

ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЛКОСИДЯЩЕГО ЛЕДОКОЛЬНОГО БУКСИРА ДЛЯ ПОРТА ДУДИНКА

Г. В. Егоров, д-р техн. наук, проф.;

Н. В. Автутов, директор по перспективному развитию

Морское инженерное бюро, г. Одесса

Аннотация. Обоснованы характеристики речного буксира проекта Морского инженерного бюро TG04 для порта Дудинка. Буксир эффективен для мелководья и речных ледовых условий, имеет осадку до 1,80 м, доковую массу до 100 т, тяговое усилие 6 т.

Ключевые слова: проектирование судов, буксир, внутренние водные пути, ледовые условия, мелководье.

Анотація. Обґрунтовано характеристики річкового буксира проекту Морського інженерного бюро TG04 для порту Дудинка. Буксир є ефективним на мілководді та у річкових льодових умовах, має осадку до 1,80 м, докову масу до 100 т, тягове зусилля 6 т.

Ключові слова: проектування суден, буксир, внутрішні водні шляхи, льодові умови, мілководдя.

Abstract. The parameters of the river tug of the Marine Engineering Bureau project TG04 for the Dudinka are grounded. The tug is effective for shallow waters and river ice conditions, its draught is 1,80 m, the dock weight is up to 100 tons, the towing force is 6 tons.

Keywords: ships design, tug, inland waterways, ice conditions, shallow water.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В сегменте речных и смешанного река–море плавания перевозок судовладельцы активно инвестируют средства в строительство самоходных сухогрузных и нефтеналивных транспортных судов, а также несамоходных барж, обеспечивающих непосредственное перемещение груза и, следовательно, приносящих прямой доход.

Вопросы проектирования мелко-сидящих речных буксиров рассматривались в публикациях 70–80-х годов XX столетия [2, 3, 4, 8, 9, 10], с тех пор

новые суда такого класса не проектировались.

Существующий флот речных буксиров и толкачей продолжает неуклонно стареть (например, на начало 2008 года количество таких судов с классом Российского Речного Регистра (РРР) возрастом до 10 лет составляло всего 55 ед., от 10 до 15 лет — 101 ед., от 15 до 20 лет — 972 ед., от 20 до 30 лет — 2517 судов и старше 30 лет — 3119 судов) и в ближайшее время, к сожалению, не планируются значительные капиталовложения в покупку новых единиц вспомогательного флота.

Тем не менее, в речных портах потребность в новых буксирах чрезвычайно высока из-за крайней изношенности существующего флота. Одним из таких портов является речной порт Дудинка, входящий в состав Заполярного филиала ОАО «Горно-металлургический комбинат «Норильский никель» [5].

При создании буксиров нового поколения наибольший интерес представляют оптимизация обводов на основе численного моделирования [7], учет возможностей современной техники в отношении массогабаритных характеристик дизелей, что позволяет увеличить мощность малых буксиров при сохранении их размеров, снизить возможные риски при эксплуатации за счет рационального проектирования корпусных конструкций [6].

ЦЕЛЬЮ СТАТЬИ является обоснование характеристик речного буксира, эффективного для мелководья и речных ледовых условий, на примере проекта Морского инженерного бюро ТГ04 для порта Дудинка.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Порт Дудинка расположен на правом берегу реки Енисей в 230 милях от ее устья и является ведомственным портом, построенным для обеспечения нужд Норильского горно-металлургического комбината.

Эксплуатация судов вспомогательного флота в Дудинке связана с множеством трудностей, основными из которых являются:

короткий навигационный период (с мая по октябрь) и, необходимость четкой безаварийной работы судов;

длинный период зимнего отстоя с чрезвычайно низкой (ниже 50 °С) температурой наружного воздуха и вмерзанием на глубину полной осадки судов в лед, включая винторулевую группу;

ежегодный ледоход, следствием которого могут стать значительные повреждения или даже гибель судов и портовых сооружений.

Соответственно, речной буксир для эксплуатации в суровых условиях Заполярья должен отвечать следующим требованиям:

буксир должен быть рассчитан на эксплуатацию по назначению при низких отрицательных температурах окружающего воздуха;

оборудование и конструкция винторулевого комплекса должны позволять вводить буксир в эксплуатацию при низких отрицательных температурах из состояния полного вмерзания в лед;

корпус буксира должен иметь усиленную конструкцию для работы в условиях замерзшей акватории;

в связи с необходимостью подъема буксира на причал во время зимнего отстоя масса судна не должна превышать 100 т (ограничение по грузоподъемности крана);

максимальную осадку не более 1,80 м (по глубинам в затоне, где находится на зимнем отстое флот, и по путевым условиям речки Дудинки).

Буксир должен выполнять работы по обеспечению безопасности судов портового флота во время ледохода, поэтому имеет минимальные габариты и тяговое усилие не менее 6 т, позволяющие работать со всеми единицами флота, имеющегося в распоряжении Заполярного филиала.

Основные характеристики судна, а также характеристики аналогичных существующих судов, в том числе буксира «Тажный» проекта 1427, который был заменен буксиром проекта ТГ04, приведены в табл. 1.

Задание по внешним условиям массы порожнем буксира (не более 100 т), наибольшей осадки $d = 1,80$ м и выбранный из анализа прототипов коэффициент

Таблиця 1. Сравнительные характеристики буксира TG04 и прототипов

Параметр	Пр. TG04	Пр. 1427	Пр. P14A
Длина габаритная, м	20,45		31,50
Длина по КВЛ L , м	18,50	18,20	30,40
Ширина корпуса по КВЛ на миделе B , м	6,00	4,20	6,60
Ширина габаритная, м	6,56	4,40	6,80
Высота борта на миделе H , м	2,40	2,56	1,80
Осадка по КВЛ d , м	1,80	1,43	1,08
Максимальная длительная мощность ГД N , кВт	2×221	2×110	2×166
Тяговое усилие, т	6,50		4,15
Валовая вместимость, рег. т	84,81		171
Экипаж	6		11
Тип и количество двигателей	2 ВФШ	2 ВФШ	2 ВФШ

общей полноты $C_b = 0,603$ позволили определить главные размерения судна ($L \times B \times H = 18,5 \times 6 \times 2,40$).

Архитектурно-конструктивный тип буксира выбран классическим для речных портовых буксиров — однопалубный, двухвинтовой буксир, с носовым уступом главной палубы, со средним расположением рулевой рубки и машинного отделения (МО), с форштевнем ледокольного типа.

Район эксплуатации — водные бассейны и устьевые участки рек с морским режимом судоходства разряда «О». Эксплуатация судна возможна на волнении с высотой волны 1%-й обеспеченности не более 2,0 м.

Класс назначен в соответствии с назначенным районом плавания — класс «**✠** О 2,0 (лед 30)» (PPP), причем с учетом фактических условий эксплуатации в порту Дудинка ледовая категория заведомо принята выше, чем рекомендуется Правилами PPP для судов класса «**✠** О 2,0».

Обводы корпуса буксира разработаны с использованием методов CFD-моделирования (рис. 1).

При этом выбор номинального числа оборотов и гидродинамических характеристик гребных винтов (ГВ) производился для получения тягового усилия не менее 6,0 тонн в проектном режиме.

Проектным режимом являлась работа на швартовах (нулевая скорость хода) при номинальном числе оборотов и 100%-й нагрузке главных двигателей (ГД).

Исходные данные для расчетов поданы ниже:

диаметр открытых гребных винтов $D_p = 1,200$ м

число гребных винтов $x = 2$

число и мощность главных двигателей 2×221 кВт

В связи с предполагаемыми ледовыми условиями и малой осадкой открытые ГВ расположены в неглубоких полутоннелях корпуса. В расчетных условиях ГВ полностью погружены, соответственно $D_p/T = 0,667$.

Расчет оптимального числа оборотов ГВ выполнен в табл. 2.

В расчете число оборотов варьировалось в пределах 350...420 об/мин с шагом 10 об/мин, для каждого значения числа оборотов подобрано шаговое отношение, обеспечивающее 100%-ю нагрузку ГД. Связь между геометрическими и гидродинамическими характеристиками ГВ принята по результатам испытаний четырехлопастных винтов серии «В» Нидерландского бассейна.

Величина дискового отношения A_E/A_O принята равной 0,650 на основании расчета минимального значения A_E/A_{Omin} , выполненного из условия от-

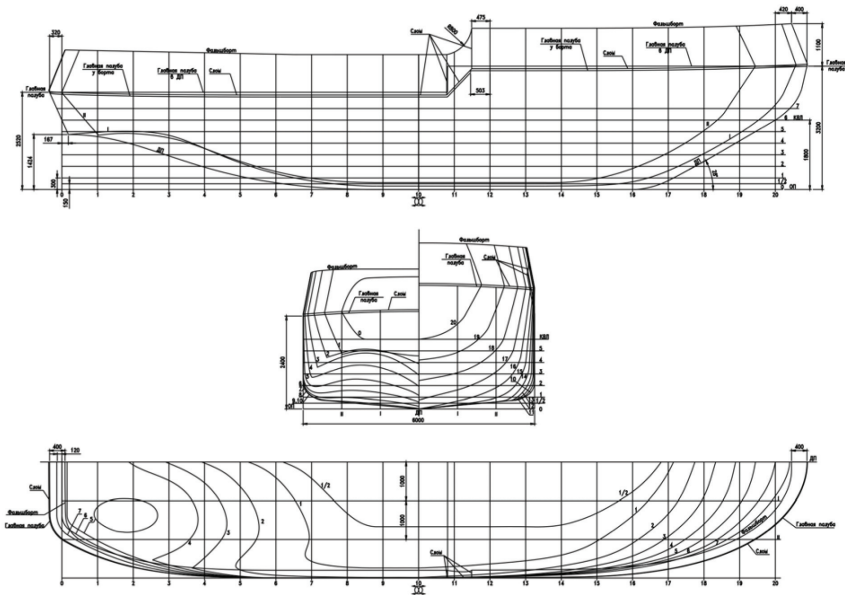


Рис. 1. Теоретичний чертеж корпусу мелкосидящего речного буксира проекта TG04

сутствия развитой кавитации для каждого из значений чисел оборотов. Расчет A_E/A_{Omin} выполнен с помощью известной формулы Келлера, связывающей дисковое отношение с упором ГВ и условиями его работы:

$$A_E / A_{Omin} = \frac{0,05 + (1,3 + 0,3z) \cdot T_p}{D_p^2(p_0 + \rho gh - p_v)},$$

где z — число лопастей ГВ; T_p — упор ГВ; $p_0 + \rho gh$ — статическое давление на оси ГВ; p_v — давление насыщенных паров на оси ГВ.

В расчетах принято $p_0 - p_v = 99047$ Па, что отвечает условиям воды при температуре 15 °С.

Нагрузка ГД по эффективной мощности N_E (строки 8 и 9 табл. 2) рассчитана с учетом КПД передачи 0,95.

Тяга ГВ на швартовах T_E (строка 10 табл. 2) рассчитана с учетом засасывания; коэффициент засасывания на швартовах t_{p0} предварительно принят равным 0,100.

Ориентировочная тяга буксира на швартовах $T_{E\Sigma}$ указана в строке 11 табл. 2.

С учетом данных табл. 2 было выбрано передаточное число редукторов $i_r = 4,409:1$, что соответствует номинальному числу оборотов ГВ 408 об/мин.

На рис. 2 показано распределение тяги буксира на швартовах по данным табл. 2 и отмечено выбранное номинальное число оборотов ГВ.

Как видно из рис. 2, кривая тяги не имеет выраженного максимума; тяга растет с ростом числа оборотов, асимптотически приближаясь к некоторому постоянному значению.

При выборе оптимального числа оборотов, таким образом, следует стремиться к его увеличению в пределах, ограниченных соображениями кавитации ГВ, конструкции ГВ и обеспечения приемлемых ходовых качеств в условиях свободного хода буксира. С учетом этих соображений выбор передаточного числа редукторов в данном случае представляется вполне обоснованным.

С учетом выбранного номинального числа оборотов геометрические харак-

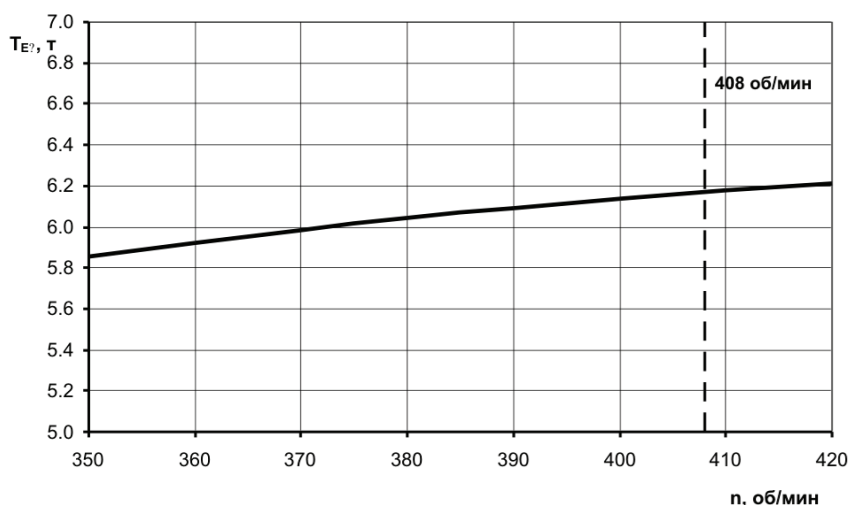


Рис. 2. Распределение тяги буксира на швартовах

Таблица 2. Расчет оптимального числа оборотов гребных винтов

1	n, об/мин (задано)	350	360	370	380	390	400	410	420
2	A_E/A_{Omin}	0,609	0,615	0,620	0,625	0,630	0,633	0,637	0,640
3	P/D_p	1,016	0,973	0,933	0,895	0,860	0,828	0,797	0,768
4	A_E/A_O	0,650	0,650	0,650	0,650	0,650	0,650	0,650	0,650
5	K_T	0,4522	0,4325	0,4137	0,3959	0,3790	0,3629	0,3477	0,3332
6	K_O	0,0677	0,0622	0,0573	0,0529	0,0489	0,0453	0,0421	0,0392
7	T_p , кН	0,4522	0,4325	0,4137	0,3959	0,3790	0,3629	0,3477	0,3332
8	N_E , кВт	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0	221,0
9	N_E л. с.	300,6	300,6	300,6	300,6	300,6	300,6	300,6	300,6
10	T_E , т	2,928	2,962	2,993	3,021	3,046	3,069	3,089	3,106
11	$T_{E\Sigma}$, т	5,855	5,924	5,986	6,042	6,092	6,137	6,177	6,213

теристики ГВ буксира TG04 приняты следующими (на основе ГВ серии «В»):

- диаметр $D_p = 1,200$ м
- шаговое отношение $P/D_p = 0,803$
- дисковое отношение $A_E/A_O = 0,650$
- число лопастей $z = 4$

Для расчета уточненных тяговых характеристик буксира необходимо учесть взаимодействие между ГВ и корпусом.

Коэффициент попутного потока для ГВ в тоннелях на судне рассматриваемого типа может быть получен по формуле Э.Э. Папмеля:

$$w = 0,11 + \frac{0,16}{x} C_B^x \sqrt[3]{\frac{\nabla}{T}} = 0,247,$$

где $x = 2$ — число ГВ; $C_B = 0,603$ — коэффициент общей полноты; $\nabla = 120,4$ м³ — объемное водоизмещение; $T = 1,80$ м — осадка.

Коэффициент попутного потока принимается постоянным при разных скоростях и режимах работы ГВ.

Согласно рекомендациям [1], для ГВ, расположенных в тоннелях и полностью погруженных под ватерлинию, коэффициент засасывания приблизительно равен коэффициенту попутного потока. Примем $t_p = w = 0,247$ в режиме свободного хода буксира при скорости 10 уз.

Зависимость коэффициента засасывания t_p от режима работы ГВ установлена Э.Э. Папмелем в следующем виде:

$$t_p = \frac{t_0}{1 - \frac{J}{P_1/D_p}}, \quad (1)$$

где J — относительная поступь ГВ; P_1/D_p — шаговое отношение нулевого упора, в нашем случае $P_1/D_p = 0,866$.

Пользуясь зависимостью (1), можно определить коэффициент засасывания на швартовах t_{p0} , подставив в нее известные величины $t_p = 0,247$, $P_1/D_p = 0,866$ и поступь ГВ при скорости 10 уз и номинальном числе оборотов $J = 0,475$. Величина коэффициента засасывания на швартовах составляет $t_{p0} = 0,110$.

С учетом приведенных выше характеристик ГВ и коэффициентов взаимодействия системы «корпус–двигатель» получено тяговое усилие буксира при различных скоростях от 0 (на швартовах) до 10 уз и различных числах оборотов ГВ от 310 до 408 об/мин (табл. 3, рис. 3).

Для получения скорости свободного хода буксира или скорости с возом на основе данных табл. 3 и рис. 3 необходимо задать сопротивление буксира и воза с учетом коэффициента в зависимости от скорости. Нагрузка ГД достигает максимального значения 100 % на швартовах.

Тяга буксира на швартовах при номинальных числах оборотов гребных

винтов согласно расчетам достигает 6,10 т.

Движение судна обеспечивается двумя открытыми литыми стальными четырехлопастными винтами фиксированного шага диаметром 1200 мм, с шаговым отношением 0,793 и дисковым отношением 0,65, с приводом от двух главных двигателей, мощностью 221 кВт каждый, через реверс-редукторы. Предусмотрена возможность работы двигателей в течение 1 часа с нагрузкой 110% номинальной мощности.

Скорость при осадке по КВЛ 1,8 м и 90% МДМ составляет 10,2 уз.

Маневренные характеристики буксира обеспечиваются двумя балансирными двухопорными рулями, установленными по бортам. Перья рулей выполнены обтекаемой формы, а для защиты каждого руля от повреждений при эксплуатации в ледовых условиях предусмотрен ледовый «зуб».

Для перекладки рулей в румпельном отделении установлены две независимые электрогидравлические рулевые машины, обеспечивающие как одновременную (синхронную), так и отдельную перекладку рулей на любой борт. Привод рулевых машин обеспечивает перекладку рулей с 35° одного борта на 35° другого борта на полном переднем ходу за время не более 22 секунд.

Доковый вес буксира составил около 88 т. Для достижения такой массы был принят расчетный срок службы

Таблица 3. Тяговое усилие T_{Σ} , т, на различных режимах

n, об/мин	V_{Σ} , уз							
	0,00	1,43	2,86	4,29	5,71	7,14	8,57	10,00
408	6,10	5,71	5,28	4,82	4,33	3,80	3,25	2,68
390	5,57	5,20	4,79	4,34	3,87	3,36	2,83	2,27
370	5,02	4,66	4,27	3,84	3,38	2,90	2,39	1,85
350	4,49	4,15	3,78	3,37	2,93	2,47	1,97	1,46
330	3,99	3,67	3,32	2,93	2,51	2,06	1,59	1,10
310	3,52	3,22	2,88	2,51	2,11	1,69	1,24	0,77

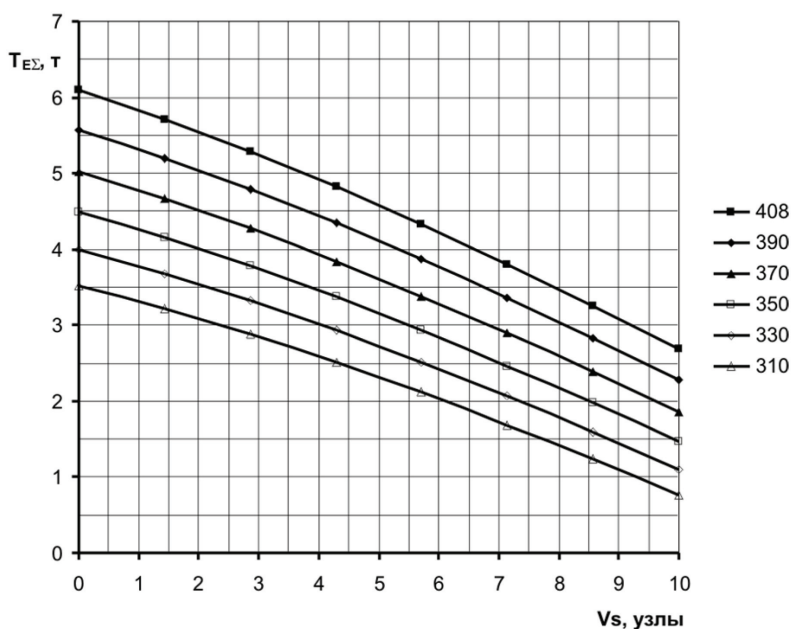


Рис. 3. Тяговое усилие $T_{E\Sigma}$ на различных режимах

корпуса судна 15 лет. Корпус судна, выполненного из стали категории *D*, набран по поперечной системе набора со шпацией 400 мм. При этом флоры расположены на каждой шпации. Толщины наружной обшивки, палубы и переборок рубки (толщины от 4 до 9 мм) приняты из условий прочности и требований РРР.

На шп. 6, 10, 23, 39 были установлены главные водонепроницаемые поперечные переборки, разделяющие корпус на пять непроницаемых отсеков. Переборки плоской конструкции, толщина обшивки 4,5 мм. Стойки переборок выполнены из несимметричных полособульбов № 8 и сварного таврового профиля 4×150/8×80 мм.

Судно имеет форштевень ледокольной формы из листа сечением 30×125 мм, подкрепленного поперечным набором и сварным тавровым профилем размером s6/8×80 мм. Бортовой набор выполнен из несимметричных полособульбов № 8 (шпангоуты) и сварного таврового профиля 5×250/8×80 мм

(рамные шпангоуты и стрингер). В свою очередь флоры и кильсоны выполнены из сварного таврового профиля с толщиной стенки 5 мм и пояском 8×80 мм вне машинного отделения и 6 мм в машинном отделении. Палубный набор выполнен из несимметричных полособульбов № 8 (бимсы) и сварного таврового профиля 4×200/8×80 мм (рамные бимсы и карлингсы). В местах установки якорно-швартовного и буксирного оборудования установлены утолщенные листы и соответствующие подкрепления.

Наприподнятой в носовой части главной палубе расположена рулевая рубка, а также установлена электрическая якорно-швартовно-буксирная лебедка с тяговым усилием 75 кН и буксирный битенг, обеспечивающие возможность выполнения операций по кантовке различных объектов.

Номинальное тяговое усилие на буксирном барабане лебедки 50 кН максимальное тяговое усилие 75 кН, на первом слое. Канатоемкость буксирного

барабана лебедки — 100 м синтетического каната диаметром 48 мм.

Автономность судна по запасам топлива составляет 3,3 суток воды — 4,8 суток. Запасы топлива размещаются в цистернах, которые расположены в районе МО в диптанке.

В средней части судна на палубе расположены аккумуляторный ящик и помещение зарядного устройства, а в корпусе размещены встроенные цистерны запаса топлива и вкладная цистерна запаса питьевой воды. Цистерны запаса топлива выполнены в соответствии с требованиями Правил РРР без соприкосания с наружной обшивкой.

В кормовой оконечности судна расположено МО с капом высотой 900 мм, а также шкиперская кладовая и румпельное отделение.

Для выполнения буксировочных операций на капе МО установлен буксирный гак с номинальным тяговым усилием 70 кН, автоматической и дистанционной ручной отдачей буксирного каната.

При выполнении буксировок на гаке возможна работа как со стальным, так и синтетическим буксирным канатом.

Для предотвращения повреждений корпуса при выполнении буксировочных и кантовочных операций по бортам судна установлен коробчатый привальный брус из листа толщиной 10 мм, в носовой и кормовой оконечностях установлен резиновый кранец из цилиндрического профиля.

Вспомогательная энергетическая установка в составе двух дизель-генераторов электрической мощностью 62 кВт каждый обеспечивает судно электроэнергией, а также позволяет при необходимости обеспечить выдачу электропитания на берег или другой плавучий объект.

Предусматривается возможность вывода судна из эксплуатации с его вмержанием в лед на 6 месяцев без прогрева МО и бытовых помещений.

Ввод в эксплуатацию после зимнего отстоя осуществляется при отрицательных температурах окружающего воздуха (до -20°C) и положительных (созданных электрическим воздухоподогревателем) в МО.

Буксир «Портовый 1» (строительный номер 701) был заложен на заводе «Нижегородский Теплоход» 12.09.08 г., спущен на воду 27.08.09 г., сдан в эксплуатацию 17.09.08 г. Проведенные в сентябре 2009 года на Волге испытания и первая навигация 2009–2010 годов в условиях порта Дудинка полностью подтвердили заложенные в буксир решения.

ВЫВОДЫ

Таким образом, были обоснованы основные характеристики нового речного буксира для выполнения работ в порту Дудинка, включая рейдо-маневровые работы с речными судами, плавкранами; вспомогательные работы по постановке к причалу, отводу от причала, кантовке барж и судов; расстановка судов в отстойном затоне в период весеннего паводка; ледокольные работы в р. Дудинка в осенний период; расстановка несамоходного флота на зимний отстой (установка на удалении от причала в осеннем льду с удержанием до вмораживания). Буксир «Портовый-1» проекта TG04 заменил в составе вспомогательного флота «ГМК «Норильский никель» в порту Дудинка буксир проекта 1427 постройки 1969 года. Планируется, что по результатам эксплуатации «Портового-1» в 2010 году будет принято решение о строительстве следующих судов серии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Басин, А.М.** Гидродинамика судна [Текст] / А. М. Басин, В. Н. Анфимов. — Л. : Речной транспорт, 1961. — 684 с.
- [2] **Горбунов, Ю.В.** Суда для малых рек [Текст] / Ю. В. Горбунов, В. И. Любимов, Б. П. Гамзин. — М. : Транспорт, 1990. — 196 с.
- [3] **Гринбаум, А.Ф.** Способ определения основных элементов буксирного судна [Текст] / А. Ф. Гринбаум. — Судостроение. — 1980. — № 12. — С. 5–8.
- [4] **Гринбаум, А.Ф.** Буксиры, толкачи и баржи для Сибири [Текст] / А. Ф. Гринбаум, В. П. Лобастов, И. В. Сергеев. — Судостроение. — 1987. — №9. — С. 6–10.
- [5] **Егоров, Г.В.** Оценка потребностей Российской Федерации в новых судах различных типов. Перспективы отечественного судостроения [Текст] / Г. В. Егоров // Судостроение и судоремонт. — 2008. — № 3 (29). — С. 42–49.
- [6] **Егоров, Г.В.** Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска [Текст] / Г. В. Егоров. — С.Пб. : Судостроение, 2007. — 384 с.
- [7] **Егоров, Г.В.** Опыт использования CFD-моделирования при проектировании пропульсивного комплекса судна [Текст] / Г. В. Егоров, Б. Н. Станков, А. В. Печенюк // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2007. — № 2. — С. 3–11.
- [8] **Зайцев, И.А.** Энергетические установки буксирных судов [Текст] / И. А. Зайцев. — Л. : Судостроение, 1972. — 184 с.
- [9] **Лесюков, В.А.** Оптимизация характеристик буксиров и толкачей внутреннего плавания [Текст] / В. А. Лесюков. — Судостроение. — 1975. — № 8. — С. 8–10.
- [10] **Павленко, В.Г.** Грузовые транспортные средства для малых рек [Текст] / В. Г. Павленко, Б. М. Сахновский, Л. Н. Врублевская. — Л. : Судостроение, 1985. — 288 с.