

УДК 629.124

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.156>

## **Перспективы и проблемы использования сжиженного природного газа в качестве топлива на речных судах в северных пароходствах России**

**Л.В. Иванов**<sup>1</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6916-7154>

**А.В. Соловьёв**<sup>2</sup>

**Э.Г. Румянцев**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** В статье рассматриваются перспективы модернизации судов, эксплуатируемых в акваториях магистральных сибирских рек, под использование сжиженного природного газа (СПГ) как основного типа топлива, а также проблемы, связанные с их адаптацией. СПГ является дешевым, энергетически эффективным и более экологически чистым аналогом традиционного дизельного топлива (ДТ). Унификация проектов адаптации распространенных типов главных двигателей судов из северных пароходств позволит значительно снизить эксплуатационные затраты. Проблемы модернизации связаны с хранилищем запаса топлива на судах. Более низкая плотность СПГ по сравнению с ДТ, а также необходимость использования криогенного топливного танка, снижает автономность эксплуатации судна на СПГ. Выполненный в статье анализ показал, что при модернизации автономность плавания по запасам топлива может снизиться в два раза.

**Ключевые слова:** газомоторное топливо (ГМТ), СПГ, танки типа С, газодизель, двухтопливные судовые двигатели, автономность плавания.

## **Prospects and problems of using liquefied natural gas as fuel on river vessels in the northern shipping companies of Russia**

**Lev V. Ivanov**<sup>1</sup>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6916-7154>

**Alexey V. Soloviev**<sup>2</sup>

**Ernest G. Rumiantcev**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The article considers the prospects of the modernization of vessels operating in the water areas of the main Siberian rivers, for the use of liquefied natural gas (LNG) as the main type of fuel, as well as problems associated with the adaptation of the existing ship designs. LNG is a cheap, energy efficient, and more environmentally friendly analogue of the traditional diesel fuel (DF). Unification of adaptation projects for common types of main engines of ships from northern shipping companies will significantly reduce operating costs. Modernization problems are associated with the storage of fuel stock on ships. The lower density of LNG in comparison with diesel fuel, as well as the need to use a cryogenic fuel tank, reduces the autonomy of the ship's operation on LNG. The analysis carried out in the

article showed that with modernization, the autonomy of navigation in terms of fuel reserves can be halved.

**Keywords:** gas engine fuel, LNG, type C tanks, gas diesel, dual fuel marine engines, fuel autonomy.

**Введение**

В настоящее время все чаще встает вопрос об использовании газомоторного топлива (ГМТ) на судах. ГМТ дешевле и экологичнее, чем традиционно применяемое ДТ. Уже существуют проекты судов, использующих в качестве основного топлива компримированный природный газ (КПГ) и сжиженный углеводородный газ (СУГ). СУГ не прижился на судовых ДВС из-за нестабильного горения при высоких степенях сжатия. На данный момент существует лишь одно судно (проект 03622 «Чайка»), которое использует СПГ в качестве топлива [1]. Из-за высокой плотности СПГ является более энергоэффективным типом топлива, чем КПГ. Сравнение топлив представлено в таблице 1.

*Таблица 1*

**Сравнение типов топлива**

Проект	Количество ед.	Тип главного двигателя	Кол-во x мощность, кВт
СК2000 КН	7	8NVD-36A-IU	2x425
P-77	36	6NVD48AU	2x485
1754БМ	9	8NVD36	2x294
414В	9	6NVD-26A3	2x272
621	7	6NVDS48A-2U	2x640
866/866М	21	3Д6-150	2x110

Сдерживающими критериями при применении СПГ являются сложность адаптации существующих проектов судов под его использование, а также топливная логистика. Одним из путей решения этой проблемы является применение судов-бункеровщиков [2]. Однако СПГ в больших объемах производится в северной части России. При использовании СПГ на судах северных пароходств значительно снизятся транспортные издержки из-за уменьшения плеча доставки топлива от места его производства до места его потребления. При портовой бункеровке судов, область работы которых находится недалеко от места производства СПГ, необходимость в специальных судах-бункеровщиках отпадает.

СПГ вписывается в международные нормы, контролирующие выбросы продуктов сгорания судового топлива МАРПОЛ [3], что особенно критично в северных и арктических регионах, поскольку через территорию особого контроля проходит маршрут северного морского пути (СМП). Также в северных регионах развит речной транспорт, осуществляющий снабжение населенных пунктах в рамках «северного завоза».

В тексте статьи рассмотрены флоты пароходств, действующих по магистральным сибирским рекам и их судоходным притокам: Обь-Иртышское речное пароходство (ОИРП), Иртышское речное пароходство (ИРП), Енисейское речное пароходство (ЕРП) и Ленское объединенное речное пароходство (ЛОРП). Несмотря на то, что хозяйствующих субъектов гораздо больше, в данной статье рассмотрены только те, чья география перевозок включает в себя арктические районы.

### Анализ флотов северных пароходств

Ведущее место в производственно-хозяйственной деятельности предприятий речного транспорта занимает перевозка нерудных строительных материалов (НСМ). Доля перевозок нефтепродуктов составляет около 40-45% [4].

подавляющее число грузоперевозок осуществляется самоходными судами. Для различных пароходств процент буксирно-баржевых перевозок колеблется от 70 до 90% [4].

При анализе флотов северных пароходств выявлены наиболее распространенные типы танкеров. Типы самоходных нефтеналивных танкеров и их силовые установки приведены в таблице 2 [5-7].

Таблица 2

#### Типы самоходные нефтеналивных танкеров

Проект	Количество ед.	Тип главного двигателя	Кол-во x мощность, кВт
1741А (РТ-600)	38	8ЧНСП 18/22	2x221
		6NVD-26A3	2x272
Р33ЛТМ (Плотовод)	20	6NVD-26A3	2x272
428 (ОТ-2000)	25	8NVD-48-2А	2x773
433	1	3Д6-150	1x150
758Б (ОТА-800)	18	6NVD-48U	2x294
Р-96	2	3Д6Н-150	1x110
758 (ОТ-800)	13	6NVD-48	2x294
Р-103	19	6ЧСП15/18	2x110
Р-96А	25	3Д6Н-150	1x110

В таблице 3 представлены наиболее распространенные типы буксиров, участвующих в буксирно-баржевом транспорте.

Таблица 3

#### Типы буксиров

Проект	Количество ед.	Тип главного двигателя	Кол-во x мощность, кВт
1741А (РТ-600)	38	8ЧНСП 18/22	2x221
		6NVD-26A3	2x272
Р33ЛТМ (Плотовод)	20	6NVD-26A3	2x272
428 (ОТ-2000)	25	8NVD-48-2А	2x773
433	1	3Д6-150	1x150
758Б (ОТА-800)	18	6NVD-48U	2x294
Р-96	2	3Д6Н-150	1x110
758 (ОТ-800)	13	6NVD-48	2x294
Р-103	19	6ЧСП15/18	2x110
Р-96А	25	3Д6Н-150	1x110

Сгруппировав двигатели от различных типов судов, можно оценить массовость их эксплуатации. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4

**Группировка по типу главного двигателя**

Марка и модель главного двигателя	Количество судов
ЗД6-150	48
6NVD48AU	36
6NVD-26A3	67
8NVD-48-2A	26
6NVD-48U	31

**Модернизация под использование топливного СПГ**

При переводе судовых дизелей под использование газомоторного топлива (ГМТ) применяются две основные концепции:

- Использование искрового зажигания газозвушной смеси с большим изменением первоначальной конфигурации двигателя и полным переходом на ГМТ;
- Применение газодизельного режима, когда ДТ используется как пилотное – для воспламенения основной газозвушной смеси [8]. Степень сжатия сохраняется как у дизельного двигателя.

Второй способ требует значительно меньших материальных затрат. При воспламенении ДТ микроконтроллер подает необходимое количество ГМТ. Проблема возможной детонации, ограничивающей возможность сжатия газозвушной смеси в цилиндре, решается путем использования обедненной газозвушной смеси – чем беднее газозвушная смесь, тем большее сжатие допустимо в цилиндре. Рабочая смесь поджигается не в одной точке около стенки, а в центре заряда, что положительно влияет на срок службы ДВС [9].

Также использование газодизельного двигателя позволяет добиться большой гибкости в плане топливной логистики. Дополнительное снижение затрат на модернизацию речных ГД для работы в газодизельном режиме заключается в установке общего газозвушного смесителя, питающего смесью все цилиндры малоомощного двигателя [10]. Для главных двигателей (ГД) средней и высокой мощности на каждый цилиндр двигателя устанавливают индивидуальные клапаны-смесители.

Доля пилотного ДТ, которое требуется для воспламенения основного ГМТ для средне- и малооборотных двигателей составляет 5-8%. В некоторых двигателях компании Wärtsilä доля пилотного ДТ составляет 1% [11].

На сегодняшний день перечень двигателей, приведенный в таблице 4, устарел как морально, так и конструктивно. Износ двигателей и отсутствие запчастей вынуждает судовладельцев переходить на современные аналоги. В таблице 5 приведены аналоги судовых двигателей и дизель-редукторных агрегатов (ДРРА).

Основные сдерживающие факторы для внедрения газодизельных ГД на речных судах это:

- хранение на судне основного запаса топлива;
- рациональное расположение газового оборудования, удобство и безопасность его эксплуатации и обслуживания;
- бункеровка СПГ;
- отсутствие навыков эксплуатации газодизельных судовых установок и криогенных топливных танков у плавсостава.

Таблица 5

Аналоги главных двигателей

Марка и модель главного двигателя	Аналог		Производитель	Расход газодизельного топлива г/кВт*ч (8% ДТ)
ЗД6-150	ЯМЗ-236 атмосферный		Ярославский моторный завод	17,2 гр. ДТ 166 гр. СПГ
6NVD48AU	6ЧН21/21		Завод "Волжский дизель имени Маминых" (Балаково)	От 16 до 20 гр.ДТ От 156 до 195 гр. СПГ соотв.
6NVD-26A3				
8NVD-48-2A				
6NVD-48U				

Размещение основного запаса СПГ выполняется в соответствии с частью XII Правил РРР (ред. 2019 г.). Допускается размещение в корпусе судна (ниже главной палубы), частично выше главной палубы и выше главной палубы. Все зависит от проекта судна, которое будет переделываться на работу в газодизельном режиме двигателя.

Для модернизации существующих проектов судов под использование СПГ необходимо вписать криогенный топливный танк в геометрию судна без значительного изменения корпуса. В корпусе должно быть размещено не только емкостное оборудование, но также испарители и подогреватели СПГ, а также система подачи метана в газоздушный смеситель.

Наиболее распространенный тип судовых топливных танков на малотоннажных судах – это цилиндрические танки типа С с вакуумной изоляцией [12]. На крупных судах применяются мембранные топливные танки или вкладные призматические танки типов А и В.

Танки типа С просты в изготовлении и установке, имеют время бездренажного хранения до 40 часов и уже производятся в России. Главным их недостатком является неэффективное использование полезного пространства. Сравнение типов танков по эффективности использования полезного пространства приведено на рисунке 1 [13].

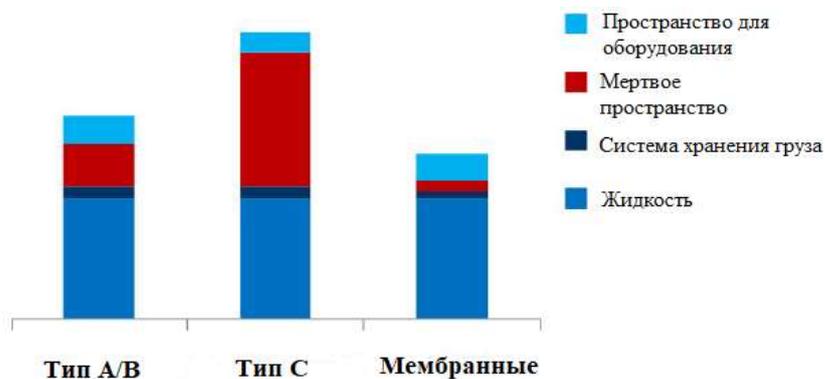


Рис. 1 - Сравнение различных систем топливных танков

Для увеличения автономности плавания при переходе на альтернативное топлива и сохранения геометрии корпуса судна, необходимо использовать призматические танки типа В. Эти призматические танки выполняются вкладными, что позволяет сооружать их отдельно от судна и легко устанавливать в корпусе. Удельный вес этой

системы составляет  $0,015 \text{ т/м}^3$ , что значительно меньше, чем удельный вес танков типа С ( $0,073 \text{ т/м}^3$ ) [14-15].

При вписывании криогенного топливного танка в объем существующего топливного танка наблюдается снижение автономности плавания по топливу. Несмотря на то, что массовая теплота сгорания СПГ выше, чем у ДТ, из-за меньшей плотности СПГ, а также необходимого объема для тепловой изоляции и специфического оборудования, коэффициент полезного использования пространства снижается.

Коэффициент полезного использования пространства призматическими танками типа В составляет 0,59. Для танков типа С этот коэффициент существенно ниже – 0,42. В случае разработки проекта нового буксира могут быть использованы мембранные топливные танки с самым высоким коэффициентом полезного использования пространства – 0,73.

Автономность плавания по топливу рассчитывается следующим образом. Все расчеты приведены на примере судна проекта 1741А.

Автономность плавания у судна этого проекта, согласно документации, составляет 20 суток [16]. Объем топливного танка –  $65,3 \text{ м}^3$ . В таком случае объем СПГ для танков различных типов будет:

$$V_{\text{тип С}} = 65,3 \cdot 0,42 = 27,4 \text{ м}^3 \quad (1)$$

$$V_{\text{тип А/В}} = 65,3 \cdot 0,59 = 38,7 \text{ м}^3 \quad (2)$$

$$V_{\text{мембрана}} = 65,3 \cdot 0,73 = 47,6 \text{ м}^3 \quad (3)$$

При модернизации проекта судна предполагается установить главный двигатель 6ЧН21/21 с расходом СПГ  $156 \text{ г СПГ/кВтЧ}$ . В таком случае объемный часовой расход СПГ при работе двух двигателей мощностью  $272 \text{ кВт}$  будет:

$$Q_{\text{СПГ}} = \frac{q \cdot M \cdot n}{\rho_{\text{СПГ}}} = \frac{156 \cdot 10^{-3} \cdot 272 \cdot 2}{430} = 0,197 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4)$$

где  $q$  – расход топлива,  $\text{г/кВтЧ}$ ;  $M$  – мощность двигателя,  $\text{кВт}$ ;  $n$  – количество двигателей;  $\rho_{\text{СПГ}}$  – плотность СПГ,  $\text{кг/м}^3$ .

Отсюда можно определить автономность плавания при использовании топливных танков различных типов:

$$A_{\text{тип С}} = \frac{V_{\text{тип С}}}{Q_{\text{СПГ}} \cdot 24} = \frac{27,4}{0,197 \cdot 24} = 5,8 \text{ сут} \quad (5)$$

$$A_{\text{тип А/В}} = \frac{V_{\text{тип А/В}}}{Q_{\text{СПГ}} \cdot 24} = \frac{38,7}{0,197 \cdot 24} = 8,2 \text{ сут} \quad (6)$$

$$A_{\text{тип С}} = \frac{V_{\text{мембрана}}}{Q_{\text{СПГ}} \cdot 24} = \frac{47,6}{0,197 \cdot 24} = 10,1 \text{ сут} \quad (7)$$

Объем танка ДТ определен в зависимости от доли пилотного топлива. В данной статье доля пилотного ДТ принята 8%. Наличие небольших танков с ДТ обязательно на судне.

В таблице 6 представлен сравнительный анализ автономности плавания по топливу для танков различных типов.

Таблица 6

**Сравнение изменения автономности плавания**

Название проекта судна:	Существующий проект, сут	Танки типа А/В, сут	Танки типа С, сут	Мембранные танки, сут
1741А	20	8,2	5,8	10,1
Р33ЛТМ	9	4,4	3,1	5,5
ОТ-2000	12	5,9	4,2	7,3
433	3	1,1	0,8	1,3
ОТА-800	15	9,4	6,6	11,5
Р-96	3	4,0	2,8	4,9
ОТ-800	15	9,4	6,6	11,5
Р-103	7	3,7	2,6	4,6

При развитии системы бункеровки судов СПГ проблема снижения автономности плавания судна по топливу будет нивелирована. Опыт эксплуатации судна проекта 03622 «Чайка-СПГ» показал, что заправка судна СПГ возможна с берега с автомобиля-газовоза при соблюдении норм безопасности. При появлении плавучих заправочных терминалов заправка будет производиться именно с них.

**Заключение**

Анализ требований Правил РРР части XII ПКПС (ред. 2019 г.) и состава наиболее распространенных речных проектов судов показал, что модернизация эксплуатируемых судов в газоходы возможна и для этого имеются все условия:

- нормативная база, в первую очередь - нормативно-техническая база: Правила РРР ч. XII ПКПС ред. 2019 года и Технический регламент о безопасности объектов внутреннего водного транспорта;
- наличие проектных организаций, осуществляющие проектирование и модернизацию речных судов;
- наличие оборудования на отечественном рынке для реализации проекта;
- возможность заправки судов СПГ.

Наиболее эффективно внедрение судов, использующих СПГ как топливо в северных регионах, в которых есть ресурсная база производства СПГ. Эффективность достигается за счет уменьшения плеча доставки топлива от места производства к месту его потребления. Также в северных регионах действуют более строгие нормативы контроля выбросов, и использование СПГ в качестве топлива способно решить эту проблему.

Проблемы при переводе существующих типов судов на СПГ могут быть связаны со снижением автономности плавания судна по запасам топлива. При встраивании криогенных топливных танков в пространства корпуса на место традиционных топливных танков автономность плавания может снизиться в два раза.

**Литература**

1. Костылев И.И., Коняев Д.В. Бункеровка как фактор сдерживания применения газового топлива на судах // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. №5 (39);
2. Зеленодольский завод имени А.М. Горького спустил на воду первое речное пассажирское судно на СПГ «Чайка» URL: <https://portnews.ru/news/299898/> (дата обращения 14.09.2020);
3. МАРПОЛ 73/76 Приложение VI Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов URL: <http://docs.cntd.ru/document/499014496> (дата обращения 14.09.2020);

4. Григорьев Е.А. Экономическая оценка ресурсосберегающих технологий работы речных судов: дисс. канд. эконом. наук: 08.00.05 защищена 30.05.14. утв.: // автор Евгений Алексеевич // Сибирский государственный университет путей сообщения – Новосибирск - 2014, 151 с;
5. Официальный сайт Обь-Иртышского речного пароходства URL: <https://oirp.ru/> (дата обращения 15.09.2020);
6. Официальный сайт ОАО «Ленское объединенное речное пароходство» URL: <http://lorp.ru/> (дата обращения 15.09.2020);
7. Водный транспорт URL: <https://fleetphoto.ru/> (дата обращения 15.09.2020);
8. Безюков О.К., Жуков В.А., Воробей К.А. Анализ энергоэкологического эффекта применения газопоршневых двигателей в судовых энергетических установках // Вестник государственного университета морского и речного флота им адмирала С.О. Макарова – 2015, №6(34), с 143-151. DOI: 10/21821|2309-5180-2015-7-6-143-151;
9. Дорохов А.Ф., Акпаров И.А., Хоан Коанг Льюнг Особенности применения газообразных топлив в судовых энергетических установках // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2012. №2, с 70-75;
10. Ведрученко В.Р., Крайнов В.В., Кокшаров М.В, Лазарев Е.С., Кузнецова Д.К. О технических решениях при переводе транспортных и судовых ДВС на использование газообразного топлива // ОНВ – 2014. №3 (133);
11. Wärtsilä 20DF Product Guide URL: [https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w20df.pdf?utm\\_source=engines&utm\\_medium=dfengines&utm\\_term=w20df&utm\\_content=productguide&utm\\_campaign=msleadscoring](https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w20df.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dfengines&utm_term=w20df&utm_content=productguide&utm_campaign=msleadscoring) (дата обращения 15.09.2020);
12. Michael Kraack LNG infrastructure and shipbuilding // GO LNG – Final Conference to the SBSR Project «MarTech LNG», Klapeida 10.09.2015;
13. Баранов А.Ю., Иванов Л.В. Анализ конструктивных особенностей систем хранения груза для модернизации проекта речного танкера класса «река-море». // Морской Вестник – 2019, №3(71) – с 18-21;
14. Y. Nagata, A. Tanoue, T. Kida, T. Kawai IHI SPB Tank for LNG fueled ships // IHI Engineering Review – 2015. №2 (47);
15. DNVGL-CG-0133 Class Guideline Liquefied gas carriers with independent prismatic tanks of type A and B – 2017;
16. Речная справочная книжка корабельного инженера Е. Л. Смирнова URL:<https://russrivership.ru/ships/30> (дата обращения 06.10.2020).

#### References:

1. Kostylev I.I., Konjaev D.V. «Bunkerovka kak faktor sdejivania primeneniya gazovogo toplava na sudah» (Bunkering as a factor in restraining the use of gas fuel on ships) // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova – 2016. №5 (39);
2. Zelenodolskiy zavod imeni A.M. Gor'kogo spustil na vodu pervoe rechnoe passajirskoye sydno na SPG «Chayka» Web. 14. Sep. 2020 <<https://portnews.ru/news/299898/>>;
3. MARPOL 73/76 Annex 5;
4. Grigoriev E.A. Economicheskaya ocenka resursosberegajushih tehnologiy raboty rechnih sudov: PhD thesis – 2014;
5. Official site of Ob-Irtish shipping company. Web. 14. Sep. 2020 <<https://oirp.ru/>>;
6. Official site of Lena shipping company. Web. 14. Sep. 2020 <<http://lorp.ru/>>;
7. Vodniy transport. Web. 14. Sep. 2020 : <<https://fleetphoto.ru/>>;
8. Bezykov O.K., Jukov, V.A., Vorobey K.A. Analis energoecologicheskogo effecta primeniya gazoporshnevih dvigateley v sudovih energeticheskikh ustanovkakh (Analysis of the energy-ecological effect of the use of gas piston engines in ship power plants) // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova – 2015. №6 (34); с 143-151. DOI: 10/21821|2309-5180-2015-7-6-143-151;
9. Dorohov A.F., Akparov I.A., Hoan Koang Liong Osobennosti primeniya gasoobrasnih topliv v sudovih energeticheskikh ustanovkakh (Features of the use gas fuels in ship power plants) // Vestnik AGTU. Seria: Moskaya tehnika I tehnologiya. 2012. №2, с 70-75;
10. Vedruchenko V.R., Kraynov V.V., Kokparov M.V., Lazarev E.S., Kuznetsova D.K. O tehniceskikh resheniyah pri perevode transportnih I sudovih DVS na ispol'sovanie

- gasoobrasnogo topliva (About technical solutions for the transport and ship internal combustion engines to use natural gas as a fuel) // ONV – 2014. №3 (133);
11. Warstila 20DF Product Guide URL: [https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w20df.pdf?utm\\_source=engines&utm\\_medium=dfengines&utm\\_term=w20df&utm\\_content=productguide&utm\\_campaign=msleadscoreing](https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w20df.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dfengines&utm_term=w20df&utm_content=productguide&utm_campaign=msleadscoreing) (дата обращения 15.09.2020);
  12. Michael Kraack LNG infrastructure and shipbuilding // GO LNG – Final Conference to the SBSR Project «MarTech LNG», Klapeida 10.09.2015;
  13. Б Баранов А.У., Иванов Л.В. Analis konstrukcionnih osobennostey siste, hraneniya gruzha dlya modernizatsii projecta rechnogo tankera klassa reka-more (Analysis of the structural features of cargo containment systems for the modernization of a river-sea tanker project) // Morskoy Vestnik – 2019, №3(71) – с 18-21;
  14. Y. Nagata, A. Tanoue, T. Kida, T. Kawai IHI SPB Tank for LNG fueled ships // IHI Engineering Review – 2015. №2 (47);
  15. DNVGL-CG-0133 Class Guideline Liquefied gas carriers with independent prismatic tanks of type A and B – 2017;
  16. Rechanaya spravochnaya knijka korabelnogo injenera E.L. Smirnova. Web. 06. Oct. 2020 «<https://russrivership.ru/ships/30>»;

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Иванов Лев Владимирович**, аспирант кафедры низкотемпературной энергетики, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, e-mail: [levladiv@mail.ru](mailto:levladiv@mail.ru)

**Lev V. Ivanov**, graduate student of low-temperature energetics department, ITMO University, Saint-Petersburg, Lovonosov st, 9, e-mail: [levladiv@mail.ru](mailto:levladiv@mail.ru)

**Соловьёв Алексей Валерьевич**, док. техн. наук, доцент кафедры систем информационной безопасности, управления и телекоммуникаций Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [solovev@rivregnn.ru](mailto:solovev@rivregnn.ru)

**Alexey V. Soloviev**, Dr Tech. Sc, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Румянцев Эрнест Георгиевич**, магистр, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: [rumernest@gmail.com](mailto:rumernest@gmail.com)

**Ernest G. Rumiantcev**, Master, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 25.01.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.  
Received 25.01.2021; published online 23.03.2021.