



ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 56.6; 629.556.2:33
EDN DFULJC

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГЛАВНЫЕ РАЗМЕРЕНИЯ И ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУКСИРОВ С ЛЕДОВЫМ КЛАССОМ ARC5

А.С. Реуцкий, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

Р.Ю. Романов, ЦНИИМФ, 191015 Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., 6А, e-mail: romanovry@cniimf.ru

Увеличение судооборота в замерзающих портах РФ и возможность использовать СПГ для bunkеровки портофлота ставят вопрос о целесообразности применения двухтопливных буксиров. Поскольку нормативных ограничений на использование низкосернистого судового топлива в российских портах нет, для решения вопроса об использовании природного газа в качестве топлива можно задействовать экономический критерий целесообразности. Для реализации этого подхода мы прибегнем к экономическим моделям, в которых для вычислений используется определенный набор входных данных о буксире. Исследование «ледовых» Правил РС вкуче с толщинами льда, характерными для Финского залива в тяжелые с навигационной точки зрения зимы, продемонстрировали необходимость в буксирах с арктическим классом ледовых усиления. За отсутствием двухтопливного буксира с ледовым классом, достаточным для безопасной круглогодичной работы в акватории замерзающих портов, авторы создали его математическую модель, построенную на базе статистических данных по буксирным судам с ледовыми классами Arc4 и Arc5 и дающую представление о проектных характеристиках этого судна в первом приближении, что достаточно для проведения технико-экономического анализа.

Таким образом, объектом исследования является математическая модель буксира-кантовщика с ледовым классом Arc5, использующего СПГ в качестве топлива, а целью исследования — оценка влияния применения двухтопливных технических СПГ-решений на облик и основные характеристики буксира-кантовщика с ледовым классом Arc5.

Ключевые слова: портофлот, буксир-кантовщик, тяга на гаке, ледовый класс, сжиженный природный газ.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Оценка влияния использования сжиженного природного газа на главные размеры и тяговые характеристики буксиров с ледовым классом Arc5 / А.С. Реуцкий, Р.Ю. Романов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 81. — С. 47 — 60. — EDN DFULJC.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE USE OF LIQUEFIED NATURAL GAS ON THE MAIN DIMENSIONS AND TRACTION CHARACTERISTICS OF TUGS WITH ICE CLASS ARC5

A.S. Reutskii, PhD, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: reutskii.as@rs-class.org

R.Yu. Romanov, Central Marine Research and Design Institute (CNIIMF), 191015 Russia, St. Petersburg, Kavalergardskaya ul., 6A, e-mail: romanovry@cniimf.ru

With the increase in the number of operations in freezing sea ports of the Russian Federation, and given the ability to provide bunkering with liquefied natural gas, the question of the expediency of using dual-fuel tugs is becoming important. In the absence of regulatory restrictions on the use of low-sulfur marine fuel, the issue of using natural gas can be resolved using the economic criterion of expediency. This approach relies on implementing economic models that need a certain set of input data about the tugboat for calculations. The study of the "ice" Rules of the Russian Maritime Register of Shipping, as well as the ice thicknesses characteristic of the Gulf of Finland in navigationally difficult winters, demonstrated the need to use tugboats with the arctic ice category. In the absence of a dual-fuel tugboat with an ice class sufficient for safe year-round operation in the waters of freezing ports, the authors created its mathematical model based on statistical data on tugboats with ice classes Arc4 and Arc5 and giving an idea of the design characteristics of this vessel in the first approximation, which is sufficient for conducting a feasibility analysis. Thus, the object of the study is a mathematical model of an Arc5 ice-class LNG-fuelled tugboat, and the purpose of the study is to assess the impact of dual-fuel technical LNG solutions on the appearance and main characteristics of an Arc5 ice-class barthing tugboat.

Key words: port fleet, tugboat, bollard pull, ice class, LNG, liquefied natural gas.

For citation: Reutskii A.S., Romanov R.Yu. Assessment of the impact of the use of liquefied natural gas on the main dimensions and traction characteristics of tugs with ice class Arc5. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 81. P. 47 — 60. EDN DFULJC. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент большое количество исследований зарубежных [1 — 4] и отечественных [5, 6] ученых посвящено вопросам проектирования буксирных судов. Оценка влияния новых технических решений на результирующие характеристики судов является одним из предметов науки проектирования судов.

С учетом потенциального увеличения переваливаемого тоннажа и количества судозаходов в замерзающие порты Российской Федерации становится актуальным создание современных буксиров с высокими ледовыми классами. В настоящий момент в нашей стране происходит постепенный ввод все больших портовых мощностей экспортных терминалов по отгрузке сжиженного природного газа (далее — СПГ), а также рассматриваются новые варианты их размещения, что зачастую приводит к проработке идеи использования СПГ в качестве топлива на буксирных судах, тем более что за рубежом данные концепции не единожды реализовывались. На рисунке представлены примеры буксиров, использующих СПГ в качестве топлива (рис. 1).

а



б



Рис. 1. Двухтопливные буксиры Borgø & Bohn (а) и Audax (б)

Климатические условия отечественных портов накладывают на суда портового флота необходимость удовлетворять ряду требований. Требования к безопасности и маневренности буксира, круглогодично работающего в замерзающих водах, оказывают на облик этого судна сильное влияние при его проектировании. Для выполнения требований к безопасной ледовой эксплуатации буксира увеличивают толщину его обшивки, улучшают прочностные характеристики набора корпуса, делают переменной частоту его установки в районах ледовых подкреплений и особенно в оконечностях. Для удовлетворения требований к ледовой ходкости увеличивают мощность главных двигателей (далее — ГД) энергетической установки, а для обеспечения требуемой маневренности применяют механические, либо электрические винто-рулевые колонки (далее — ВРК), способные выдерживать ледовые нагрузки. Все эти решения приводят к увеличению габаритов судна и его водоизмещения, росту мощности его двигателей и расхода топлива, что аналогичным образом сказывается и на стоимости его эксплуатации.

Использование СПГ в качестве топлива на транспортных судах имеет продолжительную историю [7]. Первый буксир, работающий на СПГ, Borgøy & Bokn (рис. 1), был спроектирован Sanmag и построен в 2014 г., то есть в настоящий момент имеет уже 10-летний опыт эксплуатации. Однако применение СПГ на морских судах вызвано не экономическими причинами, а необходимостью, нормативными запретами или иными инструментами (например, финансовыми), введенными правительствами стран, радеющими за экологичность морского транспорта в зонах контроля выбросов (ЕСА) [8, 9]. Таким образом, для определения степени привлекательности использования на морском транспорте какого-либо альтернативного вида топлива в интересах отечественных заинтересованных лиц должен использоваться критерий экономической целесообразности (за исключением случаев, когда это вызвано необходимостью удовлетворения нормативным требованиям).

Экономическая привлекательность определяется с использованием специализированных технико-экономических моделей, например модели работы портового флота [10, 11]. При этом для получения адекватных результатов должны использоваться соответствующие модели судов. В настоящий момент не существует судна, которое обладало бы достаточным ледовым классом и использовало СПГ в качестве топлива и которое могло бы послужить прототипом в технико-экономическом исследовании.

При отсутствии судна-прототипа допустимо воспользоваться математической моделью судна, выполненной на приемлемом уровне абстракции. Достаточным с точки зрения потребностей технико-экономической модели является подход по созданию регрессионно-аналитической модели судна, дающей возможность достаточно гибко и в короткие сроки предоставить требуемые характеристики судов. Принцип построения подобных моделей описан в исследованиях отечественных [12, 13] и зарубежных [14] ученых.

Таким образом, объектом исследования является математическая модель буксира-кантовщика с необходимым ледовым классом, использующего СПГ в качестве топлива, а целью исследования является оценка влияния применения двухтопливных технических СПГ-решений на облик и основные характеристики этого судна. Для выполнения подобного сравнения необходимо создать расчетную модель буксира, способную учитывать наличие у буксира ледового класса и двухтопливности. Таким образом, оценка влияния применения двухтопливных технических СПГ-решений на облик и основные характеристики ледового буксира для отечественных портов возможно путем сравнения результатов расчета различных вариантов буксиров, полученных с помощью этой расчетной модели.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К БУКСИРУ-КАНТОВЩИКУ С ЛЕДОВЫМ КЛАССОМ ARC5

Исходными данными для расчетной модели являются исходные технические требования (далее — ИТТ) на судно, представляющие собой перечень его основных характеристик, которые должны быть уточнены до начала создания модели. К их числу относятся: ледовые качества (ледовый класс и ледопроездимость $h_{\text{лед}}$, м); тяга на переднем ходу BP_1 , тс; автономность A , сут; экипаж $n_{\text{эк}}$, чел; ширина B , м; осадка на миделе d , м и скорость на чистой воде v_s , уз.

Ледовые качества. Главной сложностью при создании двухтопливных буксиров в условиях отечественных портов является необходимость в обеспечении ими достаточного для выполнения буксирных операций тягового усилия в ледовых условиях, так как экспортирующие СПГ морские терминалы в нашей стране расположены в акваториях замерзающих морей. Даже в относительно мягком климате Балтийского региона средние толщины ледяного покрова на отдельных участках акватории в зимние и весенние месяцы достигают значительных (до 60 см) толщин; в юго-западной части Финского залива значение максимальной

толщины льда 1%-ной обеспеченности составляет 80 см. Необходимость в круглогодичном буксирном обеспечении в сочетании с повторяющимися на Балтике примерно раз в декаду тяжелыми зимами, когда значительно увеличивается площадь акватории, покрытой льдом большой толщины, создают потребность в буксирах с соответствующими ходовыми качествами при движении во льдах. Ходовые качества судна при движении в скованной льдом акватории определяются главным образом его ледопроходимостью, зависящей от формы корпуса, относительных и абсолютных значений главных размерений и характеристик пропульсивного комплекса. В то же время действующие требования «ледовых» Правил РС регламентируют минимально необходимый уровень ледовой прочности конструкций корпуса в зависимости от знака ледового класса судна. Так, согласно описанию ледовых классов РС, допустимая по требованиям к ледовой прочности толщина разреженных однолетних льдов в зимне-весенний период навигации, при взаимодействии с которыми судно не получает ледовых повреждений, составляет 0,7 м для ледового класса Arc4 и 0,9 м для ледового класса Arc5 (при этом скорость движения судна не регламентируется). Таким образом, для обеспечения запаса в безопасную сторону для буксира-кантовщика должен быть выбран ледовый класс Arc5, а требуемая ледопроходимость должна составлять не менее 0,9 м. При этом буксир должен иметь возможность управляться, что регламентирует его минимальную скорость в ледовых условиях — не менее 2 уз.

Тяга на переднем ходу. Вне зависимости от ледового класса, основным параметром буксирного судна является его способность создать необходимое для выполнения грузообработки транспортного судна тяговое усилие. В статье [15] на основе анализа требований отечественной нормативной базы, а также зарубежного опыта было установлено, что для грузообработки наибольшего транспортного судна в замерзающих портах РФ (газовоза СПГ грузоместимостью порядка 180 000 м³) минимально требуемая суммарная тяга буксирного ордера на чистой воде составляет 155 тс. Различные варианты расчетов отшвартовки таких судов в ледовых условиях замерзающих морских портов, выполненные для неблагоприятных вариантов направления и силы ветра и высоты волны, показали, что потребное усилие буксирного ордера составит около 200 тс, а оптимальное количество судов в таком ордере равно 4 буксирам. Следовательно, рассмотрим в работе два варианта буксира по тяге: усилие на переднем ходу для судов буксирного ордера должно составить не менее 40 тс и не менее 60 тс.

Автономность буксиров здесь составляет не менее 10 сут, что обусловлено спецификой работы буксирного флота на Балтике, зачастую подразумевающей длительные переходы между портами. Для буксира с тягой на переднем ходу не менее 40 тс примем автономность по запасам провизии и топлива 10 сут, а для буксира с тягой не менее 60 тс — 15 сут. Следует отметить, что при окончательном выборе схемы эксплуатации буксирного ордера, значения принятой для судов автономности могут быть уменьшены. Из положительных моментов принятой автономности следует выделить рост дедевейта из-за увеличения в нем доли запасов топлива, воды и провизии, что сказывается на росте водоизмещения судна, что также положительно сказывается на его ледовой ходкости.

Экипаж. Количество членов экипажа для буксира с тягой на переднем ходу 40 тс примем как у судна-прототипа «Проект Т3150» («Пур», «Тамбей») равным 10, а для буксира с тягой на переднем ходу не менее 60 тс — равным 15 из-за разницы в их функционале (выполнение буксиром спасательных функций, противопожарных функций, участие его в ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов, управление ледовой обстановкой и т.д.).

Скорость. Эксплуатационная скорость судов на чистой воде v_s , уз принята постоянной, равной 12 уз исходя из значения числа Фруда по длине, равного 0,12. При дальнейшем проектировании значение эксплуатационной скорости может быть снижено для экономии топлива в переходах по чистой воде.

Принятые в целях сопоставления ИТТ для буксиров представлены в табл. 1.

Таблица 1

ИТТ для определения характеристик расчетных буксиров

Параметры судна	Дизельное топливо		Дизельное топливо + СПГ	
	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 1 СПГ	Вар. 2 СПГ
Ледовый класс	Arc5	Arc5	Arc5	Arc5
Ледопроходимость, м	0,9	0,9	0,9	0,9
Тяга на переднем ходу, тс	Не менее 40	Не менее 60	Не менее 40	Не менее 60
Автономность, сут	10	15	10	15
Экипаж, чел	10	15	10	15
Скорость, узл	12	12	12	12

2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ, ЛЕЖАЩАЯ В ОСНОВЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТНЫХ БУКСИРНЫХ СУДОВ

В качестве инструмента для определения характеристик расчетных судов используем регрессионно-аналитическую модель судна, в основе которой лежат базовые статистические зависимости. Так как буксиров с ледовым классом Arc5 в настоящий момент существует мало, в качестве источника статистической информации также были использованы характеристики буксиров с ледовым классом Arc4, параметры которых позволяют рассматривать их ледовые качества как близкие к Arc5. Таким образом, в качестве исходных статистических данных использовались данные по 67 судам Arc4 и 7 судам Arc5 под флагом РФ, а также буксирам, использующим СПГ в качестве топлива, под флагами иностранных государств (19 судов).

3. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЛЕДОВЫХ БУКСИРОВ

Расчетная модель реализована группой вычислений, выполняемых последовательно. Алгоритм реализации расчетной модели буксиров представлен на рис. 2.

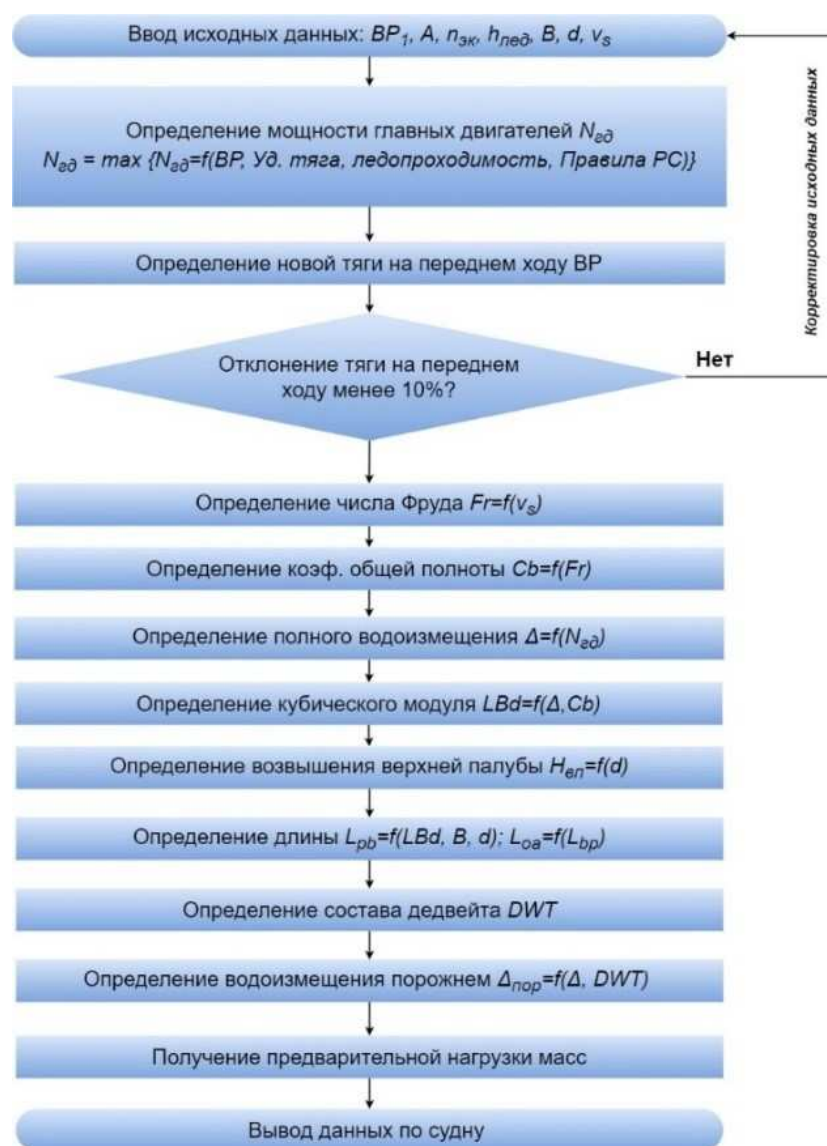


Рис. 2. Алгоритм определения характеристик расчетных буксиров с ледовым классом Arc5

После ввода исходных данных определяется мощность ГД по критерию максимизации значений мощностей, полученных в зависимости от удельной тяги, от ледопроходимости и по правилам РС (формула 1):

$$N_{ГД} = \max \left\{ \begin{array}{l} (N_{ГД} = f(BP) + N_{ГД} = f(\text{уд. тяга}) \cdot 0,5); \\ N_{ГД} = f(h_{\text{лед}}); \\ N_{ГД} \text{ по Правилам РС} \end{array} \right\}, \text{ кВт.} \quad (1)$$

Зависимость суммарной мощности ГД от удельной тяги на переднем ходу $N_{ГД} = f(\text{уд. тяга})$ определяется с помощью величины удельной тяги, принимающей для буксиров с ледовым классом Arc4 значение 17,05 кгс/кВт, а для буксиров с ледовым классом Arc5 значение 16,5 кгс/кВт. Зависимость суммарной мощности ГД от тяги на переднем ходу для буксиров, использующих дизельное топливо, с ледовыми классами Arc4 и Arc5 представлена на рис. 3, а для буксиров, использующих газовое топливо, на рис. 4.

Зависимость суммарной мощности ГД от ледопроходимости описывается с помощью классической формулы [16]:

$$N_{ГД} = 10^3 \cdot \left(\frac{B \cdot h_{\text{лед}}}{4,87} \right)^2, \text{ кВт.} \quad (2)$$

Ширина судна связана с его ледопроходимостью, структура этой зависимости показана в формуле 2, где видно, что с ростом ширины судна значительно возрастает требуемая для обеспечения ледопроходимости мощность главных двигателей. В данной постановке задачи определения непротиворечивой модели судна ширина судна и его осадка являются оптимизируемыми параметрами, при этом максимальным отношением L/B в расчетной модели является значение, равное 3,25 и соответствующее максимальному значению параметра L/B в статистической выборке судов (буксир GRIFON-1, ИМО 8862870).

Методический аппарат определения минимальной мощности для судов с различными ледовыми классами представлен в части VII Правил РС [17]. После определения мощности ГД по формуле 1 выполняется определение нового значения тяги на переднем ходу буксира и его соответствие ранее введенному, и в случае его несоответствия (отклонение от первоначального значения более чем на 1 %) выполняется корректировка ширины и осадки судна.

Для буксиров, круглогодично работающих в условиях чистой воды, значение тяги является основной характеристикой, от которой зависит мощность главных двигателей. В исследуемом случае потребная мощность энергетической установки судна в большей степени зависит от его ледовой ходкости, тем самым на определенном этапе расчета требуется обратный пересчет тяги на переднем ходу взамен введенной в начале расчета. Таким образом, результирующее значение тяги всегда носит большее значение, чем введенное, названное «желаемая тяга на переднем ходу BP_1 , т».

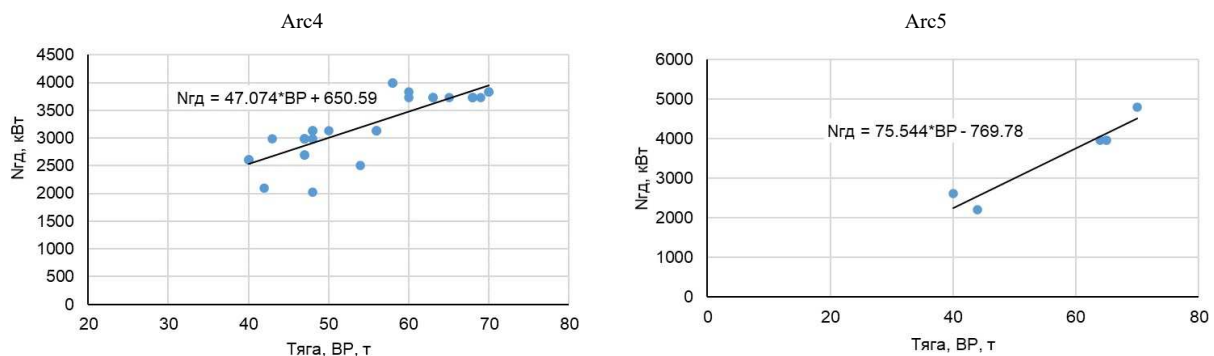


Рис. 3. Зависимость суммарной мощности ГД от тяги на переднем ходу для буксиров, использующих дизельное топливо, с ледовыми классами Arc4 (слева) и Arc5 (справа)

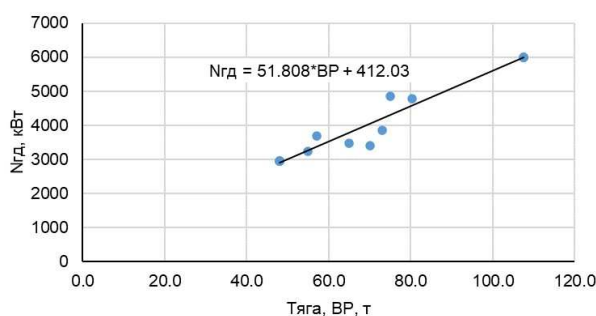


Рис. 4. Зависимость суммарной мощности ГД от тяги на переднем ходу для буксиров, использующих газовое топливо

Мощность дизель-генераторов (далее — ДГ) буксирных судов определим по зависимости (формула 3, рис. 5). Количество дизель-генераторов для всех буксиров принято равным 2.

$$N_{ДГ} = 0,3181 \cdot \Delta + 13,359, \text{ кВт.} \quad (3)$$

Далее следует определение чисел Фруда, коэффициентов общей полноты C_b и водоизмещения буксиров различных ледовых классов. Зависимость водоизмещения от мощности ГД показана на рис. 6.

Определим кубический модуль для расчетных судов по формуле 4:

$$LBd = \Delta / C_b / 1,025, \text{ м}^3. \quad (4)$$

Зависимость возвышения главной палубы над ОП буксиров с ледовым классом Arc5:

$$H = 1,0057 \cdot d + 1,2902, \text{ м}^3. \quad (5)$$

Зависимость возвышения главной палубы над ОП газотопливных буксиров:

$$H = 0,0002 \cdot d + 1,0067, \text{ м}^3. \quad (6)$$

Зависимость для определения наибольшей длины газотопливных буксиров:

$$L_{OA} = 1,1194 \cdot L_{BP} + 0,1454, \text{ м.} \quad (7)$$

Величина дедвейта представляет собой сумму масс экипажа, провизии, топлива, а также питьевой и мытьевой воды. Таким образом, величина дедвейта зависит от численности экипажа и автономности по запасам топлива и воды. Запасы топлива, в свою очередь, зависят от мощности ГД, ДГ, автономности и типа топлива. Расчет запасов топлива и автономности буксиров выполнен в п. 4. Водоизмещение судна порожнем определяется по формуле:

$$\Delta_{пор} = \Delta - DWT, \text{ т.} \quad (8)$$

Укрупненные составляющие нагрузки масс были определены в соответствии с имеющейся информацией по судам-прототипам, а также на основе эмпирических зависимостей из исследования [18].

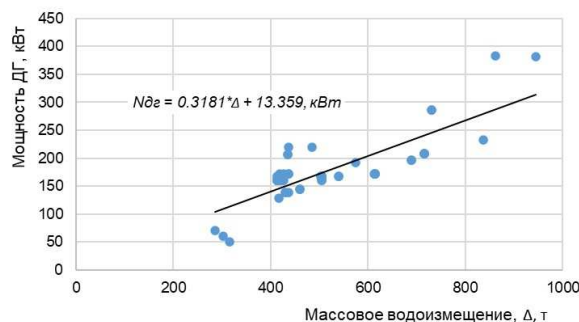


Рис. 5. Зависимость суммарной мощности дизель-генераторов от массового водоизмещения для буксиров с ледовыми классами Arc4 и Arc5

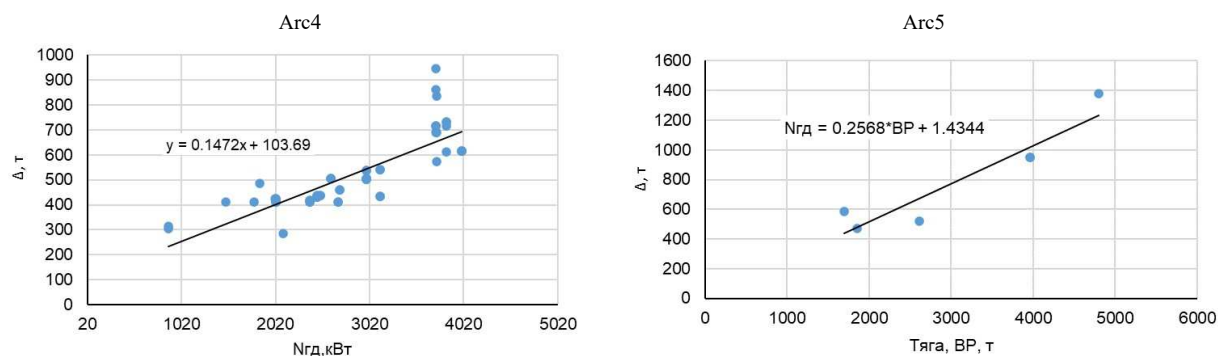


Рис. 6. Зависимость водоизмещения от суммарной мощности ГД для буксиров, использующих дизельное топливо

Параметры расчетных судов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры расчетных буксиров

Параметры судна	Дизельное топливо		Дизельное топливо + СПГ	
	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 1 СПГ	Вар. 2 СПГ
Тяга на переднем ходу, т	49	70	52	72
Ледопроездимость, м	0,9	0,9	0,9	0,9
Длина наибольшая, L_{oa} , м	31,5	34,8	32,7	36,1
Длина между перпендикулярами, L_{bp} , м	28,0	30,9	29,0	32,1
Ширина, B , м	9,2	11,6	9,6	11,8
Высота борта, H , м	6,8	6,9	6,8	6,9
Осадка, d , м	5,5	5,6	5,5	5,6
Скорость эксплуатационная, v_s , уз	12,00	12,00	12,00	12,00
Скорость максимальная, v_{max} , уз	13,21*	13,82*	13,47*	14,04*
Мощность на валах, кВт	2891	4596	3148	4755
По тяге (статистика), кВт	2252	3763	2484	3521
По удельной тяге (статистика), кВт	2424	3636	2346	3519
По ледопроездимости, кВт	2891	4596	3148	4755
По правилам РС, кВт	2600	2600	2600	2600
На эксплуатационной скорости v_s , кВт	1593*	1930*	1548*	1844*
Кол-во, тип и мощность (MCR = 100) ГД, ед × кВт	2 × 1490	2 × 2370	2 × 1630	2 × 2450
Кол-во, тип и мощность (MCR = 100) ДГ, ед × кВт	2 × 125	2 × 95	2 × 132	2 × 200
Автономность, сут	10	15	10	15
Экипаж, чел	10	10	10	10
Удельный расход топлива, г/кВт·ч	190	195	3,8ДТ + 152ПГ**	3,9ДТ + 156ПГ**
Водоизмещение, Δ , т	743,8	1181,6	786,0	1219,0
Состав переменных нагрузок				
Дедвейт, DWT , т	105,90	267,30	120,80	284,10
Запас топлива, т	83,10	203,10	98,00**	219,90**
Запас воды мытьевой, т	10,00	15,00	10,00	15,00
Запас воды питьевой, т	10,00	15,00	10,00	15,00
Экипаж, провизия, т	2,80	4,20	2,80	4,20
Балласт, т	0,00	30,00	0,00	30,00
Состав постоянных нагрузок***				
01 Корпус	356,81	511,47	372,77	519,82
02 Устройства судовые	91,40	131,00	95,31	133,96
03 Системы	20,85	35,00	28,29	43,00
04 Установка энергетическая	99,49	142,60	103,75	145,82
05 Электроэнергетическая система, связь и управление	21,10	21,68	21,10	21,68
07 Р/связь и навигация	1,26	1,26	1,26	1,26
09 Запасные части	0,88	1,27	0,88	1,27
10 Твердый балласт	—	—	—	—
11 Запас водоизмещения, остойчивости	18,00	27,00	10,00	19,00
12 Постоянные жидкие грузы	26,00	40,00	30,00	46,00
13 Снабжение, имущество	2,10	3,01	2,19	3,08
Водоизмещение порожнем, т	637,89	914,3	665,19	934,90

* На основании расчета буксировочной мощности, расчет в п. 5.

** В гибридном режиме с учетом запасов СПГ, расчет которых представлен в п. 4.

*** По прототипу пр. Т3150 «Пур», «Тамбей».

4. АВТОНОМНОСТЬ РАСЧЕТНЫХ БУКСИРОВ

Отношение расходов жидкого топлива и СПГ равняется отношению их теплотворных способностей и обычно принимается равным 1,2, то есть расход СПГ по весу будет на 20 % меньше, чем расход жидкого топлива. Для жидкого топлива удельные расходы топлива определены следующим образом: для двигателей линейки Weichai 16M33 — 190 г/кВт·ч и 16M55 — 195 г/кВт·ч, для аналогичных двухтопливных двигателей — 3,8 г/кВт·ч дизельного топлива, 152 г/кВт·ч природного газа и 3,9 г/кВт·ч дизельного топлива, 156 г/кВт·ч природного газа соответственно.

Согласно своду правил [19], бюджет рабочего времени буксиров в месяц составляет 625 часов, коэффициент использования рабочего времени $k_{\text{бг}} = 0,65$.

Исходя из этого, определим время работы энергетической установки буксиров в течение всего срока автономности по формуле:

$$t_A = \frac{625 \cdot 0,65}{30} \cdot A, \text{ час} \quad (9)$$

где A — автономность, сут.

Требуемые для обеспечения полной автономности запасы буксиров по топливу представлены в табл. 3.

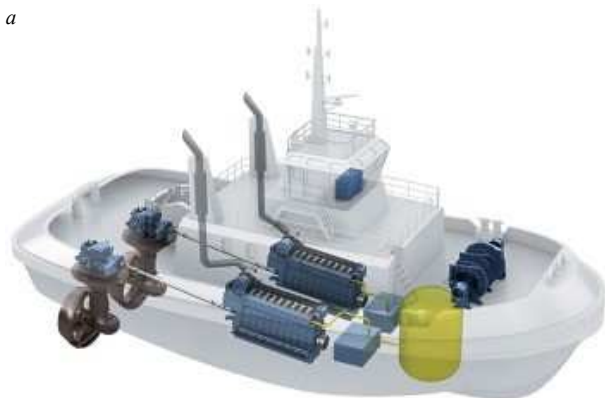
Таблица 3

Требуемое количество запасов топлива для обеспечения автономности

Тип буксира	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 1 СПГ	Вар. 2 СПГ
Автономность, A , сут	10	15	10	15
Суммарная мощность ГД, кВт	2×1490	2×2370	2×1630	2×2450
Мощность ДГ, кВт	250,0	390,0	265,0	401,0
Время работы энергетической установки буксиров, t_A , час	135,4	203,1	135,4	203,1
Дизельное топливо, т	83,1	203,1	1,8	4,2
Природный газ, т	—	—	72,5	168,0

При этом требуемые объемы для хранения природного газа в сжиженном виде составят около 137 и 317 м³ при плотности СПГ 0,54 т/м³ и заполнении емкости 98 %. В отличие от транспортных судов, буксирные суда характеризуются малыми размерениями и меньшей вместимостью корпуса. Путем анализа реализованных в настоящее время двухтопливных буксиров (с типовым расположением емкости, представленным на рис. 7а) удалось выявить зависимость между массовым водоизмещением этих судов и объемом топливного СПГ, который удалось реализовать в размерениях этих судов (рис. 7б).

а



б

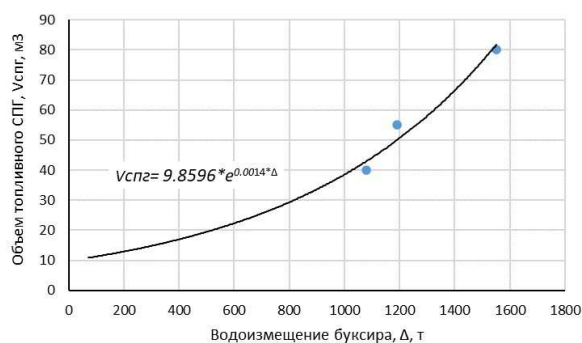


Рис. 7. Схема расположения емкости СПГ на буксирах Buksér og Berging AS (а); зависимость между массовым водоизмещением двухтопливных буксиров и объемом топливного СПГ, который удалось реализовать в размерениях этих судов (б)

Расчет объема бункерного СПГ, возможного к размещению в расчетных буксирах «Вар. 1 СПГ» и «Вар. 2 СПГ», выполнен по формуле 10 и составил 30 м³ и 55 м³ (16,2 и 29,7 т) СПГ для каждого буксира соответственно.

$$V_{\text{СПГ}} = 9,8569 \cdot \exp^{0,0014 \cdot \Delta}, \text{ час}, \quad (10)$$

где $V_{\text{СПГ}}$ — запасы бункерного СПГ, м³;
 Δ — массовое водоизмещение буксира, т.

Таким образом, выяснено, что обеспечить полную автономность портового двухтопливного буксира, характерную для аналогичного судна, работающего на морском дизельном топливе, используя только СПГ невозможно, поэтому в качестве основы для дальнейших расчетов для буксиров «Вар. 1 СПГ» и «Вар. 2 СПГ» принято количество бункерного СПГ, равное 30 м³ и 55 м³ соответственно, а недостающая автономность по топливу обеспечивается дизельным топливом. Определение необходимого количества дизельного топлива с учетом запального представлено в табл. 4.

Таблица 4

Требуемое количество запасов топлива для обеспечения автономности при работе ЭУ расчетных буксиров в двухтопливном режиме

№	Параметр	Вар. 1 СПГ	Вар. 2 СПГ	Примечание
1	Мощность ГД на чистой воде, кВт	1548	1844	На $v_s = 12$ уз
2	Мощность ГД в ледовых условиях, кВт	3147	4755	При $h_{\text{lim}} = 0,9$ м и $v_{\text{ice}} = 2$ уз
3	Мощность ДГ, кВт	270	401	По формуле 3
4	Масса бункерного СПГ на борту, т	16,2	29,7	По формуле 10
5	Удельный расход ДТ, г/кВт·ч	190	195	В режиме дизеля
6	Удельный расход ДТ, г/кВт·ч	1,9	1,95	В двухтопливном режиме ≈ 1 % от (5)
7	Удельный расход ПГ, г/кВт·ч	152	156	В двухтопливном режиме ≈ 80 % от (5)
8	Бюджет раб. времени, час	135,4	203,1	За автономность А по [16]
Время работы ЭУ на газу в различных режимах				
Время на стоянке, час		394,7*	474,8*	$(4)/(3) \cdot (7) \cdot 10^{-6}$
Время на переходы по чистой воде на v_s , час		58,6**	84,8**	$(4)/((1) + (3)) \cdot (7) \cdot 10^{-6}$
Работа в порту на чистой воде, час		58,6**	84,8**	$(4)/((1) + (3)) \cdot (7) \cdot 10^{-6}$
Работа в порту в тяжелых ледовых условиях, час		31,2***	36,9***	$(4)/((2) + (3)) \cdot (7) \cdot 10^{-6}$
Требуемая масса ДТ для обеспечения автономности в наиболее тяжелом режиме эксплуатации				
Масса ДТ для обеспечения двухтопливного режима работы ЭУ, т		0,8	1,9	$(2) \cdot (6) \cdot (8) \cdot 10^{-6}$
Дополнительное количество дизельного топлива, т		81	188,3	$(2) \cdot (5) \cdot (8) \cdot 10^{-6}$
Σ ДТ, т		81,8	190,2	В гибридном режиме
*На 100 % мощности ДГ и 0 % мощности ГД. ** На 100 % мощности ДГ и 49 % мощности ГД. *** На 100 % мощности ДГ и ГД.				

5. ПРОВЕРКА ЛЕДОПРОХОДИМОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РАСЧЕТНЫХ БУКСИРОВ

Проверку ледопроходимости полученных расчетных судов выполним в соответствии с формулой:

$$v_{\text{ice}} = v_{\text{ow}} - (v_{\text{ow}} - v_{\text{min}}) \cdot \frac{h_{\text{eq}}}{h_{\text{lim}}}, \text{ уз}, \quad (11)$$

где v_{ice} — скорость во льду толщиной h_{eq} , уз;
 v_{ow} — максимальная скорость на чистой воде, которую может развить судно, уз;
 v_{min} — минимальная ледовая скорость, уз;
 h_{eq} — толщина ровного сплошного льда, м;
 h_{lim} — ледопроходимость судна, м.

В качестве минимальной ледовой скорости v_{min} в расчетах обычно принимается значение, равное 2 уз. Максимальную скорость на чистой воде v_{ow} , которую может развить судно, определим по методике [20].

Буксиры имеют специфические формы обводов с относительно малыми значениями удлинений L/B и коэффициентов общей полноты Cb , обусловленных необходимостью обеспечения повышенных маневренных качеств и высокой остойчивости. Эти условия не позволяют безоговорочно использовать диаграммы и графики, предназначенные для расчета сопротивления движению судов других типов. Для судов с малыми удлинениями результаты экспериментальных исследований в области сопротивления движению обычно представляются в виде диаграмм зависимости удельного остаточного сопротивления от относительной скорости хода $Rr/\Delta = f(Fr)$ (рис. 8а).

При этом расчетная формула принимает вид:

$$R = m \cdot [0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \Omega \cdot (0,4 + \zeta_{f_0}) + (Rr/\Delta) \cdot \Delta \cdot g], \text{ уз}, \quad (12)$$

где m — коэффициент, учитывающий влияние выступающих частей корпуса, ветра и волнения моря;

v — скорость судна, уз;

ζ_{f_0} — коэффициент трения технически гладкой пластины;

Rr/Δ — удельное остаточное сопротивление, кН/т;

Δ — массовое водоизмещение судна, т.

Выполненный для вариантов буксиров (табл. 2) расчет буксировочной мощности на эксплуатационной скорости, а также на максимально достижимой скорости хода на чистой воде v_{ow} , показал полное соответствие требованиям, предъявленным к буксировочной мощности. Расчет представлен на рис. 8.

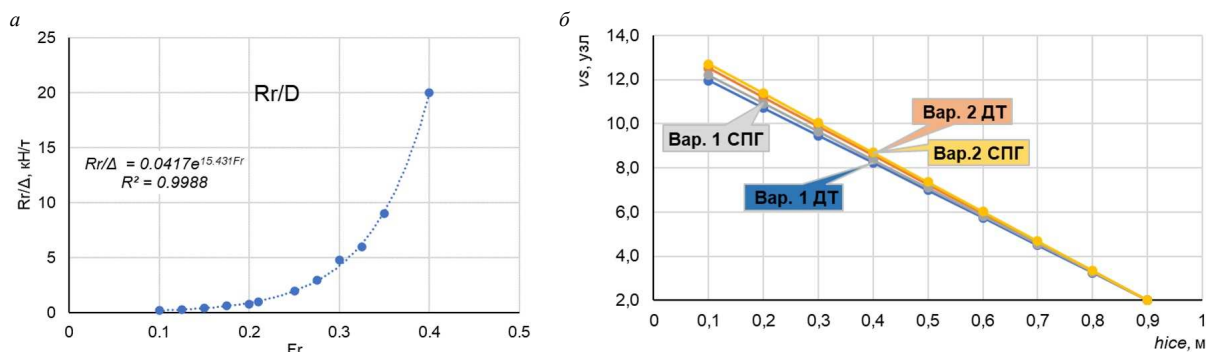


Рис. 8. Зависимость удельного остаточного сопротивления буксиров от их относительной скорости хода (а); ледопроходимость полученных расчетных буксиров (б)

Методика расчета буксировочной мощности представлена в табл. 5, а значения используемых для расчета постоянных величин — в табл. 6.

Таблица 5

Расчет буксировочной мощности буксира

№	Расчетная величина	Формула
1	Площадь смоченной поверхности, м ²	$\Omega = K_{Cb} (L_{bp} d (2 + 1,37(Cb - 0,274)B/d))$
2	Поправка на ледовый класс судна	$LK \leq Arg4 \rightarrow K_{Cb} = 1,1214; \text{ иначе } K_{Cb} = 1,1064$
3	Число Фруда	$Fr = v / \sqrt{gL_{bp}}$
4	Удельное остаточное сопротивление, кН/т	$Rr/\Delta = 0,0417 \cdot Exp^{15,431 \cdot Fr}$
5	Остаточное сопротивление, кН	$Rr = m \cdot (4) \cdot \Delta \cdot g \cdot 10^{-3}$
6	Скорость хода судна, м/с	$v = (3) \cdot \sqrt{gL_{bp}}$
7	Число Рейнольдса	$Re = (6) \cdot L_{bp} / \nu$
8	Коэффициент трения техн. гл. пластины	$\zeta_{f_0} \cdot 10^3 = f(Re)$
9	Коэффициент трения судна	$\zeta_c \cdot 10^3 = (8) + 0,4 + \zeta_r \cdot 10^3$
10	Квадрат скорости хода, м ² /с ²	$v^2 = (6)^2$
11	Сопротивление трения судна, кН	$R_f = m \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot \Omega \cdot (10) \cdot (9) \cdot 10^{-3}$
12	Буксировочное сопротивление, кН	$R = (5) + (11)$
13	Буксировочная мощность, кВт	$N = (12) \cdot (6) / \eta_{винт} / \eta_{з-передачи}$
14	Буксировочная мощность + доп. потери, кВт	$N_{\text{доп. потери}} = (13) + \text{доп. потери}$
15	Скорость хода судна, м/с	$v_s = 1,945 \cdot (6)$

Таблица 6

Постоянные величины для расчета буксировочной мощности

Величина	Значение
Плотность морской воды, ρ , т/м ³	1,025
Кинематическая вязкость жидкости ν , м ² /с	$1,61 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент выступающих частей, m	1,08
Коэффициент влияния кривизны на трение K	1,08
Корреляционный коэффициент — надбавка на шероховатость, $\zeta_n \cdot 10^3$	0,6
КПД винта	0,614
КПД z -передачи	0,97
Увеличение MCR ГД, %	15

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях роста числа судозаходов в замерзающие порты РФ и потенциальной возможности использования сжиженного природного газа для бункеровки портофлота актуализируется вопрос о целесообразности применения двухтопливных буксиров. При отсутствии нормативных ограничений на применение низкосернистого топлива в российских портах решение об использовании природного газа может основываться на экономическом критерии эффективности. Экономические модели, применяемые для анализа, требуют набора входных данных о параметрах буксира.

Анализ «ледовых» Правил Российского морского регистра судоходства и ледовых условий Финского залива в тяжелые навигационные периоды показывает необходимость применения буксиров с классом ледовых усилений не ниже Arc5. В отсутствие реального двухтопливного буксира с таким классом была разработана его математическая модель. Модель построена на основе статистических данных по судам классов Arc4 и Arc5 и позволяет получить приближенные проектные характеристики, достаточные для проведения технико-экономического обоснования.

Сопутствующей целью исследования являлась оценка влияния применения двухтопливных технических решений на облик и основные характеристики буксира-кантовщика с ледовым классом Arc5. Результатом исследования, проведенного и представленного в отчете, стали параметры расчетных буксиров для дальнейшего их (параметров) использования в экономических исследованиях. Дополнительно выявлены следующие аспекты применения СПГ в качестве топлива на буксирных судах:

- 1) увеличение их водоизмещения за счет роста постоянных составляющих нагрузки масс — массы топливной системы, конструкций надстройки и корпуса (из-за увеличения потребного объема внутри корпуса и надстройки для размещения емкости для хранения СПГ);
- 2) увеличение мощности ГД СЭД для обеспечения эксплуатационной скорости при увеличившихся габаритах судна, а также для удовлетворения требованиям к ледовой ходкости при росте ширины буксира;
- 3) рост результирующей тяги на гаке из-за увеличения мощности ГД СЭД;
- 4) невозможность обеспечить длительный срок автономности буксира по топливу в двухтопливном режиме из-за ограниченной вместимости по газовому топливу.

При выборе главных двигателей двухтопливного буксира необходимо обратить внимание их поставщика на специфику работы буксира: длительная работа на переменных долевых нагрузках, в связи с чем должны быть выполнены мероприятия, направленные на повышение стабильности работы двигателя на газообразном топливе (отсутствие детонации и пропусков воспламенения в камере сгорания); периодическое взаимодействие лопастей гребного винта со льдинами средней толщины до 1,2 м, в связи с чем для предотвращения внезапных остановок двигателя может потребоваться оборудовать его маховиком и установить гидравлические муфты в составе пропульсивной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Hensen H. Tug use in port. A practical guide. 2nd ed. / H. Hensen. — Port Rotterdam: Nautical Institute, 2003. — 192 p.
- 2 Lebedevas S. Investigation of effect on environmental performance of using LNG as fuel for engines in seaport tugboats / S. Lebedevas, L. Norkevičius, P. Zhou // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 9(2). — P. 123. — DOI 10.3390/jmse9020123.
- 3 Paulauskas V. The influence of port tugs on improving the navigational safety of the port / V. Paulauskas, M. Simutis, B. Plačienė, R. Barzdžiukas et al. // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 9(3). — P. 342. — DOI 10.3390/jmse9030342.
- 4 Бондаренко А.В. Методика выбора оптимального состава буксирного обеспечения порта / А.В. Бондаренко, В.А. Некрасов, А.П. Ястреба // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. — 2015. — № 4(32). — С. 43 — 52. — EDN UDJURF.
- 5 Власьев М.В. Определение буксирного обеспечения порта: уч. пос. / М.В. Власьев. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2022. — 105 с.
- 6 Киреев В.Н. Буксиры проектам ЦКБ «Балтсудопроект» / В.Н. Киреев, Е.С. Былинович, Ю.И. Рязанцев // *Судостроение*. — 2007. — № 3(772). — С. 25 — 29. — EDN HZVQDR.
- 7 Реуцкий А.С. Назначение размеров охраняемой зоны в ходе выполнения бункеровки методом «автоцистерна — судно» / А.С. Реуцкий, В.А. Павловский // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2025. — № 78. — С. 4 — 15. — EDN YZMAKE.
- 8 Толмачев С.А. Последствия применения требований МАРПОЛ к эксплуатационной углеродоемкости (СИ) и предлагаемые подходы к их совершенствованию / С.А. Толмачев, А.А. Серов, А.А. Михеева, Д.С. Семионичев, А.С. Реуцкий // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2024. — № 77. — С. 24 — 32. — EDN FXBYEL.
- 9 Реуцкий А.С. Анализ положений руководящих принципов ИМО по оценке интенсивности выбросов парниковых газов на протяжении жизненного цикла для всех видов судового топлива / А.С. Реуцкий, В.К. Шурпяк, С.А. Толмачев // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2025. — № 79. — С. 14 — 25. — EDN FBBBJV.
- 10 Кузнецов А.Л. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке / А.Л. Кузнецов, А.В. Галин // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. — 2015. — № 2(30). — С. 141 — 153. — DOI 10.21821/2309-5180-2015-7-2-141-153. — EDN TPSXEF.
- 11 Scott D. Port simulation modelling and economic assessment / D. Scott, D. Taylor, S. Solh, T. Elliott // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2016. — Vol. 4. — P. 16. — DOI 10.3390/jmse4010016.
- 12 Кондратенко А.А. Особенности проектирования СПГ бункеровщиков / А.А. Кондратенко, А.С. Реуцкий // *Труды Крыловского государственного научного центра*. — 2019. — Специальный выпуск 1. — С. 216 — 222.
- 13 Аполлонов Е.М. Регрессионно-аналитическая модель определения характеристик газозовов СПГ мембранного типа с различными ледовыми категориями / Е.М. Аполлонов, О.В. Таровик // *Судостроение*. — 2013. — № 806. — С. 12 — 17. — EDN QCMGUN.
- 14 Marine Design XIII: Proceedings of the 13th International marine design conference (IMDC 2018), June 10-14, 2018, Helsinki, Finland / P. Kujala, L. Lu (eds). — Vol. 2. — DOI 10.1201/9780429440519.
- 15 Реуцкий А.С. Методы определения потребного количества портовых буксиров-кантовщиков с использованием приближенных зависимостей в разных портах мира / А.С. Реуцкий, Р.Ю. Романов, Д.С. Семионичев // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2024. — № 76. — С. 74 — 86. — EDN UBTICP.
- 16 Цой Л.Г. К вопросу о критерии ледовой ходкости судов // *Морской флот*. — 2019. — № 2(1542). — С. 24 — 28.
- 17 Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2024.
- 18 Киреев В.Н. Справочник по нагрузке масс морских судов / В.Н. Киреев, В.А. Мацкевич, Ю.И. Рязанцев. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2007. — 190 с.
- 19 СП 350.1326000.2018 Нормы технологического проектирования морских портов, 2018.
- 20 Емельянов Н.Ф. Ходкость водоизмещающих морских судов: уч. пос. / Н.Ф. Емельянов. — Владивосток: Дальрыбвтуз, 2004. — 249 с.

REFERENCES

1. Hensen H. Tug use in port. A practical guide. 2nd ed. Port Rotterdam: Nautical Institute, 2003. 192 p.
2. Lebedevas S., Norkevičius L. Zhou P. Investigation of effect on environmental performance of using LNG as fuel for engines in seaport tugboats. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(2). P. 123. DOI 10.3390/jmse9020123.
3. Paulauskas V., Simutis M., Plačienė B., Barzdžiukas R. et al. The influence of port tugs on improving the navigational safety of the port. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(3). P. 342. DOI 10.3390/jmse9030342.
4. Bondarenko A.V., Nekrasov V.A., Yastreba A.P. Methodology of selection of optimal structure of the fleet harbor tug. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2015. No. 4(32). P. 43 — 52. EDN UDJURF. (In Russ.)
5. Vlas'ev M.V. Opredelenie buksirnogo obespecheniya porta [Determination of port tug support: a study guide]. St. Petersburg: SPbGMTU, 2022. 105 p.
6. Kireev V.N., Bylinovich E.S., Ryazantsev Yu.I. Buksiry proektam TsKB "Baltsudoproekt" [Tugs constructed under the TSKB Baltudoproekt's projects]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2007. No. 3(772). P. 25 — 29. EDN HZVQDR.
7. Reutskii A.S., Pavlovsky V.A. Assigning the size of the protected area during the TTS LNG bunkering operation. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 4 — 15. EDN YZMAKE. (In Russ.)
8. Tolmachev S.A., Serov A.A., Mikheeva A.A., Semionichev D.S., Reutskii A.S. Consequences of applying MARPOL requirements to operational carbon intensity (CII), and approaches for their improvement. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 24 — 32. EDN FXBYEL. (In Russ.)
9. Reutskii A.S., Shurpyak V.K., Tolmachev S.A. Analysis of the IMO guidelines for estimating the intensity of greenhouse gas emissions over the life cycle for all types of marine fuels. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 14 — 25. EDN FBBBJV. (In Russ.)

10. Kuznetsov A.L., Galin A.V. The genesis of port development models in modern transportation science. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2015. No. 2(30). P. 141 — 153. DOI 10.21821/2309-5180-2015-7-2-141-153. EDN TPSXEF. (In Russ.)
11. Scott D., Taylor D., Solh S., Elliott T. Port simulation modelling and economic assessment. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2016. Vol. 4. P. 16. DOI 10.3390/jmse4010016.
12. Kondratenko A.A., Reutskii A.S. Design specifics of LNG bunkering ships. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019. Special issue 1. P. 216 — 222. (In Russ.)
13. Appolonov E.M., Tarovik O.V. Regressionno-analiticheskaya model' opredeleniya kharakteristik gazovozov SPG membrannogo tipa s razlichnymi ledovymi kategoriymi [Regression and analytical model for determining the performances of membrane-type LNG-carriers with different ice categories]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2013. No. 806. P. 12 — 17. EDN QCMGUN.
14. Marine Design XIII: Proceedings of the 13th International marine design conference (IMDC 2018), June 10-14, 2018, Helsinki, Finland / P. Kujala, L. Lu (eds). Vol. 2. DOI 10.1201/9780429440519.
15. Reutskii A.S., Romanov R.Yu., Semionichev D.S. Methods for determining the required number of harbour tugs using approximate dependencies in different ports of the world. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 74 — 86. EDN UBTICP. (In Russ.)
16. Tsoi L.G. K voprosu o kriterii ledovoi khodkosti sudov [About the criteria for ice performance of ships]. *Morskoi flot [Marine Fleet]*. 2019. No. 2(1542). P. 24 — 28.
17. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VII. Machinery Installations / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2024.
18. Kireev V.N., Matskevich V.A., Ryazantsev Yu.I. Spravochnik po nagruzke mass morskikh sudov [Handbook of mass load of sea-going ships]. St. Petersburg: TsNII im. akad. A.N. Krylova, 2007. 190 p.
19. SP 350.1326000.2018 Norms for technological design of sea ports, 2018. (In Russ.)
20. Emel'yanov N.F. Khodkost' vodoizmeshchayushchikh morskikh sudov [Propulsion qualities of sea-going displacement ships: a study guide]. Vladivostok: Dalrybvtuz, 2004. 249 p.