установленными требованиями, нормами, показателями и оценки на этой основе соответствия или несоответствия фактических данных требуемым (вторичная информация).

Процесс реализации корректирующих и предупреждающих действий приведен на рис. 2.

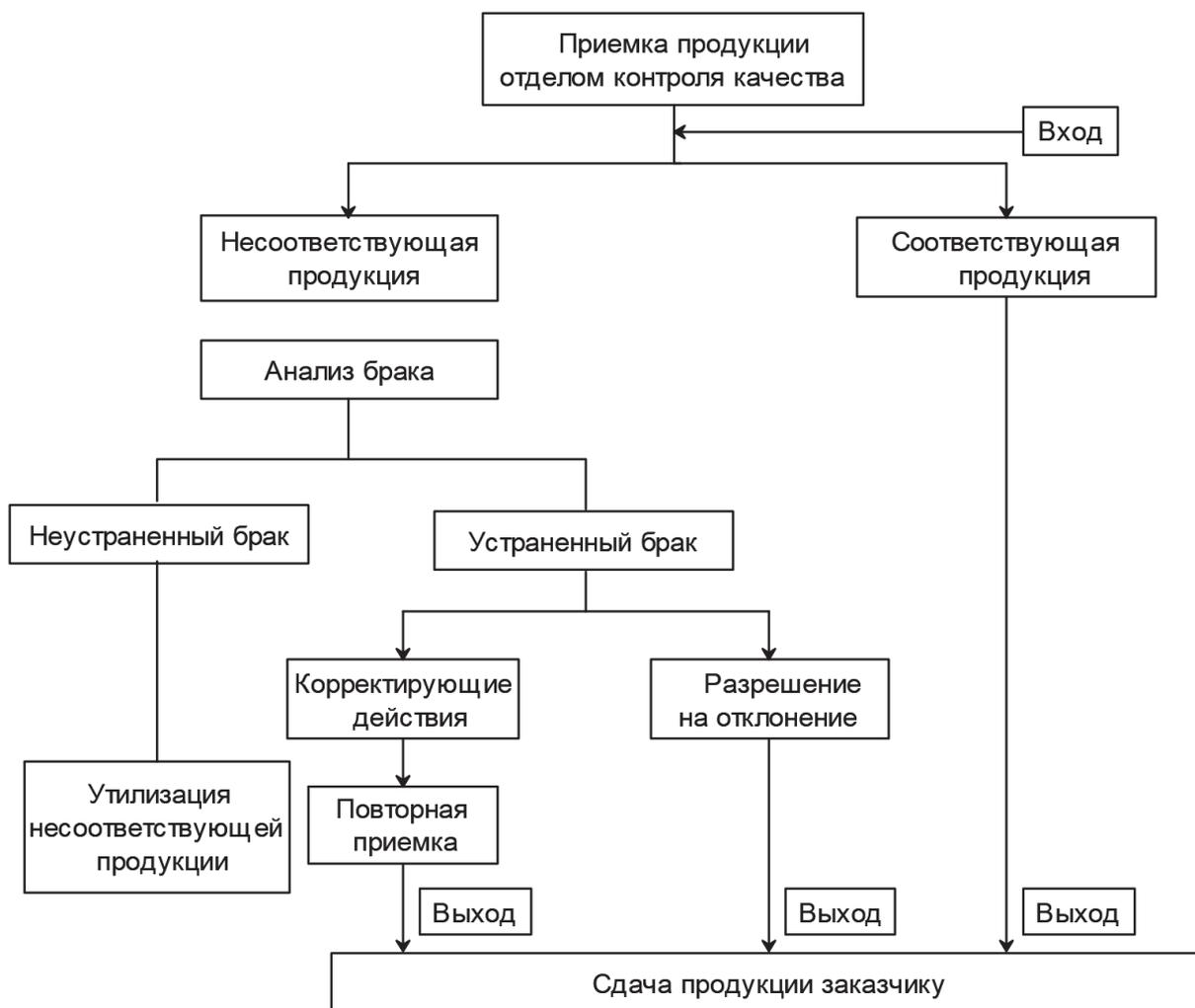


Рис. 2. Процесс управления продукцией, не удовлетворяющей требованиям нормативной документации

Несмотря на то, что в судоремонтном производстве объекты технического контроля различаются контролируемыми свойствами, определение показателей качества и других параметров,

характеризующих эти свойства, осуществляется с помощью относительно небольшого количества групп средств контроля и методов их использования. Например, основными свойствами корпуса и его конструкций являются общая и местная прочность, водонепроницаемость; трубопроводов судовых систем — способность выдерживать в течение установленного периода избыточное давление и агрессивное воздействие перемещающихся в них сред и быть непроницаемыми; двигателей внутреннего сгорания — способность в течение межремонтного периода развивать установленные мощность и частоту вращения, обеспечивать постоянство других показателей назначения, функционировать с установленным уровнем надежности и др. Однако несмотря на принципиальные различия этих свойств, их численные значения зависят прежде всего от геометрических параметров судовых технических средств судна и их взаимного расположения.

Необходимые свойства деталей и их соединений, зависящие от геометрических параметров этих элементов, обеспечиваются с помощью стандартизированной системы допусков и посадок, регламентирующей величины отклонений линейных и угловых параметров деталей и их поверхностей от номинальных значений в зависимости от назначения, характера взаимодействия и условий функционирования. Поэтому наибольший объем контроля в судоремонтном производстве занимает определение значений линейно-угловых величин, а наиболее распространенными являются средства измерений этих величин. К ним относятся такие традиционно измерительные инструменты, как линейки, щупы, штангенциркули, микрометры, индикаторы, угломеры, а также другие инструменты и приспособления (нутромеры, штихмасы), выполненные на их основе. К средствам измерения линейно-угловых величин методом прямых измерений можно отнести пробки и калибры.

В случаях, когда с помощью указанных ранее средств измерений прямые измерения линейно-угловых величин технически невыполнимы или не могут обеспечить необходимый уровень точности, широкое применение нашли средства измерений, позволяющие применить оптические, акустические, радиационные и другие неразрушающие методы контроля линейно-угловых величин. Например, для укладки валопровода применяются теодолиты, а для измерения толщин — ультразвуковые, магнитные и индукционные толщиномеры. Сварные соединения контролируются с помощью применения средств измерения (контроль геометрических параметров сварных швов), средств и методов неразрушающего контроля, а также с помощью гидравлических и пневматических испытаний. Шероховатость поверхности определяется посредством профилометров, профилографов, а также визуально с помощью эталонов поверхности заданной частоты.

Значительный объем в процессе технического контроля составляет определение параметров физического состояния рабочей среды судовых технических средств и технологического состояния материалов и полуфабрикатов в некоторых технологических процессах их обработки (переработки). Измерительному контролю подвергаются давление, температура или их расход, либо все эти параметры воды, водяного пара, смазочного и рабочего масла, жидкого и газообразного топлива, воздуха, кислорода, ацетилен, пропан-бутана, хладагента, других жидкостей и газов, применяемые в процессе эксплуатации судовых технических средств и технологических операций. Контроль давления производится манометрами, контроль температуры — термометрами, пирометрами, термографами, контроль расхода — расходомерами. Ввиду оснащённости современных судов и судоремонтных предприятий электрооборудованием и другими техническими средствами, значительное место в процессе технического контроля занимает также измерительный контроль электрических величин с применением таких средств измерения, как вольтметры, амперметры, омметры, частотомеры, ваттметры.

Качество судовых технических средств во многом зависит от механических и химических свойств материалов, из которых они изготовлены. Эти свойства контролируются с помощью соответствующих методов и средств заводскими лабораториями в процессе входного, операционного и приемочного контроля. Существует ряд контрольных операций, которые не могут выполняться указанными ранее и другими выборочными методами и осуществляются с помощью разрушения проверяемых образцов изделий (например, для обнаружения внутренних дефектов сварных швов).

Современные технологические процессы судоремонтных работ в большинстве случаев сопровождаются использованием различных способов сварки. Совершенствование их или применение новых способов соединений только частично решает проблему повышения качества изготавливаемых (ремонтируемых) конструкций, так как даже при хорошо отработанной технологии сварки возможны различного рода дефекты, приводящие к снижению надежности и долговечности конструкций. В связи с этим важное значение для повышения качества ремонтных работ и изготавливаемых конструкций приобретают *методы неразрушающего контроля*. Для обеспечения качества сварных соединений в первую очередь выполняется контроль исходных материалов, оборудования и оснастки, а также технологии и квалификации сварщиков. Если считать основной задачей сварщиков непосредственное изготовление (ремонт) конструкций, а обязанности контролеров сводить к определению годности конструкций, то при таком положении наличие дефектов в сварных швах рассматривается как нормальное явление, когда качество сварки определяет оператор-контролер, который зачастую не имеет возможности не только выявить все дефекты, но и проанализировать их.

В судоремонтном производстве особое внимание обращают на ускоренное внедрение автоматизированных методов контроля качества сварных соединений. Следует отметить, что в настоящее время не существует такого метода контроля, который гарантировал бы выявление всех дефектов сварки. Каждый из существующих методов обладает как преимуществами, так и недостатками. Практика показывает, что правильная организация процессов контроля, умелое применение того или иного метода или их сочетание позволяют с большой надежностью оценить качество сварных соединений. Все применяемые технические средства измерения линейных размеров в зависимости от степени механизации и автоматизации отдельных элементов технологического процесса контроля можно отнести к следующим группам:

- приборы и устройства ручного контроля;
- механизированные приборы и устройства
- контрольные полуавтоматические приборы и устройства;
- автоматические приборы и устройства контроля.

При использовании приборов или устройств ручного контроля все элементы процесса выполняет контролер или оператор. К этой группе средств контроля относятся различные калибры, индикаторы, миниметры, а также разнообразный универсальный измерительный инструмент. Основными недостатками ручного контроля являются низкая производительность и недостаточная объективность. У механизированных средств измерения часть вспомогательных операций механизирована, но оценка результатов контроля осуществляется оператором по стрелочному указателю. К этой группе относятся устройства, которые при переходе изделием границ регулирования подают условный световой сигнал.

Современные контрольные полуавтоматические приборы и устройства отличаются высокой степенью механизации и автоматизации. Внедрение механизированных приборов и устройств, полуавтоматов и автоматов позволит значительно сократить потребность в измерительных инструментах. Это объясняется, во-первых, заменой большого количества измерительного инструмента одним или несколькими высокопроизводительными средствами контроля и, во-вторых, уменьшением износа измерительных поверхностей в механизированных и автоматизированных устройствах по сравнению с ручным контролем вследствие более правильного и единообразного поведения контролируемых деталей на измерительных поверхностях этих устройств.

Высвобождение измерительного инструмента дает экономию капитальных вложений, которая выражается стоимостью его оборотного фонда и сокращением текущих затрат на эксплуатацию. Обратный фонд представляет собой количество измерительного инструмента, которое необходимо постоянно иметь на рабочих местах в процессе проведения поверки и ремонта и которое должно находиться в запасе для обеспечения бесперебойной работы производства. Основными составляющими экономического эффекта от внедрения средств контроля являются: повышение производительности контроля, его точности и объективности контроля, а также качества продукции.

### Заключение (Conclusion)

В настоящее время во всем мире большое значение придается качеству продукции. Высокое качество продукции является главным условием успеха предприятий и организаций в конкурентной борьбе на рынке. Повышение качества судостроительных и судоремонтных работ представляет собой одну из важнейших государственных проблем, требующих решения целого ряда взаимосогласованных инженерно-технических, организационных, экономических, социальных и других задач со свойственными им связями на разных уровнях управления и на всех стадиях постройки и ремонта судов. Повышение качества судоремонтных работ означает сокращение потерь от брака, оптимальное использование основных производственных фондов, а также максимальную эффективность судоремонтного производства. Целью планирования повышения качества ремонтируемых изделий в судоремонте является обеспечение динамики улучшения их показателей в соответствии с потребностями отраслей, эксплуатирующих суда.

Качество можно рассматривать как стратегический показатель успеха, конкурентоспособности, залог благополучия коллектива и каждого работника в отдельности. Целью любой системы учета затрат, связанных с качеством продукции, должно являться содействие его повышению, направленное на использование всех имеющихся возможностей для сокращения эксплуатационных расходов.

Условиями стратегии, основанной на использовании данных о затратах, связанных с качеством, являются:

- «атака», направленная непосредственно на устранение дефектов, с целью сведения их к нулю;
- инвестиции в «правильные» действия по предупреждению дефектов и повышению качества продукции;
- сокращение расходов на оценку и контроль по мере повышения уровня качества;
- непрерывная оценка достигаемых результатов и переориентация усилий на предупреждение дефектов с целью дальнейшего повышения уровня качества.

В основе данной стратегии находятся следующие допущения: каждый дефект обусловлен своей основной причиной; причины дефектов можно предотвращать; любой дефект всегда легче предупредить, чем исправить. На практике это означает, что реальные издержки, связанные с качеством, можно измерить, а затем сократить с помощью причинно-следственного анализа. Причины дефектов, выявляемых при контроле, необходимо установить и устранить с помощью соответствующих корректирующих действий.

Современный этап обеспечения качества ремонтных работ характеризуется переходом от реализации отдельных разрозненных мероприятий к разработке и внедрению систем управления качеством продукции на разных уровнях. Непосредственно повышение эффективности контроля качества продукции является, в свою очередь, сложной задачей, решаемой в двух направлениях: совершенствование организации технического контроля и внедрение прогрессивных средств и методов контроля. Каждое из этих направлений включает организационные, технические, экономические и социальные вопросы. Практическое решение проблем судоремонта позволит увеличить эксплуатационный период транспортного флота и обеспечить высокий уровень его технического состояния.

Как показывает практика, главные задачи, решение которых может обеспечить существенное повышение качества судоремонтных работ, в настоящее время не решены. Важную роль в совершенствовании организации судоремонтного производства играет мобилизация внутренних ресурсов за счет улучшения работы предприятия и повышения качества ремонтных работ. Показатели технического уровня и качества судоремонтных работ являются определяющими при оценке результатов деятельности судоремонтного предприятия. Одной из задач, постоянно решаемых отделом технического контроля филиала «35 СРЗ» АО «Центр судоремонта «Звездочка», является совершенствование системы технического контроля, способы развития которой находятся прежде всего в области модернизации его организации, так как они не требуют, как правило, значительных материальных затрат.

Целями совершенствования технического контроля являются:

- получение качественно новой информации о свойствах объектов контроля для более достоверной оценки их качества;
- получение более точной информации о свойствах объектов контроля за счет более высокой разрешающей способности новых средств контроля или новых способов;
- сокращение или исключение возможных материальных потерь путем замены методов разрушающего контроля методами неразрушающего контроля;
- повышение производительности труда исполнителей контроля в результате применения совершенных методов и средств, в том числе активного контроля, автоматизированных и автоматических средств контроля.

По мнению экспертов, на современное состояние судоремонтных предприятий и их стратегическое развитие оказывают существенное влияние нерешенные проблемы, в том числе недостаток квалифицированных специалистов судоремонтных специальностей на рынке труда Мурманской области [11]. С учетом того, что проблема повышения качества судоремонтных работ является сложной и многогранной, в настоящее время необходимо перестроить систему подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров, осуществить планомерное и непрерывное совершенствование квалификации рабочих и инженерно-технических кадров с целью обеспечения соответствия их профессиональной подготовки постоянно возрастающему уровню морской техники и технологии создания морской техники. В ближайшее время необходимо обеспечить детальное ознакомление рабочих и инженерно-технических кадров судоремонтного завода с требованиями, предъявляемыми к качеству ремонтных работ, особенно при переходе на новые технологические процессы (предлагается рассматривать это как важную составную часть подготовки судоремонтного производства).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Третьяков А. Н.* Применение инновационных технологий в судоремонте / А. Н. Третьяков, А. В. Четин, Е. А. Чабанов // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: материалы Второй международной научно-технической конференции. — Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический ун-т, 2020. — С. 63–65.
2. *Семенов В. П.* Повышение качества отечественного кораблестроения и судоремонта для усиления экономического присутствия России в Арктике / В. П. Семенов // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2016. — Т. 19. — № 2. — С. 521–527. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-2-521-527.
3. *Куприянова Л. М.* Качество продукции: проблемы и решения / Л. М. Куприянова // Мир новой экономики. — 2015. — № 3. — С. 75–85.
4. *Адлер Ю. П.* Бывает ли контроль лишним? / Ю. П. Адлер // Контроль качества продукции. — 2020. — № 12. — С. 56–60.
5. *Шалин А. П.* Главная ошибка переводов стандартов ISO по оценке соответствия / А. П. Шалин, В. Н. Батраков // Контроль качества продукции. — 2021. — № 1. — С. 22–27.
6. *Михеева Т. А.* Влияние качества подготовки производства на судостроительном предприятии на качество выпускаемой продукции / Т. А. Михеева, И. Н. Лучков, Е. Г. Бурмистров // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 56. — С. 55–64.
7. *Трубников Ю. Г.* Генезис систем управления судостроительным и судоремонтным производствами в России / Ю. Г. Трубников, В. А. Осипов, А. В. Андрухин // Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление. — 2016. — № 1 (77). — С. 37–47. DOI: 10.5281/zenodo.54925.
8. *Цзинькэ Ц.* Управление качеством предприятий: анализ и модели управления качеством / Ц. Цзинькэ, Р. Г. Киматова, Г. А. Кубашева // Социально-экономические явления и процессы. — 2017. — Т. 12. — № 3. — С. 183–192.
9. *Плеханов А. В.* Экономическая эффективность от внедрения системы менеджмента качества / А. В. Плеханов // Скиф. Вопросы студенческой науки. — 2019. — № 4 (32). — С. 421–424.

10. Куликов В. А. Погрешности измерений в судоремонте и оценка моментов выборочных распределений / В. А. Куликов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 777–785. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-777-785.

11. Турчанинова Т. В. Инновационное развитие судоремонтных предприятий в рамках морехозяйственной деятельности приморского региона Арктической зоны России / Т. В. Турчанинова, В. Е. Храпов. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2021. — 135 с.

## REFERENCES

1. Tretiakov, A. N., A. V. Chetin, and E. A. Chabanov. “Application of innovative technologies in ship repair.” *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya: Materialy Vtoroi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Petropavlovsk-Kamchatskii: Kamchatskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2020. 63–65.

2. Semenov, V. P. “The way to improve the quality of domestic shipbuilding and ship repair for increasing economic presence of Russia in the Arctic.” *Vestnik of MSTU* 19.2 (2016): 521–527. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-2-521-527.

3. Kupriyanova, Lyudmila Mikhailovna. “Quality products: problems and solutions.” *The world of new Economy* 3 (2015): 75–85.

4. Adler, Yu. P. “Is control unnecessary?” *Production Quality Control* 12 (2020): 56–60.

5. Shalin, A. P. and V. N. Batrakov. “The main mistake in translating ISO conformity assessment standards. part 1.” *Production Quality Control* 1 (2021): 22–27.

6. Mikheeva, T. A., I. N. Luchkov, and E. G. Burmistrov. “Impact of quality of preparation of production at shipbuilding enterprise on quality of production.” *Bulletin of VSAWT* 56 (2018): 55–64.

7. Trubnikov, Yury G., Viktor A. Osipov, and Aleksandr V. Andruhin. “Management systems genesis of shipbuilding and shiprepairing industries in Russia.” *The bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management* 1(77) (2016): 37–47.

8. Jinke Jiang, Raygul Garifollijevna Kimatova, and Guldarya Amengeldeevna Kubasheva. “Quality management of the enterprises: analysis and models of management of quality.” *Social-Economic Phenomena and Processes* 12.3 (2017): 183–192.

9. Plekhanov, Aleksei Vladimirovich. “Economic efficiency of the introduction of the quality management system.” *Skif. Voprosy studencheskoi nauki* 4(32) (2019): 421–424.

10. Kulikov, Valentin A. “Measurement errors in ship repair and estimation of moments of selective distribution.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 777–785. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-777-785.

11. Turchaninova, T. V., and V. E. Khrapov. *Innovatsionnoe razvitie sudoremontnykh predpriyatii v ramkakh morekhozyaistvennoi deyatel'nosti primorskogo regiona Arkticheskoi zony Rossii*. Apatity: FITs KNTs RAN, 2021.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Пашеева Татьяна Юрьевна** — кандидат технических наук, доцент  
 ФГАОУ ВО «Мурманский государственный технический университет»  
 183010, Российская Федерация, Мурманск,  
 ул. Шмидта, 8/15  
 e-mail: [tatjanapasheeva@rambler.ru](mailto:tatjanapasheeva@rambler.ru)

**Попов Леонид Васильевич** — начальник отдела контроля качества  
 Филиал «35 СРЗ» АО «ЦС «Звездочка»  
 183017, Российская Федерация, Мурманск,  
 ул. Адмирала Лобова, 100  
 e-mail: [35srz@mail.ru](mailto:35srz@mail.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Pasheeva, Tatyana Yu.** — PhD, associate professor  
 Murmansk State Technical University  
 8/15 Schmidta Str., Murmansk, 183010,  
 Russian Federation  
 e-mail: [tatjanapasheeva@rambler.ru](mailto:tatjanapasheeva@rambler.ru)

**Popov, Leonid V.** — Head of the Technical Control Department  
 Branch “35 Ship Repair Plant” of Ship Repair  
 Center “Zvezdochka”, JSC  
 100 Admiral Lobov Str., Murmansk, 183017,  
 Russian Federation  
 e-mail: [35srz@mail.ru](mailto:35srz@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2021 г.  
 Received: February 24, 2021.

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-244-256

## PROSPECTS FOR THE USE OF GAS TURBINE ENGINES IN MARINE POWER PLANTS

**O. K. Bezjukov, V. A. Zhukov, M. S. Kapustyansky**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The information about the appearance of steam and gas turbine engines in the fleet, the current state and prospects of their use is presented in the paper. The information about the technical characteristics of marine gas turbine engines is given, the directions of their improvement are determined in order to expand their use in civil shipbuilding. It is shown that the basis for the creation of marine gas turbine engines are industrial and aviation gas turbine engines. For their successful conversion into shipboard systems, it is necessary to choose a design scheme depending on the purpose and displacement of the vessel, upgrade the systems in accordance with the requirements of the operating conditions, and ensure a rational choice of structural materials. The most important tasks in the creation of marine gas turbine installations are to ensure the deep utilization of secondary energy resources by optimizing the parameters of the working process and the design of heat exchange equipment, as well as to ensure the possibility of using the traditional and alternative fuels, including gas. The choice of a heat recovery scheme and the development of a fuel treatment system are complex tasks, when solving which it is necessary to take into account many factors, namely, the purpose of the vessel, the need for heat for their own needs, the availability of free space, the operating modes of the power plant, the limits of the complexity of the working cycle. Promising areas for the use of gas turbine engines in the fleet are the creation of hybrid power plants based on them, including for the vessels with electric propulsion, as well as environmentally safe installations with closed cycles, including for facilities operating in the coastal shelf. The solution of complex scientific and technical problems associated with the expansion of using the gas turbine engines at civil marine facilities requires comprehensive research, including energy and exergetic assessment of the installations efficiency, numerical modeling of the processes, conducting field experiments and experimental design work.*

*Keywords: marine power plants, gas turbine engines, design schemes, secondary energy resources, energy efficiency, complex research*

**For citation:**

Bezjukov, Oleg K., Vladimir A. Zhukov, and Mikhail S. Kapustyansky. "Prospects for the use of gas turbine engines in marine power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 244–256. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-244-256.

**УДК 621.438**

## ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ НА ФЛОТЕ: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. С. Капустянский**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург,  
Российская Федерация

*В статье приведена информация о появлении на флоте паро- и газотурбинных двигателей, их современном состоянии и перспективах использования, а также определены направления их совершенствования с целью расширения применения в гражданском судостроении. Показано, что базой для создания судовых газотурбинных двигателей являются промышленные и авиационные газотурбинные двигатели, для успешной конвертации которых в судовые необходимо в зависимости от назначения и водоизмещения судна выбрать конструктивную схему, модернизировать системы в соответствии с требованиями эксплу-*

атационных условий, а также обеспечить рациональный выбор конструкционных материалов. Отмечается, что важнейшими задачами при создании судовых газотурбинных установок является обеспечение глубокой утилизации вторичных энергетических ресурсов за счет оптимизации параметров рабочего процесса и конструкции теплообменного оборудования, а также возможности использования традиционных и альтернативных видов топлива, включая газовые. Подчеркивается, что выбор схемы утилизации теплоты и разработка системы топливоподготовки являются комплексными задачами, в процессе решения которых необходимо учитывать множество факторов, а именно: назначение судна, потребность в тепле для собственных нужд, наличие свободного пространства, режимы работы энергоустановки и пределы усложнения рабочего цикла. Рассмотрены перспективные направления использования газотурбинных двигателей на флоте, такие как гибридные энергетические установки, в том числе для судов с электродвижением, работающих в прибрежном шельфе. Сделан вывод о том, что решение сложных научно-технических задач, связанных с расширением сферы использования газотурбинных двигателей на объектах гражданской морской техники, требует комплексных исследований, включающих энергетическую и эксергетическую оценку эффективности установок, численное моделирование процессов, проведение натурных экспериментов и опытно-конструкторских работ.

*Ключевые слова:* судовые энергетические установки, газотурбинные двигатели, конструктивные схемы, вторичные энергетические ресурсы, энергоэффективность, комплексные исследования

**Для цитирования:**

Безюков О. К. Газотурбинные двигатели на флоте: история и перспективы / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. С. Капустянский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 244–256. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-244-256.

### **Введение (Introduction)**

Оценку перспектив использования газотурбинных двигателей (ГТД) в составе судовых энергетических установок (СЭУ) целесообразно начать с ретроспективы применения турбомашин на флоте. В 1897 г. катер *Turbinia* водоизмещением 44,5 т, оснащенный паротурбинной установкой мощностью 1545 кВт (2100 л. с.), разработанной Ч. Парсонсом, развив скорость 34,5 уз, наглядно продемонстрировал преимущество перед кораблями, оснащенными поршневыми паровыми двигателями, самый мощный из которых имел скорость 24 уз. Таким образом, паротурбинные двигатели (ПТД) зарекомендовали себя как наиболее предпочтительный тип энергоустановок для кораблей и судов, от которых требуется высокая скорость. В 1898 г. на английских верфях началось строительство турбинных миноносцев *Viper* и *Sobra*, оснащенных турбинами Ч. Парсонса. В 1906 г. был спущен на воду линейный крейсер *Drednought* водоизмещением 16 тыс. т. Паротурбинная установка Ч. Парсонса обеспечивала крейсеру скорость, равную 21 уз.

Паровые турбомшины устанавливались также на гражданских судах. Так, одним из трех главных двигателей океанского лайнера *Titanic* являлась паровая турбина мощностью 11777 кВт (16 000 л. с.). Ротор турбины диаметром 3,7 м и массой около 131 т вращался с частотой 165–190 мин<sup>-1</sup>. В настоящее время ПТД не утратили своей актуальности — ряд современных судов (рис. 1 и 2) оснащен паротурбинными силовыми установками. К паротурбинным СЭУ относятся также ядерные энергетические установки ледоколов. В настоящее время в состав действующего флота входят атомоходы «Россия», «Советский Союз», «Ямал», «50 лет Победы», «Таймыр» и «Вайгач», плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов», атомный лихтеровоз-контейнеровоз «Севморпуть». Перспективными разработками являются ледоколы пр. 22220 (рис. 3) и 210510 (рис. 4).

ГТД быстрого (взрывного) сгорания в закрытой камере постоянного объема был разработан в 1906–1908 гг. российским инженером В. В. Каровидиным. ГТД Каровидина при частоте вращения турбины 10 000 мин<sup>-1</sup> развивал мощность 1,2 кВт (1,6 л. с.). В 1913 г. М. Н. Никольским был спроектирован газотурбинный двигатель с трехступенчатой газовой турбиной мощностью 120 кВт (160 л. с.). Дальнейшие усовершенствования в конструкцию газотурбинных двигателей внесли В. И. Базаров, В. В. Уваров и Н. Р. Брилинг. В 30–40-е гг. XX в. работы по созданию и совершенствованию корабельных ГТД велись под руководством Г. И. Зотикова на Ленинградском металлическом заводе, однако в начале Великой Отечественной войны они были прекращены [1]. Возобновление

работ по созданию корабельных ГТД относится к 50-м гг. XX в. В качестве основы для разработки корабельного ГТД рассматривались два варианта [2]:

- стационарные (промышленные) ГТД сложного цикла с регенерацией теплоты отработавших газов и умеренной температурой газа перед турбиной;
- авиационные ГТД простого цикла с более высокими параметрами рабочего тела.



Рис. 1. Танкер Knock Nevis дедвейтом 564763 т с паротурбинной энергетической установкой мощностью 37300 кВт (<https://im0-tub-ru.yandex.net/i?id=7f3edc6a20bbaa47788c6250eb9a5d9e&ref=rим&n=33&w=117&h=150>)



Рис. 2. Танкер-газовоз «Гранд Анива» дедвейтом 74000 т с паротурбинной установкой мощностью 29000 л. с. ([https://www.turbинист.ru/uploads/posts/2017-05/thumbs/1493799323\\_tanker-gazovoz-grand-aniva-dlya-perevozki-spg-1.jpg](https://www.turbинист.ru/uploads/posts/2017-05/thumbs/1493799323_tanker-gazovoz-grand-aniva-dlya-perevozki-spg-1.jpg))



Рис. 3. Универсальный атомный ледокол пр. 22220 «Арктика»  
(<https://mtdata.ru/u10/photo80B6/20600927129-0/original.jpg>)

ПТД относятся к двигателям с внешним подводом теплоты, на смену которым пришли двигатели внутреннего сгорания — газотурбинные двигатели (ГТД), превосходящие ПТД по массогабаритным и экономическим показателям. Важнейшую роль в создании ГТД сыграли российские ученые и инженеры. Так, в 1892 г. П. Д. Кузьминский сконструировал первый в мире ГТД с газовой реверсивной турбиной радиального типа. Процесс сгорания в двигателе Кузьминского протекал при постоянном давлении в открытой камере и получил название «медленное сгорание».



Рис. 4. Перспективный атомный ледокол пр. 210510 «Лидер»  
с ядерной паротурбинной установкой мощностью 120 МВт  
(<https://im0-tub-ru.yandex.net/i?id=cac0601f49bcfbfd7105c0074a98fb2e2-l&n=13>)

Первая корабельная ГТУ мощностью около 3 МВт была создана под руководством С. Д. Колосова на базе авиационного турбовинтового двигателя. Различия в условиях эксплуатации авиационных и корабельных ГТУ и связанные с этим проблемы адаптации авиационных ГТД на флоте привели С. Д. Колосова к выводу о необходимости специальной разработки морских ГТД. Однако

последующий отечественный и зарубежный опыт создания кораблей с газотурбинными установками показал, что конвертация авиационных ГТД путем необходимых доработок является наиболее рациональным способом проектирования корабельных ГТД [3].

В настоящее время ГТД находят широкое применение на боевых надводных кораблях различных классов и различного водоизмещения в Военно-морском флоте. Газотурбинными и дизель-газотурбинными энергетическими установками оснащены корабли водоизмещением до 10 000 т и более. По количественному составу энергоустановки с ГТД составляют в ВМФ РФ 61 %, в зарубежном ВМФ — 70 %. Перед отечественными предприятиями поставлена задача создания корабельного ГТД пятого поколения [4], [5].

Оценка возможностей и перспектив использования ГТД в гражданском судостроении является актуальной, учитывая, что требования, предъявляемые к энергетическим установкам гражданских судов, существенно отличаются от требований, предъявляемых к корабельным ГТУ. При проведении анализа перспектив использования ГТД на судах необходимо принимать во внимание следующие факторы:

- опыт использования ГТД на морском и речном флоте;
- программу развития гражданского судостроения в Российской Федерации;
- возможности повышения энергоэффективности судовых ГТУ и обеспечения их соответствия экологическим требованиям;
- технологические возможности отечественных машиностроительных предприятий.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Опыт строительства и эксплуатации гражданских судов с ГТД имеется как в нашей стране, так и за рубежом. Судно на подводных крыльях пр. 1708 типа «Буревестник», построенное в 1964 г. на судостроительном заводе «Красное Сормово», было оснащено конвертированными авиационными двигателями типа АИ-20 (2 × 3660 л. с.), вмещало 150 пассажиров и имело дальность плавания около 500 км.

В серии теплоходов типа «Капитан Смирнов» пр. № 1609 в качестве главных использована газопаровая установка, состоящая из двух газотурбинных двигателей М-25 мощностью по 25000 л. с. и двух утилизационных паровых турбин. В работе [6] приведены данные об отечественных и зарубежных грузовых судах с газотурбинными энергетическими установками. Данные о судах приведены в табл. 1, технические характеристики энергетических установок судов — в табл. 2. На основании данных, приведенных в этих таблицах, можно сделать вывод о том, что газотурбинные двигатели первого поколения, использовавшиеся (1965–1980 гг.) в гражданском судостроении, имели мощность 8,7–27,5 МВт, применяемые на крупнотоннажных судах различного назначения водоизмещением более 15 тыс. т, использовали жидкие сорта топлива нефтяного происхождения. Основным недостатком ГТД являлся более высокий по сравнению с дизелями расход топлива.

Таблица 1

Грузовые суда, оснащенные ГТД

Название судна	Парижская коммуна	Капитан Смирнов	Айрон монарх	Лусайн	Сивен принс	Адмирал Каллэгэн	Финджет	Евролайнер	Шеврон орегон
Тип судна	Сухогруз	Ролкер	Ролкер	Метановоз	Паром	Ролкер	Паром	Контейнеровоз	Танкер
Год введения в эксплуатацию	1968	1978	1973	1974	1975	1967	1977	1971	1975
Изготовитель	СССР	СССР	Австралия	Норвегия	Австралия	ФРГ	Финляндия	ФРГ	США
Дедвейт, т	16 185	36 000	15 450	20 900	5 550	24 000	23 000	23 100	35 560
Эксплуатационная скорость, уз	18,2	25	20	19,7	18	26	30,5	26	15

Таблица 2

Характеристики судовых ГТУ

Название судна	Парижская коммуна	Капитан Смирнов	Айрон монарх	Лусайн	Сивен принс	Адмирал Каллэгэн	Финджет	Евролайнер	Шеврон орегон
Тип установки	Промышленная	Комбинированная	Промышленная	Промышленная	Промышленная	Авиационная	Авиационная	Авиационная	Промышленная
Цикл работы установки	Регенеративный+охлаждение	Простой	Регенеративный	Регенеративный	Регенеративный	Простой	Простой	Простой	Регенеративный
Тип передачи	Механическая	Механическая	Механическая	Механическая	Электрическая	Механическая	Механическая	Механическая	Электрическая
Частота вращения гребного винта, мин <sup>-1</sup>	103	130	125	125	200	145–135	135	170	100
Мощность ГТД, кВт:	8700	2 x 17300	12850	14700	8900	2 x 15300	2 x 20000	2 x 27500	9200
Вид топлива	Дизельное тяжелое	Дизельное	Тяжелое	Дизельное	Дизельное	Дизельное	Дизельное	Дизельное	Дизельное
Удельный расход топлива г/(кВт·ч)	320–324	238	272	–	–	293–312	272	–	269

Потребности гражданского флота РФ составляют [7]: плавучие буровые установки и платформы — 30 ед., суда обеспечения — 90 ед., ледоколы — 18 ед., научно-исследовательские суда — 35 ед., танкеры — 40 ед., суда для перевозки сжиженного газа — 30 ед. По имеющимся в средствах массовой информации данным (сообщение ТАСС: <https://tass.ru/ekonomika/5539685>), Минпромторг РФ поддержал разработку и создание судна на подводных крыльях «Циклон» (рис. 5) полным водоизмещением 70,8 т, вместимостью 150 пассажиров для эксплуатации на Дальнем Востоке и в Калининграде. На судне планируется установить два турбовальных газотурбинных двигателя АИ-20А мощностью по 2,7 МВт, которые должны обеспечить дальность плавания судна до 500 км при крейсерской скорости 95 км/ч и максимальную эксплуатационную скорость — 100 км/ч.



Рис. 5. Судно «Циклон»  
(<http://sudostroenie.info/mobver/novosti/24285.html>)

Большинство из указанных ранее и перспективных судов имеют энергетические установки мощностью в несколько МВт. Учитывая, что в настоящее время в Российской Федерации не производятся дизельные двигатели большой мощности [8], ГТД, выпускаемые в странах СНГ, имеют реальные перспективы применения в морской технике. ГТУ по принципу передачи мощности потребителю можно разделить на прямодействующие, непосредственно связанные с потребителем и включающие механизмы передачи мощности. ГТУ первого типа вследствие высокой частоты вращения ГТД могут найти применение только в том случае, если приводной механизм (электрогенератор, компрессор, вентилятор и др.) допускает высокую частоту вращения.

Главные ГТД могут иметь зубчатую или электрическую передачу. Наибольшее распространение имеет зубчатая передача, КПД которой достигает 97–98 %. Электропередача используется на судах специального назначения: ледоколах и пассажирских судах. Ограниченный набор элементов ГТД (компрессор, камера сгорания, турбина) не исключает различных вариантов конструктивных схем. Типовые схемы ГТД, имеющие перспективы использования на морской технике, приведены на рис. 6.

Разделение приводов воздушного компрессора и пропульсивной установки имеет в своей основе применение нескольких турбин, последовательно или перекрестно включенных в газовый тракт установки. Одна из турбин является пропульсивной (передающей мощность на движитель), другие турбины являются приводными для компрессоров. В схемах ГТД с регенерацией теплоты возможно достижение более высоких КПД, чем в прямоточных типах установок. Эффективность внедрения системы регенерации во многом зависит от конструкции теплообменных аппаратов и их гидравлического сопротивления, определяющего потерю давления в воздушно-газовом тракте. Применение регенерации в двухвальной установке нивелирует снижение КПД двигателя на частичных нагрузках. Возможности повышения энергетической эффективности судовых ГТУ и методы оценки использования вторичных энергетических ресурсов рассмотрены в работах [9], [10].

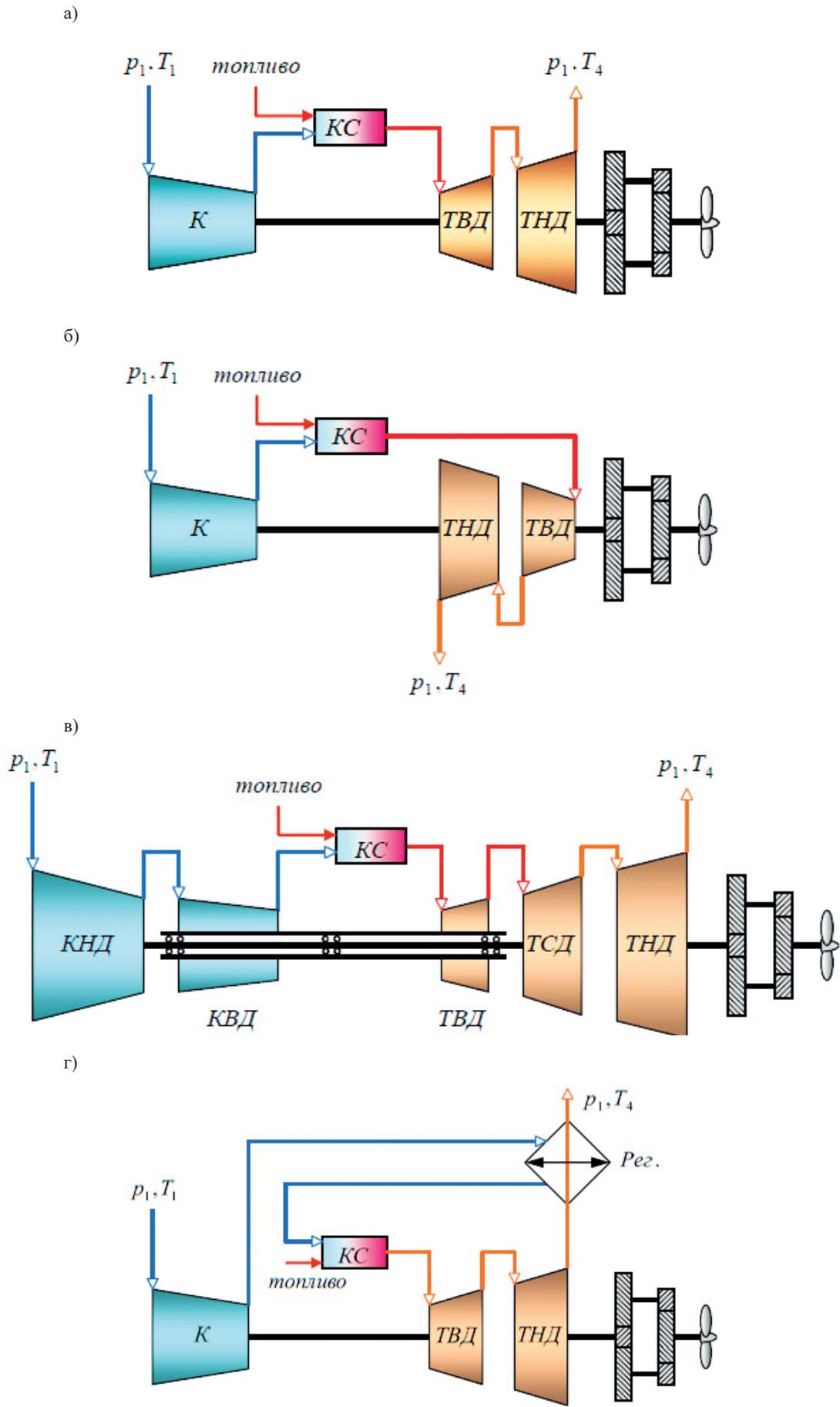
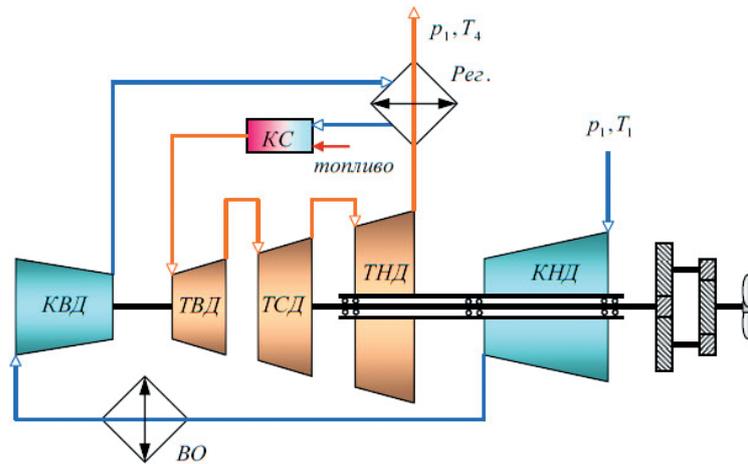


Рис. 6. Конструктивные схемы ГТД (начало)

д)



е)

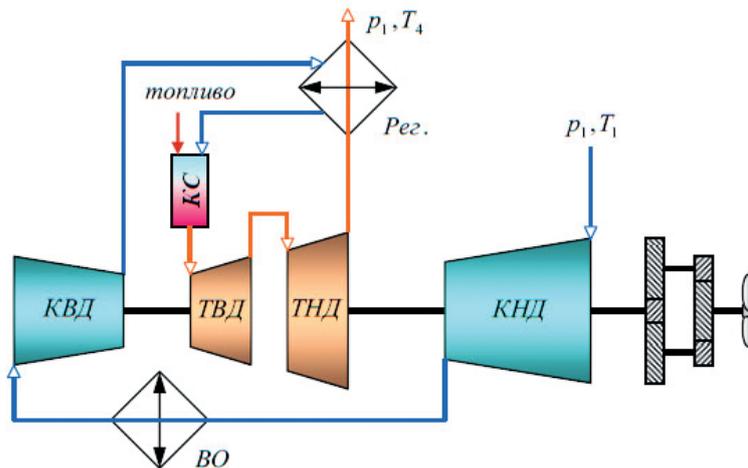


Рис. 6. Конструктивные схемы ГТД (окончание):

- а* — двухвальный ГТД с последовательным соединением турбин (по газовому тракту);
- б* — двухвальный ГТД с перекрестным соединением турбин (по газовому тракту);
- в* — трехвальный ГТД с последовательным соединением турбин (по газовому тракту);
- г* — двухвальный ГТД с последовательным соединением турбин (по газовому тракту) и регенерацией теплоты отработавших газов;
- д* — трехвальный ГТД с последовательным соединением турбин (по газовому тракту), промежуточным охлаждением воздуха и регенерацией теплоты отработавших газов;
- е* — двухвальный ГТД с последовательным соединением турбин (по газовому тракту), промежуточным охлаждением воздуха и регенерацией теплоты отработавших газов

Конвертация авиационных и промышленных ГТД в судовые требует учета особых условий эксплуатации, анализ которых проведен в работах [11]–[13]. Основными выявленными эксплуатационными факторами являются солевые отложения и износы проточных частей компрессоров, а также износ лопаток турбин, оказывающие влияние на снижение экономических и экологических показателей работы судовой ГТУ. Проблемы повышения эксплуатационной надежности ГТД, применяемых в судовых энергетических установках рассмотрены в работах [14], [15]. Совершенствованию систем диагностирования судовых ГТД посвящены работы [16]–[18].

С целью повышения надежности элементов судовых ГТД предлагается использовать конструкционные материалы, отвечающие условиям эксплуатации [19], оптимизировать режимы работы ГТД [20] и тепловое состояние наиболее теплонагруженных элементов [21], [22], совершенствовать конструкцию основных элементов ГТД на основании всесторонних научных исследований [23], [24].

### Результаты (Results)

В результате проведенного анализа научно-технической информации, представленной в отечественных и зарубежных источниках можно сделать следующие выводы.

1. Современные тенденции развития гражданского судостроения подтверждают возможности расширения использования в составе судовых энергетических установок газотурбинных двигателей. Наиболее рациональным является применение ГТД в СЭУ мощностью 2 МВт и более.

2. Использование ГТД в составе СЭУ позволяет решить проблему импортозамещения, поскольку в настоящее время в Российской Федерации отсутствует производство дизельных двигателей большой мощности, тогда как производство газотурбинных двигателей успешно реализовано на ряде отечественных предприятий.

3. Для использования на флоте в зависимости от назначения судна и его водоизмещения могут быть адаптированы как промышленные (стационарные), так и авиационные ГТД.

4. Основными задачами, решаемыми в процессе конвертации промышленных и авиационных ГТД в судовые, являются повышение их экономичности за счет совершенствования рабочих процессов и максимально полного использования вторичных энергетических ресурсов, а также повышение ресурсных показателей за счет учета особенностей эксплуатации и рационального выбора конструкционных материалов.

5. Существующие конструктивные схемы ГТД позволяют достаточно полно применять вторичные энергетические ресурсы при условии оптимального выбора параметров рабочего процесса и использования эффективного теплообменного оборудования.

### Обсуждение (Discussion)

Задачи повышения надежности ГТД за счет совершенствования конструкции отдельных элементов, обеспечения допустимого теплового состояния, использования современных материалов успешно решаются разработчиками и производителями стационарных и авиационных ГТД. Особой задачей, требующей решения применительно к судовым ГТУ, является глубокая утилизация вторичных энергетических ресурсов, которая для авиационных ГТД, не является приоритетной, и в отличие от стационарных установок должна решаться в ограниченном пространстве машинно-котельного отделения. В связи с этим особое значение приобретает выбор параметров рабочего цикла и конструкции теплообменных аппаратов.

Особенность подобных исследований состоит в использовании природного газа и водорода в качестве альтернативного топлива для судовых газовых турбин и гибридных судовых энергетических установок на основе ГТД с возможностью использования различных видов топлива, а также разработке судовых газовых турбин замкнутого цикла, обладающих такими преимуществами, как возможность эксплуатации практически любого источника теплоты, компактность и экологическая безопасность.

### Заключение (Conclusion)

Использование газотурбинных двигателей в гражданском судостроении имеет перспективы для определенных сегментов флота. Успешная реализация данных перспектив требует решения комплекса научно-технических задач, связанных с конвертацией промышленных и авиационных ГТД в судовые. К важнейшим задачам относятся повышение энергоэффективности судовых ГТУ за счет утилизации вторичных энергетических ресурсов, возможность использования традиционных и альтернативных видов топлива, создание гибридных судовых энергетических установок на базе ГТД, в том числе для буровых платформ и других объектов, работающих в прибрежных акваториях.

Решение сложного комплекса задач предполагает применение различных методов исследований, включая энергетические и эксергетические оценки рабочих циклов ГТД, численное моделирование процессов, протекающих в элементах ГТД и теплообменном оборудовании, экспериментальные исследования, а также сбор информации в условиях эксплуатации судовых ГТУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прасников В. Б.* Первый газотурбинный корабль отечественного ВМФ (Опытный большой торпедный катер пр. 183Т) / В. Б. Прасников // Судостроение. — 2004. — № 6 (757). — С. 27–31.
2. *Буров М. Н.* История развития и основные проблемы создания морских энергетических установок нового поколения / М. Н. Буров // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № 3 (393). — С. 103–112. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-103-112.
3. *Буров М. Н.* Основные проблемы применения конвертированных авиационных газотурбинных двигателей в составе морских энергетических установок и их решение / М. Н. Буров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2018. — Т. 22. — № 4 (82). — С. 62–69.
4. *Буров М. Н.* К вопросу о формировании облика семейства морских ГТД 5-го поколения / М. Н. Буров, В. А. Пономарев // Актуальные проблемы морской энергетики. Материалы Восьмой международной научно-технической конференции. — СПб.: СПбГМТУ, 2019. — С. 40–47.
5. *Буров М. Н.* Направления разработки и создания корабельного газотурбинного двигателя пятого поколения / М. Н. Буров, В. А. Пономарев // Судостроение. — 2020. — № 4 (851). — С. 29–34.
6. *Болдырев О. Н.* Судовые энергетические установки / О. Н. Болдырев. — Северодвинск: Севмашвуз, 2003. — 171 с.
7. *Пашин В. М.* Инновации и перспективы создания морской техники / В. М. Пашин // Инновации. — 2011. — № 7 (153). — С. 3–10.
8. *Безюков О. К.* Состояние и перспективы судового двигателестроения в России / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 40–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-40-53.
9. *Ерофеев В. Л.* О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.
10. *Жуков В. А.* Использование вторичных энергетических ресурсов в судовых энергетических установках с газотурбинными двигателями / В. А. Жуков, М. С. Капустянский // Актуальные проблемы морской энергетики / Материалы девятой Междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2020. — С. 583–587.
11. *McCreath C. G.* Environmental factors that determine hot corrosion in marine gas turbine rigs and engines / C. G. McCreath // Corrosion Science. — 1983. — Vol. 23. — Is. 9. — Pp. 1017–1023. DOI: 10.1016/0010-938X(83)90028-8.
12. *Семенюк А. В.* Влияние эксплуатационных факторов на параметры рабочего процесса судовых газотурбинных двигателей / А. В. Семенюк, Л. А. Семенюк, Н. Н. Таращан // Вестник Морского государственного университета. — 2018. — № 83. — С. 84–89.
13. *Wirkowski P.* Parameterization of the operating conditions of the vessel's turbine engine in the aspect of the pollutant exhaust emission assessment / P. Wirkowski, J. Markowski // Transportation Research Procedia. — 2019. — Vol. 40. — Pp. 927–933. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.130.
14. *Мясников Ю. Н.* Эксплуатационные дефекты судовых дизельных и газотурбинных двигателей / Ю. Н. Мясников, В. С. Никитин, А. А. Равин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 3 (385). — С. 85–96. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-85-96.
15. *Глушкова Д. Б.* Повышение ресурса работы деталей судовых газотурбинных двигателей / Д. Б. Глушкова, Ю. Н. Дзюба // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2008. — № 42. — С. 24–27.
16. *Воробьев Ю. М.* Усовершенствование бортовых систем диагностирования судовых газотурбинных двигателей / Ю. М. Воробьев // Водный транспорт. — 2013. — № 2 (17). — С. 13–18.
17. *Жорник М. Н.* Оптико-электронная пирометрическая система / М. Н. Жорник, С. В. Веретенников, Е. Г. Колесова // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. — 2018. — № 4 (47). — С. 24–30.
18. *Campora U.* Marine gas turbine monitoring and diagnostics by simulation and pattern recognition / U. Campora, C. Cravero, R. Zaccone // International journal of naval architecture and ocean engineering. — 2018. — Vol. 10. — Is. 5. — Pp. 617–628. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2017.09.012.

19. *Vaferi K.* Thermo-mechanical simulation of ultrahigh temperature ceramic composites as alternative materials for gas turbine stator blades / K. Vaferi, M. Vajdi, S. Nekahi, S. Nekahi, F. S. Moghanlou, M. S. Asl, M. Mohammadi // *Ceramics International*. — 2021. — Vol. 47. — Is. 1. — Pp. 567–580. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.164.
20. *Володин Ю. Г.* Теплообмен при пуске судового газотурбинного двигателя / Ю. Г. Володин, О. П. Марфина, Ю. И. Матвеев, М. Ю. Храмов // *Вестник Волжской государственной академии водного транспорта*. — 2019. — № 58. — С. 153–158.
21. *Володин Ю. Г.* Особенности теплообмена в жаровой трубе судового газотурбинного двигателя в пусковом режиме / Ю. Г. Володин, Ю. И. Матвеев, М. Ю. Храмов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2018. — № 4. — С. 66–74. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-66-74.
22. *Liu J.* Effects of a pocket cavity on heat transfer and flow characteristics of the endwall with a bluff body in a gas turbine engine / J. Liu, S. Hussain, L. Wang, G. Xie, B. Sundén // *Applied Thermal Engineering*. — 2018. — Vol. 143. — Pp. 935–946. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.020.
23. *Fatsis A.* Design point analysis of two-shaft gas turbine engines topped by four-port wave rotors for power generation systems / A. Fatsis // *Propulsion and Power Research*. — 2019. — Vol. 8. — Is. 3. — Pp. 183–193. DOI: 10.1016/j.jprr.2019.06.001.
24. *Hughes M.* Challenges for gas turbine engine components in power generation / M. Hughes // *Procedia structural integrity*. — 2017. — Vol. 7. — Pp. 33–35. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.057.

## REFERENCES

1. Prasnikov, V. B. “The first gas turbine ship of national navy.” *Shipbuilding* 6(757) (2004): 27–31.
2. Burov, Maxim N. “Evolution and main design challenges of new-generation marine power plants.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 3(393) (2020): 103–112. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-103-112.
3. Burov, Maksim Nikolaevich. “Main problems of converted aircraft GTES application in marine power plants and their solution.” *Vestnik USATU* 22.4(82) (2018): 62–69.
4. Burov, M. N., and V. A. Ponomarev. “To the issue of shaping the image of v-generation ship GTES family.” *Aktual'nye problemy morskoi energetiki. Materialy Vos'moi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet, 2019. 40–47.
5. Burov, M. N., and V. A. Ponomaryov. “Development and construction trends of 5th generation gas-turbine engine.” *Shipbuilding* 4(851) (2020): 29–34.
6. Boldyrev, O. N. *Cudovye energeticheskie ustanovki*. Severodvinsk: Sevmashvtuz, 2003.
7. Pashin, V. “Innovations and prospects of naval engineering.” *Innovations* 7(153) (2011): 3–10.
8. Bezjukov, Oleg Konstantinovich, and Vladimir Anatoljevich Zhukov. “State and prospects of ship engine-building in Russia.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 40–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-40-53.
9. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Olesya V. Melnik. “On the possibilities of using secondary energy resources in marine engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.
10. Zhukov, V. A., and M. S. Kapustyanskii. “Ispol'zovanie vtorichnykh energeticheskikh resursov v sudovykh energeticheskikh ustanovkakh s gazoturbinnymi dvigatelyami.” *Aktual'nye problemy morskoi energetiki. Materialy devyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2020. 583–587.
11. McCreath, C. G. “Environmental factors that determine hot corrosion in marine gas turbine rigs and engines.” *Corrosion Science* 23.9 (1983): 1017–1023. DOI: 10.1016/0010-938X(83)90028-8.
12. Semenyuk, A. V., L. A. Semenyuk, and N. N. Tarashchan. “Vliyanie ekspluatatsionnykh faktorov na parametry rabocheho protsessa sudovykh gazoturbinnnykh dvigatelei.” *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 83 (2018): 84–89.
13. Wirkowski, Paweł, and Jarosław Markowski. “Parameterization of the operating conditions of the vessel's turbine engine in the aspect of the pollutant exhaust emission assessment.” *Transportation Research Procedia* 40 (2019): 927–933. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.130.
14. Myasnikov, Yuri N., Vladimir S. Nikitin, and Aleksandr A. Ravin. “Service defects of ship diesel and gas-turbine engines.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 3(385) (2018): 85–96.
15. Glushkova, D., and Yu. Dzyuba. “Increasing service life of marine gas-turbine engine parts.” *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* 42 (2008): 24–27.

16. Vorobjov, U. "Improving onboard diagnostic systems of gas turbine engines." *Vodnyi transport* 2(17) (2013): 13–18.
17. Zhornik M. N., S. V. Veretennikov, and E. G. Kolesova. "Optical-electronic pyrometric system." *Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University* 4(47) (2018): 24–30.
18. Campora, Ugo, Carlo Cravero, and Raphael Zaccone. "Marine gas turbine monitoring and diagnostics by simulation and pattern recognition." *International journal of naval architecture and ocean engineering* 10.5 (2018): 617–628. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2017.09.012.
19. Vaferi, Kouros, Mohammad Vajdi, Sanam Nekahi, Sahar Nekahi, Farhad Sadegh Moghanlou, Mehdi Shahedi Asl, and Mohsen Mohammadi. "Thermo-mechanical simulation of ultrahigh temperature ceramic composites as alternative materials for gas turbine stator blades." *Ceramics International* 47.1 (2021): 567–580. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.164.
20. Volodin, Y. G., O. P. Marfina, Y. I. Matveev, and M. Y. Khramov. "Heat exchange during start-up of a marine gas turbine engine." *Bulletin of VSAWT* 58 (2019): 153–158.
21. Volodin, Yuri Guryanovich, Yuri Ivanovich Matveev, and Mikhail Yurievich Khramov. "Characteristics of heat transfer in fire tube of marine gas turbine engine in starting mode." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2018): 66–74. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-66-74.
22. Liu, Jian, Safeer Hussain, Lei Wang, Gongnan Xie, and Bengt Sundén. "Effects of a pocket cavity on heat transfer and flow characteristics of the endwall with a bluff body in a gas turbine engine." *Applied Thermal Engineering* 143 (2018): 935–946. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.020.
23. Fatsis, A. "Design point analysis of two-shaft gas turbine engines topped by four-port wave rotors for power generation systems." *Propulsion and Power Research* 8.3 (2019): 183–193. DOI: 10.1016/j.jprr.2019.06.001
24. Hughes, Martin. "Challenges for gas turbine engine components in power generation." *Procedia structural integrity* 7 (2017): 33–35. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.057.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Безюков Олег Константинович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [okb-nayka@yandex.ru](mailto:okb-nayka@yandex.ru), [kaf\\_sdvs@gumrf.ru](mailto:kaf_sdvs@gumrf.ru)

**Жуков Владимир Анатольевич** —  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [va\\_zhukov@rambler.ru](mailto:va_zhukov@rambler.ru), [zhukovva@gumrf.ru](mailto:zhukovva@gumrf.ru)

**Капустянский Михаил Сергеевич** — аспирант  
*Научный руководитель:*  
Жуков Владимир Анатольевич  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kaf\\_sdvs@gumrf.ru](mailto:kaf_sdvs@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Bezjukov, Oleg K.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [okb-nayka@yandex.ru](mailto:okb-nayka@yandex.ru), [kaf\\_sdvs@gumrf.ru](mailto:kaf_sdvs@gumrf.ru)

**Zhukov, Vladimir A.** —  
Dr. of Technical Sciences, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping,  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [va\\_zhukov@rambler.ru](mailto:va_zhukov@rambler.ru), [zhukovva@gumrf.ru](mailto:zhukovva@gumrf.ru)

**Kapustyansky, Mikhail S.** — Postgraduate  
*Supervisor:*  
Zhukov, Vladimir A.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping,  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kaf\\_sdvs@gumrf.ru](mailto:kaf_sdvs@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2021 г.  
Received: February 18, 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265

## COMPARISON OF THE VELOCITY COEFFICIENTS VALUES IN THE TURBINE STAGE WITH PARTIAL BLADING OF THE RUNNER

**A. A. Kryukov, S. V. Chekhranov**

Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

*Modern marine turbine units are distinguished by a variety of purposes, types, structural differences, materials and working bodies. This diversity is ensured by the use of innovative information technologies from the pre-production process to the production of final products. It is noted that at the design stage of the turbomachine, it is necessary to take into account the external characteristics of the stage — power, angular velocity, shaft torque, efficiency, etc. It is emphasized that in an effort to reduce the losses in the stage, engineers resort to creating low-consumption partial turbines, in which a significant part of the losses from the partiality decreases due to changes in design parameters. An example of such a design is a turbine with partial blading of the runner. The object of the study is a low-consumption inflow turbine with partial blading of the runner with different admission intensity. The subject of the study is the gas-dynamic characteristics of the flow part of the nozzle diaphragm and the runner of the low-consumption inflow turbine. The main objective of the study is to compare the values of the velocity coefficients of the nozzle diaphragm and the runner of the turbine stage. It is noted that low-consumptions are characterized by small dimensions that do not allow to properly conducting a physical experiment. The method of research in the proposed work is numerical simulation of gas flow using computational gas dynamics. The graphs of the dependence of the velocity coefficients of the nozzle diaphragm and the runner at different admission intensity on  $u_1/C_0$  are presented in the paper. The unsatisfactory convergence of the coefficients values is established and recommendations for improving the convergence of the gas-dynamic calculation are proposed.*

*Keywords: nozzle diaphragm, runner, velocity coefficients, admission intensity, simulation, numerical method, experiment.*

**For citation:**

Kryukov, Aleksey A., and Sergei V. Chekhranov. "Comparison of the velocity coefficients values in the turbine stage with partial blading of the runner." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 257–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265.

УДК 621.515.001.5

## СРАВНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ СКОРОСТИ В ТУРБИНОЙ СТУПЕНИ С ЧАСТИЧНЫМ ОБЛОПАЧИВАНИЕМ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

**А. А. Крюков, С. В. Чехранов**

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет», г. Владивосток, Российская Федерация

*В работе исследованы современные судовые турбоагрегаты, отличающиеся многообразием назначения, типов, конструкционных отличий, материалов и рабочих тел. Такое разнообразие обусловлено применением инновационных информационных технологий — от процесса подготовки производства до выпуска конечной продукции. Отмечается, что на этапе проектирования турбомашины необходимо учитывать внешние характеристики: мощность, угловую скорость, крутящий момент на валу, коэффициент полезного действия, характеризуемый потерями, которые имеются в ступени, и др. Подчеркивается, что в стремлении снизить потери в ступени инженеры прибегают к созданию малорасходных парциальных турбин, у которых существенная часть потерь от парциальности уменьшается в связи с изменением конструктивных параметров. Примером такой конструкции является турбина с частичным облопачиванием рабочего колеса, объектом исследования — малорасходная центробежная турбина с частичным облопачиванием рабочего колеса с различной степенью парциальности. Предметом исследования являются газодинамические характеристики проточной части соплового аппарата*

и рабочего колеса малорасходной центростремительной турбины. Основной задачей исследования является сравнение значений коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса турбинной ступени. Отмечается, что малорасходные турбины характеризуются малыми размерами, не позволяющими в должной мере качественно проводить физический эксперимент. Методом исследования в предлагаемой работе является численное моделирование течения газа с использованием вычислительной газовой динамики. В работе представлены графики зависимости коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса при различной степени парциальности от  $u_1/C_0$ . Установлена неудовлетворительная сходимость значений коэффициентов и предложены рекомендации по улучшению сходимости газодинамического расчета.

*Ключевые слова:* сопловой аппарат, рабочее колесо, коэффициент скорости, степень парциальности, моделирование, численный метод, эксперимент.

**Для цитирования:**

Крюков А. А. Сравнение значений коэффициентов скорости в турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 257–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265.

### Введение (Introduction)

В работе [1] исследуются модели, в которых коэффициенты скорости сопловых аппаратов (СА) и рабочих колес (РК) приняты по результатам обобщений экспериментальных исследований традиционных парциальных турбин. Результаты исследования [2] показали наличие влияния крайних сопловых каналов в турбине с частичным облопачиванием рабочего колеса на суммарный коэффициент скорости соплового аппарата турбинной ступени. Это служит основанием для необходимости совершенствования предложенной ранее математической модели течения потока и замены методики определения коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса.

Малорасходные турбины характеризуется рядом специфических свойств, в том числе маломерностью, которые не позволяют в должной мере проводить физические эксперименты. В связи с развитием информационных технологий широкое распространение получил *численный метод CFD* (вычислительная газовая динамика), позволяющий получать выходные параметры потока в турбинных ступенях, а также визуальное отображение структуры течения. Замена физического эксперимента численным дает возможность применять программные системы *CFD* в качестве имитационно стенда, что подтверждено рядом исследований [3]–[7].

В процессе внедрения численных экспериментов можно установить отличительные особенности характера течения потока в турбине с частичным облопачиванием рабочего колеса от традиционных парциальных турбин и принять решение о необходимости полужэкспериментального исследования характеристик потока в СА и РК с помощью имитационного стенда.

*Целью исследования* является определение характерных различий значений коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса, полученных на основе результатов обобщений экспериментальных исследований традиционных парциальных турбин и численного исследования турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса с использованием ANSYS CFX.

*Задачи исследования:*

– сравнить значения коэффициентов скорости СА и РК турбинной ступени со степенью парциальности  $\varepsilon = 1,00$ , полученные в ходе традиционного расчета и с использованием имитационно стенда;

– сравнить значения коэффициентов скорости СА и РК турбинных ступеней со степенью парциальности  $\varepsilon = 0,059–0,412$  на интервале  $u_1/C_0 = 0,1–0,9$  и в диапазоне  $\pi_t = 1,5–2,5$ ;

– сформулировать методические рекомендации по дальнейшему применению полученных данных.

Объектом исследования является центростремительная малорасходная турбина с частичным облопачиванием РК с различной степенью парциальности, предметом исследования служат газодинамические характеристики проточной части соплового аппарата и рабочего колеса малорасходной

центростремительной турбины, методом исследования — численное моделирование течения газа с использованием вычислительной газовой динамики.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении исследования особенностей структуры потока в проточной части турбины с частичным облопачиванием РК применяется *метод численного моделирования*, использование которого позволяет собрать информацию о поле скоростей потока в проточной части для уточнения данных, полученных в процессе проведения физических опытов. Важность использования такого метода в данной работе обеспечена характерными особенностями исследуемой проточной части ступени, которая имеет небольшие геометрические размеры и не позволяет применять в ходе эксперимента измерительные приборы для качественного исследования структуры потока.

Численное моделирование, применяемое в качестве дополняющего и уточняющего метода к проведению газодинамического эксперимента, позволяет снизить затраты времени и ресурсов за счет уменьшения количества опытов на физической турбинной ступени. На основе конкретизированных данных о потоке в проточной части ступени, полученных этим методом, появляется возможность решить вопрос об эффективности рабочего процесса в турбинной ступени и сформулировать методы его совершенствования.

При использовании метода численного моделирования течения рабочего тела в турбинной ступени применяется система уравнений, которые описывают перемещение потока газа в проточной части, состоящая из уравнений сохранения энергии, количества движения, момента количества движения и неразрывности. Кроме того, применяются уравнения состояния газа и учитываются вязкость газа и турбулентность течения потока.

В настоящее время существующие наработки [8]–[11] в создании численных методов решения уравнений описывают перемещение турбулентного потока газа. Использование данных методов устанавливает дополнительные требования к квалифицированному подходу и проверке достоверности полученных расчетных данных путем сопоставления их с опытными данными. Технические характеристики турбинных ступеней приведены в таблице, визуальные трехмерные модели — на рис. 1.

#### Характеристики турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса

Угол наклона сопел соплового аппарата, град.	Высота сопла, мм	Шаг сопел, мм	Ширина горла, мм	$Z_{CA}$ сопел, СА	$\beta_{1PK}$ , град.	$\beta_{2PK}$ , град.	$Z_{PK}$ лопаток РК
16,31	2,53	5,88	1,45	27	90	42	34
	2,53	5,88	1,45	27	90	42	13
	2,53	5,88	1,45	27	90	42	6
	2,53	5,88	1,45	27	90	42	3
	2,53	5,88	1,45	27	90	42	1
	$L_{PK}$ вход, мм	$L_{PK}$ выход, мм	Ширина горла, мм	Шаг лопаток, мм	$\epsilon_{экр}$	$D_n$ , мм	$D_{вн}$ , мм
	3,29	4,3	1,5	2,54	1,00	50	27,5
	3,29	4,3	1,5	2,54	0,412	50	27,5
	3,29	4,3	1,5	2,54	0,206	50	27,5
	3,29	4,3	1,5	2,54	0,118	50	27,5
	3,29	4,3	1,5	2,54	0,059	50	27,5

Процесс численного исследования турбинной ступени с частичным облопачиванием РК состоит из пяти этапов:

- 1-й этап — создание геометрических моделей турбины и различной степенью парциальности с использованием систем CAD-моделирования;
- 2-й этап — генерация сеточной модели с использованием параметров сетки, применяемой в исследовании [2];

3-й этап — задание граничных условий, применимых к данному численному эксперименту (параметры рабочего тела и модели турбулентности, частота вращения, интерфейс сопряжения, количество итераций и др.) при создании расчетной модели;

4-й этап — продолжительный период времени, который занимает поиск решения в главном модуле с учетом требуемых значений невязок и небалансов;

5-й этап — анализ результатов расчетов.

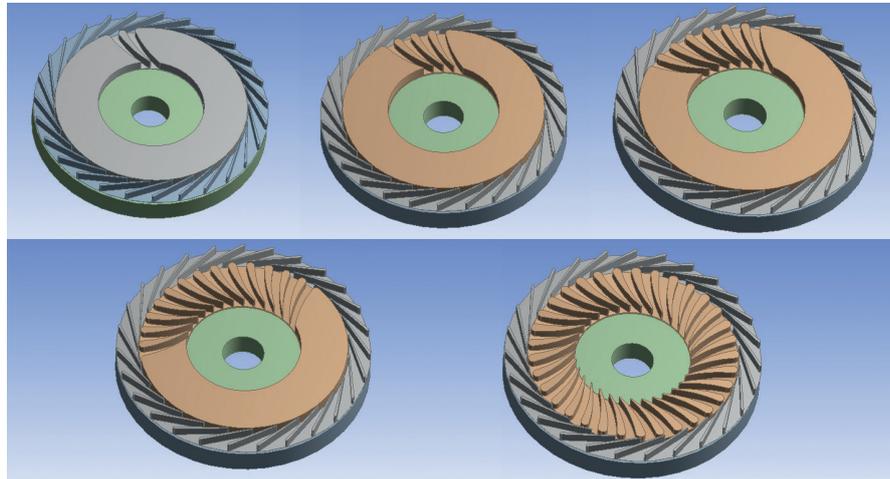


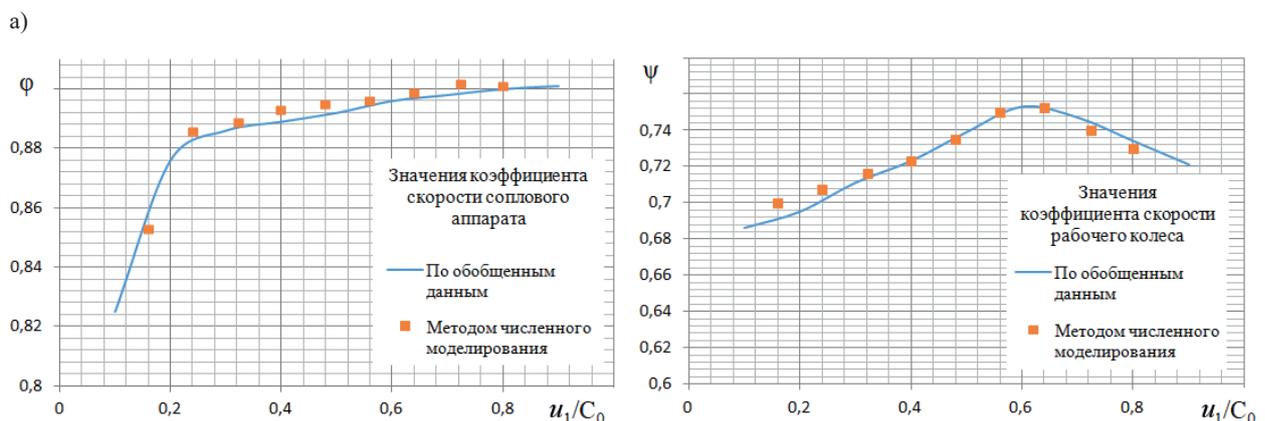
Рис. 1. Турбинные ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса с различной степенью парциальности в диапазоне  $\varepsilon = 0,059-1$

Численное исследование выполнялось при соблюдении следующих граничных условий:

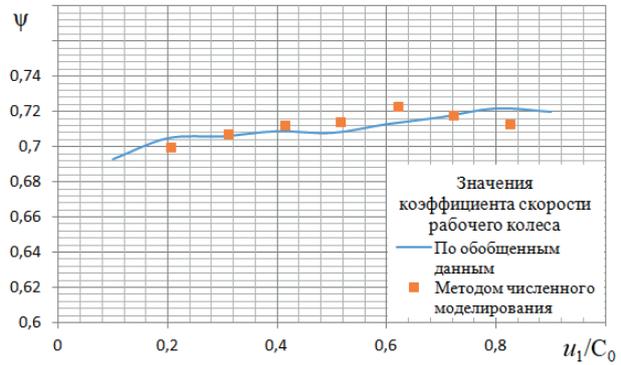
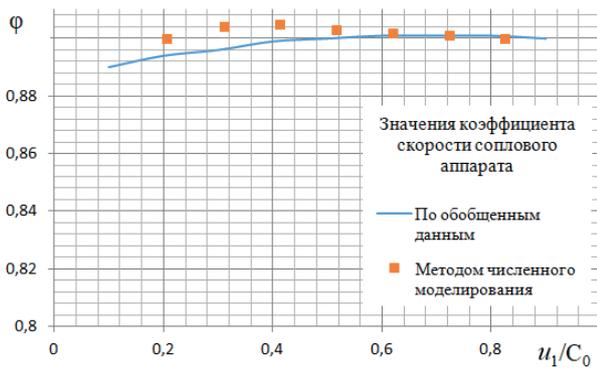
- постановка задачи — нестационарная задача;
- рабочее тело — Air Ideal Gas;
- модель турбулентности — SST (Shear Stress Transport);
- давление торможения потока на входе в ступень —  $(1,5-2,5) \cdot 10^5$  Па;
- температура торможения потока на входе в ступени — 293 К;
- давление в потоке на выходе из ступени —  $10^5$  Па;
- диапазон частот вращения РК 20 000–100 000 мин<sup>-1</sup>.

### Результаты (Results)

Сравнительный анализ значений коэффициентов скорости СА и РК турбинной ступени со степенью парциальности  $\varepsilon = 1,00$ , полученных в ходе традиционного расчета и с использованием имитационного стенда позволяют сделать вывод о целесообразности его применения при определении значения коэффициентов скорости СА и РК. На рис. 2 показаны графики зависимости коэффициентов скорости СА и РК от  $u_1/C_0$  при различной степени расширения ступени  $\pi_r$ .



б)



в)

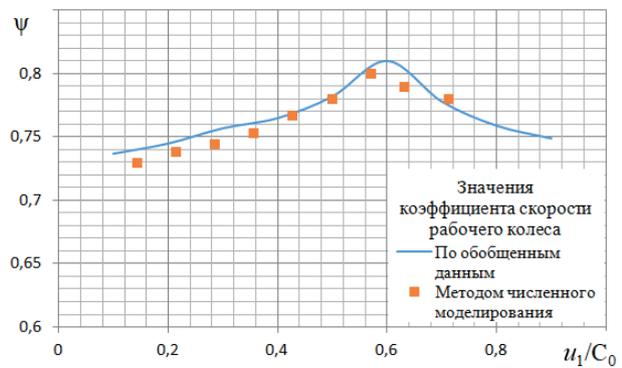
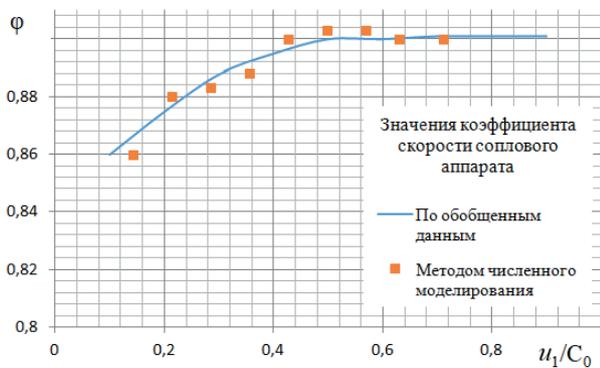


Рис. 2. Графики зависимости коэффициентов  $\phi$  и  $\psi$  в турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса:  
 а — при  $\varepsilon = 1,00$  и  $\pi_r = 2,0$ ; б — при  $\varepsilon = 1,00$  и  $\pi_r = 1,5$ ; в —  $\varepsilon = 1,00$  и  $\pi_r = 2,5$

На графиках зависимости видна высокая сходимость значений коэффициентов скорости СА и РК, полученных различными способами. Это показывает правильность выбора расчетной сетки, граничных условий и критериев сходимости газодинамических расчетов. Также это может свидетельствовать о целесообразности применения методов CFD вместо традиционно используемых методов выполнения газодинамических расчетов. В результате использования данного метода определения коэффициентов скорости СА и РК применительно к турбинным ступеням с частичным облопачиванием рабочего колеса с некоторой степенью парциальности получают подобные графики зависимости (рис. 3 и 4).

а)

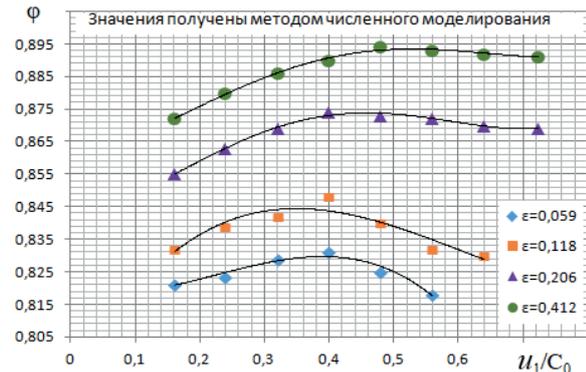
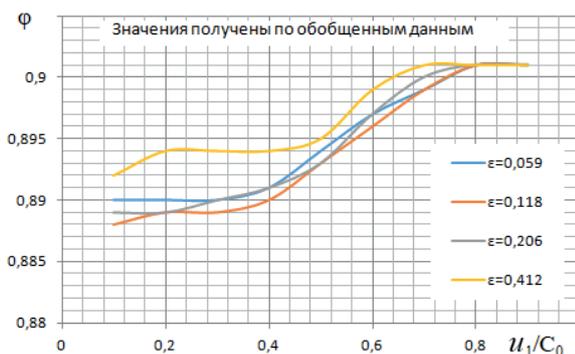


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента скорости соплового аппарата (а) (начало)

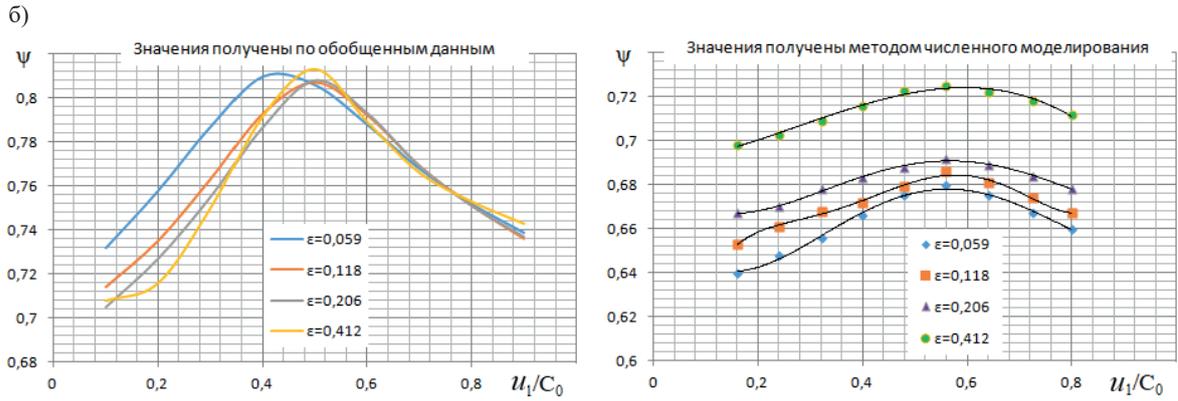


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента скорости рабочего колеса (б) турбинной ступени с частичным облапачиванием рабочего колеса при  $\epsilon = 0,059-0,412$  и  $\pi_t = 2,0$  (окончание)

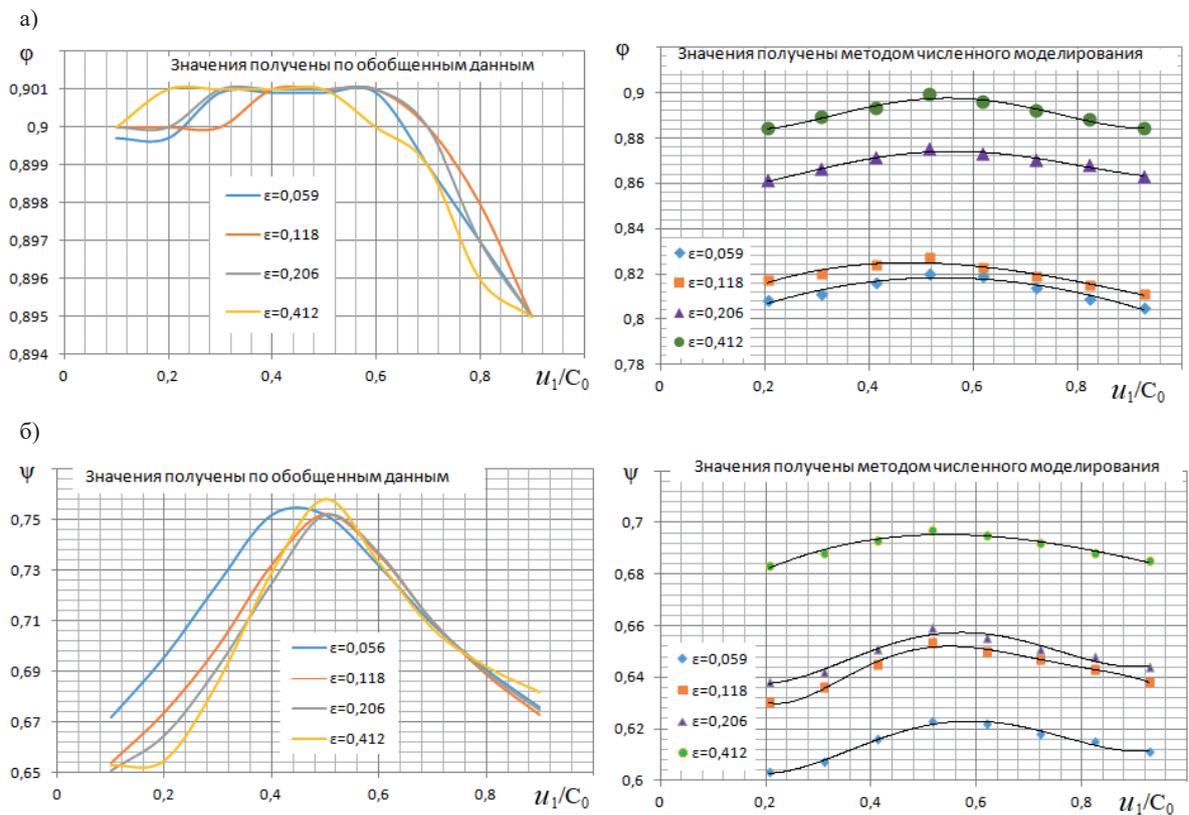
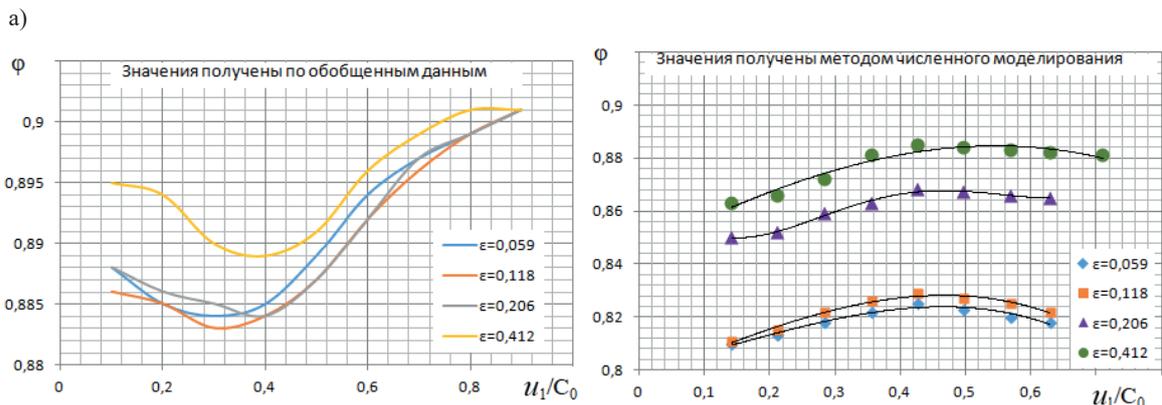


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента скорости соплового аппарата (а) и рабочего колеса (б) турбинной ступени с частичным облапачиванием рабочего колеса при  $\epsilon = 0,059-0,412$  и  $\pi_t = 1,5$



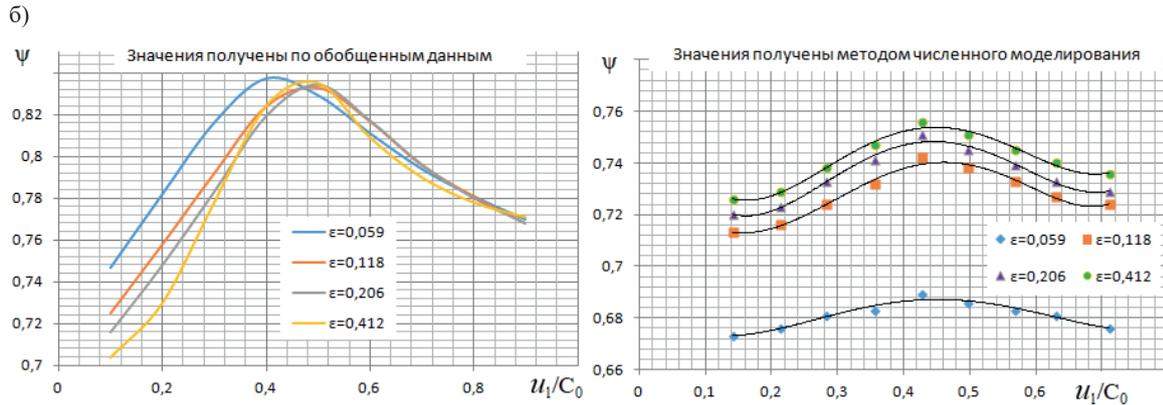


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента скорости соплового аппарата (а) и рабочего колеса (б) турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса при  $\epsilon = 0,059-0,412$  и  $\pi_t = 2,5$

Результаты, приведенные на рис. 3–5, показывают неудовлетворительную сходимость значений коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса, полученных на основе обобщенных экспериментальных данных традиционных парциальных турбин с данными, полученными в ходе численного эксперимента.

### Обсуждение (Discussion)

Сравнение графиков зависимости коэффициентов скорости СА и РК от  $u_1/C_0$  позволяет сделать вывод о некотором снижении значений коэффициентов, полученных методом численного моделирования. Это объясняется влиянием крайних сопловых каналов на общее течение потока [2], невозможным в традиционных парциальных турбинах. Образование застойных зон (зон рециркуляции) в крайних сопловых каналах приводит к снижению скорости  $C_1$ , что обуславливает понижение коэффициента скорости соплового аппарата  $\varphi$ . Под влиянием крайних сопловых каналов газодинамические параметры на входе в рабочее колесо отличаются от параметров, которые могли быть в традиционной парциальной турбине. На выходе из ступени значение скорости  $w_2$  тоже будет отличаться от значения скорости, которая могла бы быть в традиционной парциальной турбине, что также ведет к понижению коэффициента скорости рабочего колеса  $\psi$ .

В процессе перехода к общей оценке графиков зависимости коэффициента скорости СА и РК от  $u_1/C_0$  можно наблюдать повышение значения коэффициентов вслед за увеличением  $u_1/C_0$ . При достижении оптимального значения  $u_1/C_0$  происходит коррекция и снижение коэффициентов. Существенное влияние на значение коэффициента скорости СА оказывает число Маха, оптимальное значение которого составляет  $M = 0,55-0,6$ .

Поскольку в турбинах с частичным облопачиванием РК характер течения потока существенно отличается от течения в традиционных парциальных турбинах, математическую модель [1] нельзя полностью считать адекватной. Ввиду существенной разницы в значениях коэффициентов скорости СА и РК необходимо ее уточнение в части определения этих коэффициентов. Применение методов математического моделирования позволяет определять математические зависимости (полиномов) коэффициентов скорости СА и РК от различных параметров: степени парциальности, числа Маха [7], степени расширения [8] и других в широком диапазоне  $u_1/C_0$ .

### Выводы (Summary)

На основе выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

– при сравнении значений коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса, полученных различными способами, возникает вывод о целесообразности их применения как с использованием обобщенных данных, так и метода численного моделирования;

- наличие парциальности в турбинной ступени с частичным облопачиванием РК оказывает влияние на конечное значение коэффициентов скорости СА и РК, что приводит к некоторому снижению их значений по отношению к обобщенным данным;
- применение CFD-метода позволяет выявить снижение значений коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса в широком диапазоне  $u_1/C_0$  и  $\pi_r$ ;
- для уточнения существующей математической модели [1] необходимо использовать математические зависимости (полиномы) коэффициентов скорости СА и РК от различных параметров  $\pi_r$ ,  $\varepsilon$ , число Маха и др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чехранов С. В. Математическая модель радиальной малорасходной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / С. В. Чехранов, Р. Р. Симашов // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 222–226.
2. Крюков А. А. Численное исследование течения потока в ступени центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4–1 (50). — С. 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.
3. Епифанов А. А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин / А. А. Епифанов, А. И. Кириллов, В. А. Рассохин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — № 1 (142). — С. 65–70.
4. Забелин Н. А. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н. А. Забелин [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2013. — № 1 (166). — С. 45–53.
5. Нгуен А. К. Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности / А. К. Нгуен, К. Л. Лапшин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2016. — № 2 (243). — С. 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17.
6. Нгуен А. К. Влияние тангенциального наклона рабочих лопаток на потери кинетической энергии / А. К. Нгуен, К. Л. Лапшин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. — 2017. — Т. 23. — № 4. — С. 66–73. DOI: 10.18721/JEST.230406.
7. Kryukov A. A. Determination of the velocity coefficient of a turbine nozzle diaphragm with partial blading of the runner / A. A. Kryukov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 986. — Is. 1. — Pp. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012045.
8. Крюков А. А. Трехмерное численное моделирование малорасходной центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 1. — С. 74–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-74-80.
9. Rassokhin V. The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines / V. Rassokhin, N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olenikov, M. Cherkasova, A. Sebelev // Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover. — Polytechnical University Publishing House, 2014. — Pp. 139–155.
10. Rakov G. A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia / G. Rakov, V. Rassokhin, N. Zabelin, S. Olenikov, A. Sebelev, A. Sukhanov, S. Schislyayev // International Journal of environmental & science education. — 2016. — Vol. 11. — No. 18. — Pp. 11721–11733.
11. Smirnov M. V. Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I / M. V. Smirnov, A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, N. I. Kuklina // Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics. — Stockholm, Sweden, 2017. — Paper ID: ETC2017–100.

## REFERENCES

1. Chekhranov, S., and R. Simashov. “Mathematical model of a radial-flow low-consumption turbine having partially bladed wheel rotor.” *Transport business of Russia* 6 (2015): 222–226.

2. Krykov, Aleksey A., and Sergei V. Chekhranov. "Numerical experiment of flow in stages of inflow turbine with fractional blading of the rotor wheel." *Marine intelligent technologies* 4–1(50) (2020): 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.
3. Epifanov, A. A., A. I. Kirillov, and V. A. Rassohin. "Расчет трехмерного течения в ступенях малоразходных турбин." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* 1(142) (2012): 65–70.
4. Zabelin, N. A., G. L. Rakov, V. A. Rassokhin, A. A. Sebelev, and M. V. Smirnov. "Investigation of flow characteristics in low-flow turbine stages of the design of LPI." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* 1(166) (2013): 45–53.
5. Nguyen, A. Q., and K. L. Lapshin. "Characteristics and structure of the flow in a turbine stage with a negative gradient of the degree of reactivity." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* 2(243) (2016): 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17.
6. Nguyen, A. Q., and K. L. Lapshin. "The influence of tangential inclination of rotor blades on kinetic energy losses in an axial turbine stage." *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology* 23.4 (2017): 66–73.
7. Kryukov, A. A., G. L. Rakov, S. V. Chekhranov, and R. R. Simashov. "Determination of the velocity coefficient of a turbine nozzle diaphragm with partial blading of the runner." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 986. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012045.
8. Kriukov, Aleksei Alekseevich, and Sergei Valentinovich Chekhranov. "Three-dimensional numerical simulation of low-consumption inflow turbine with partial blading of runner." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2021): 74–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-74-80.
9. Rassokhin, V., N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, and A. Sebelev. "The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines." *Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover*. Polytechnical University Publishing House, 2014. 139–155.
10. Rakov, Gennadiy, Viktor Rassokhin, Nikolay Zabelin, Sergey Olennikov, Aleksandr Sebelev, Aleksandr Sukhanov, and Sergey Schislyaev. "A Low Emission Axial-Flow Turbine for the Utilization of Compressible Natural Gas Energy in the Gas Transport System of Russia." *International Journal of environmental & science education* 11.18 (2016). 11721–11733.
11. Smirnov, M. V., A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, and N. I. Kuklina. "Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I." *Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*. Stockholm, Sweden, 2017. Paper ID: ETC2017–100.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Крюков Алексей Алексеевич** — аспирант  
 Научный руководитель:  
 Чехранов Сергей Валентинович  
 ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный  
 технический рыбохозяйственный университет»  
 690087, Российская Федерация, г. Владивосток,  
 ул. Луговая, 52б  
 e-mail: [aleksey902@mail.ru](mailto:aleksey902@mail.ru)  
**Чехранов Сергей Валентинович** —  
 доктор технических наук, профессор  
 ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный  
 технический рыбохозяйственный университет»  
 690087, Российская Федерация, г. Владивосток,  
 ул. Луговая, 52б  
 e-mail: [turboroom@yandex.ru](mailto:turboroom@yandex.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Kryukov, Aleksey A.** — Postgraduate  
 Supervisor:  
 Chekhranov, Sergei V.  
 Far Eastern State Technical  
 Fisheries University  
 52B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,  
 Russian Federation  
 e-mail: [aleksey902@mail.ru](mailto:aleksey902@mail.ru)  
**Chekhranov, Sergei V.** —  
 Dr. of Technical Sciences, professor  
 Far Eastern State Technical  
 Fisheries University  
 52B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,  
 Russian Federation  
 e-mail: [turboroom@yandex.ru](mailto:turboroom@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2021 г.  
 Received: February 25, 2021.

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-266-277

## MODELING AN ERGATIC SYSTEM FOR JOINT CONTROL OF SHIP MOTION

**V. O. Tyrva**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The procedure for constructing a model of an ergatic ship motion control system is described. A ship is an object of joint control by the skipper and the control machine in the “skipper-ship” system. Anthropomorphic control is considered in the form of a sequence of descriptions of discrete control signals. The sequence is based on a set of incomplete representations of elementary motions in the state space of the “skipper-ship” system. The relationship between the parameters of the ship movement and the state of the human-machine interface controls in the wheel-house in order to move on different parts of the trajectory in the state space is taken into account. The possibility of applying the model at all three levels of motion control: targeting, planning, and implementation, is shown. Descriptions of incomplete representations of elementary movements of a ship with two propellers and rudder are given. The description is given in the nine-dimensional state space using normal systems of ordinary differential equations. The set includes 27 incomplete representations of elementary movements. It defines the maximum number of 702 pairwise different signals for discrete state control of the “skipper-ship” system. Techniques and examples of reducing the number of signals for discrete state control of the “skipper-ship” system are shown. They are combined into use cases-templates with reference to the goals of traffic management based on the experience of navigation. Due to templates, in the implementation of anthropomorphic control, it is easier to solve the problems of its design at the levels of target designation, planning and performance. The advantages of the model are noted. They are expressed in the fact that at predicting the vessel movement relative to any point of the trajectory in the state space of the system, it is necessary and sufficient to have the values of the phase coordinates only for this point as the initial conditions for integrating the differential equations of the model and not refer to the movement “in the past”. The model provides an opportunity to analyze the behavior of the vessel under the influence of internal and external uncertainties when performing joint control. The model allows you to perform optimization by solving a finite-dimensional mathematical programming problem.*

*Keywords: modeling, ship, ergatic system, elementary motion, motion control.*

**For citation:**

Tyrva, Vladimir O. “Modeling an ergatic system for joint control of ship motion.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 266–277. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-266-277.

**УДК 62-50**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СОВМЕСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА

**В. О. Тырва**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Описана процедура построения модели эргатической системы управления движением судна, рассматриваемого как объект совместных действий судоводителя и управляющего автомата в системе «судоводитель – судно». В отличие от традиционного представления процесса управления функцией времени рассматривается антропоморфное управление в виде последовательности описаний сигналов дискрет-*

ного управления, выполненного на основе множества неполных представлений элементарных движений в пространстве состояний системы. Тем самым учитывается взаимосвязь параметров движения судна и состояния органов управления человеко-машинного интерфейса в ходовой рубке с целью движения на разных участках траектории в пространстве состояний системы. Показана возможность применения модели на всех трех уровнях управления движением: целеуказания, планирования и исполнения. Приведены описания двадцати семи элементов множества неполных представлений элементарных движений судна с двумя двигателями и рулем в девятимерном пространстве состояний с помощью нормальных систем обыкновенных дифференциальных уравнений. На данном множестве определено максимальное количество из семисот двух попарно различных сигналов дискретного управления состоянием системы «судоводитель – судно». Показаны приемы и примеры сокращения количества сигналов дискретного управления состоянием системы «судоводитель – судно» и объединения их в прецеденты — шаблоны с привязкой к целям управления движением на основе опыта судовождения. Благодаря шаблонам в реализациях антропоморфного управления упрощено решение задач его конструирования на уровнях целеуказания, планирования и исполнения. Указаны достоинства модели, выраженные в том, что при прогнозировании движения судна относительно любой точки траектории в пространстве состояний системы необходимо и достаточно располагать значениями фазовых координат только для этой точки в качестве начальных условий интегрирования дифференциальных уравнений модели, не рассматривая описание движения «в прошлом». Модель предоставляет возможность анализировать поведение судна в условиях влияния внутренних и внешних неопределенностей при совместном управлении и выполнять его оптимизацию путем решения конечномерной задачи математического программирования.

*Ключевые слова:* моделирование, судно, эргатическая система, элементарное движение, управление движением.

**Для цитирования:**

Тырва В. О. Моделирование эргатической системы совместного управления движением судна / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 266–277. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-266-277.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время управление как сложный целенаправленный процесс в эргатических системах «человек – машина» (СЧМ) рассматривается на трех уровнях (сверху вниз): целеуказание, планирование, исполнение [1]. Эти уровни в различных приложениях теории управления имеют также иные названия. Применительно к автоматизированному управлению движением судов принятие управленческих решений рассматривается как периодический процесс, каждый цикл которого включает следующие этапы [2]:

- 1) получение информации о состоянии СЧМ и внешней среды;
- 2) формирование цели о некотором другом состоянии, в которое желательно перевести систему;
- 3) определение допустимых путей достижения системой поставленной цели;
- 4) выбор из множества допустимых решений наилучшего;
- 5) реализация принятого решения.

Первые два этапа называют *подготовкой решения по управлению*, что соответствует целеуказанию, третий и четвертый — относятся к *планированию управления*, пятый этап — к *исполнению управления*.

Анализ информации об управлении движением судов показывает, что процесс принятия решения в задачах управления судном имеет следующие особенности [3]:

- большая размерность решаемых задач и большие объемы обрабатываемых данных;
- значительная повторяемость принимаемых решений в сходных условиях (тесная взаимосвязь рассматриваемых ситуаций управления с районом плавания и типом судна);
- возможность принятия решения по прецедентам, т. е. типовым ситуациям организации движения судов;
- необходимость подготовки нескольких вариантов (версий) принимаемых решений в определенных ситуациях;
- необходимость принятия решения в условиях неопределенности (отсутствие достоверной информации или полное отсутствие требуемой информации).

При выработке решений в различных ситуациях и условиях плавания руководствуются не только действующими нормативными документами и инструкциями (например, МППСС-72), но и личным опытом судовождения, а также обобщенным опытом, изложенным в виде практических рекомендаций. Известно, что 75 % навигационных аварийных случаев происходит по причине *человеческого фактора* и связано с уровнем подготовки судоводителя, ответственного за обеспечение безопасности судовождения, наличия у него необходимого практического опыта, а также навыков судовождения и управления судном [3]. Поскольку повышение уровня компетенции судоводителя на практике «методом проб и ошибок» недопустимо, актуальными являются разработка и создание систем поддержки принятия решений (СППР) на основе использования математических моделей управляемого движения.

В процессе моделирования, являющегося необходимым этапом автоматизации управления, пространственное движение судна в общем случае описывается системой, состоящей из двенадцати обыкновенных дифференциальных уравнений для производных линейных координат центра масс судна, углов Эйлера и составляющих линейной и угловой скорости [4]. В целях упрощения модели используют описание управляемых движений для отдельных режимов и условий. Характерным является то, что при построении математических моделей не учитывается влияние действия органов управления человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) на процесс управления движением судна с центрального поста — автоматизированного рабочего места судоводителя в ходовой рубке судна.

Установлено, что введение в математические модели движения судна информации о действии органов управления ЧМИ позволяет упростить понимание судоводителем предлагаемых СППР вариантов представления целей на уровне целеуказания, а также результатов планирования управления и соответствующего ему представления управляемого движения судна [5]. При этом расчет оптимального управления выражается в решении не вариационной задачи, как в классической теории оптимального управления, а более простой задачи параметрической оптимизации при дифференциальных связях параметров модели. Полученное таким образом управление называется *антропоморфным* [6]. Автоматизацию такого управления движением судна, как переход от ручного управления к автоматическому и, согласно современным представлениям, — к управлению с искусственным интеллектом, можно представить с позиций придания управляющему автомату (УА) эргатической системы *судоводитель – судно* (ССС) способностей к рассуждениям, планированию и принятию решений [7]. Основная задача создания такой автоматизированной системы состоит в организации взаимодействия и согласовании возможностей технической и биологической частей системы с тем, чтобы обеспечить наибольшую эффективность системы в целом [1]. Подобное взаимодействие положено в основу математической модели СССР, рассмотренной далее.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Для описания плоского движения судна при антропоморфном управлении в предлагаемом исследовании используется *метод пространства состояний*, с помощью которого управляемое движение представляется в виде непрерывной траектории, состоящей из участков, каждый из которых отображает в пространстве состояний решение нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений определенного вида.

Перейдем от модели управляемого объекта общего вида, приведенной в работе [5], к описанию плоского движения судна при антропоморфном управлении. Для этого применительно к СССР необходимо конкретизировать множество

$$\mathbf{Z} = \{ \dot{X}(t) = F^r(X(t)), r = 1, 2, \dots, R \}, \quad (1)$$

состоящее из  $R$  неполных представлений элементарных движений:

$$\dot{X}(t) = F^r(X(t)), \quad (2)$$

которые составляют базу знаний для построения последовательности

$$U(t_1, t_f) = \{ U_r^s(t_1), U_s^j(t_2), U_j^i(t_3), \dots, U_k^m(t_f) \} \quad (3)$$

сигналов дискретного управления (СДУ):

$$U_r^k(t_s) = \{t_s, F^r(X(t_s)), F^k(X(t_s))\}. \quad (4)$$

В выражениях (1) и (2) использованы следующие обозначения:

$X(t)$  — вектор (матрица-столбец) фазовых координат  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , значения которых зависят от времени  $t$ ;

$F^r(X(t))$  — вектор-функция правых частей нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, записанной в векторной форме (2), где точкой над буквой  $X$  обозначена операция дифференцирования по времени  $t$ , применяемая к фазовым координатам  $x_1, x_2, \dots, x_N$ .

Запись представления (4) СДУ  $U_r^k(t_s)$  означает, что в момент времени  $t_s$  неполное представление  $\dot{X}(t) = F^r(X(t))$  элементарного движения из множества (1) заменяется на другое неполное представление  $\dot{X}(t) = F^k(X(t))$  из того же множества при  $k \neq r$  и  $(r, k) \in \{1, 2, \dots, R\}$ .

Исходя из представления управляемого движения судна в неподвижной  $Ox_1x_2x_3$  и связанной  $Gx_4x_5x_6$  системах координат [8] при внешних воздействиях течения (скорости  $v_T$ , направления  $y_T$ ) и ветра (скорости  $v_B$ , направления  $y_B$ ) — рис. 1, рассматриваем судно как элемент ССС с фазовыми координатами  $x_1, x_2, \dots, x_6$  и управляющими воздействиями:  $u_1$  (упор винта),  $u_2$  (угол перекаладки руля) — рис. 2.

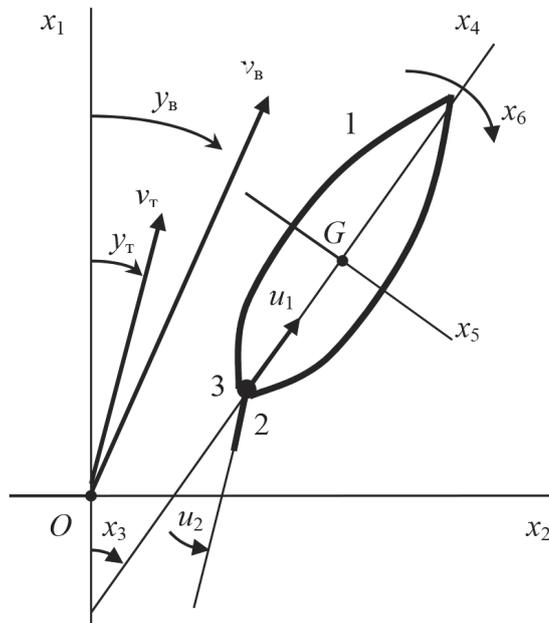


Рис. 1. Параметры управляемого движения судна, ветра и течения в неподвижной и связанной системах координат:  
 1 — корпус судна; 2 — руль судна; 3 — движитель

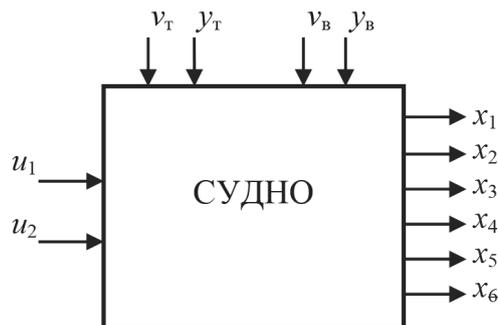


Рис. 2. Представление судна в виде элемента эргатической системы «судоводитель – судно»

Выполним композицию модели движения судна [8] и модели МП [5] действий судоводителя, проявляющихся в перемещениях органов управления аппаратов ЧМИ ходовой рубки. Полагаем, что реализуется совместное управление [5] упором движителей и перекладкой руля судоводителем и управляющим автоматом. При этом УА реализует антропоморфное управление, подобное управлению, исполняемому судоводителем, изменяющим положения органов управления ЧМИ.

Аппараты совместного управления (АпСУ) движением судна представим с помощью изобразительной модели (рис. 3), которая раскрывает принцип построения и работы АпСУ с многопозиционным органом управления (ОрУ) — рукояткой 1 и аналоговым датчиком углового перемещения 3. Сигнал  $v$  на выходе датчика 3 однозначно определяется положением  $u = u_a + u_c$  рукоятки 1 ручного управления (положение  $Q$ ). Рукоятка управления 1 с помощью пружин связана с поворотной вилкой 2, отклоняемой от нейтрального положения  $N$  до изменяемого положения  $P$  электромеханическим преобразователем 5 с червячной передачей 4. Угловые скорости перемещений элементов конструкции аппарата:  $\omega_n$  — червяка механической передачи 4,  $\omega_a$  — вилки 2,  $\omega_c$  — рукоятки 1 относительно вилки 2. Угол поворота  $u_a$  задается управляющим автоматом ССС сигналом  $v_a$ . Благодаря червячной передаче 4 связь между электромеханическим преобразователем 5 и вилкой 2 однонаправленная — от преобразователя к вилке. Поэтому управляющие действия судоводителя при перемещении им органа управления не оказывают влияние на работу УА системы *судоводитель – судно* и не изменяют его сигнал  $u_a$ , реализованный в аппарате в виде определенного положения ОрУ.

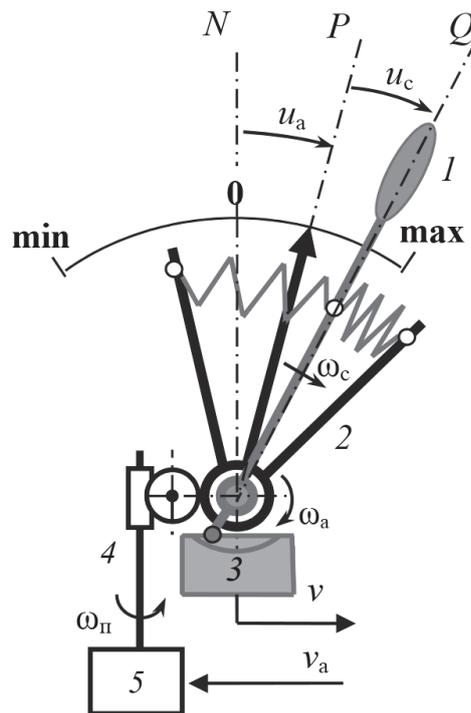


Рис. 3. Изобразительная модель аппарата совместного управления (АпСУ)

- 1 — рукоятка управления; 2 — вилка;
- 3 — датчик углового перемещения;
- 4 — червячная передача;
- 5 — электромеханический преобразователь

Когда судоводитель держит рукой рукоятку АпСУ, он через нее получает информацию о намерениях УА изменить характер движения судна. При этом судоводитель за счет перемещения рукоят-

ки  $I$  в положение  $Q$  на рис. 3 корректирует управляющие действия автомата (положение  $P$  на рис. 3), если «не соглашается» с намерениями УА. Если судоводитель не создает корректирующие воздействия на ОпУ ( $u_c = 0$ ), соглашаясь с намерениями УА, то управление движением судна осуществляется только автоматом ( $u = u_a$ ). При отключении или отказе УА судоводитель, воздействуя на ОпУ (рукоятку) АпСУ, продолжает управлять судном.

Для технической реализации управления движением судна с помощью движителя и руля, в соответствии с рис. 1, необходимо применить два АпСУ (АпСУ1 и АпСУ2, как показано на рис. 4) с приводными устройствами (ПУ), включающими, например, электромеханический преобразователь и червячную передачу (см. рис. 3).

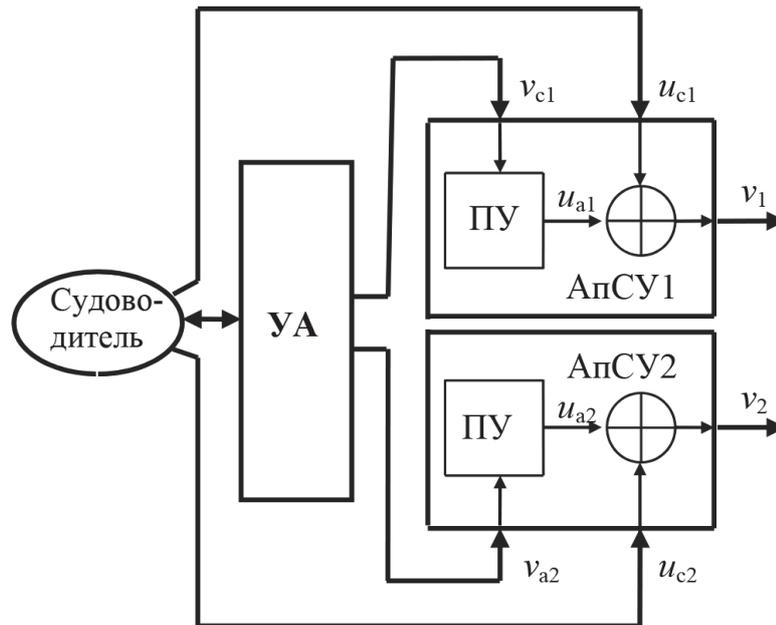


Рис. 4. Схема формирования воздействий  $v_1$  на упор винта и  $v_2$  на руль судна с помощью аппаратов совместного управления АпСУ1 и АпСУ2

Допустим, что система управления движением судна построена таким образом, что обеспечивает пропорциональное преобразование  $v_1$  в упор  $u_1$  и  $v_2$  в угол  $u_2$  перекладки руля, показанных на рис. 1, а действие АпСУ характеризуется моделью МП многопозиционного ОпУ [5]. Усложним задачу построения математической модели, чтобы выделить особенности конструирования антропоморфного управления и расширить области применения модели. Будем рассматривать суда, у которых для создания упора  $u_1$  используются два движителя (два винта), создающие упоры  $u_{11}$  и  $u_{12}$  так, что  $u_1 = u_{11} + u_{12}$ . Тогда множество (1) вместо  $R = 3^2 = 9$  элементов будет иметь  $R = 3^3 = 27$  неполных представлений элементарных движений судна и для формирования совместного управления в ССС необходимо применить не два, как показано на рис. 4, а три АпСУ. Дальнейшее усложнение задачи моделирования проводить не будем, рассматривая, например, ее для варианта «два движителя и два руля» с отдельным управлением, так как процедура построения модели не изменится, но станет неудобной для восприятия человеком (не ЭВМ), поскольку множество (1) будет включать  $R = 3^4 = 81$  элемент.

### Результаты (Results)

Используя трансформированные уравнения динамики судна [8], представим множество (1) неполных представлений элементарных движений судна в виде нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1(t) = x_4(t) \cos x_3(t) - x_5(t) \sin x_3(t) + s_1(t); \\ \dot{x}_2(t) = x_4(t) \sin x_3(t) + x_5(t) \cos x_3(t) + s_2(t); \\ \dot{x}_3(t) = x_6(t); \\ \dot{x}_4(t) = a_{11}x_5(t)x_6(t) + a_{12}x_4^2(t) + (a_{13} + a_{14}x_4(t))(x_7(t) + x_8(t)) + a_{15}|s_4(t)|s_4(t); \\ \dot{x}_5(t) = a_{21}x_4(t)x_6(t) + a_{22}x_4(t)x_5(t) + a_{23}|x_5(t)|x_5(t) + a_{24}x_4^2(t)x_9(t) + a_{25}|s_5(t)|s_5(t); \\ \dot{x}_6(t) = a_{31}x_4(t)x_6(t) + a_{32}x_4(t)x_5(t) + a_{33}x_4^2(t)x_9(t) + a_{34}|s_5(t)|s_5(t); \\ \dot{x}_7(t) = b_1\omega_{11}; \\ \dot{x}_8(t) = b_1\omega_{12}; \\ \dot{x}_9(t) = b_2\omega_2, \end{array} \right. \quad (5)$$

и табл. 1, в которой показана нумерация элементов множества (1) для ССС в количестве двадцати семи.

Таблица 1

**Нумерация множества неполных представлений  
элементарных плоских движений двухвинтового судна**

$\omega_{ij}$		$\omega_{12} = 1$	$\omega_{12} = 0$	$\omega_{12} = -1$
$\omega_{11} = 1$	$\omega_2 = 1$	10	11	14
	$\omega_2 = 0$	1	2	5
	$\omega_2 = -1$	19	20	23
$\omega_{11} = 0$	$\omega_2 = 1$	12	13	17
	$\omega_2 = 0$	3	4	8
	$\omega_2 = -1$	21	22	26
$\omega_{11} = -1$	$\omega_2 = 1$	15	16	18
	$\omega_2 = 0$	6	7	9
	$\omega_2 = -1$	24	25	27

Первые шесть уравнений системы (5) описывают непосредственно движение корпуса судна на плоскости  $Ox_1x_2$  (см. рис. 1), последние три — положения органов управления двумя движителями и рулем. Возмущающие воздействия течения и ветра на судно представлены в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_1(t) = v_T(t) \cos y_T(t); \\ s_2(t) = v_T(t) \sin y_T(t); \\ s_4(t) = v_B(t) \cos(x_3(t) - y_B(t)) - v_T(t) \cos(x_3(t) - y_T(t)) - x_4(t); \\ s_5(t) = -v_B(t) \sin(x_3(t) - y_B(t)) + v_T(t) \sin(x_3(t) - y_T(t)). \end{array} \right. \quad (6)$$

Для вычисления коэффициентов  $a_{ij}$  получены формулы, позволяющие выполнить расчеты с учетом геометрических характеристик судна, осадки, глубины судового хода и других параметров. В качестве примера в табл. 2 приведены расчетные значения коэффициентов модели плоского движения двухвинтового судна типа «Волго-Дон». Значения коэффициентов  $b_1$  и  $b_2$  конкретизируют по экспериментальным данным и рекомендациям инженерной психологии для аппаратов ЧМИ в ходовой рубке. В начальном приближении  $b_1 = b_2 = 0,12 \text{ с}^{-1}$ .

Таблица 2

**Расчетные значения коэффициентов дифференциальных уравнений управляемого движения судна типа «Волго-Дон»**

Коэффициент	Размерность	Множитель	Осадка судна					
			$T = 3,5$ м		$T = 2,5$ м		$T = 1,5$ м	
			Глубина хода					
			$H = 10$ м	$H = 20$ м	$H = 10$ м	$H = 20$ м	$H = 10$ м	$H = 20$ м
$a_{11}$	–	–	1,09	1,09	1,17	1,17	1,34	1,34
$a_{12}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-3}$	–2,39	–2,22	–1,75	–1,55	–1,03	–0,88
$a_{13}$	$\text{мс}^{-2}$	$10^{-1}$	2,18	2,18	0,93	0,93	0,40	0,40
$a_{14}$	$\text{с}^{-1}$	$10^{-2}$	–1,79	–1,79	–0,46	–0,46	–0,18	–0,18
$a_{15}$	$\text{с}^{-1}$	$10^{-7}$	6,60	6,62	2,84	2,84	1,23	1,23
$a_{21}$	–	$10^{-2}$	–4,14	–3,95	–47,04	–46,74	–58,18	–57,80
$a_{22}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-3}$	18,90		8,13		3,24	
$a_{23}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-2}$	4,86		3,24		1,37	
$a_{24}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-3}$	–10,20		–4,11		–1,55	
$a_{25}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-7}$	40,80		13,20		3,08	
$a_{31}$	$\text{м}^{-1}$	$10^{-2}$	–12,70		–7,29		–3,38	
$a_{32}$	$\text{м}^{-2}$	$10^{-5}$	–66,20		–11,40		–6,25	
$a_{33}$	$\text{м}^{-2}$	$10^{-4}$	9,75		4,26		1,82	
$a_{34}$	$\text{м}^{-2}$	$10^{-8}$	–2,72		–1,17		–0,44	

Таким образом, для задания множества (1) применительно к рассматриваемому двухвинтовому судну необходимо конкретизировать вид системы дифференциальных уравнений (5), задавая различные значения  $\omega_{11}$ ,  $\omega_{12}$ ,  $\omega_2$  в неповторяющихся комбинациях. Нумерация элементов множества (1) в табл. 1 может быть выполнена произвольным образом. Для того чтобы получить по табл. 1 элемент множества (1), например, с номером  $r = 12$ , нужно выделить ячейку таблицы с числом 12 и по горизонтали от нее найти  $\omega_{11} = 0$ ,  $\omega_2 = 1$ , а по вертикали —  $\omega_{12} = 1$ . Эти значения  $\omega_{11}$ ,  $\omega_{12}$ ,  $\omega_2$  нужно подставить в систему (5). Получим неполное представление элементарного движения плоского движения судна в множестве (1) с заданным номером  $r = 12$ . Аналогичный алгоритм действует при определении неполных представлений элементарных движений в виде (5) с другими номерами по заданному номеру из множества (1).

**Обсуждение (Discussion)**

Необходимо обратить внимание, что фазовые координаты  $x_7$ ,  $x_8$ ,  $x_9$  характеризуют следующие данные:  $x_7$  — упор  $u_{11}$  одного из движителей, например, с номером 1;  $x_8$  — упор  $u_{12}$  движителя с номером 2;  $x_9$  — угол перекладки руля. Тогда элемент 12 множества (1), построенного в соответствии уравнениями (5) и табл. 1, можно вербально определить так: «не изменяется упор движителя 1, увеличивается упор движителя 2, перекачивается руль к левому борту ( $\omega_2 = 1$ ). Из опыта судовождения и в соответствии с решением уравнений (5) элементу с номером 12 соответствует представление о том, что определенное элементарное движение судна выражается в увеличении скорости движения  $x_4$  и стремлении судна уклониться влево.

Каждому номеру табл. 1, таким образом, можно поставить в соответствие словесное описание изменений или неизменных положений органов управления ЧМИ в рубке ( $x_7$ ,  $x_8$ ,  $x_9$ ), изменений

или неизменных упоров движителей  $u_{11}$ ,  $u_{12}$ , угла перекладки руля  $u_2$  и реакцию на них судна, выраженную в параметрах его движения  $(x_1, x_2, \dots, x_6)$ . И, наоборот, если, например, появляется намерение увеличить скорость движения за счет увеличения упора движителя 2, сохранив при этом неизменным упор движителя 1 и уклониться вправо, переложив руль к правому борту, то нужно для этого выбрать из множества (1) по табл. 1 элемент с номером 21. Таким образом, каждому номеру табл. 1 можно дать вербальную интерпретацию действий и реакций, выраженных в состояниях и изменениях положений органов управления ЧМИ и реакции на это судна элементарным движением, характеризуемым координатами  $x_1, x_2, \dots, x_6$  и, наоборот, для того чтобы изменить элементарное движение судна, т. е. его координаты  $x_1, x_2, \dots, x_6$ , необходимо представить как этого можно достичь с помощью изменения положения органов управления. Соответственно на основе построенной модели появляется возможность управлять движением судна, сообщая управляющему автомату ССС о своих намерениях. К тому же при совместном управлении построенную модель удобно использовать на уровне целеуказания для УА, выразив цель управляемого движения в виде последовательности неполных представлений элементарных движений из множества (1), руководствуясь данными табл. 1. Для такой последовательности переход от одного элементарного движения к другому вызывает определенный СДУ (4). Максимальное количество попарно различных СДУ для ССС в рассматриваемом случае при  $R = 27$  составляет  $(27-1)27 = 702$ . Таким образом, для того, чтобы в последовательности элементарных движений были реализованы все 702 попарно различных СДУ, такая последовательность должна состоять из не менее, чем 703 элементов.

Фактически не все конкретные попарно различные СДУ с номерами из множества  $\mathbf{D}_0 = \{1, 2, \dots, 702\}$  натуральных чисел применяются судоводителем в практике судовождения, о чем, например, свидетельствуют результаты натурных экспериментов [9]. Поэтому размерность задачи конструирования антропоморфного управления можно понизить, выделив в  $\mathbf{D}_0$  подмножество  $\mathbf{D}_1 \subset \mathbf{D}_0$  меньшей мощности реализуемых судоводителем СДУ. Тогда на уровне целеуказания можно рассматривать последовательность (3) СДУ как отображение значений индексов моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_j$  на множество  $\mathbf{D}_1$ , т. е. выразить антропоморфное управление через целочисленную функцию от целочисленного аргумента. Задача построения такой функции должна решаться для конкретной ситуации (например, для определенного маневра судна при известной аппаратной реализации ЧМИ в ходовой рубке). Так, при совместном управлении продольным и боковым движениями судна на разных интервалах времени количество элементов множества  $\mathbf{D}_1$  составит  $3^2(3^2-1) + 3^1(3^1-1) = 78$ , что существенно меньше мощности множества  $\mathbf{D}_0$ , равной 702. Эти количественные данные оправдывают традиционное разделение моделируемых задач на задачу синтеза управляющей скоростью судна системы и задачу синтеза управляющей курсом системы [2].

В работе [10] обоснована перспективность решения проблемы построения интегрированной системы управления судном с единым управлением, осуществляемым с комплексного центрального поста управления — автоматизированного рабочего места судоводителя в ходовой рубке судна. Предлагается для решения данной проблемы использовать модель системы с распределенной архитектурой на основе мультиагентных технологий, принцип действия которых основан на декомпозиции общей задачи на ряд локальных задач, возлагаемых на агентов системы, разделении их между агентами, планировании коллективного поведения агентов и координации их взаимодействия на основе кооперации, реконфигурации, коммуникации и разрешении конфликтных ситуаций.

Анализ движения судов, выполненный на основе результатов натурных экспериментов [9], показал, что в последовательности СДУ (3) существуют повторяющиеся фрагменты, которые можно рассматривать как прецеденты [3] и как удобные для реализации в ЧМИ шаблоны в соответствии с предложениями, выполненными в работах [11], [12]. Не перегружая изложение нумерацией СДУ, воспользуемся данными табл. 1, представив шаблоны в виде последовательностей номеров неполных представлений элементарных движений судна: 4–1–4; 4–9–4; 4–1–4–9–4; 4–7–4–3–4 и др. Каждому из таких шаблонов может быть поставлена в соответствие некоторая цель движения, подчиненная общей цели для всей последовательности (3), например: «увеличить скорость до нового значения двумя движителями», «уменьшить скорость до нового значения двумя движителями», «увеличить

скорость, затем снизить скорость двумя движителями», «уменьшить скорость судна, затем увеличить скорость движителем 2» и т. п.

Таким образом, проведенное исследование позволяет представить движение судна при антропоморфном управлении непрерывной траекторией в пространстве состояний  $\{t \times x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n\}$ , которая состоит из участков элементарных движений, представляемых решением уравнений (5) при значениях  $\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_2$ , выбираемых из табл. 1. Решения совпадают в моменты  $t_1, t_2, \dots, t_f$  действия СДУ (4) в выбранной последовательности (3). Моментам действия СДУ соответствуют угловые точки траектории. Каждый участок траектории между соседними угловыми точками определяется целью элементарного движения, а некоторые последовательные участки траектории могут составлять шаблон, имеющий цель более высокого уровня по сравнению с целями элементарных движений. Поэтому на уровне целеуказания могут использоваться неполные представления элементарных движений в вербальной и математической (2) формах и шаблоны представлений целенаправленных движений, упрощающие процесс целеуказания с учетом указанных во введении данной статьи особенностей процесса принятия решения, обусловленного задачами управления судном.

Информация о неопределенности прогнозируемого изменения состояния ССС в каждой угловой точке траектории может быть использована для коррекции программы управления движением судна как до, так и в процессе выполнения движения на основе интегрирования уравнений чувствительности [7]. Существенное влияние на параметрическую неопределенность оказывает (см. табл. 2), осадка судна, в меньшей степени — глубина судового хода. Однако не существует аналитических зависимостей значений коэффициентов дифференциальных уравнений (5) малых для судна глубин, незначительно превышающих осадку судна, которые можно было бы использовать для уточнения модели. Выражения (6) позволяют снизить сигнальную неопределенность, но не устраняют ее из-за влияния на движение судна течения и ветра, которые, по существу, являются случайными процессами. В приемлемом для практики случае влияние указанных факторов целесообразно учитывать с использованием интервальных неопределенностей.

В случае недопустимого возрастания неопределенности программной траектории на стадии исполнения может проводиться апостериорное формирование программы управления в соответствии с рекомендацией, изложенной в [13]. Для этого имеются две возможности:

- 1) сдвигаются моменты времени подачи СДУ относительно рассчитанных ранее значений с сохранением априорной последовательности действий судоводителя или / и УА;
- 2) производится изменение спланированной последовательности действий, а значит, и последовательности неполных представлений элементарных движений, а также выполняются расчеты новых значений моментов времени подачи СДУ в исполнительную часть СЧМ для реализации апостериорной программы управления.

### **Заключение (Conclusion)**

В основе предложенного моделирования динамики состояния ССС находятся представления о совместном управлении движением судна судоводителем и управляющим автоматом, с помощью которого реализуется антропоморфное управление, подобное тому, которое выполняет человек, воздействуя на органы управления. Каждому участку моделируемой траектории в пространстве состояний ССС между угловыми точками, обусловленными действием СДУ, соответствует некоторая цель, определяемая судоводителем с пониманием о ее достижении при помощи воздействия на органы управления судном. Взаимосвязь представлений движения органов управления и движения судна с соответствующими целями используется на всех трех уровнях управления: целеуказания, планирования и исполнения. Учет такой взаимосвязи перемещений ОрУ с целями способствует эффективному решению задач управления движением судна на основе накопленного опыта и выполнения точных математических расчетов управляющим автоматом ССС, что позволяет оптимизировать распределение функции управления между судоводителем и УА.

В качестве достоинства модели следует отметить также, что при прогнозировании движения судна относительно любой точки траектории в пространстве состояний ССС необходимо и достаточно

располагать значениями фазовых координат только для этой точки в качестве начальных условий интегрирования дифференциальных уравнений модели и не обращаться к движению «в прошлом». Для каждого из указанных участков траектории можно построить систему дифференциальных уравнений в вариациях (уравнений чувствительности), на основе решения которой исследовать и учесть поведение судна в условиях внутренних и внешних неопределенностей. Эти уравнения могут быть использованы также для решения задачи оптимизации управляемого движения судна с использованием методов математического программирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ющенко А. С. Человек и робот — совместимость и взаимодействие / А. С. Ющенко // Робототехника и техническая кибернетика. — 2014. — № 1 (2). — С. 4–9.
2. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. — О.: Феникс; — М.: ТрансЛит, 2007. — 376 с.
3. Шерстюк В. Г. Гибридная интеллектуальная СППР для управления судном / В. Г. Шерстюк, А. П. Бень // Искусственный интеллект. — 2008. — № 3. — С. 490–499.
4. Соляков О. В. Оптимизация режимов управления движением речных судов / О. В. Соляков, А. А. Потемкин, Н. В. Першин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1186–1196. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1186-1196.
5. Тырва В. О. О реализации совмещаемых управляющих воздействий на объект в системах «человек-машина» / В. О. Тырва, А. В. Саушев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2020. — Т. 21. — № 5. — С. 274–281. DOI: 10.17587/mau.21.274-281.
6. Tyrva V. O. Anthropomorphic Control over Electromechanical System Motion: Simulation and Implementation / V. O. Tyrva, A. V. Saushev, O. V. Shergina // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). — IEEE, 2020. — Pp. 374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.
7. Тырва В. О. Моделирование действий и ответных реакций эргатической системы с электромеханическим объектом управления / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 189–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-189-201.
8. Тырва В. О. Трансформированные уравнения динамики судна / В. О. Тырва, Э. Б. Якимов // Материалы международной НПК «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление». — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2009. — С. 301–305.
9. Тырва В. О. Совместное управление объектом в эргатической системе: модели и реализации / В. О. Тырва // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 430–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443.
10. Искандеров Ю. М. Мультиагентная модель интегрированной системы управления судном / Ю. М. Искандеров, В. Д. Гаскаров, В. И. Дорошенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 831–841. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-831-841.
11. Cooper A. About Face 3. The Essentials of Interaction Design / A. Cooper, R. Reimann, D. Cronin. — 3rd edition. — Wiley, 2007. — 648 p.
12. Raskin J. The humane interface: new directions in the design of computer systems / J. Raskin. — Addison-Wesley Professional, 2000. — 233 p.
13. Петров Б. Н. Проблемы гибкости и надежности управления в теории бортовых терминальных систем / Б. Н. Петров [и др.] // Автоматика и телемеханика. — 1981. — № 2. — С. 15–24.

#### REFERENCES

1. Yuschenko, A. S. “Human-robot: compatibility and cooperation.” *Robotics and technical cybernetics* 1(2) (2014): 4–9.
2. Vagushchenko, L. L., and N. N. Tsymbal. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna*. O.: Feniks; M.: TransLit, 2007.

3. Sherstyuk, V. G., and A. P. Ben'. "Gibridnaya intellektual'naya SPPR dlya upravleniya sudnom." *Artificial intelligence* 3 (2008): 490–499.
4. Soliakov, Oleg V., Andrey A. Potemkin, and Nikita V. Pershin. "Optimization of the motion river vessels regimes control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1186–1196. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1186-1196.
5. Tyrva, V. O., and A. V. Saushev. "About realizations of compatible control impacts on the object in the man-machine systems." *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* 21.5(2020): 274–281. DOI: 10.17587/mau.21.274-281.
6. Tyrva, Vladimir O., Aleksandr V. Saushev, and Olga V. Shergina. "Anthropomorphic Control over Electro-mechanical System Motion: Simulation and Implementation." *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2020.374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.
7. Tyrva, Vladimir O. "Modeling actions and reactions of ergatic system with electromechanical control object." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 189–201. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-189-201.
8. Tyrva, V. O., and E. B. Yakimov. "Transformirovannye uravneniya dinamiki sudna." *Materialy mezhdunarodnoi NPK «Vodnye puti Rossii: stroitel'stvo, ekspluatatsiya, upravlenie»*. SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2009. 301–305.
9. Tyrva, Vladimir O. "Joint control by object in ergatic system: models and realizations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 430–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-430-443.
10. Iskanderov, Yurii M., Vagiz D. Gaskarov, and Viktor I. Doroshenko. "Multi-agent model of the integrated ship control system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 831–841. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-831-841.
11. Cooper, Alan, Robert Reimann, and David Cronin. *About Face 3. The Essentials of Interaction Design*. 3rd edition. Wiley, 2007.
12. Raskin, Jef. *The humane interface: new directions in the design of computer systems*. Addison-Wesley Publishing Professional, 2000.
13. Petrov, B. N., A. Ya. Andrienko, V. P. Ivanov, and Yu. P. Portnov-Sokolov. "Problemy gibkosti i nadezhnosti upravleniya v teorii bortovykh terminal'nykh system." *Avtomatika i telemekhanika* 2 (1981): 15–24.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Тырва Владимир Оскарович** —  
 кандидат технических наук, доцент,  
 старший научный сотрудник  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: v.tyrva@mail.ru, kaf\_electroprivod@gumrf.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Tyrva, Vladimir O.** —  
 PhD, associate professor,  
 Senior Researcher  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: kaf\_electroprivod@gumrf.ru, v.tyrva@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2021 г.  
 Received: February 25, 2021.

## CONCEPT STUDIES OF VESSEL ELECTRICAL POWER TRANSMISSION UNIT

**I. V. Sorokin<sup>1</sup>, D. S. Semenov<sup>1,2</sup>, S. V. Sharashkin<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*Power supply of remote from the main communications objects is a one of the main problem in the Arctic area reclamation. Due to the fact that offline power sources have a limited power value, it is necessary to solve the problem of forced power supply to the high-power consumers (industrial installations, localities, etc.). For this purpose, floating power units based on the nuclear power plant are developed and used. At studying the various mooring systems for a floating power unit, the most appropriate option is single point mooring (SPM) with internal vessel turret system. The system allows fixing a vessel position and providing uninterrupted power supply of consumer through the mooring unit. The main part of the system is electrical energy reception and transmission device. It represents slip-ring contact for connecting cables of object and electrical system of the floating power unit. Creation of ship electrical power system consists of converters and commutation equipment is required for realizing transmission and distribution of electrical energy. The analysis results of electrical energy transmission system options from the floating power unit to the object (consumer) are presented in the paper. The various construction options of the electrical energy reception and transmission device for direct docking with the mooring unit are developed. According to the criteria of reliability, manufacturability, weight and volume, a comparison of transmission system options for voltages levels of 10.5, 35 and 110 kV is made. Parameter of ship's and underwater transmission lines such us numbers and section of cables as well as power and voltage losses have been estimated. Based on the study results, the possibility and feasibility of using such systems are assessed.*

*Keywords: electrical power system, electrical energy transmission, slip-ring contact, floating power unit, single point mooring, electrical energy reception and transmission device, modeling.*

**For citation:**

Sorokin, Ilya V., Dmitrii S. Semenov, and Sergei V. Sharashkin. "Concept studies of vessel electrical power transmission unit." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 278–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-278-289.

**УДК 621.3.05**

## АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОМПЛЕКСА СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**И. В. Сорокин<sup>1</sup>, Д. С. Семенов<sup>1,2</sup>, С. В. Шарашкин<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> — ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В работе рассмотрен вариант решения одной из основных проблем при освоении Арктической зоны Российской Федерации, которая состоит в обеспечении электроэнергией объектов, удаленных от магистральных коммуникаций. Отмечается, что ограниченность мощности автономных источников приводит к необходимости постановки задачи принудительного (внешнего) обеспечения электроэнергией высокопотребителей (промышленные установки, населенные пункты и др.). Для решения этой задачи отечественные и зарубежные компании занимаются разработкой, изготовлением и вводом в эксплуатацию плавучих энергоблоков на основе ядерной энергетической установки. При рассмотрении различных систем швартовки плавучего энергоблока целесообразным оказывается применение варианта с одноточечным причалом, расположенным в определенной секции судна, поскольку данная система позволяет осуществить надежную фиксацию судна в месте швартовки, обеспечивая при этом бесперебойную подачу питания от источника электроэнергии на объект через швартовное устройство. Подчеркивается,*

что ключевым элементом электрооборудования данной системы является устройство приема-передачи электроэнергии, которое представляет собой конструкцию, включающую скользящий электрический контакт, и служит для соединения приемных кабелей объекта с электроэнергетической системой плавучего энергоблока. Для организации передачи и распределения энергии требуется разработка судовой электроэнергетической системы, включающей элементы преобразовательного и коммутационного оборудования. В статье проанализированы результаты расчета возможных систем передачи электроэнергии от плавучего энергоблока к объекту снабжения. Приведены возможные варианты конструкции устройства приема-передачи электроэнергии для непосредственной стыковки плавучего энергоблока со специальным швартовным устройством. Выполнено сравнение по критериям технологичности, надежности, массы и габаритов вариантов систем передачи на уровнях напряжения 10,5, 35 и 110 кВ. Определены параметры судовых и подводных кабельных трасс: число и сечение кабелей, а также дана предварительная оценка потерь напряжения и мощности. На основании результатов анализа определены возможность и целесообразность реализации подобных систем.

*Ключевые слова:* электроэнергетическая система, передача электроэнергии, скользящий контакт, плавучий энергоблок, одноточечный причал, устройство приема-передачи, моделирование.

**Для цитирования:**

Сорокин И. В. Анализ вариантов комплекса судового электрооборудования для выдачи электроэнергии / И. В. Сорокин, Д. С. Семенов, С. В. Шарашкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 278–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-278-289.

### **Введение (Introduction)**

В последнее десятилетие (начиная с 80–90 гг. XX в.) приоритетными являются задачи развития Арктической зоны за счет разработки месторождений природных ресурсов и усовершенствования технологий их освоения, что нашло отражение в соответствующих указах Президента Российской Федерации и государственной программе «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации». Одной из ключевых задач в части освоения данной территории служит энергообеспечение населенных пунктов, производственных сооружений и промышленных установок, являющихся высокомоощными потребителями электроэнергии.

Применение автономных источников зачастую не может обеспечить необходимый уровень энергопотребления, поэтому остро встает вопрос принудительного (внешнего) энергоснабжения объектов. При условии высокой удаленности объекта от магистральных линий электроснабжения (прибрежные зоны, морские объекты) целесообразно применение передвижных (плавучих) электростанций (ПЭС) [1]. ПЭС представляет собой судно с ядерной энергетической установкой и единой электроэнергетической системой, осуществляющими распределение и преобразование энергии для передачи к потребителю.

Важной задачей в процессе реализации подобных систем является обеспечение надежной конструкции устройства выдачи (УВ). Наиболее простым вариантом исполнения УВ может служить обычная кабельная линия с использованием соединительных муфт. Основным недостатком такого варианта исполнения является отсутствие фиксации отводящих кабелей и возможные их повреждения в процессе перемещения судна при качке. Для исключения этого недостатка возможно использование варианта совмещения швартовного устройства (буя) и устройства приема-передачи (УПП) электроэнергии в единую конструкцию. Подобное решение нашло применение при добыче полезных ископаемых [2], [3], однако реализация его для передачи электроэнергии требует фундаментальной проработки.

Очевидно, что при реализации системы передачи на берег требуется разработка обособленной электроэнергетической системы судна, способной осуществлять распределение и преобразование электроэнергии, а также контроль состояния процесса передачи. Основные принципы построения подобных систем подробно описаны в источниках [4]–[6] и могут быть использованы при качественном сравнении вариантов компоновки оборудования.

Основные цели работы:

- проработка возможных структур систем передачи с учетом требуемой мощности;

- сравнение вариантов систем передачи;
- определение облика основных конструктивных узлов.

Результаты настоящего исследования могут найти применение при разработке новых судов обеспечения электроэнергией или ПЭС, а также при оснащении имеющихся судов оборудованием приема-передачи.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

В процессе исследования предполагается рассмотрение трех основных схем передачи электроэнергии с различными уровнями напряжения  $U_{\text{д}}$ : 10,5, 35 и 110 кВ. Диапазон мощности потребителей может быть достаточно велик (от 0,5 до 80 МВт и более). При этом необходимо учитывать выходную мощность имеющихся образцов судовых ядерных энергетических установок (СЯЭУ). Для СЯЭУ с реакторами типа «Ритм-100» и «Ритм-200» целесообразно выполнять расчет для мощности  $P = 100$  МВт. При этом следует полагать, что коэффициент мощности нагрузки  $\cos \varphi = 0,98$  находится на уровне электростанции объекта снабжения. Диапазон возможных расстояний до объекта составляет 1–15 км.

В рассматриваемой системе (рис. 1) следует выделить три основных узла:

- электроэнергетическую систему для выдачи электроэнергии;
- УПП электроэнергии;
- устройство стыковки (УС) судового и подводного кабеля.

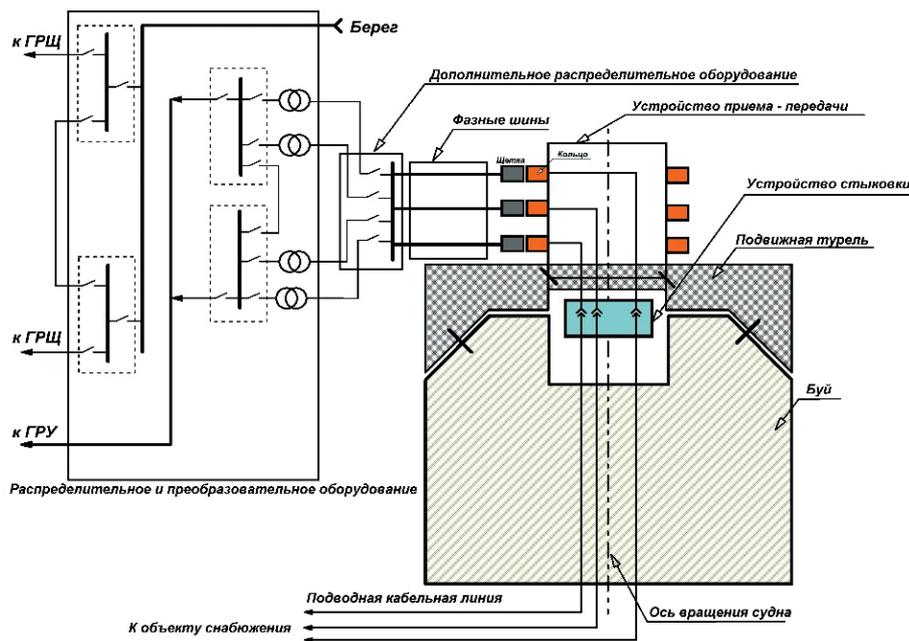


Рис. 1. Функциональная схема системы приема-передачи энергии

Электроэнергетическая система для выдачи электроэнергии состоит из распределительного и преобразовательного оборудования, предназначенного для передачи энергии от судовых электростанций. Также ее состав входит система контроля состояния и диагностики процесса передачи. УПП представляет собой скользящий электрический контакт. Подвод судового кабеля от ШС осуществляется к контактным щеткам УПП.

В процессе эксплуатации судно совместно с контактными щетками вращается вокруг неподвижной оси буя. При этом контактные кольца остаются неподвижными за счет жесткой сцепки с буюм. Устройство стыковки (УС) необходимо для соединения кабелей, закрепленных на швартовном устройстве (бую), и судовых кабелей или контактных поверхностей, отводящихся от контактных колец УПП.

Особенностью схемы передачи на уровне напряжения 10,5 кВ (рис. 2) является отсутствие повышающих трансформаторов и высоковольтного распределительного оборудования. При этом количество отводящих судовых и подводных кабелей питания существенно увеличивается по сравнению с остальными рассматриваемыми вариантами. Питание на систему передачи осуществляется непосредственно от электростанций судна (уровень напряжения 10,5 кВ) и распределяется между двумя параллельно работающими силовыми щитами (ЩС1–2). Отводящие фидеры ЩС1–2 соединены с кабельными группами, которые подаются на контактные щетки УПП. Структурная схема варианта передачи на уровне напряжения 10,5 кВ приведена на рис. 2.

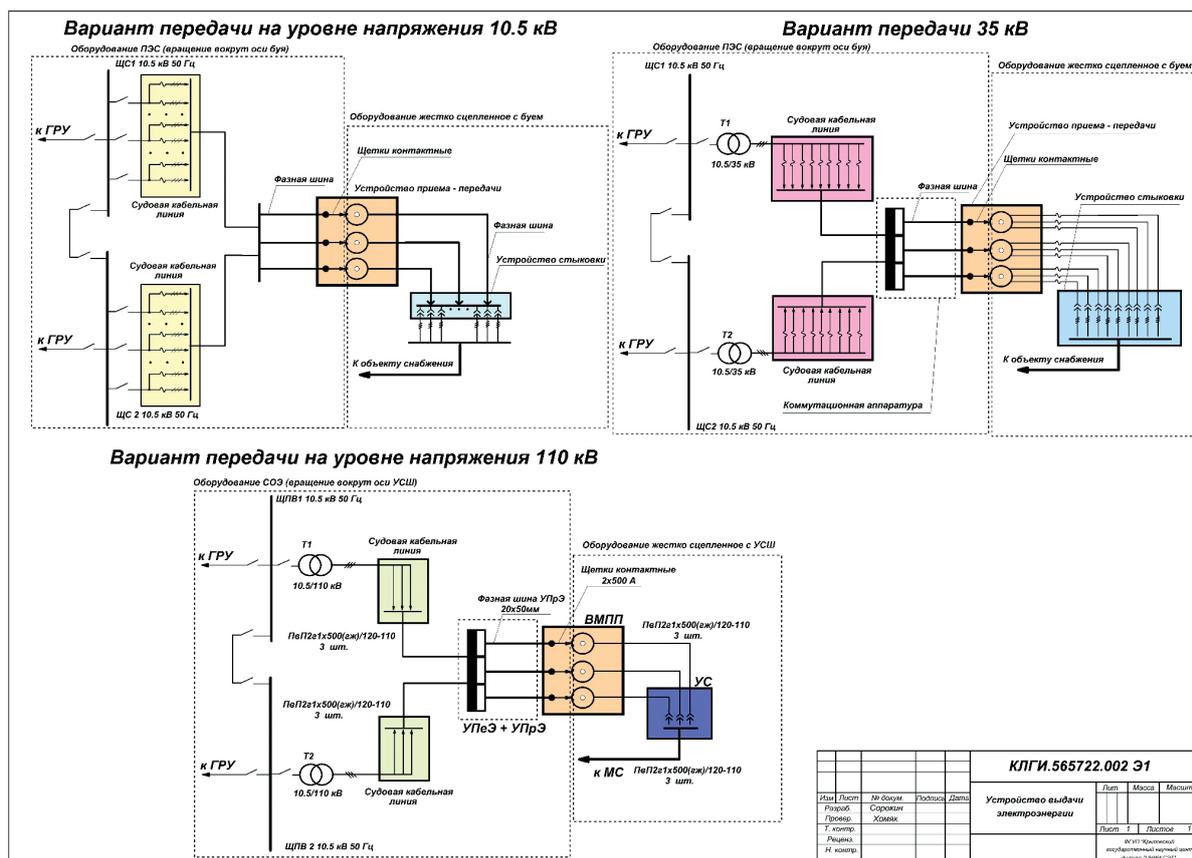
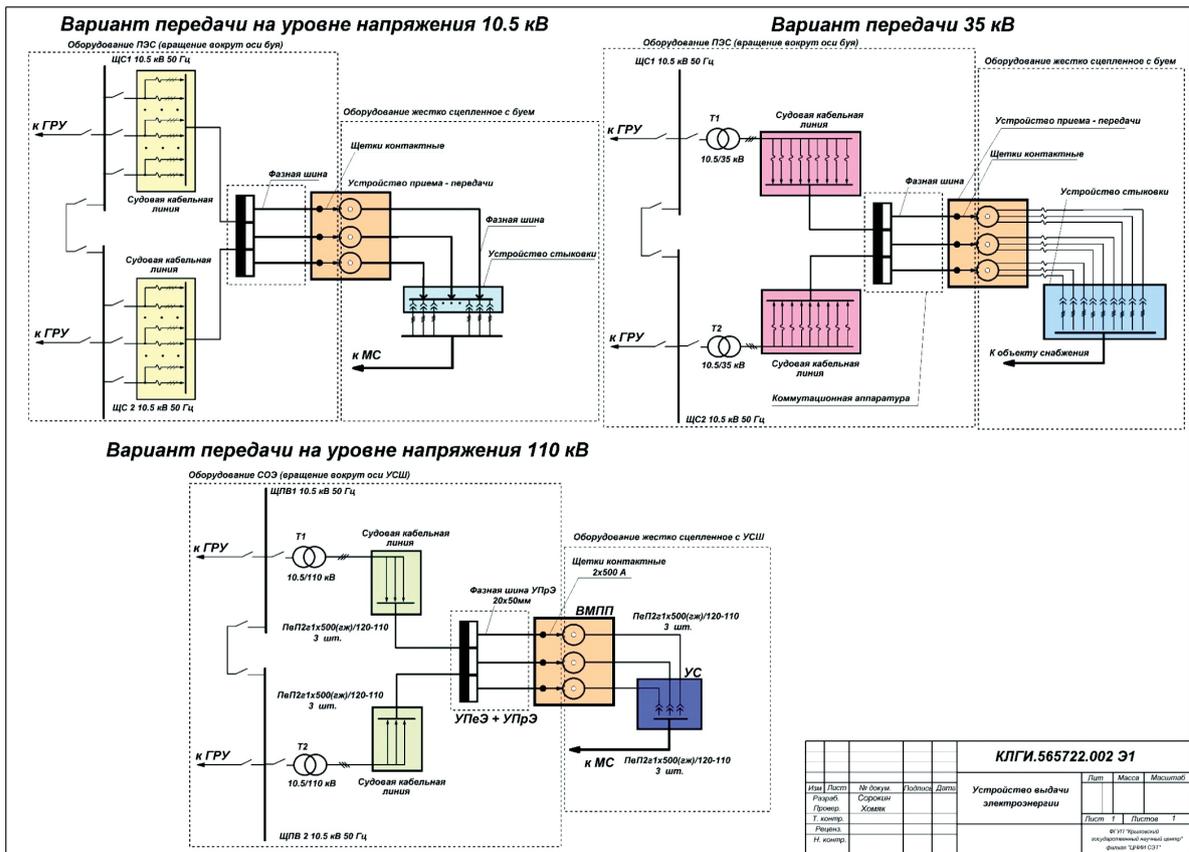


Рис. 2. Структурная схема варианта передачи на уровне напряжения 10,5 кВ

Передача электроэнергии из судовой сети на объект с уровнем напряжения передачи 35 кВ требует установки на судне повышающих трансформаторов 10,5/35 кВ. Отводящие фидеры ЩС при этом соединены с первичной обмоткой трансформаторов  $T1$  и  $T2$ . Однако в данном варианте выходные кабели трансформаторов  $T1$  и  $T2$  не могут быть соединены непосредственно со щетками УПП. Поэтому для реализации данного варианта необходима установка дополнительного распределительного устройства между повышающими трансформаторами и УПП. Структурная схема варианта передачи на уровне напряжения 35 кВ приведена на рис. 3, а.

Передача электроэнергии из судовой сети на объект с уровнем напряжения передачи 110 кВ требует наличия повышающих трансформаторов 10,5/110 кВ. Тогда кабельная система с учетом стандартной номенклатуры может состоять из трех силовых кабелей. ЩС1–2 напряжением 10,5 кВ, подключенные к соответствующим секциям ГРУ, необходимы для передачи энергии от главных турбогенераторов на повышающие трансформаторы  $T1$  и  $T2$  для подачи на кабельную линию напряжением 110 кВ. Кабельная линия представлена тремя силовыми кабелями (по одному кабелю на фазу), при этом судовые и подводные кабели имеют различные условия прокладки и могут выбираться отдельно. Структурная схема варианта передачи на уровне напряжения 110 кВ приведена на рис. 3, б.

а)



б)

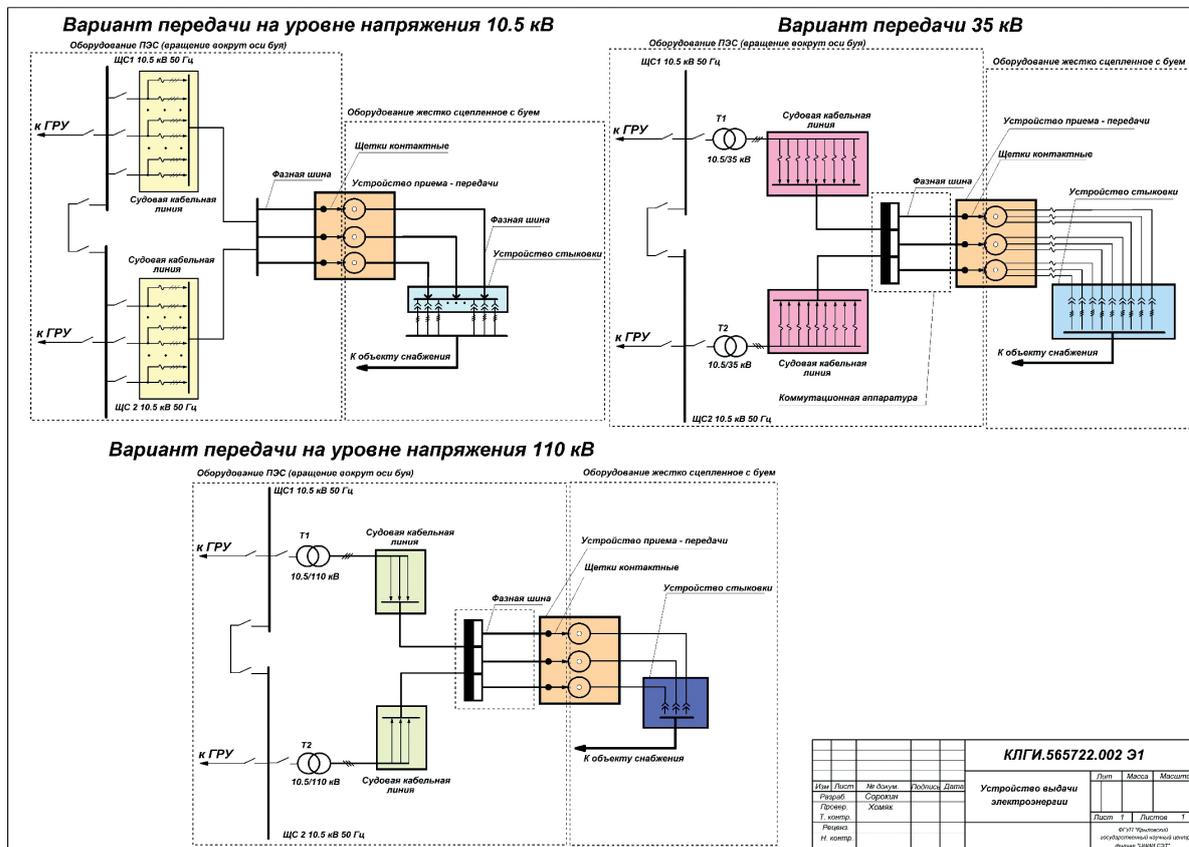


Рис. 3. Структурные схемы вариантов передачи:

а — на уровне напряжения 35 кВ; б — на уровне напряжения 110 кВ

Для сравнения представленных вариантов необходимо задаться критериями оценки. При анализе разрабатываемых систем целесообразно выбрать следующие показатели:

- надежность;
- технологичность (для узла приема-передачи);
- электрические потери в системе (потери напряжения и мощности);
- массо-габаритные показатели.

При оценке надежности необходимо воспользоваться структурными методами, рассмотренными в источнике [7], с учетом ряда допущений:

- поток отказов будем считать простейшим (пуассоновским);
- расчет без учета восстановления для короткого времени непрерывной работы;
- показатели безотказности УПП и коммутационных аппаратов не изменяются в различных вариантах, поэтому ими можно пренебречь.

УПП является основным разрабатываемым узлом сложного конструктивного исполнения. При изменении параметров напряжения передачи его габариты и масса существенно изменяются, поэтому расчет технологичности различных вариантов целесообразно осуществлять для УПП. Показателями технологичности, согласно [8], могут служить удельная материалоемкость изделия  $M$  и комплексный показатель технологичности конструкции  $K$ .

Удельная материалоемкость изделия  $M$  определяется как отношение массы изделия к основному техническому показателю системы. Для сравнения вариантов целесообразно применение в качестве основного технического параметра значения передаваемой мощности  $P$ .

Комплексный показатель технологичности  $K$  можно оценить по формуле

$$K = \sum_{i=1}^s k_i \cdot \varphi_i / \sum_{i=1}^s \varphi_i,$$

где  $k_i$  — значение  $i$ -го показателя технологичности;

$\varphi_i$  — значение весового коэффициента  $i$ -го показателя технологичности.

Соответствующие показатели технологичности и таблицы весовых коэффициентов приведены в [9]. Для определения электрических потерь при различных вариантах исполнения необходимо построить математическую модель системы передачи 110 кВ в среде Matlab Simulink (рис. 4).

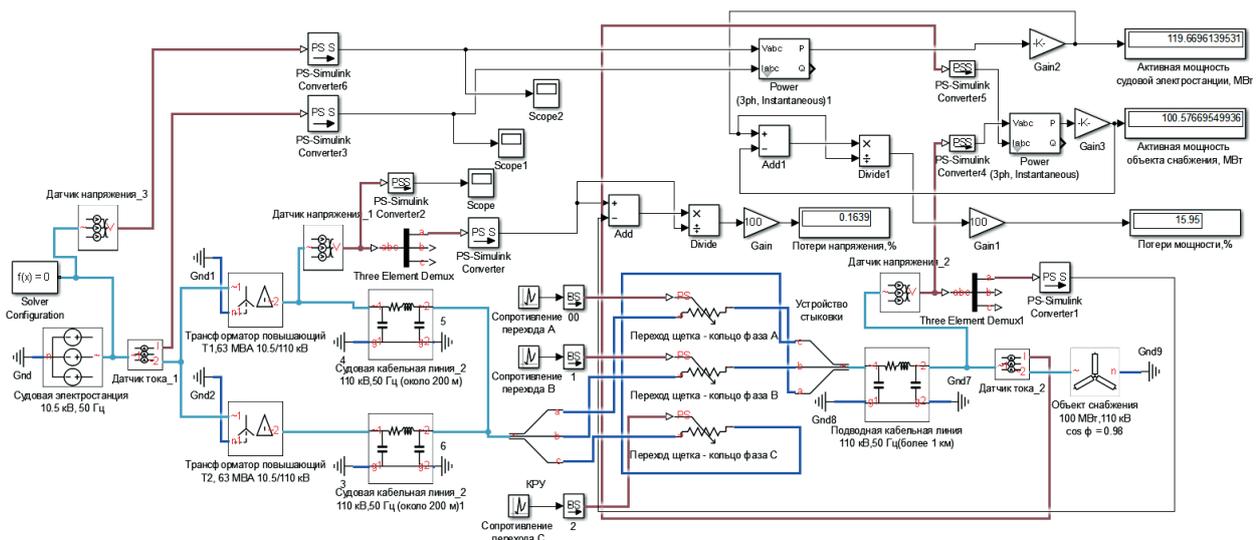


Рис. 4. Математическая модель варианта системы передачи энергии на уровне 110 кВ

Судовая электростанция представлена источником напряжения 10,5 кВ, осуществляющим питание системы через согласующие трансформаторы  $T1$  и  $T2$ . Судовые и подводные кабельные линии выполнены в виде блока Transmission Line с соответствующим количеством кабелей

и электрическими параметрами. Переход *щетка — контактное кольцо* определен блоком резистора с переменным сопротивлением, в котором учитываются возможные принимаемые значения переходного сопротивления скользящего контакта при эксплуатации (200–2000 мкОм). В качестве объекта снабжения выступает активно-индуктивная нагрузка, соединенная по схеме звезда с заземленным нейтральным проводом.

Контроль мощности на входе-выходе системы осуществляется с помощью двух блоков измерения Power Measurment, информация с которых поступает на соответствующие дисплеи (активная мощность судовой электростанции и активная мощность объекта снабжения, МВт) и блок расчета потерь. Потери напряжения (%) определяются по датчику напряжения на входе-выходе кабельной линии и выводятся на дисплей в процентном соотношении.

Математические модели оставшихся двух вариантов (10,5 кВ и 35 кВ) имеют аналогичную структуру и блоки. Принципиальным отличием различных вариантов является состав судовых и подводных кабельных линий по количеству и типу кабелей. При определении облика УПП исходными данными будут являться различные требования и теоретические исследования [10], [11], а именно:

- допустимые изоляционные расстояния для различных уровней напряжения;
- допустимые токовые нагрузки на шинопроводы;
- габариты кабелей и шинопроводов.

Для сравнения масса-габаритных параметров требуется построение контруктивных моделей. Для этого необходимо воспользоваться средой автоматического проектирования Kompas-3D.

### Результаты (Results)

В процессе расчета необходимого количества жил и сечений кабеля для всех вариантов был обеспечен дополнительный запас по перегрузкам (около 1,5 номинального тока). В связи с тем, что на изменение таких показателей, как стоимость, масса, уровень электрических потерь, оказывает влияние структура кабельной линии от ПЭС до приемника электроэнергии, необходимо рассмотреть структуру подводной кабельной линии. Состав и электрические параметры подводных кабельных линий различных вариантов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Состав и электрические параметры  
подводных кабельных линий различных вариантов**

Напряжение передачи, кВ	Тип кабеля	Индуктивность на километр, мГн	Емкость на километр, мкФ	Активное сопротивление на километр, Ом	Кол-во, шт.
110	110 кВ 1 × 500 мм <sup>2</sup>	0,37	0,194	0,04	3
35	35(24) кВ 1 × 500 мм <sup>2</sup>	0,321	0,5	0,04	9
10,5	6/10(12) кВ 3 × 150 мм <sup>2</sup>	0,309	1,12	0,16	34

Для указанных в табл. 1 электрических параметров при различных расстояниях до объекта возможно определение активных потерь для различных вариантов. Результаты расчета потерь активной мощности при уровнях напряжения 10,5 кВ 35 кВ и 110 кВ приведены на рис. 5.

В программной среде «Компас 3D» разработаны модели УПП. Общие узлы и элементы устройства описаны в варианте конструкции 10,5 кВ (рис. 6). В основе конструкции находится электрический контакт между стальным кольцом 4 (сцеплен с бумом) и графитовыми щетками 3 (жестко сцеплены с судном). Для крепления щеток, расположенных на шине 1 к корпусу судна, используются горизонтальные стержневые изоляторы 2, которые необходимо установить на дополнительную изолирующую прокладку 7, а также между фазными кольцами и блоками

подшипников 8 (линейные изоляторы 6). Каждая шина 1 соответствует одной фазе трехфазной системы, соединенной с переходом *кольцо — щетка*. Отводные шины 5 закреплены на стальных контактных кольцах 4 и УС. Для других вариантов отводные шины 5 заменены кабелями за счет сниженной токовой нагрузки. Вращение вокруг оси осуществляется за счет подшипников 8, закрепленных на вращающейся конструкции судна.

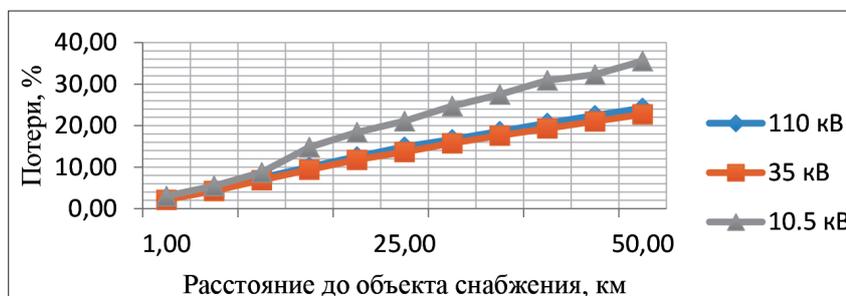


Рис. 5. Процент активных потерь мощности в системе в зависимости от расстояния

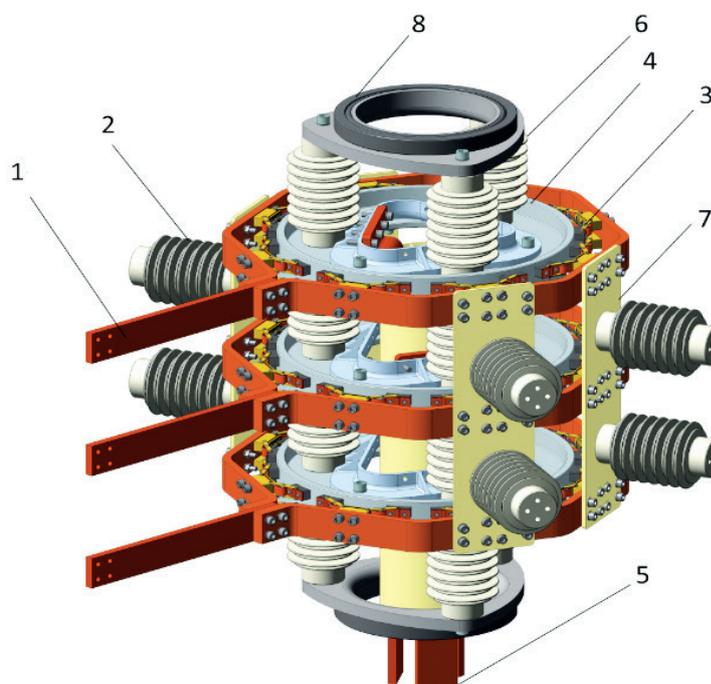


Рис. 6. Компьютерная модель УПП для варианта 10,5 кВ

Все варианты, выполненные на основе трехкольцевой структуры, имеют общие структурные единицы. Основными отличиями являются масса и габариты установок, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

**Масса и габариты УПП энергии для различных вариантов систем передачи**

Уровень напряжения, кВ	Габариты Г × Ш × В, мм	Масса, кг
10,5	1560 × 1335 × 1483	731
35	1673 × 1582 × 1634	675
110	3262 × 1673 × 3795	766

Графики вероятности безотказной работы для различных вариантов системы передачи при ее непрерывной работе в течение 500 ч приведены на рис. 7.

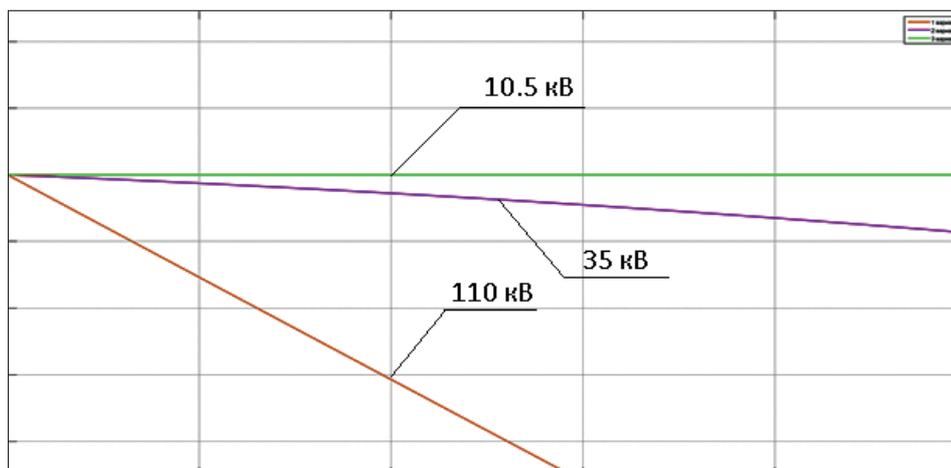


Рис. 7. Вероятность безотказной работы при непрерывной эксплуатации в течение 500 ч для всех вариантов систем передачи

Итоговые значения параметров технологичности вариантов УПП приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Параметры технологичности УПП энергии  
для различных вариантов исполнения**

Напряжение передачи	$k$	$k_c$	$k_r$	$k_o$	$k_{сб}$	$K$	$M$ , кг/МВт
10,5 кВ	0,2	0,25	0,77	0,22	0	0,34	7,31
35 кВ	0,2	0,25	0,75	0,26	0	0,33	6,75
110 кВ	0,19	0,21	0,7	0,24	0	0,308	7,66

**Обсуждение (Discussion)**

Математическое моделирование показало, что потери напряжения для всех вариантов систем передачи не превышает 5 % при расстоянии до объекта снабжения не более 10 км. Ожидаемые потери активной мощности в системе 10,5 кВ существенно выше, чем для вариантов 35 кВ и 110 кВ. При этом основная доля потерь во всех вариантах приходится на кабельную линию. Наименьшие потери мощности в кабельной линии наблюдаются в варианте 110 кВ.

Характеристики безотказности (см. рис. 8) свидетельствуют о высокой динамике снижения вероятности безотказной работы для варианта 110 кВ. Для вариантов 35 кВ и 10,5 кВ данные показатели на участке непрерывной работы (500 ч) оказываются сопоставимыми между собой. Низкий показатель безотказности варианта 110 кВ объясняется отсутствием путей резервирования системы на уровне кабельной трассы. При выходе из строя хотя бы одного элемента кабельной линии система полностью теряет работоспособность.

Анализ технологичности вариантов УПП (см. табл. 3) показывает, что комплексные показатели технологичности конструкции различных вариантов сопоставимы. Однако наилучший удельный показатель мощности имеет вариант 35 кВ за счет наименьшей массы устройства. Габаритные размеры УПП (см. табл. 2) значительно увеличиваются для варианта 110 кВ за счет увеличения допустимых изоляционных расстояний по сравнению с вариантами 10,5 и 35 кВ, имеющими сопоставимые габариты.

Кабельная линия передачи энергии на объект снабжения для варианта 110 кВ имеет в составе три кабеля (по одному на фазу) и не обладает дополнительным резервирующим запасом по току. Для вариантов 10,5 и 35 кВ данный запас составляет около 1,5 номинального тока при работе в длительном режиме. Таким образом, целесообразность применения запаса по току обосновывается резервными путями передачи энергии для варианта 10,5 кВ (34 кабеля по одной жиле на фазу) и 35 кВ (три кабеля на фазу).

### Заключение (Conclusion)

Оценка рассмотренных вариантов структуры системы передачи электроэнергии на объект выполнялась по следующим критериям: надежность, технологичность, масса, габариты и электрические потери. На основе результатов расчетов был сделан вывод о том, что наилучшее соотношение всех приведенных критериев содержит вариант передачи на уровне напряжения 35 кВ, поскольку он имеет приемлемые показатели безотказности при непрерывной работе без обслуживания, электрические потери и габариты. При наименьшей массе УПП обладает сопоставимыми показателями технологичности конструкции.

Основным недостатком вариантов 35 кВ и 110 кВ является наличие двух повышающих трансформаторов в системе с единичной мощностью 63 МВ·А. Трансформаторы для подобных мощности и уровня напряжения не применяются на судах согласно нормативным документам, в том числе из-за несоответствия требованиям Российского морского регистра судоходства. Для реализации структуры требуется разработка специальных трансформаторов с требуемыми масса-габаритными показателями и климатическим исполнением для установки в технических помещениях судна. Кроме того, возникает необходимость получения разрешения для использования высокого уровня напряжения (35 кВ) на судне.

Вариант с уровнем напряжения 10,5 кВ полностью удовлетворяет требованиям нормативных документов, имеет сходные с вариантом 35 кВ показатели технологичности, безотказности и габариты. Недостатками в данном случае являются высокие габариты подводной кабельной линии и электрические потери. В состав кабельной линии входит 34 трехжильных кабеля, что осложняет их крепление к УС и на дне. Большое количество кабелей также сказывается и на электрических потерях. С учетом компенсации на уровне объекта снабжения при удаленности его на расстоянии 20 км потери в системе составят около 20 %. Поэтому данный вариант нецелесообразно использовать в широком диапазоне расстояний до объекта.

УПП энергии на напряжение 110 кВ имеет высокие габариты, а система предусматривает установку повышающих трансформаторов (аналогично варианту 35 кВ). Данный уровень напряжения превышает допустимый для судов в девять раз, что отражается на габаритах коммутационной и распределительной аппаратуры с учетом изоляционных расстояний. Комплекс судового оборудования при этом имеет наибольшие габариты и сложность исполнения и нецелесообразен для применения на судне.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петрунин В. В.* Плавающие энергоблоки с РУ «РИТМ-200М» / В. В. Петрунин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. — 2019. — № 1. — С. 91–96.
2. *Rizkya I.* Comparison of Crude Oil Supply Cost Between Ship Rental and Single Point Mooring / I. Rizkya, K. Syahputri, R. M. Sari, O. C. Syardhi // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 851. — Is. 1. — Pp. 012048. DOI: 10.1088/1757-899X/851/1/012048.
3. *Qi X.* Calm Buoy and Fluid Transfer System Study / Y. Chen, Q. Yuan, G. Xu, K. Huang // The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017. — Paper Number: ISOPE-I-17-128.
4. *Volintiru O. N.* Modeling and optimization of HVAC system for special ships / O. N. Volintiru, I. C. Scurtu, T. M. Ștefănescu // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 1122. — Is. 1. — Pp. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1122/1/012004.
5. *Баранов А. П.* Судовые автоматизированные электроэнергетические системы / А. П. Баранов; Федеральное агентство морского и речного транспорта. Гос. Морская академия им. С. О. Макарова. — СПб.: Судостроение, 2005. — 528 с.
6. *Djagarov N.* Ship's Electrical Power System Model for Investigation of Dynamic Mode Operation / N. Djagarov [et al] // 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493929.

7. Папков Б. В. Вероятностные и статистические методы оценки надёжности элементов и систем электроэнергетики: теория, примеры, задачи / Б. В. Папков, В. Л. Осокин. — Старый Оскол: ТНТ, 2017. — 424 с.
8. Лапина Н. В. Оценка технологичности изделий машиностроения при замене традиционных материалов на композиты / Н. В. Лапина, Н. И. Баурова // Новые материалы и технологии в машиностроении. — 2017. — № 26. — С. 37–41.
9. Артемов И. И. Стратегия оценки технологичности конструкции изделий для высокотехнологичных наукоемких машиностроительных производств / И. И. Артемов, А. Е. Зверовщиков, С. А. Нестеров // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. — 2017. — № 1 (40). — С. 286–290.
10. Zhao S. Study of Carbon Brush and Slip-Ring System Abrasion From Electric Contact Friction Under Special Environments / S. Zhao [et al] // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — Pp. 9308–9317. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050098.
11. Grandin M. Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact / M. Grandin, U. Wiklund // Tribology International. — 2018. — Vol. 121. — Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.004.

## REFERENCES

1. Petrunin, V. V., Yu. P. Fadeev, A. N. Pakhomov, K. B. Veshnyakov, V. I. Polunichev, S. V. Kabin, and A. Yu. Turusov. “Floating power units with RITM-200M RP.” *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov* 1 (2019): 91–96.
2. Rizkya, I., K., Syahputri, R. M. Sari, and O. C. Syardhi. “Comparison of Crude Oil Supply Cost Between Ship Rental and Single Point Mooring.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 851. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1757–899X/851/1/012048.
3. Qi, Xiaoliang, Yongjun Chen, Quan Yuan, Gang Xu, and Kevin Huang. “Calm Buoy and Fluid Transfer System Study.” *The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017. Paper Number: ISOPE-I-17-128.
4. Volintiru, O. N., I. C. Scurtu, and T. M. Ștefănescu. “Modeling and optimization of HVAC system for special ships.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1122. No. 1. IOP Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1122/1/012004.
5. Baranov, A. P. *Sudovye avtomatizirovannye elektroenergeticheskie sistemy*. SPb.: Sudostroenie, 2005.
6. Djagarov, Nikolay, Zhivko Grozdev, Vencislav Varbev, Gabriel Predoi, and Julia Djagarova. “Ship’s Electrical Power System Model for Investigation of Dynamic Mode Operation.” *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493929.
7. Papkov, B. V., and V. L. Osokin. *Veroyatnostnye i statisticheskie metody otsenki nadezhnosti elementov i sistem elektroenergetiki: teoriya, primery, zadachi*. Staryi Oskol: TNT, 2017.
8. Lapina, N. V., and N. I. Baurova. “Evaluation of technology of machine-building products when replacing traditional materials on composites.” *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* 26 (2017): 37–41.
9. Artemov, I. I., A. E. Zverovschikov, and S. A. Nesterov. “Estimation of technological effectiveness strategy at design of workpieces for hi-tech, science intensive technology engineering manufactures.” *Vestnik of P. A. Solov'yov Rybinsk State Aviation Technical University* 1(40) (2017): 286–290.
10. Zhao, Shuai, Hongzhong Ma, Mengyao Jiang, Chengying Li, Yidan Liu, Xuehua Zhao, and Xuan Chen. “Study of Carbon Brush and Slip-Ring System Abrasion From Electric Contact Friction Under Special Environments.” *IEEE Access* 9 (2021): 9308–9317. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050098.
11. Grandin, Martina, and Urban Wiklund. “Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact.” *Tribology International* 121 (2018): 1–9. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.004.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сорокин Илья Владимирович** — инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр» 196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44  
e-mail: [idefo@list.ru](mailto:idefo@list.ru)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sorokin, Ilya V.** — Engineer  
Krylov State Research Center  
44 Moscow highway, St. Petersburg, 196158,  
Russian Federation  
e-mail: [idefo@list.ru](mailto:idefo@list.ru)

**Семенов Дмитрий Сергеевич** — аспирант

*Научный руководитель:*

Самосейко Вениамин Францевич —

доктор технических наук, профессор

ФГУП «Крыловский государственный  
научный центр»

196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Московское шоссе, 44

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7

e-mail: [semenov.d.serg@yandex.ru](mailto:semenov.d.serg@yandex.ru),

[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

**Шарашкин Сергей Владимирович** —

кандидат технических наук

ФГУП «Крыловский государственный  
научный центр»

196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Московское шоссе, 44

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7

e-mail: [s\\_sharashkin@mail.ru](mailto:s_sharashkin@mail.ru),

[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

**Semenov, Dmitrii S.** — Postgraduate  
*Supervisor:*

Samoseiko, Veniamin F. —

Dr. of Technical Sciences, professor

Krylov State Research Center

44 Moscow highway,

St. Petersburg, 196158,

Russian Federation

Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: [semenov.d.serg@yandex.ru](mailto:semenov.d.serg@yandex.ru),

[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

**Sharashkin, Sergei V.** —

PhD

Krylov State

Research Center

44 Moscow highway, St. Petersburg, 196158,

Russian Federation

Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: [s\\_sharashkin@mail.ru](mailto:s_sharashkin@mail.ru),

[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 24 февраля 2021 г.*

*Received: February 24, 2021.*

## THE RESULTS OF DESIGN AND TRIALS OF COMBINED PROPULSION PLANT FOR A BUOY BOAT

**A. V. Grigoryev<sup>1,2</sup>, S. M. Malyshev<sup>2,3</sup>, S. V. Vorobyev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup> — JSC “RPC “Ship electric propulsion”, St. Petersburg, Russian Federation

*Combined propulsion plants get wide spread on modern ships of foreign construction, while in the domestic shipbuilding industry there is practically no experience in the design and testing of these vessels. A distinctive feature of the combined propulsion plants is that the energy for the vessel movement is generated in them in two (or more) different types of ship engines — thermal and electric, working on a common propulsion unit — a propeller. Combined propulsion plants are complex electromechanical systems designed to ensure the movement of the vessel and the production of electricity in the various modes of operation. Combined propulsion plants conjoin the advantages of traditional propulsion systems with heat main engines and electric propulsion plants. A unified electric power system with a combined plant of a work boat is discussed in the paper. The work boat is the first vessel built in the Russian Federation with this type of propulsion system. The feature the combined propulsion plant installed on the work boat is the ability to operate the propeller electric motor in both propulsion and generator modes. The ship uses diesel generators, storage batteries and electric propulsion motor in the generator mode as the sources of electricity. The main modes of the vessel operation, the results of dock and sea trials of the unified electric power system and combined propulsion plant are briefly discussed in the paper. During the trials, the autonomous mode of operation of each electric power source on the auxiliary electric propulsion plant and ship consumers has been checked successfully. New method of synchronization of diesel-generator and autonomous inverter has been realized; it has high speed and accuracy that excludes appearance of current shot when power source connects to the main switchboard.*

*Keywords: combined propulsion plant, heat main engine, electric propulsion motor, electric propulsion plant, reduction gear, shaft line, propeller, propulsor, operating mode, accumulator battery.*

**For citation:**

Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Semen V. Vorobyev. “The results of design and trials of combined propulsion plant for a buoy boat” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 290–299. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-290-299.

УДК 621.315:621.3.025

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОПУЛЬСИВНОЙ УСТАНОВКИ ЛОЦМЕЙСТЕРСКОГО КАТЕРА

**А. В. Григорьев<sup>1,2</sup>, С. М. Малышев<sup>2,3</sup>, С. В. Воробьев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> — СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup> — АО «НПЦ «Электродвижение судов», Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Темой исследования являются комбинированные пропульсивные установки (КПУ), которые находят широкое применение на современных судах зарубежной постройки, при этом в отечественном судостроении практически отсутствует опыт проектирования и испытаний судов с такими установками. Отмечается, что отличительной особенностью КПУ является то, что энергия для движения судна в них вырабатывается в двух (или более) разнотипных судовых двигателях: тепловых и электрических, работающих на одной движитель — гребной винт. Подчеркивается, что КПУ являются сложными электромеханическими системами, предназначенными для обеспечения движения судна и производства электроэнергии в различных режимах эксплуатации, они сочетают в себе достоинства традиционных пропульсивных установок*

с тепловыми главными двигателями и гребных электрических установок. В статье рассмотрена единая электроэнергетическая системы с комбинированной установкой рабочего катера. Рабочий катер — первое судно, построенное в Российской Федерации с данным типом пропульсивной установки. Отличие КПУ, установленной на рабочем катере, является возможность работы гребного электродвигателя как в двигательном, так и в генераторном режиме. В качестве источников электроэнергии на судне применяются дизель-генераторы, аккумуляторные батареи и гребной электродвигатель, приводимый в движение от главного дизеля. В статье кратко рассмотрены основные режимы эксплуатации судна, представлены результаты швартовных и ходовых испытаний единой электроэнергетической системы и КПУ. Отмечается, что при проведении испытаний был успешно проверен автономный режим работы каждого источника электроэнергии, используемого на вспомогательной гребной электроустановке и общесудовых приемниках. В процессе проведения испытаний реализован новый способ синхронизации ДГ и автономного инвертора, отличающийся высоким быстродействием и точностью, что исключает появление бросков тока при подключении источника электроэнергии к ГРЩ.

*Ключевые слова:* комбинированная пропульсивная установка, тепловой главный двигатель, гребной электродвигатель, гребная электрическая установка, редуктор, валопровод, гребной винт, движитель, режим эксплуатации, аккумуляторные батареи.

**Для цитирования:**

Григорьев А. В. Результаты проектирования и испытаний комбинированной пропульсивной установки лоцмейстерского катера / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, С. В. Воробьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 290–299. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-290-299.

## Введение (Introduction)

Пропульсивная установка представляет собой комплекс механизмов и устройств, предназначенных для обеспечения движения судна. На судах находят применение пропульсивные установки разного типа и состава. Наибольшее распространение в настоящее время получили традиционные пропульсивные установки с тепловыми главными двигателями (ГД) и гребные электрические установки (ГЭУ) с гребным электродвигателем (ГЭД). Каждому из указанных типов установок присущи свои достоинства и недостатки, которые определяют их область применения [1]–[3].

Необходимость сочетания достоинств пропульсивных установок разных типов послужила стимулом для создания комбинированных (гибридных) пропульсивных установок (КПУ). КПУ сочетают в себе достоинства пропульсивных установок на базе тепловых главных двигателей и ГЭУ, что позволяет судну работать с высокими технико-экономическими показателями в различных режимах эксплуатации.

## Методы и материалы (Methods and Materials)

Комбинированная (гибридная) пропульсивная установка является судовой пропульсивной установкой, в которой энергия для движения судна вырабатывается в двух или более разнотипных судовых двигателях: тепловых и электрических, работающих на общий движитель. Данные установки являются сложными электромеханическими системами, предназначенными для обеспечения движения судна в различных режимах эксплуатации и производства электроэнергии при условии экономичного хода. В состав КПУ входит тепловой ГД и ГЭД. Два двигателя с разными физическими процессами, свойствами и техническими характеристиками механически связаны между собой с помощью редуктора или валопровода и работают на общий движитель (гребной винт).

КПУ сочетают свойства как традиционных установок на базе тепловых двигателей, так и систем электродвижения. В зависимости от соотношения мощностей ГД и ГЭД свойства традиционных пропульсивных установок проявляются в разной степени. Как правило, мощность ГД превосходит мощность ГЭД. В качестве движителя в составе КПУ [4] может применяться гребной винт или механическая ВРК [5], [6]. Структурная схема традиционной валогенераторной установки (ВГУ) с винтом регулируемого шага (ВРШ) приведена на рис. 1. В состав ВГУ входит ГД, валогенератор (ВГ) и редуктор. В качестве гребного винта, как правило, применяют ВРШ. ГД работает с постоянной частотой вращения, что позволяет ВГ вырабатывать необходимую для питания общесудовых

приемников электроэнергию с номинальными значениями напряжения и частоты. Скорость судна меняется за счет разворота лопастей ВРШ. В ВГУ данного типа сложно реализовать двигательный режим работы электрической машины, поэтому данный тип пропульсивного комплекса нельзя отнести к КПУ.

Недостатками ВГУ традиционной конструкции является сложность реализации режима параллельной работы ВГ и судового генераторного агрегата [7], а также невозможность эксплуатации ВГ при сильном волнении моря. Возможность работы электрической машины в обоих режимах: генераторном (режим валогенератора) и в двигательном (режим гребного электродвигателя), значительно повышает экономичность пропульсивной установки и ее регулировочные характеристики [8], [9].

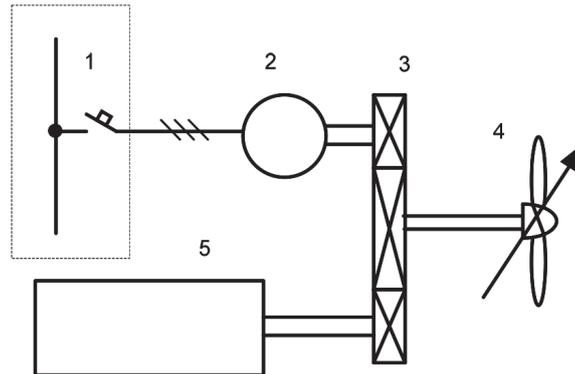


Рис. 1. Структурная схема валогенераторной установки с ВРШ  
1 — главный распределительный щит; 2 — валогенератор; 3 — редуктор;  
4 — винт регулируемого шага; 5 — главный двигатель

КПУ с винтом фиксированного шага (ВФШ) и полупроводниковым преобразователем (ПП), в котором реализуется двигательный и генераторный режим эксплуатации ГЭД, представлена на рис. 2.

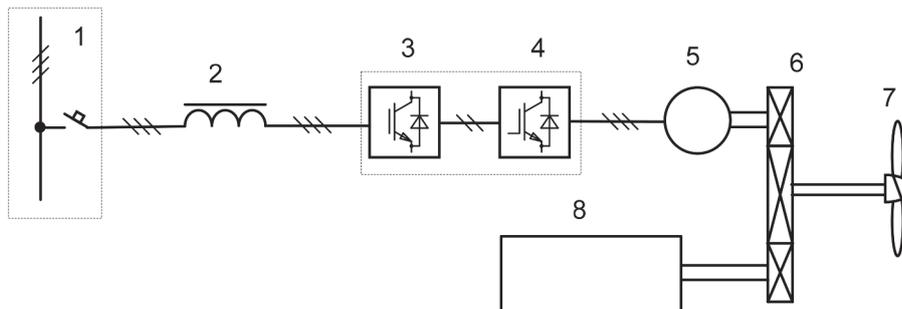


Рис. 2. Структурная схема комбинированной пропульсивной установки с винтом фиксированного шага и полупроводниковым преобразователем:  
1 — главный распределительный щит; 2 — дроссель;  
3 — полупроводниковый преобразователь; 4 — гребной электродвигатель;  
5 — редуктор; 6 — винт фиксированного шага; 7 — главный двигатель

КПУ состоит из ГД и ГЭД, которые через редуктор подключены к ВФШ. ГЭД получает питание от обратимого ПП, выполненного на базе двух полупроводниковых модулей, работающих в режиме активного выпрямителя и автономного инвертора. Скорость судна меняется путем изменения частоты вращения ВФШ [10], [11]. В данной комбинированной пропульсивной установке ГЭД может работать в валогенераторном режиме, в котором ход судна обеспечивает ГД, приводящий в движение ВФШ и ГЭД. Работа ГЭД в режиме валогенератора позволяет отказаться от работы вспомогательного дизель-генератора (ДГ) в ходовом режиме. В КПУ с обратимым ПП могут быть реализованы следующие режимы эксплуатации:

- автономная работа и совместная работа ГД и ГЭД на ВФШ;
- автономный валогенераторный режим работы ГЭД с отбором мощности от ГД (режим экономичного хода);
- параллельная работа ГЭД (режим валогенератора) с судовыми ДГ;
- стартерный запуск ГД от ГЭД.

При скорости судна менее 40–50 % от номинального значения в работе участвует только ГЭД, который получает питание от ДГ или статических источников электроэнергии. Средний ход судна в диапазоне 40–80 % от номинального значения обеспечивает ГД, при этом ГЭД может работать в режиме валогенератора, вырабатывая электроэнергию. Полный (максимальный) ход судна реализуется совместной работой в двигательном режиме ГД и ГЭД [12]–[16]. Зависимость мощности на гребном валу от скорости судна в различных режимах эксплуатации КПУ показана на рис. 3.

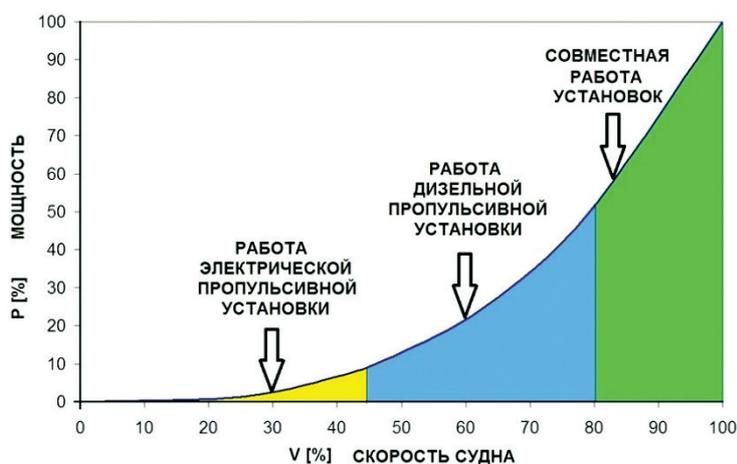


Рис. 3. Зависимость мощности на гребном валу от скорости судна при различных режимах эксплуатации

### Результаты (Results)

В 2020 г. завершено строительство и успешно проведены ходовые испытания двух рабочих катеров с КПУ. Рабочие катера были построены на Онежском судостроительном заводе (г. Петрозаводск) по заказу ФГУП «Росморпорт» (рис. 4).



Рис. 4. Рабочий катер с комбинированной пропульсивной установкой (личное фото А. В. Григорьева)

На катерах впервые в отечественном судостроении применяется КПУ с ПП. Структурная схема единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) с КПУ рабочего катера приведена на рис. 5.

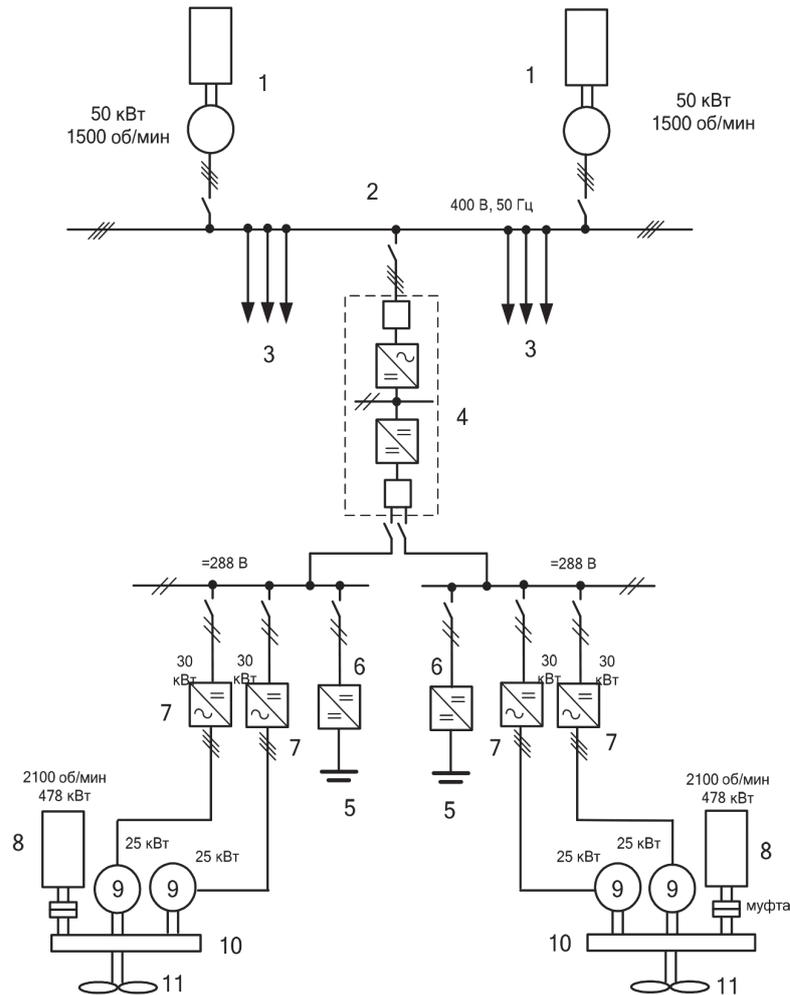


Рис. 5. Структурная схема ЕЭЭС с комбинированной пропульсивной установкой и винтом фиксированного шага: 1 — дизель-генератор; 2 — главный распределительный щит переменного тока; 3 — приемники электроэнергии; 4 — полупроводниковое устройство; 5 — аккумуляторная батарея; 6 — зарядные устройства; 7 — полупроводниковые инверторы; 8 — главный двигатель; 9 — гребной электродвигатель; 10 — редуктор; 11 — винт фиксированного шага

ЕЭЭС катера состоит из двух ДГ 1 мощностью 50 кВт, подключенных к ГРЩ переменного тока 2, от которого получают питание общесудовые приемники электроэнергии 3, и двух блоков аккумуляторных батарей (АБ) 5. В состав пропульсивного комплекса входят две КПУ. Каждая КПУ включает в себя ГД 8 мощностью 478 кВт и два ГЭД 9 мощностью по 25 кВт, подключенных посредством редуктора к валопроводу с ВФШ. ГЭД 9 через полупроводниковые инверторы 7 могут получать питание от двух блоков пропульсивных АБ 7 или от ГРЩ переменного тока 2 через полупроводниковое устройство 4. Основное оборудование ЕЭЭС с КПУ приведено на рис. 6.

Для реализации принципа единой электроэнергетической системы АО «НПЦ «Электродвижение судов» при участии сотрудников факультета судовой энергетики ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова и кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), был разработан и изготовлен комплект электротехнического оборудования, включающего полупроводниковое устройство (ППУ), которое является обратимым, позволяя преобразовывать электроэнергию переменного тока 400 В, 50 Гц в электроэнергию постоянного тока напряжением 288 В.

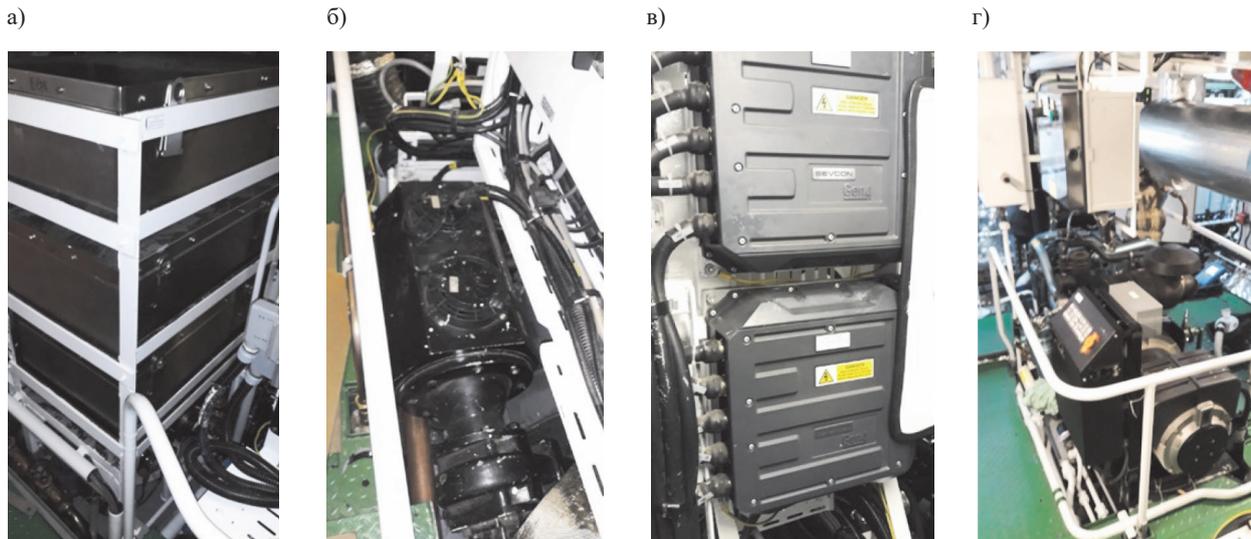


Рис. 6. Оборудование ЕЭС с комбинированной пропульсивной установкой:  
 а — блок аккумуляторных батарей; б — гребной электродвигатель;  
 в — полупроводниковые модули; г — дизель-генератор  
 (личное фото А. В. Григорьева)

ППУ состоит из дросселя (установлен на стороне постоянного тока), полупроводникового преобразователя постоянного напряжения (*DC-DC* преобразователь), автономного инвертора, синусного фильтра и микропроцессорной системы управления, расположенной в отдельном шкафу. Преобразователь постоянного напряжения и автономный инвертор выполнены на базе полупроводниковых модулей фирмы Danfoss. Фотографии оборудования ППУ приведены на рис. 7.

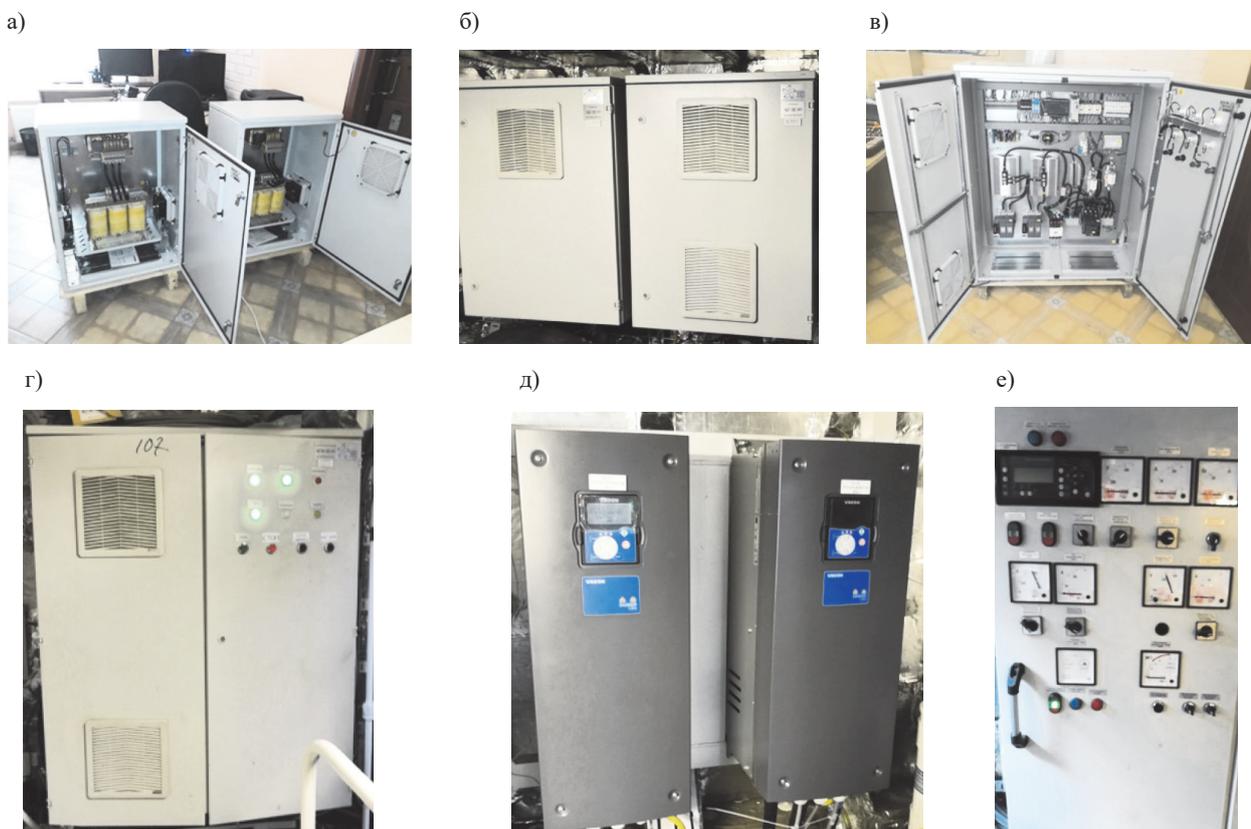


Рис. 7. Оборудование полупроводникового устройства: а — дроссель и синусный фильтр;  
 б — шкаф управления; в — полупроводниковые модули; г — генераторная секция ГРЩ  
 (личное фото А. В. Григорьева)

На рабочем катере были реализованы следующие режимы эксплуатации:

- автономная работа ГД на винт — электроэнергию вырабатывают ДГ;
- автономная работа ГД на винт — электроэнергию вырабатывают ГЭД, работающий в режиме валогенератора;
- автономная работа ГЭД на винт при питании от АБ;
- автономная работа ГЭД на винт при питании от ДГ;
- совместная работа ГД и ГЭД на винт;
- стоянка судна с питанием приемников электроэнергии переменного тока от АБ;
- режим синхронизации и параллельной работы ДГ и ГЭД, работающего в режиме валогенератора.

При проведении швартовых и ходовых испытаний были проверены все основные режимы эксплуатации ЕЭЭС с КПУ рабочего катера проекта. В соответствии с разработанной программой и методикой испытаний проводились измерения качества электроэнергии в судовой сети. Коэффициент несинусоидальности формы кривой напряжения во всех режимах эксплуатации ЕЭЭС не превышал 5 %. Процесс измерения качества электроэнергии в судовой сети показан на рис. 8.



Рис. 8. Электротехнические измерения при проведении испытаний ЕЭЭС с комбинированной пропульсивной установкой:  
а — подключение электроизмерительного прибора;  
б — проведение измерений  
(личное фото А. В. Григорьева)

При проведении испытаний были также выполнены измерения основных переходных процессов в пропульсивной установке и вспомогательной системе электродвижения. Определялось качество переходных процессов при автономной и совместной работе ГЭД и ГД во время пуска, останова и реверса. Выполнена проверка работы ГЭД в двигательном режиме при питании от АБ и от ГД, а также при параллельной работе источников электроэнергии. Выполнена проверка возможности работы ГЭД в режиме валогенератора, синхронизации и параллельной работы ДГ, ГЭД и АБ.

Впервые реализован процесс синхронизации ДГ с АБ через автономный инвертор путем подгона частоты тока на выходе ППУ как при подключении инвертора, так и при подключении ДГ к ГРЩ. При использовании данного способа синхронизации наблюдается значительное сокращение времени синхронизации и увеличение скорости. Включение на параллельную работу происходит практически при нулевом сдвиге фаз напряжений ДГ и автономного инвертора, при этом броски тока при подключении одного из источников электроэнергии к ГРЩ полностью отсутствуют. Осциллограммы мгновенного значения напряжения ДГ и автономного инвертора в момент начала синхронизации и при подключении одного из источников электроэнергии к ГРЩ приведены на рис. 9. Успешно проведенные швартовые и ходовые испытания подтвердили правильность научно-технических решений, принятых при проектировании ЕЭЭС с КПУ, и высокие технические характеристики первой установки данного типа, внедренной на российском судне.

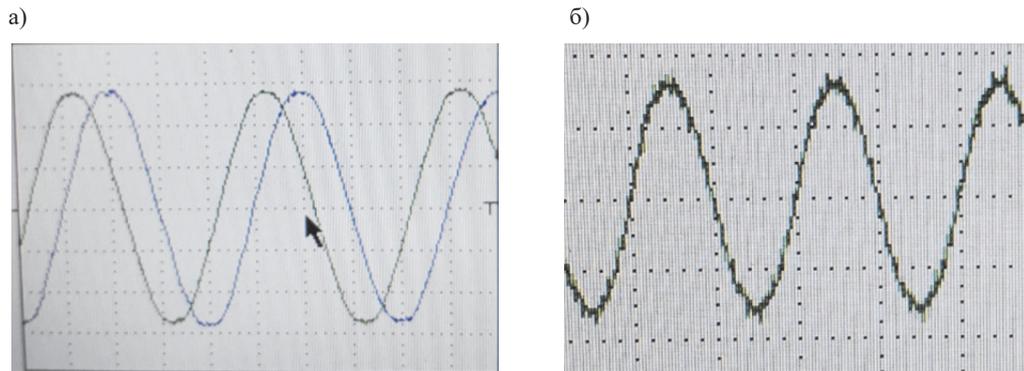


Рис. 9. Мгновенное значение напряжения ДГ и автономного инвертора при синхронизации  
 а — начало синхронизации; б — окончание синхронизации

### Выводы (Summary)

На основании выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Впервые в эксплуатацию введено судно с комбинированной пропульсивной установкой, спроектированное отечественными организациями и построенное на российском судостроительном заводе.
2. В качестве источников электроэнергии на судне применяются автономные дизель-генераторы, аккумуляторные батареи и ГЭД, работающий в режиме валогенератора на ходу судна. В процессе проведения швартовных и ходовых испытаний успешно проверены автономный режим работы каждого источника электроэнергии на вспомогательную гребную электроустановку и общесудовые приемники, а также параллельная работа источников электроэнергии в различных сочетаниях.
3. Успешно проведены ходовые испытания комбинированной пропульсивной установки при отдельной и совместной работе ГД и ГЭД на гребной винт при питании от ДГ и АБ, что является подтверждением правильности научно-технических решений, заложенных при проектировании судна.
4. В процессе проведения испытаний реализован новый способ синхронизации ДГ и автономного инвертора, который отличается высоким быстродействием и точностью, что исключает появление бросков тока при подключении источника электроэнергии к ГРЩ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные комплексы нового поколения / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 49–50.
2. Хватов О. С. Судовая пропульсивная гибридная установка / О. С. Хватов, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта — 2013. — № 35. — С. 337–340.
3. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2013. — № 2. — С. 50–52.
4. Хватов О. С. Математическая модель судовой гибридной пропульсивной установки / О. С. Хватов, О. А. Бурмакин, И. А. Тарпанов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2009. — № 27. — С. 150–154.
5. Григорьев А. В. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: моногр. / А. В. Григорьев, В. А. Петухов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 175 с.
6. Григорьев А. В. Судовые валогенераторные установки нового поколения на базе обратимых полупроводниковых преобразователей / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 36–38.
7. Будашко В. В. Разработка трехуровневой многокритериальной стратегии управления гибридной судовой энергетической установкой комбинированного пропульсивного комплекса / В. В. Будашко // Электротехника і Електромеханіка. — 2017. — № 2. — С. 62–72. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.

8. Baldi F. Optimal load allocation of complex ship power plants / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabriellii, K. Andersson // *Energy Conversion and Management*. — 2016. — Vol. 124. — Pp. 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
9. Ancona M. A. Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization / M. A. Ancona, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, J. Rosati // *Energy Conversion and Management*. — 2018. — Vol. 164. — Pp. 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.
10. Capasso C. Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsized Boats / C. Capasso, E. Notti, O. Veneri // *Energy Procedia*. — 2019. — Vol. 158. — Pp. 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.
11. Geertsma R. D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments / R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J. J. Hopman // *Applied Energy*. — 2017. — Vol. 194. — Pp. 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.
12. Ling-Chin J. Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective — A life cycle assessment case study / J. Ling-Chin, A. P. Roskilly // *Energy Conversion and Management*. — 2016. — Vol. 117. — Pp. 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.
13. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки / А. В. Григорьев [и др.] // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 56–57. — С. 106–114.
14. Григорьев А. В. Судовые комбинированные пропульсивные установки: назначение, состав, классификация / А. В. Григорьев, С. М. Малышев, Р. Р. Зайнуллин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958.
15. Григорьев А. В. Перспективы применения статических источников электроэнергии на судах с системами электродвижения / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.
16. Григорьев А. В. Схемотехнические решения судовых единых электроэнергетических систем на базе вентильных генераторов и статических источников электроэнергии / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин, С. М. Малышев // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 801–811. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-801-811.

## REFERENCES

1. Grigoryev, A. V., and E. A. Glekler. “Sudovye kombinirovannyye propul’sivnyye komplekсы novogo pokoleniya.” *Morskoy vestnik* 2S(11) (2013): 49–50.
2. Khvatov, O. S., and I. A. Tarpanov. “Ship propulsion hybrid installation.” *Bulletin of VSAWT* 35 (2013): 337–340.
3. Grigoryev, A. V. “Sudovye kombinirovannyye propul’sivnyye ustanovki.” *Morskoy flot* 2 (2013): 50–52.
4. Khvatov, O. S., O. A. Burmakina, and I. A. Tarpanov. “Mathematical model of ship hybrid propulsive installations.” *Bulletin of VSAWT* 27 (2009): 150–154.
5. Grigoryev, A. V., and V. A. Petukhov. “Sovremennyye i perspektivnyye sudovyye valogeneratornyye ustanovki.” SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S. O. Makarova, 2009.
6. Grigoryev, A. V., and R. R. Zaynullin. “Sudovyye valogeneratornyye ustanovki novogo pokoleniya na baze obratimyykh poluprovodnikovyykh preobrazovateley.” *Morskoy vestnik* 2S(11) (2013): 36–38.
7. Budashko, V. V. “Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex.” *Электротехника и Электромеханика* 2 (2017): 62–72. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.
8. Baldi, Francesco, Fredrik Ahlgren, Francesco Melino, Cecilia Gabriellii and Karin Andersson. “Optimal load allocation of complex ship power plants.” *Energy Conversion and Management* 124 (2016): 344–356. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.009.
9. Ancona, Maria Alessandra, F. Baldi, M. Bianchi, L. Branchini, F. Melino, A. Peretto, and J. Rosati. “Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization.” *Energy Conversion and Management* 164 (2018): 42–58. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.02.080.
10. Capasso, Clemente, Emilio Notti, and Ottorino Veneri. “Design of a Hybrid Propulsion Architecture for Midsized Boats.” *Energy Procedia* 158 (2019): 2954–2959. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.958.

11. Geertsma, R.D., R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hopman. “Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments.” *Applied Energy* 194 (2017): 30–54. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.060.

12. Ling-Chin, J., and A. P. Roskilly. “Investigating a conventional and retrofit power plant on-board a Roll-on/Roll-off cargo ship from a sustainability perspective — A life cycle assessment case study.” *Energy Conversion and Management* 117 (2016): 305–318. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.032.

13. Grigoryev, A.V., A. A. Popov, S. M. Malyshev, and R. R. Zaynullin. “Ship combined propulsion plants.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 56–57 (2019): 106–114.

14. Grigoryev, Andrey V., Sergei M. Malyshev, and Ruslan R. Zaynullin. “Ship combined propulsion plants: purpose, composition, classification.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 951–958. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-951-958.

15. Grigoryev, Andrey V., Ruslan R. Zaynullin, and Sergei M. Malyshev. “Perspectives of using the static electric power sources on ships with electric propulsion plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 202–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-202-213.

16. Grigoryev, Andrey V., Ruslan R. Zaynullin, and Sergei M. Malyshev. “Schematic solutions for ship unified electric power systems based on valve generators and static electric power sources.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 801–811. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-801-811.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Григорьев Андрей Владимирович** —

кандидат технических наук, доцент  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
 С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
 197376, Россия, Санкт-Петербург,  
 ул. Профессора Попова, 5  
 e-mail: [a.grigorev@eds-marine.ru](mailto:a.grigorev@eds-marine.ru),  
[kaf\\_saees@gumrf.ru](mailto:kaf_saees@gumrf.ru)

**Малышев Сергей Михайлович** —

ассистент, начальник отдела  
 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
 197376, Россия, Санкт-Петербург,  
 ул. Профессора Попова, 5  
 АО «НПЦ «Электродвижение судов»  
 197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178  
 e-mail: [malyshevsergey@list.ru](mailto:malyshevsergey@list.ru)

**Воробьев Семен Валентинович** —

ведущий инженер  
 АО «НПЦ «Электродвижение судов»  
 197341, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 Фермское шоссе, 12, лит. Е, оф. 178  
 e-mail: [kit85mail@yandex.ru](mailto:kit85mail@yandex.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Grigoryev, Andrey V.** —

PhD, associate professor  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 Saint Petersburg Electrotechnical University  
 5 Professora Popova Str., St. Petersburg,  
 197022, Russian Federation  
 e-mail: [a.grigorev@eds-marine.ru](mailto:a.grigorev@eds-marine.ru),  
[kaf\\_saees@gumrf.ru](mailto:kaf_saees@gumrf.ru)

**Malyshev, Sergei M.** —

Assistant, Head of Department  
 Saint Petersburg Electrotechnical University  
 5 Professora Popova Str., St. Petersburg,  
 197022, Russian Federation  
 JSC “RPC “Ship electric propulsion”  
 12 Fermskoe shosse Str., let. E, office  
 178, St. Petersburg, 197341, Russian Federation  
 e-mail: [malyshevsergey@list.ru](mailto:malyshevsergey@list.ru)

**Vorobyev, Semen V.** —

Lead engineer  
 JSC “RPC “Ship electric propulsion”  
 12 Fermskoe shosse Str., let. E, office  
 178, St. Petersburg, 197341, Russian Federation  
 e-mail: [zaynullin@eds-marine.ru](mailto:zaynullin@eds-marine.ru)

Статья поступила в редакцию 10 марта 2021 г.

Received: March 10, 2021.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского  
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

**Том 13. № 2**

**2021 год**

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*  
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.04.21. Формат 60×90/8  
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 18,75. Тираж 500 экз. Заказ № 133/21

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7