

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРКТИЧЕСКИХ СУДОВ СНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ ГРУЗОПОТОКА ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

А. А. Кондратенко, О. В. Таровик

ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2019 г.

Выполнено исследование влияния структуры грузопотока и распределения вместимости судна на эффективность флота снабжения в Арктике. Для этого разработаны детализированная проектная модель судна снабжения и алгоритм ситуационного планирования рейсов. В качестве расчетного примера рассмотрена система круглогодичного снабжения группы платформ в Карском море. Обоснован вывод о необходимости учета структуры грузопотока как в процессе анализа работы самой системы, так и при проектировании отдельных судов снабжения.

Ключевые слова: суда снабжения, арктический флот, проектирование судов, планирование работы флота, структура грузопотока, оптимизация флота.

Введение

В настоящее время в мире накоплен значительный опыт проектирования и эксплуатации судов снабжения, а также планирования их работы в условиях чистой воды. Однако перед отечественной нефтегазодобывающей отраслью стоит проблема освоения месторождений арктического региона со сложными ледовыми условиями. Имеющийся отечественный опыт проектирования и эксплуатации судов снабжения в ледовых условиях Баренцева и Каспийского морей весьма ограничен, кроме того, ледовые условия этих регионов являются относительно легкими. Поэтому вопросы проектного анализа арктических судов снабжения и моделирования их эксплуатации требуют дальнейшего исследования.

Одна из основных методических сложностей, возникающих при анализе систем снабжения, заключается в возможности судов одновременно перевозить разнотипные грузы. При решении задач проектирования судна это ставит вопрос о наиболее рациональном распределении полезной вместимости корпуса по разным грузовым пространствам, а при планировании загрузки судов в рейсах, определении состава флота и моделировании его работы вынуждает учитывать множественность типов грузов. Очевидно, что структура грузопотока снабжения

оказывает существенное влияние на результаты решения этих задач. Вместе с тем распределение грузопотока снабжения по типам грузов может варьироваться для различных месторождений. Приведем показательный пример, относящийся к технологии производства и транспортировки бурового раствора (табл. 1).

Типичная для мировой практики система снабжения обеспечивает работу множества платформ (5—15 единиц), расположенных компактно и находящихся на небольшом удалении от берега. Условия бурения и добычи в пределах такого региона практически идентичны, а суда работают на коротком плече, совершая круговой рейс за несколько дней. Это позволяет производить буровой раствор централизованно на береговом заводе и затем доставлять его на платформы судами снабжения в специализированных подпалубных танках. Такая логистическая схема обусловлена тем, что береговое производство дешевле морского, а короткое плечо перевозок и стабильное время рейса по чистой воде гарантируют сохранение свойств бурового раствора до момента его доставки на платформу без применения специальных мер. Однако для большинства удаленных месторождений российской Арктики характерны существенные отклонения от описанной типовой схемы. Значительные расстояния между морскими нефтегазовыми объектами и различные

Таблица 1. Альтернативные технологии производства и транспортировки бурового раствора

Характеристика	Перевозка жидкого бурового раствора	Перевозка сухих компонентов для бурового раствора
Конфигурация снабжаемых платформ	Множество компактно расположенных платформ в регионе с одинаковыми условиями бурения	Отдельно расположенная платформа, снабжаемая индивидуально
Удаление от берега	70—100 миль	100—1000 миль
Место производства бурового раствора	Централизованное производство на береговом заводе	Производство на платформе из воды и сухих компонентов
Способ транспортировки бурового раствора	В жидком виде в танках судов снабжения	В контейнерах на палубе судна снабжения
Особенность грузопотока	Умеренное количество палубных грузов	Повышенное количество палубных грузов
Утилизация грузовых пространств существующих судов снабжения	Нормальная	Неэффективная

геологические условия районов добычи, большие дистанции до базы снабжения и возможность увеличения длительности рейса из-за ледовых условий — все это приводит к тому, что буровой раствор рациональнее производить на платформе. В этом случае сухие компоненты для производства бурового раствора упаковываются на базе снабжения в контейнеры, которые доставляются судами на платформу. Это вызывает значительный рост количества грузов, перевозимых на палубе, и влияет на утилизацию грузовых пространств судна и эффективность флота в целом.

В настоящей статье описан подход к проектированию арктической системы снабжения с учетом не только ледовых условий, но и структуры грузопотока, а также приведен расчетный пример вариантной оптимизации состава флота. В качестве варьируемых факторов помимо структуры грузопотока рассматриваются: распределение полезного пространства судна по типам грузов, класс ледовых усилений, дедвейт и тип судна (PSV — снабженец или AHTS — буксир завозчик якорей). Актуальность рассмотрения типа судна как варьируемого параметра заключается в том, что для выполнения функций судов снабжения в отечественной и мировой практике зачастую используются завозчики якорей, что обусловлено условиями фрахтового рынка. При этом с технической точки зрения завозчики якорей, как и любое универсальное средство, уступают по транспортной эффективности специализированным снабженцам. В условиях чистой воды преимущества PSV проявляются наиболее очевидно: мощность двигателя AHTS, выбираемая из условия буксировки якорей, может в несколько раз превышать мощность PSV с таким же водоизмещением, негативно отражаясь на полезной вместимости.

Описание подхода к проектированию и анализу систем снабжения

Анализ исследований в области проектирования судов снабжения и моделирования их работы представлен в [1], где сделан вывод, что в настоящее время отсутствуют подходы, позволяющие анализировать влияние структуры грузопотока снабжения и распределения вместимости судна на эффективность работы флота. Для выполнения такого анализа в рамках данного исследования была создана специальная модель, объединяющая элементы из различных областей — детализированную параметрическую модель судна и алгоритм ситуационного логистического планирования. Это позволило исследовать как судостроительные, так и логистические аспекты работы системы снабжения, что необходимо для корректного учета влияния структуры грузопотока. На рис. 1 показаны основные этапы вычислений предлагаемого подхода. Входными параметрами являются:

- динамика потребления грузов на платформе;
- оптимизируемые характеристики судов снабжения;
- вместимости платформы по типам грузов;
- дистанция от базы снабжения до платформы;
- параметры ледовых условий на маршруте движения;
- динамика длительности операций судов снабжения в порту и у платформы в течение года.

Описание грузопотока производится с учетом динамики его изменения по каждому типу груза в течение всего моделируемого периода работы системы. Для описания площадных грузов был принят подход на основе условного контейнера [2], масса, площадь и объем которого являются усредненными величинами, которые отображают соотношение типов реально используемой тары и структуру грузопотока (трубы в связках, шламовые, рефрижератор-

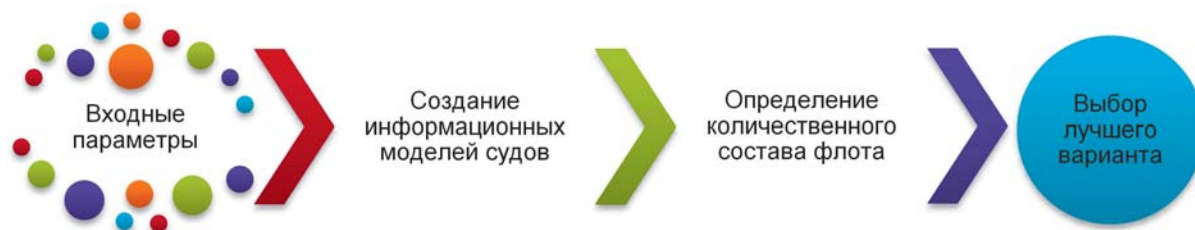


Рис. 1. Схема вычислительного процесса при проектировании системы снабжения
Fig. 1. General flow-chart of the calculation process of supply system design

ные и офшорные контейнеры, контейнеры для твердых бытовых отходов и др.). Также были выделены четыре обобщенных типа массовых грузов: порошковые грузы, буровой раствор, топливо и вода. Для перевозки каждого из них используется только одна определенная группа грузовых пространств судна. В настоящей работе для определения состава флота используется грузопоток в направлении «на платформу», поскольку обратный грузопоток всегда оказывается меньше и обеспечивается автоматически.

В качестве оптимизируемых параметров выступают основные характеристики судна, которые являются входными данными при генерации информационных моделей альтернативных вариантов судов. Флот снабжения полагается состоящим из судов одного проекта. Объект обслуживания описывается через его грузовые пространства, характеризующиеся вместимостями и площадями для размещения грузов различных типов. В рамках настоящей работы рассматривается снабжение одной платформы, поскольку это наиболее характерно для российской Арктики и позволяет упростить модель. Маршрут до платформы характеризуется только дистанцией и ледовыми условиями, так как влиянием ветра и волнения на средние скорости движения в Арктике можно пренебречь. Особенности ветро-волновых условий в районе платформы, а также ограничения ее доступности по погоде учтены косвенно путем задания динамики изменения длительности операций судна в порту и у объекта обслуживания в течение года.

Вторым этапом вычислительной схемы на рис. 1 является создание информационных моделей для всех вариантов рассматриваемых судов снабжения на основе заданных значений основных характеристик. Для этого используется специализированная расчетная модель судна, имеющая высокую степень детализации и учитывающая все важные качества судна как сложной технической системы. Создание модели судна с высокой детализацией обусловлено необходимостью учета большого количества факторов при оценке влияния основных характеристик судна на его интегральные проектные показатели (вместимости, площадь грузовой палубы, расходы топлива, грузоподъемность), которые определяют эффективность работы судна в составе транспортной системы. Использование непрерывной расчет-

ной модели позволяет построить ряд судов в широком диапазоне изменения их основных характеристик для дальнейшего анализа.

Полученные информационные модели передаются на третий этап вычислительной схемы, на котором для каждого рассматриваемого типоразмера определяется потребное количество судов. Для решения этой задачи был разработан оригинальный эвристический алгоритм планирования работы флота и формирования расписаний рейсов судов снабжения. Необходимость создания собственного алгоритма обусловлена тем, что существующие подходы к планированию учитывают только палубные грузы, кроме того, они базируются на допущении о регулярной работе флота согласно недельному расписанию [1]. Это ограничивает их применение в случае необходимости учета структуры грузопотока и неравномерности длительности рейса в течение года.

На завершающем этапе вычислительной схемы для каждой конфигурации флота выполняется оценка экономической эффективности, что позволяет выбрать компоновку флота с наилучшими показателями.

Проектная модель для определения характеристик судов снабжения

Перед разработкой расчетной модели была собрана и проанализирована база данных, содержащая более 100 параметров для 115 оригинальных (только одно судно из серии) современных (постройки 1997—2017 гг.) проектов PSV и AHTS. Эти данные послужили основой для формирования проектной модели судна.

Перечень входных параметров модели и диапазоны их варьирования представлены в табл. 2. Расчетная модель позволяет определять характеристики как PSV, так и AHTS. Минимальные и максимальные значения главных размерений (L_{pp} , B , d , D) приняты на основании характеристик существующего флота. Максимальное значение проектной скорости хода на чистой воде V_s соответствует числу Фруда $Fn = 0,35$. Классы ледовых усилений C задаются согласно Правилам Российского морского регистра судоходства (РС); для каждого класса предусмотрен характерный диапазон допустимых значений ледопроеходимости.

Таблица 2. Перечень входных параметров расчетной модели судна

№	Параметр	Символ	min	max
1	Тип судна	PSV/AHTS		
2	Длина между перпендикулярами, м	L_{pp}	50	100
3	Ширина на миделе, м	B	13	25
4	Осадка в грузу, м	D	4	9
5	Высота борта на миделе, м	D	5	13,5
5	Скорость на чистой воде, $у_3$	v_s	8	$\frac{0,35}{0,5144} \sqrt{L_{pp} g}$
7	Класс ледовых усилений	C	—	Arc8
8	Ледопроходимость, м		0	2,5
9	Коэффициент общей полноты	C_b	0,58	0,78
10	Распределение полезной вместимости по типам груза			
11	Наличие вертолетной площадки			



Рис. 2. Схема расчетной модели судна снабжения
Fig. 2. Flow-chart of the PSV calculation model

Расчетный алгоритм проектной модели судна показан на рис. 2. В силу ограничений объема статьи далее приводятся только основные расчетные соотношения, а полный вариант модели и детальные по-

яснения можно найти в тексте диссертации первого автора настоящей работы¹.

¹ <http://www.smt.ru/ru/viewdisser/64/>.

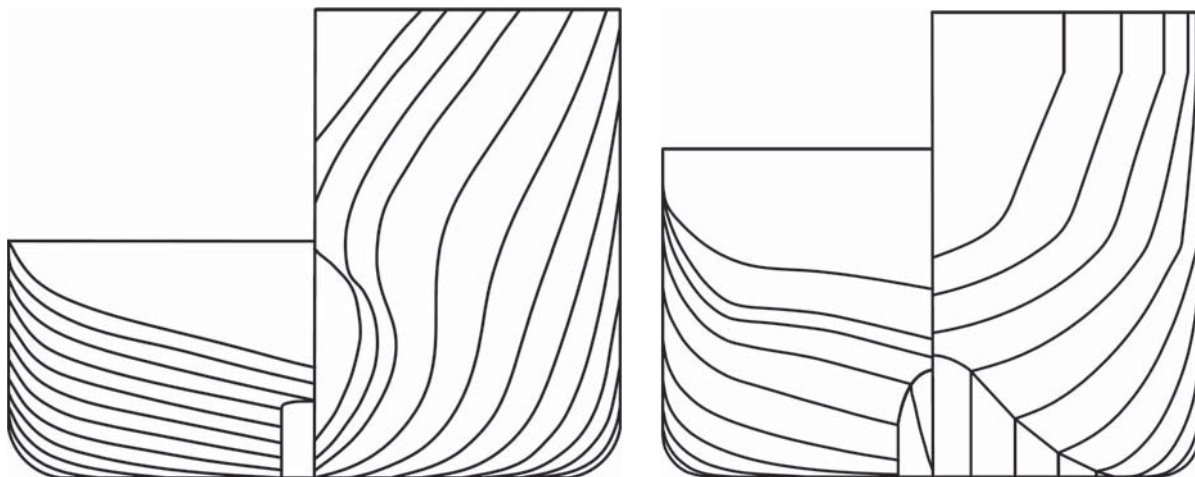


Рис. 3. Примеры теоретических чертежей судов-прототипов с низким (слева) и высоким (справа) ледовым классом
Fig. 3. Examples of lines drawings of prototype ships with low (on the left) and high (on the right) ice class

Первым шагом после анализа корректности ввода данных является проверка выполнения требований к высоте надводного борта по Правилам о грузовой марке.

Генерация теоретического чертежа производится интерполяционным методом путем перестроения обводов судов-прототипов. На рис. 3 представлены примеры теоретических чертежей судов-прототипов.

После генерации теоретического чертежа для судов с высоким ледовым классом выполняется проверка соответствия геометрии корпуса рекомендациям Правил РС, причем полагается, что не прошедшие такую проверку суда далее не рассматриваются. Затем путем численного интегрирования таблицы ординат производится расчет гидростатических кривых, площадей шпангоутов, ватерлиний и смоченной поверхности, а также объемов и площадей внутри корпуса, которые необходимы для последующих вычислений.

Далее производится оценка основных характеристик движительно-рулевого комплекса (ДРК) и подруливающих устройств (ПУ). Все существующие суда обеспечения имеют два винта, что и принимается в модели по умолчанию, однако при необходимости обеспечения высокой ледопроеходимости применяется трехвинтовая схема. Диаметр гребного винта D_p (м) принимается на основе статистических данных:

$D_p = 0,48d$ — для судов типа PSV с ледовым классом Arc4 и менее;

$D_p = 0,55d + 0,33$ — для всех судов типа AHTS и судов типа PSV с классом Arc5 и более.

Для судов PSV предусматриваются винто-рулевые колонки (ВРК) с электрической передачей мощности на валы и открытыми гребными винтами фиксированного (для судов класса Arc5 и более) или регулируемого шага. Для судов типа AHTS с ледовым классом Arc4 и менее предполагаются прямая передача мощности на валы и винты регулируемого шага в круговых насадках.

Согласно сложившейся практике число ПУ для судов, оборудованных ВРК, принимается равным двум, в противном случае — четырем. Необходимую тягу T_E одного ПУ можно оценить по рекомендациям компании «Wartsila», которые хорошо согласуются со статистическими данными:

$$T_E = 0,05(S_A + 3S_W), \text{ т}, \quad (1)$$

где $S_A = (D - d)L_{pp} + 0,5H_{st}(L_{wl} + L_{max}) + 3,6H_{st}L_{fore}$ — площадь проекции надводной части судна на диаметральную плоскость, м^2 , где $H_{st} = 2,7$ м — высота яруса надстройки; L_{wl} — длина судна по ватерлинии, м; L_{max} — максимальная длина судна, м; $L_{fore} = 0,35L_{pp}$ — среднестатистическая длина надстройки, м; $S_W = L_{wl}d$ — площадь проекции подводной части на диаметральную плоскость, м^2 .

Мощность ПУ N_{ir} , необходимую для обеспечения тяги T_E , можно определить по соотношению (2), в котором первый элемент в фигурных скобках принят по данным работы [3, с. 410], а второй получен в настоящем исследовании на основе статистических данных:

$$N_{ir} = \max \left\{ 7,27T_E; 25(L_{pp} - 43) \right\}, \text{ кВт}. \quad (2)$$

Следующим этапом вычислений является расчет буксировочного сопротивления на чистой воде. Для судов с ледовым классом Arc4 и менее используется универсальная методика Холтропа — Меннона [4], продемонстрировавшая хорошее согласование с имеющимися данными модельных испытаний. Однако для судов снабжения с классом Arc5 и выше эта методика занижает остаточное сопротивление ориентировочно на 15—25%. Более точные результаты достигаются при использовании метода О. В. Дубровина [5, с. 114], предназначенного для ледоколов и основанного на пересчете остаточного сопротивления судна-прототипа с учетом влияния

Таблица 3. Регрессионные коэффициенты в зависимостях (4)

Коэффициент	Значения коэффициента a_{ij}				Диапазон чисел Фруда
	a_{i3}	a_{i2}	a_{i1}	a_{i0}	
k_1	0	-222,7	100,6	-4,800	$0,10 \leq Fn \leq 0,20$
	0	-113,5	37,21	5,500	$0,20 < Fn \leq 0,35$
k_2	-12,06	-0,756	1,162	0,226	$0,10 \leq Fn \leq 0,35$
k_3	37,15	35,04	-15,16	-1,081	
k_4	-0,006	-97,95	34,38	2,133	
k_5	0	0	-0,705	-0,063	$0,10 \leq Fn \leq 0,15$
	0	0,282	1,859	-0,454	$0,15 < Fn \leq 0,25$
	0	-0,222	0,200	-0,008	$0,25 < Fn \leq 0,35$
k_6	0	0	10,88	0,976	$0,10 \leq Fn \leq 0,15$
	0	1,130	-29,45	7,000	$0,15 < Fn \leq 0,25$
	0	7,539	-5,575	0,630	$0,25 < Fn \leq 0,35$
k_7	0	0	-56,52	-5,184	$0,10 \leq Fn \leq 0,15$
	0	-22,05	150,1	-35,68	$0,15 < Fn \leq 0,25$
	0	-51,92	37,11	-5,567	$0,25 < Fn \leq 0,35$
k_8	0	0	98,09	10,28	$0,10 \leq Fn \leq 0,15$
	—	52,54	-249,1	61,17	$0,15 < Fn \leq 0,25$
	—	99,23	-71,19	13,77	$0,25 < Fn \leq 0,35$

параметров L_{wl}/B , B/d и C_b . Коэффициент остаточного сопротивления C_R рассчитывается по формуле

$$C_R = C_{R_0} k_{C_b} k_{B/d} k_{L/B}, \quad (3)$$

где

$k_{C_b} = \chi_{C_b} / \chi_{C_b0}$; $k_{B/d} = \chi_{B/d} / \chi_{B/d0}$; $k_{L/B} = \chi_{L/B} / \chi_{L/B0}$ — коэффициенты влияния формы корпуса; C_{R_0} — коэффициент остаточного сопротивления судна-прототипа; χ_i — вспомогательные коэффициенты (индекс «0» соответствует судну-прототипу), определяемые в оригинальной методике по графикам и аппроксимированные в настоящей работе выражениями:

$$\begin{cases} \chi_{C_b} = k_1 (C_b + 0,496) + 0,983, \\ \chi_{B/d} = k_2 (B/d)^2 + k_3 (B/d) + k_4, \\ \chi_{L/B} = k_5 (L_{wl}/B)^3 + k_6 (L_{wl}/B)^2 + k_7 (L_{wl}/B) + k_8, \end{cases} \quad (4)$$

где $k_i = a_{i3}Fn^3 + a_{i2}Fn^2 + a_{i1}Fn + a_{i0}$; значения коэффициентов регрессии a_{ij} приведены в табл. 3.

В качестве прототипа использовано судно обеспечения ледового плавания, характеризующееся зна-

чениями $L_{wi} = 81,4$ м, $B = 18,0$ м, $d = 7,5$ м, $C_b = 0,696$, для которого

$$C_{R_0} = (233,25Fn^2 - 77,833Fn + 10,843)10^{-3}. \quad (5)$$

Расчет полного сопротивления судна на чистой воде производится путем дополнения остаточного сопротивления недостающими составляющими по методике [4].

Зная диаметр гребных винтов, тип ДРК и сопротивление на проектной скорости хода, можно произвести подбор винта на основе результатов серийных испытаний. Для этого в расчетной модели реализован автоматический алгоритм выбора четырехлопастных гребных винтов по следующим сериям: М4-65 и М4-85 [6, с. 477] — для судов с ледовым классом Arc4 и менее; ледовые винты [7] — для судов класса Arc5 и выше, аппроксимация кривых действия которых выполнена в рамках настоящего исследования. Коэффициенты влияния корпуса w_i и t рассчитываются по соотношениям, приведенным в [8, с. 267], с учетом корректировок, выполненных применительно к судам снабжения:

$$w_i = k_w 0,165 C_b^{2/6} \sqrt[6]{L_{wl} B d C_b} / \sqrt{D_p} - 0,1 C_b (Fn - 0,2),$$

$$t = k_t (0,7w_t + 0,06), \quad (6)$$

где k_w и k_t — коэффициенты, принимаемые на основе имеющихся результатов модельных испытаний: $k_w = k_t = 1$ — для судов класса Arc4 и менее; $k_w = 0,6$, $k_t = 2,5$ — для прочих судов.

Принцип подбора наилучшего винта основан на поиске оптимального значения относительной поступи J_{opt} и шагового отношения $(P/D_p)_{opt}$, обеспечивающих максимальный КПД винта при заданной величине коэффициента нагрузки винта по упору K_{DT} . Функциональные зависимости J_{opt} и $(P/D_p)_{opt}$ от K_{DT} для ледовых и неледовых винтов получены в рамках настоящей работы. В качестве расчетного режима во всех случаях принимается движение по чистой воде. Учитывается ограничение минимально допустимого дискового отношения A_E/A_0 по условию отсутствия второй стадии кавитации.

Потребная мощность на гребных винтах P_d определяется как максимальное из значений, рассчитанных для нескольких расчетных случаев:

- движение по чистой воде (P_{d1});
- движение во льдах предельной толщины (P_{d2});
- подрыв якоря судном типа АНТС (P_{d3});
- минимальная мощность для судов ледового класса по Правилам РС (P_{d4}).

При расчете мощности P_{d1} на валах при движении по чистой воде учитываются корректировки КПД винтов за счет следующих факторов: использование поворотной колонки или классического вала, тип винта, наличие или отсутствие круговой насадки. Для расчета сопротивления судна в сплошном льду используется методика Г. Линдквиста [9], скорость, соответствующая предельной ледопроницаемости, принята равной 2 уз, а переход от ледового сопротивления к потребной мощности на валах P_{d2} производится по рекомендациям К. Е. Сазонова [10, с. 153]. Значение мощности P_{d3} определяется по формуле

$$P_{d3} = 81,72 T_{BP} / k_{BP}, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где $T_{BP} = T_{ah} + p_{ch} l_{ch}$ — потребная тяга на швартовом режиме для подрыва якоря, т; $p_{ch} = 0,11$ т/м — удельная масса якорного троса в воде; T_{ah} — предельная держащая сила якоря, т; l_{ch} — длина якорного троса (значения T_{ah} и l_{ch} принимаются для каждого случая индивидуально экспертным путем); k_{BP} — коэффициент, зависящий от конфигурации ДРК, значение которого принято равным [11]: 1,1 и 1,2 для судов с винтами фиксированного шага без круговой насадки и с насадкой соответственно, 1,25 и 1,4 для судов с винтами регулируемого шага без круговой насадки и с насадкой соответственно.

Суммарная мощность энергетической установки N определяется с учетом типа ДРК, мощности судовых потребителей и мощности лебедок для заводки якорей. В случае прямой передачи мощности предусмотрена установка дизель-генераторов и валогенератора для питания ПУ. Для судов с механической передачей мощности на винты значение N можно оценить по формуле (8), а в случае электрической передачи — по формуле (9).

$$N = \frac{1}{0,9} P_d / \eta_0, \text{ кВт}, \quad (8)$$

где $\eta_0 = 0,97$ — коэффициент передачи мощности через z-редуктор, 0,9 — коэффициент запаса;

$$N = \frac{1}{0,9} \left(\frac{P_{hl}}{\eta_1} + \frac{P_d}{\eta_2} \right), \text{ кВт}, \quad (9)$$

где $P_{hl} = 3,093 \Delta^{0,66}$ — мощность судовых потребителей на ходовом режиме, кВт; Δ — водоизмещение судна, т; $\eta_1 = 0,93$ — коэффициент передачи энергии к судовым потребителям; $\eta_2 = 0,87$ — коэффициент передачи мощности от двигателей на гребные валы.

На следующем этапе вычислений производятся оценки объемов и площадей корпуса судна, при этом принимается схема общего расположения, приведенная на рис. 4. Далее все объемы вычисляются и задаются в кубических метрах, площади — в квадратных метрах, а линейные размеры — в метрах.

Определение суммарного объема грузовой зоны до верхней палубы (ВП) выполняется путем вычитания объемов негрузовых помещений из полного объема корпуса W_{hullP} , который рассчитывается путем численного интегрирования теоретического чертежа:

$$W_{C_0} = k_W (W_{hull} + W_{fore} - W_{er} - W_{sr} - W_{tr} - W_{roll}), \text{ м}^3, \quad (10)$$

где W_{fore} — объем балластной цистерны в надстройке бака, определяемый интегрированием теоретического чертежа при условии, что высота твиндека равна высоте яруса надстройки $H_{st} = 2,7$ м, а длина форпика $L_f = 0,05 L_{pp} + 1,5$;

$W_{er} = (0,018 N + 60)(D - h_{db})$ — объем помещений машинного отделения (МО), центрального пульта управления (ЦПУ) и главного распределительного щита (ГРЩ), где h_{db} — высота двойного дна, принимаемая как минимально допустимое значение по Правилам РС;

$W_{sr} = (2,77 L_{pp} - 124)(D - Z_{tw})$ — объем помещения ВРК/рулевого устройства,

где $Z_{tw} = \max(H_{st}; 0,635 \ln N - 2,18) + h_{db}$ — высота твиндека с учетом минимальной высоты МО (при $D - Z_{tw} < H_{st}$ считается, что твиндек отсутствует);

$W_{tr} = L_{tr} B_{tr} H_{tr}$ — объем помещения подруливающих устройств (ПУ), где $L_{tr} = 3,2 D_{tr}$ — длина помещения ПУ (D_{tr} — диаметр подруливающего устройства, принимаемый по каталогу исходя из его мощности N_{tr}); $B_{tr} = 0,6 L_{tr}$ — ширина помещения ПУ; $H_{tr} = \{Z_{tw}; D\}$ — высота помещения ПУ при наличии и отсутствии твиндека;

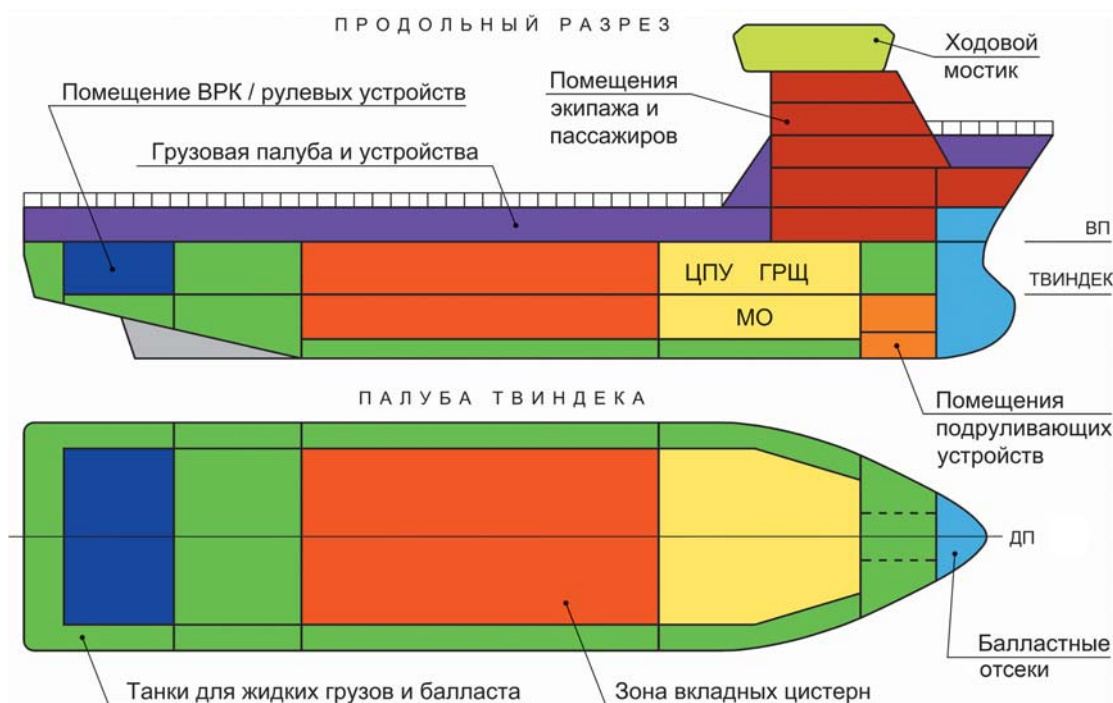


Рис. 4. Типовая схема общего расположения судна снабжения, принятая в модели
Fig. 4. Typical general arrangement of PSV taken in the model

$W_{roll} = 0,67D_{roll}^2 B_{roll}$ — объем для размещения кормового ролла на судне типа АНТС (для судов PSV данный вычет отсутствует), где $D_{roll} = 0,0121T_{BP} + 0,71$ — диаметр кормового ролла (T_{BP} — тяга АНТС на швартовном режиме для подрыва якоря, настроечный параметр, т); $B_{roll} = B/4$ — ширина кормового ролла;

$k_w = 0,9$ — понижающий коэффициент, учитывающий объемы прочих вспомогательных помещений, не учтенных напрямую.

Для перехода от значения объема грузовой зоны W_{C_0} к полезному объему для размещения груза W_C необходимо учесть коэффициенты утилизации пространства, а также объемные доли грузовых пространств каждого типа в общем полезном объеме:

$$W_C = W_{C_0} \left(\frac{C_{DW} + C_{FO} + C_{FW} + C_{MB} + C_{aux} + \frac{C_{BC}}{c_2}}{c_1} \right)^{-1}, \quad (11)$$

где C_{DW} , C_{FO} , C_{FW} , C_{MB} , C_{aux} , C_{BC} — объемные доли грузовых пространств, занимаемых цистернами для хранения буровой/балластной воды, топлива, пресной воды, бурового/солевого раствора, вспомогательными цистернами и емкостями для порошкового груза соответственно; $c_1 = 0,95$, $c_2 = 0,37$ — коэффициенты утилизации пространства для жидких и порошковых грузов.

Значительное недоиспользование пространства помещений с порошковыми грузами связано не только с геометрией вкладных емкостей и необходимостью их недозаполнения, но и с наличием

большого числа специализированных систем для обработки порошковых грузов под давлением. Отметим, что цистерны для размещения бурового и солевого растворов также являются вкладными, но на современных судах снабжения они встраиваются в другие цистерны, предназначенные для перевозки жидких грузов, что не приводит к дополнительным потерям пространства. Расчетная модель поддерживает возможность варьирования объемных долей, определяющих распределение полезного объема W_C по грузам различного типа. Полезный объем для размещения каждого груза можно рассчитать путем умножения W_C на соответствующую объемную долю. В пространствах для перевозки ГСМ учтены также топливные цистерны для собственных нужд судна, объем которых оценивается по формуле $W_{MDO} = 0,023N$, исходя из автономности 10 суток.

Алгоритм определения полезной площади S_D для размещения палубных грузов также сводится к определению (на основе теоретического чертежа) полной площади верхней палубы S_{D_0} и вычиту из нее значений прочих площадей:

$$S_D = k_S (S_{D_0} - S_{sup} - S_{ahw} - S_{DB}), \quad \text{м}^2, \quad (12)$$

где S_{sup} — площадь нижнего яруса надстройки, которая для судов типа PSV и АНТС с ледовым классом менее Arc4 составляет 220 и 300 м² соответственно, а для судов с более высоким классом — 700 м²; $S_{ahw} = 0,1235T_{WBP} + 25$ — площадь, занимаемая комплектом лебедок и сопутствующего оборудования

для выполнения заводки якорей и буксировки платформ на судах типа АНТС (для судов PSV данный вычит отсутствует), где $T_{WBP} = (10T_{BP} - 500)$ — суммарная паспортная тяга комплекта лебедок, т;

$S_{DB} = 2B_{DB}L_{DB}$ — площадь переходов в двойных фальшбортах, где $B_{DB} = 1,6$ м — ширина переходов; $L_{DB} = L_{max} - L_{fore}$ — длина переходов; L_{fore} — длина надстройки, ограничивающая площадь $S_{sup} + S_{ahw}$ (определяется путем численного интегрирования теоретического чертежа);

$k_s = 0,8$ — коэффициент использования площади, учитывающий наличие палубных устройств и невозможность размещения грузовых единиц вплотную друг к другу.

Расчетная модель для определения составляющих нагрузки построена на основании информации по распределению массы на отдельные группы для 12 судов снабжения, включая данные ЦКБ «Балтсудопроект» [12]. Водоизмещение судна порожнем разделено на 10 составляющих (все массы вычисляются в тоннах):

$$\Delta_{пор} = M_{sth} + M_{sup} + M_{ice} + M_{eq} + M_t + M_{pp} + M_{el} + M_{oth} + M_{t(AHTS)} + M_{HD}, \quad (13)$$

где $M_{sth} = 0,004(L_{max}BD)^{1,347}$ — масса основного металлического корпуса;

$M_{sup} = 0,065[H_{sup}(2B + 1,5L_{fore}) + 0,75H_{st}L_{fore}B]$ — масса надстройки, где $H_{sup} = 6H_{st}$ — высота надстройки;

M_{ice} — масса ледовых усилений (принимается по методике [13]);

$M_{eq} = 0,317(M_{sth} + M_{sup})^{0,943}$ — масса оборудования корпуса;

$M_t = (1,276 - 6 \cdot 10^{-5}L_{max}BD)(L_{max}BD)^{2/3}$ — масса судовых устройств;

$M_{pp} = 0,3508N^{0,783}$ — масса энергетической установки;

$M_{el} = 0,0576(L_{max}BD)^{0,776}$ — масса электроэнергетической системы;

$M_{oth} = (3,2 \cdot 10^{-5}L_{max}BD + 0,178)(L_{max}BD)^{2/3}$ — масса судовых систем, вооружения, запасных частей, постоянных жидких грузов, снабжения и имущества;

$M_{t(AHTS)} = 7 \cdot 10^{-4}T_{BP}^{1,832}$ — масса специализированных судовых устройств АНТС;

$M_{HD} = \{24; 70; 0\}$ — масса вертолетной площадки для случаев наличия площадки из алюминия, из стали и ее отсутствия соответственно.

Зависимости для определения координат центра тяжести различных составляющих нагрузки судна приведены в табл. 4. Начало системы координат расположено на пересечении основной плоскости, плоскости мидель-шпангоута и диаметральной плоскости; положительное направление оси абсцисс — в сторону носа.

Зная значение водоизмещения судна порожнем, можно рассчитать величину дедвейта DW и грузоподъемности M_c по соотношениям:

$$DW = \Delta - \Delta_{пор}, \quad (14)$$

$$M_c = DW - (M_{MDO} + M_{crew} + M_{aux}), \text{ т,}$$

где M_{MDO} — масса судового топлива, $M_{crew} = 2$ т — масса экипажа, $M_{aux} = C_{aux}W_{C\rho_{aux}}$ — масса веществ

Таблица 4. Зависимости для определения координат центра тяжести составляющих нагрузки масс судна порожнем

Элемент нагрузки	Абсцисса, м	Аппликата, м
M_{sth}	$x_{sth} = -0,02L_{pp}$	$z_{sth} = 0,55D$
M_{sup}	$x_{sup} = x_{max(вп)} - 0,6L_{fore}$	$z_{sup} = D + 0,53H_{sup}$
M_{ice}	$x_{ice} = 0$	$z_{ice} = 0,6d$
M_{eq}	$x_{eq} = 0,6x_{sth} + 0,4x_{sup}$	$z_{eq} = 0,6z_{sth} + 0,4z_{sup}$
M_t	$x_t = 0,075L_{pp}$	$z_t = 1,05D$
M_{pp}	$x_{pp} = -0,11L_{pp}$	$z_{pp} = (0,7462 - 0,0287D)D$
M_{el}	$x_{el} = 0$	$z_{el} = 0,93D$
M_{oth}	$x_{oth} = 0,035L_{pp}$	$z_{oth} = (1,112 - 0,0784D)D$
$M_{t(AHTS)}$	$x_{t(AHTS)} = x_{max(2^2)} - (L_{fore} - 0,5S_{ahw} / B)$	$z_{t(AHTS)} = D + H_{st}$
M_{HD}	$x_{hd} = L_{pp} / 2$	$z_{HD} = D + H_{sup}$

Примечание. $x_{max(вп)}$ — абсцисса наиболее удаленной точки верхней палубы.

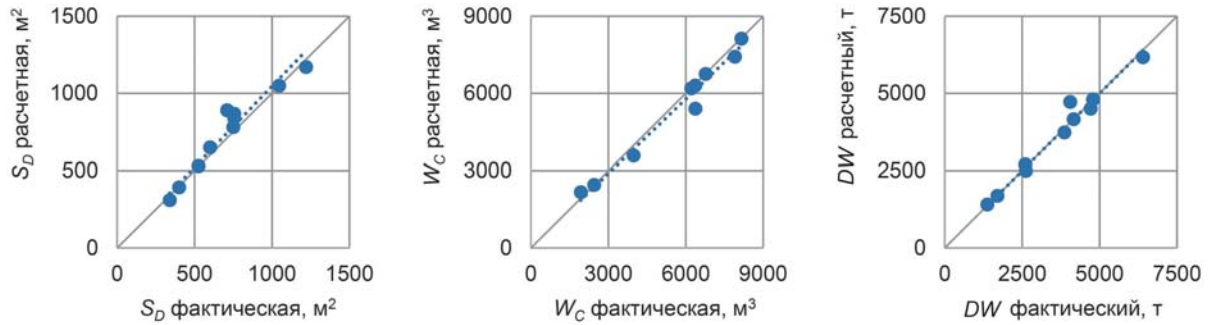


Рис. 5. Сопоставление расчетных и фактических значений параметров судов снабжения
Fig. 5. Comparison of calculated PSV parameters and full-scale values

во вспомогательных цистернах, где $\rho_{aux} = 1 \text{ т/м}^3$ — средняя плотность таких веществ.

Координаты центра тяжести составляющих дедвейта приняты по прототипу: $x_{MDO} = 0$, $z_{MDO} = 0,7D$; x_{crew} и z_{crew} равны аналогичным параметрам для надстройки; $x_{aux} = 0,19L_{pp}$, $z_{aux} = 0,5D$.

Последним этапом расчета является проверка остойчивости с учетом посадки судна при наиболее опасном состоянии загрузки, которое возникает при размещении на верхней палубе груза с максимально возможной массой. Посадка судна обеспечивается приемом балласта в минимально необходимом количестве до выполнения ограничений по отсутствию дифферента и обеспечению метacentрической высоты $h \geq 0,11B$. Для этого в модели реализован итеративный алгоритм, осуществляющий последовательное наполнение различных балластных цистерн. Все они разделены на три группы: носовую, центральную и кормовую, а их вместимости определены на основе статистических данных и составляют 33%, 15% и 52% общего объема балластных танков соответственно. В расчетах учитывается изменение центра тяжести балластной воды при изменении уровня наполнения цистерн.

Для подтверждения достоверности разработанных алгоритмов и соответствия модели проектной практике была выполнена ее верификация на основе 10 построенных судов, имеющих различные размеры, тип, ледовый класс и ледопроездимость. Для верификации были выбраны три параметра, которые оказывают наибольшее влияние на эффективность судна (полезная площадь палубы, полезный объем для размещения грузов W_C и дедвейт судна DW) и являются результатом сложного взаимодействия множества подсистем судна. Результаты верификации приведены на рис. 5 и демонстрируют соответствие модели реальной проектной практике для всего ряда рассматриваемых судов. Наибольшее соответствие наблюдается по дедвейту судна, для которого погрешность в большинстве случаев не превышает 4—5%, что говорит о достоверности алгоритмов расчета составляющих нагрузки судна порожнем. Для площади S_D и объема W_C среднее отклонение составляет около 5,5%.

Алгоритм ситуационного планирования рейсов судов снабжения

Основная идея ситуационного алгоритма планирования рейсов заключается в последовательном удовлетворении критических потребностей платформы в грузах различного типа. Алгоритм осуществляет планирование на основании заданного грузопотока и для каждого шага планирования выбирает наилучшее судно-исполнитель. В результате работы алгоритма ситуационного планирования для каждого варианта конфигурации флота формируется подробный перечень операций судов (перемещение, операции на платформе и в порту). Основные принципы функционирования алгоритма подробно описаны в [2; 14] и кратко представлены на рис. 6.

Длительность рейса и расходы топлива судна на арктической линии определяются упрощенно, так как они служат целям проектной оптимизации судов и не применяются для решения реальных эксплуатационных задач. Принимается допущение, что судно движется по чистой воде и в ледовых условиях с максимально достижимой скоростью, а для моделирования самих ледовых условий используются такие параметры, как эквивалентная толщина льда h_{ice} (м) и доля разводий p_{Lane} . Расчетные зависимости для определения скорости судна V_I во льду с заданными параметрами имеют вид:

$$\begin{cases} V_{IF} = V_{np} + (V_{max} - V_{np})(h_{np} - h_{ice}) / h_{np}, \\ V_{Lane} = V_{np} + (V_{max} - V_{np})(h_{np} - h_{ice} p_{red}) / h_{np}, \\ V_I = V_{IF} (1 - p_{Lane} p_{util}) + V_{Lane} p_{Lane} p_{util}, \end{cases} \quad (15)$$

где V_{max} — максимальная скорость хода судна на чистой воде, определяемая в проектной модели, уз; h_{np} — ледопроездимость судна, м; $V_{np} = 2$ уз — скорость судна во льдах, соответствующих ледопроездимости h_{np} ; V_{IF} — максимальная скорость хода судна в сплошном льду толщиной h_{ice} , уз; V_{Lane} — скорость движения в разводьях при толщине льда, равной $h_{ice} p_{red}$, уз; $p_{red} = 0,2$ — коэффициент, задающий относительную толщину льда в разводьях; $p_{util} = 0,5$ — коэффициент, определяющий долю разводий, используемых судном при движении.



Рис. 6. Основные особенности и атрибуты алгоритма планирования
Fig. 6. Key features and attributes of the planning algorithm

Значения коэффициентов p_{red} и p_{util} приняты на основе выполненных оценок параметров движения современных судов во льдах.

Расчет критерия экономической эффективности

В качестве критерия экономической эффективности для сравнения различных конфигураций флота используется сумма затрат на приобретение флота и расходов на топливо в течение заданного времени.

Для определения стоимости приобретения судна была собрана статистика, включающая цену продажи в долларах более 50 судов в период с 1998 по 2017 гг. Все цены были приведены к 2017 г. с учетом значений индекса потребительских цен США. Стоимость приобретения судна C_{av} выражена в виде функции водоизмещения судна порожнем (т):

$$C_{av} = 0,0172\Delta_{пор} - 9,2, \text{ млн долл.} \quad (16)$$

На основе плана рейсов может быть рассчитано суммарное время, затраченное на операции различных типов t_i (ч). Расходы топлива F_{MDOi} (т) по каждой операции определяются по формуле

$$F_{MDOi} = qN_it_i, \quad (17)$$

где i — тип операции; $q = 0,221 \cdot 10^{-3}$ т/кВт·ч — удельный расход топлива; $N_i = P_i / K_{tr}$ — средняя мощность для выполнения операции, кВт, где P_i — потребляемая мощность, кВт; K_{tr} — коэффициент передачи мощности, который в случае единой электроэнергетической системы равен 0,87 при передаче мощности на гребные электромоторы

и 0,93 при передаче мощности на другие судовые потребители.

В настоящем расчете учтены три режима работы судна: на ходу ($P_i = P_a + P_{hl}$, где P_{hl} — мощность на судовые потребители), операции у платформы ($P_i = 3000$ кВт) и операции в порту ($P_i = 750$ кВт).

Стоимостной критерий P_{tot} представляет собой сумму затрат на приобретение флота и расходов на топливо:

$$P_{tot} = \sum C_{av} + C_{MDO} \sum F_{MDOi} 10^{-6}, \text{ млн долл.} \quad (18)$$

где $C_{MDO} = 550$ долл./т — стоимость топлива MDO.

Пример исследования системы снабжения, работающей в ледовых условиях

В качестве примера рассмотрена задача обслуживания группы платформ в Карском море. Снабжение осуществляется с береговой базы на плавучее хранилище, расположенное на расстоянии 300 морских миль от берега. Суммарный годовой грузопоток — 160 000 т. Объемы и площади для хранения различных грузов на плавучем хранилище приняты из расчета размещения снабжения на 10 суток при средней интенсивности доставки грузов снабжения. В рамках расчетного примера производится вариантный анализ влияния на эффективность транспортной системы следующих факторов: структуры грузопотока, дедвейта, ледового класса и ледопроеходимости, типа судна (PSV/AHTS) и распределения полезной вместимости судна по типам грузов.

Рассмотрены два варианта грузопотока (табл. 5), различающиеся по структуре. В первом случае (СТР-1) буровой раствор транспортируется с берега в специализированных цистернах судна, во втором случае (СТР-2) производство раствора произ-

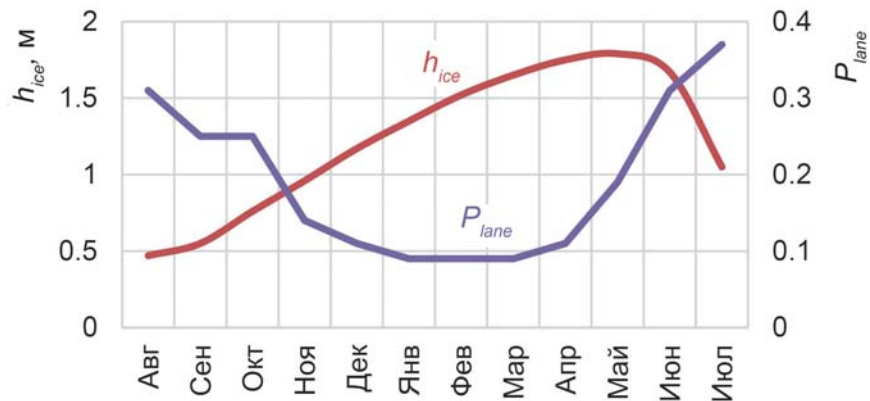


Рис. 7. Параметры ледовых условий расчетного примера
Fig. 7. Parameters of ice conditions in a case study

водится на платформе, а компоненты перевозятся в контейнерах.

Расчетные значения параметров ледовой обстановки в рассматриваемом регионе для всех месяцев года представлены на рис. 7 и приблизительно соответствуют средней степени тяжести ледовых условий. Характеристики альтернативных вариантов судов снабжения приведены в табл. 6 и включают суда класса Arc7 и Arc8 с двумя вариантами ледопроеходимости в широком диапазоне варьирования дедвейта. Суда Arc7 характеризуются большим диапазоном изменения дедвейта, чем суда Arc8, поскольку последние ограничены допустимыми пределами значений главных размерений.

Параметры среднестатистического распределения вместимости судна по типам грузов приведены в табл. 7, где также указаны варианты распре-

Таблица 5. Варианты структуры грузопотока

Тип груза и размерность грузопотока	Плотность, площадь или масса	Грузопоток	
		СТР-1	СТР-2
Порошковые грузы, м ³	2,0 т/м ³	3 616	3 616
Буровой раствор, м ³	2,5 т/м ³	10 265	0
Топливо, м ³	0,85 т/м ³	17 390	17 390
Вода, м ³	1,0 т/м ³	83 320	90 550
Условный контейнер, шт.	7,3 м ² , 3,38 т	8 580	14 040

Таблица 6. Характеристики рассматриваемых вариантов формирования флота

№	С	h_{np} , м	Главные размерения, м					Мощность ЭУ, МВт		Дедвейт, т		Площадь палубы, м ²		Грузоподъемность, т	
			L_{pp}	B	D	d	C_b	PSV	AHTS	PSV	AHTS	PSV	AHTS	PSV	AHTS
1	Arc7	2	73,3	18,0	11,2	8,3	0,59	29,4	30,1	1670	1540	590	470	970	825
2			78,0	17,82	10,0	8,25	0,6	27,4	28,1	2280	2160	622	500	1630	1485
3			79,5	20,95	11,0	8,5	0,6	30,9	31,6	2780	2680	900	830	2000	1855
4			88,0	21,0	11,2	8,29	0,59	30,3	31,0	2800	2700	1070	990	2005	1860
5			95,0	19,5	10,3	8,05	0,6	28,0	28,7	3080	2980	1100	1020	2340	2195
6			95,0	21,0	11,0	8,4	0,6	29,7	30,4	3470	3360	1170	1080	2660	2515
7			94,0	23,8	11,2	8,5	0,59	32,4	33,1	3830	3720	1410	1310	2930	2785
8			100,0	23,0	11,2	8,43	0,6	31,7	32,5	4050	3940	1450	1350	3145	2995
9			88,8	21,0	11,2	9,0	0,64	31,4	32,2	4240	4140	1470	1360	3410	3260
10			97,0	23,0	11,0	8,7	0,62	32,1	32,9	4630	4520	1510	1400	3740	3590
11			100,0	25,0	11,0	8,7	0,62	34,2	35,0	5280	5170	1600	1490	4310	4160

№	С	$h_{np},$ м	Главные размерения, м					Мощность ЭУ, МВт		Дедвейт, т		Площадь палубы, м²		Грузо- подъем- ность, т	
			L_{pp}	B	D	d	C_b	PSV	AHTS	PSV	AHTS	PSV	AHTS	PSV	AHTS
12	Arc8	2,5	88,0	21,0	11,2	8,29	0,59	44,5	45,2	1960	1860	1070	990	920	770
13			95,0	19,5	10,3	8,05	0,6	41,9	42,6	2250	2150	1100	1020	1270	1125
14			95,0	21,0	11,0	8,4	0,6	44,5	45,2	2550	2450	1170	1080	1500	1350
15			94,0	23,8	11,2	8,5	0,59	47,4	48,1	2850	2750	1410	1310	1710	1560
16			100,0	23,0	11,2	8,43	0,6	46,6	47,3	3050	2940	1450	1350	1900	1750
17			100,0	23,4	11,2	8,7	0,61	47,5	48,2	3610	3500	1490	1380	2440	2290
18			100,0	24,5	11,0	8,7	0,62	49,6	50,4	4070	3960	1570	1455	2870	2720

деления, адаптированного под грузопотоки СТР-1 и СТР-2. Адаптация распределений вместимости судна выполнена прямо пропорционально объемной доле грузов каждого типа в расчетном грузопотоке. Единственным исключением является топливо, объемом которого принят исходя из условий арктической эксплуатации равным 35% от W_c .

На рис. 8 приведен пример расчета необходимого числа судов снабжения типа PSV и суммарных затрат при периоде эксплуатации 10 лет и среднестатистических вместимостях грузовых пространств судна. Как видно, исходя из заданного типоразмерного ряда, для обеспечения перевозок требуется не менее двух судов. Далее для удобства приводятся не точечные значения показателей критерия эффективности, а усредненная кривая.

Результаты комплексного анализа эффективности различных конфигураций флота приведены на рис. 9. На рис. 9а—9г показаны суда со среднестатистическим распределением полезной вместимости по типам груза, на рис. 9д и 9е — с адаптированным под грузопотоки СТР-1 и СТР-2 соответственно.

На рис. 9а приведены результаты расчетов для систем снабжения на основе судов типа PSV при грузопотоке СТР-1 и сроке эксплуатации 10 лет. Наилучшими экономическими показателями в данном случае обладают суда ледового класса Arc7 с дедвейтом в диапазоне 3200—4000 т. Увеличенная ледопроемкость судов класса Arc8 и соответствующее увеличение скорости хода во льдах не компенсируют негативного влияния уменьшенной полезной вместимости и высокой стоимости судов этого класса.

При переходе ко второй структуре грузопотока (см. рис. 9б), где доля контейнеров выше, ситуация существенно меняется. Эффективность судов класса Arc7 заметно падает, поскольку в случае грузопотока СТР-2 большие вместимости корпуса становятся бесполезными, а суда класса Arc8, напротив, практически не изменяют своих показателей и на некотором диапазоне дедвейтов (2500—3500 т) начинают превосходить суда класса Arc7, что наблюдается также и для других расчетных случаев. Однако наилучшие показатели эффективности наблюдаются для судов класса Arc7 при дедвейте 4500—5000 т.

Таблица 7. Распределение вместимости судна по типам груза для различных случаев

Тип грузового пространства	Доля полезной вместимости судна		
	по статистике	для СТР-1	для СТР-2
Порошковые грузы (C_{bc})	0,05	0,023	0,024
Буровой раствор (C_{mb})	0,20	0,066	0,000
Топливо как груз + судовое топливо (C_{fo})	0,22 + 0,02 = 0,240	0,350	0,350
Буровая/балластная вода (C_{dw})	0,350	0,536	0,601
Пресная вода (C_{fo})	0,135		
Другие негрузовые пространства (C_{aux})	0,025	0,025	0,025

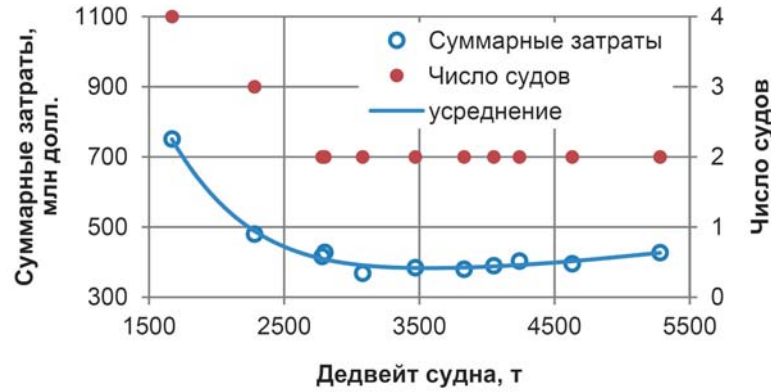


Рис. 8. Показатели эффективности системы снабжения. Грузопоток СТР-1. Период эксплуатации – 10 лет. Суда типа PSV, ледовый класс Arc7, среднестатистические вместимости грузовых пространств

Fig. 8. Feasibility characteristics of the supply system. Cargo-flow STR-1. Operation period – 10 years. Vessel type – PSV, ice class Arc 7, average distribution of capacity per cargo types

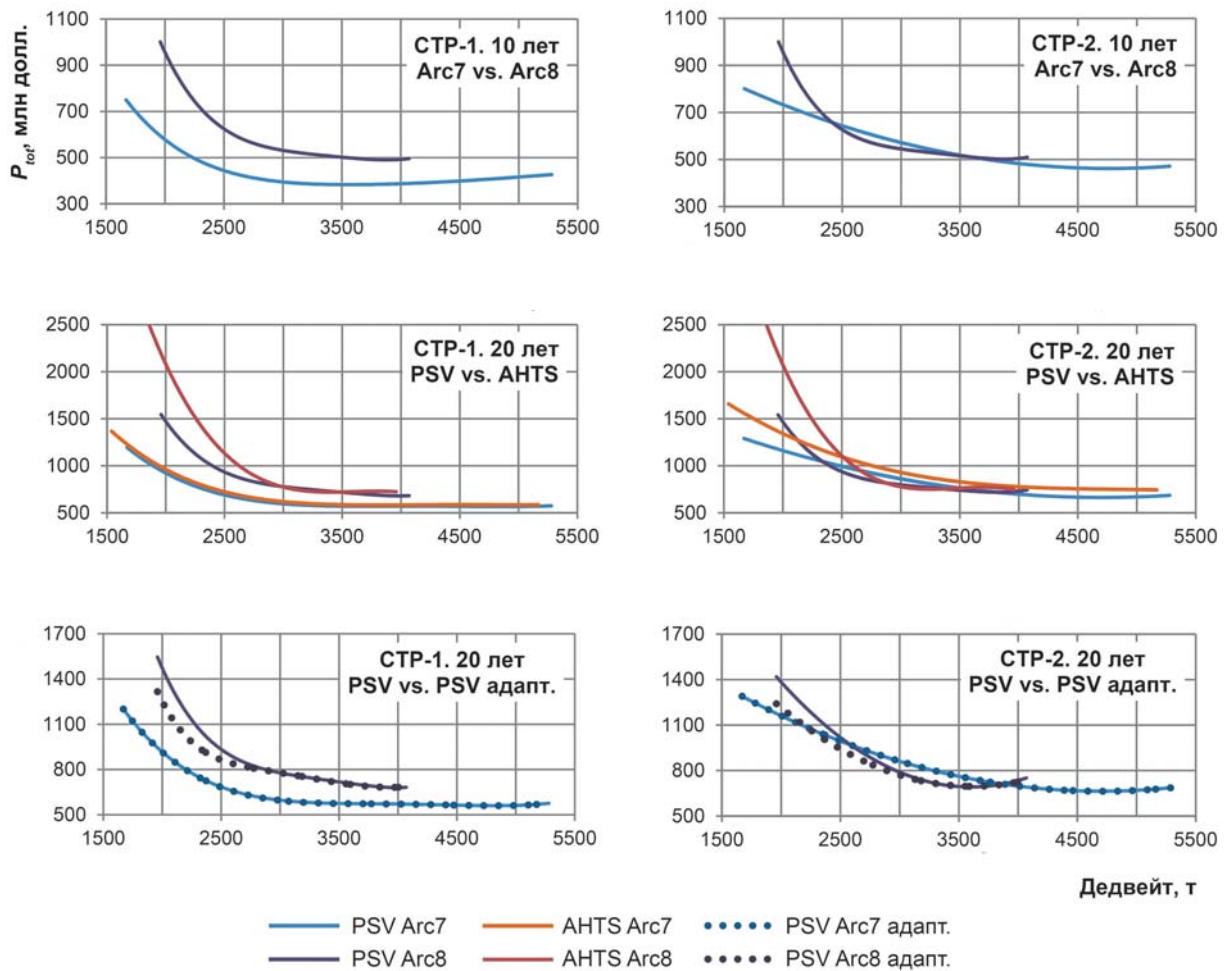


Рис. 9. Значения критерия эффективности для различных конфигураций флота

Fig. 9. Values of the efficiency criterion for various fleet configurations

Важным эффектом является слабая чувствительность судов класса Arc8 к изменениям структуры грузопотока. Это обусловлено тем, что из-за высоких расходов топлива и ограниченной вместимости топливных танков судов класса Arc8 (24% от W_c)

определяющим типом груза в этом случае становится топливо. В результате снижается чувствительность к другим составляющим грузопотока и его структуре в целом. Ситуация, при которой один тип груза определяет необходимое число рейсов и показатели

эффективности всей системы, достаточно характерна. Традиционно роль такого груза выполняет площадной груз. Основная же идея настоящей работы заключается в балансировании степени влияния грузов разного типа и повышении за счет этого транспортной эффективности системы в целом. Одновременно данный расчетный пример подтверждает необходимость учета структуры грузопотока при проектировании флота снабжения, поскольку если бы в случае с судами Arc8 был применен традиционный подход и в качестве определяющего типа груза был принят площадной, результаты были бы ошибочными.

На рис. 9в и 9г приведено сопоставление затрат для четырех различных вариантов формирования флота и двух вариантов грузопотока (СТР-1 и СТР-2) за 20 лет. В рассмотрение включены суда типов PSV и АНТС ледовых классов Arc7 и Arc8. Для судов класса Arc7 при грузопотоке СТР-1 (рис. 9в) использование АНТС вместо PSV с аналогичным дедвейтом приводит к росту затрат приблизительно на 5%. Для судов с малым дедвейтом (до 3000 т) класса Arc8 затраты АНТС существенно превышают аналогичные показатели PSV, что связано с недостатком вместимости АНТС. Наилучшие результаты показывают конфигурации судов PSV класса Arc7 с дедвейтом 3500—5000 т. На рис. 9г представлено аналогичное сопоставление, отлична лишь структура грузопотока (СТР-2). Как видно, для судов класса Arc7 увеличение доли генеральных грузов в структуре грузопотока приводит к снижению эффективности судов АНТС на всем диапазоне значений: разница в затратах по сравнению с судами PSV достигает 15%. Показатели судов типа PSV и АНТС, имеющих класс Arc8, практически не изменяются при варьировании структуры грузопотока, как это наблюдалось и в прошлом расчетном случае. Наилучшие показатели имеют конфигурации флота PSV Arc7 с дедвейтом 4000—5000 т.

На рис. 9д и 9е приведено сравнение конфигураций флота судов PSV классов Arc7 и Arc8, имеющих среднестатистическое и адаптированное под соответствующие грузопотоки распределение полезной вместимости (см. табл. 7). Суда класса Arc7 оказались нечувствительными к изменению соотношения вместимостей их грузовых пространств при всех вариантах грузопотока. Это обусловлено тем, что определяющим типом груза для них является площадной, а объемы корпуса судна достаточны для перевозки всех прочих грузов. Напротив, для судов класса Arc8 с малым дедвейтом (до 3000 т) характерен недостаток вместимости корпуса, поэтому в данном случае предложенные изменения конфигурации грузовых пространств позволяют уменьшить затраты более чем на 10% как для грузопотока СТР-1, так и для грузопотока СТР-2.

Заключение

Структура грузопотока может оказывать существенное влияние на эффективность системы снаб-

жения, поэтому ее необходимо учитывать как в процессе анализа работы самой системы, так и при проектировании отдельных судов. Если определяющим типом груза является площадной, то наилучшим способом повышения эффективности системы является минимизация доли контейнерных грузов в структуре грузопотока. Однако при нетипичной структуре грузопотока или при недостатке вместимости корпуса судна за счет высокого ледового класса в роли определяющего груза могут выступать и другие составляющие грузопотока, например топливо. В этом случае оптимизация грузовых пространств судна под заданную структуру грузопотока будет иметь наибольший эффект. В качестве отдельного вывода можно отметить, что с технической точки зрения использование судов типа АНТС вместо специализированных PSV приводит к снижению эффективности системы снабжения на 5—15% за счет меньших значений площади палубы, вместимости и грузоподъемности судна.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 177920162).

Литература

1. Kondratenko A. A., Tarovik O. V. Cargo flow oriented design of supply vessel operating in ice conditions // Proc. of OMAE-2017. — 2018. — OMAE2018-77802. — 10 p.
2. Таровик О. В., Топаж А. Г., Крестьянцев А. Б. и др. Комплексная имитационная модель морской транспортно-технологической системы платформы «Приразломная» // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 86—103.
3. Гайкович А. И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: В 2 т. — Т. 1: Описание системы «Корабль». — СПб.: НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. — 819 с.
4. Holtrop J., Mennen G. G. J. An Approximate Power Prediction Method // Intern. Shipbuilding Progress. — 1982. — Vol. 29 (335). — P. 166—170.
5. Каштелян В. И., Рывлин А. Я., Фаддеев О. В., Ягодкин В. Я. Ледоколы. — Л.: Судостроение, 1972. — 280 с.
6. Войткунский Я. И. и др. Справочник по теории корабля: В 3 т. — Т. 1. — Л.: Судостроение, 1985. — 768 с.
7. Капранцев С. В., Полтавец П. А., Фролова И. Г. Разработка серии гребных винтов фиксированного шага для судов ледового класса // Тр. центр. науч.-исслед. ин-та им. академика А. Н. Крылова. — 2012. — № 69 (353). — С. 16—22.
8. Гайкович А. И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: В 2 т. — Т. 2: Анализ и синтез системы «Корабль». — СПб.: НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. — 872 с.
9. Lindqvist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships // Proc. of the 10th POAC. — Lulea, Sweden, 1989. — P. 722—735.

10. Сазонов К. Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2010. — 274 с.
11. Zahalka P. Bollard Pull. — Hamburg: Association of Hanseatic Marine Underwriters, 2010. — 10 p.
12. Мацкевич В. А., Мацкевич А. В. Практическое проектирование транспортных судов: В 2 ч. — Ч. 1. — М.: Недра, 2015. — 194 с.
13. Таровик О. В. Методика определения масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Крылов. гос. науч. центр. — СПб., 2015. — 22 с.
14. Кондратенко А. А. Планирование работы флота на континентальном шельфе // Мор. интеллект. технологии. — 2017. — Т. 1, № 1 (35). — С. 29—38.

Информация об авторах

Кондратенко Александр Алексеевич, аспирант, инженер 1-й категории, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44), e-mail: aleksandrkonratenko@live.com.

Таровик Олег Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44), e-mail: tarovik_oleg@mail.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Кондратенко А. А., Таровик О. В. Проектирование арктических судов снабжения с учетом структуры грузопотока транспортной системы // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 80—96. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-80-96.

ARCTIC SUPPLY VESSEL DESIGN TAKING INTO ACCOUNT THE CARGO FLOW STRUCTURE OF THE TRANSPORT SYSTEM

Kondratenko A. A., Tarovik O. V.

Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on February 25, 2019

Abstract

Recent developments in the area of Arctic oil and gas fields' exploration put into the agenda the problem of supply fleet sizing and composition. The state of the art contains many studies that are generally focused on the impact of ice conditions on the design of platform supply vessels (PSV). However, the structure of cargo flow affects the supply system significantly, since it defines the level of utilization of vessel capacities and determines transport efficiency. This is especially relevant in the case of Arctic supply systems because of non-typical technology for the production and logistics of brine/mud cargoes.

This paper describes an approach to optimize the supply fleet configuration using the criterion of total costs and considering both the non-stationary ice conditions and the structure of cargo flows. The proposed design concept incorporates the detailed calculation model of PSVs and the special tactical planning algorithm. The latter generates the voyage plan and estimates the size of supply fleet considering the structure of cargo flow. As the test example, we examined the task of servicing the group of platforms in the Kara Sea. We performed the analysis of impact of various factors on fleet efficiency. The considered factors are the structure of cargo flow, ice class and deadweight, type of vessel (PSV or AHTS) and distribution of vessel capacity by cargo types. The case study showed that cargo flow structure highly influence the efficiency of supply fleet, while a widespread "deck-cargo" approach is unable to consider the true nature of the process. Therefore, this factor should be taken into account when solving fleet sizing and composition tasks, as well as PSV design problems.

Keywords: supply vessels, Arctic fleet, ship design, planning of fleet operation, scheduling, structure of cargo flow, sizing of supply fleet.

The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 177920162).

References

1. Kondratenko A. A., Tarovik O. V. Cargo flow oriented design of supply vessel operating in ice conditions. Proc. of OMAE-2017, 2018, OMAE2018-77802, 10 p.
2. Tarovik O. V., Topazh A. G., Krest'yantsev A. B. et al. Kompleksnaya imitatsionnaya model' morskoi transportno-tekhnologicheskoi sistemy platformy "Prirazlomnaya". [Comprehensive Simulation Model of Marine Transport and Support System for "Prirazlomnaya" Platform]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2017, no. 3 (27), pp. 86—103. (In Russian).
3. Gaikovich A. I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korablei i sudov. V 2 t. Vol. 1. Opisanie sistemy "Korabl'". [Design theory for water displacing ships and vessels. Vol. 1. "Ship" System Description]. St. Petersburg, NITs MORINTEKh, 2014, 819 p. (In Russian).
4. Holtrop J., Mennen G. G. J. An Approximate Power Prediction Method. Intern. Shipbuilding Progress, 1982, vol. 29 (335), pp. 166—170.
5. Kashcheyan V. I., Ryvlin A. Ya., Faddeev O. V., Yagodkin V. Ya. Ledokoly. [Icebreakers]. Leningrad, Sudostroenie, 1972, 280 p. (In Russian).
6. Voikunskii Ya. I. et al. Spravochnik po teorii korablya. V 3 t. T. 1. [Ship Theory Handbook. Vol. 1]. Leningrad, Sudostroenie, 1985, 768 p. (In Russian).
7. Kaprantsev S. V., Poltavets P. A., Frolova I. G. Razrabotka serii grebnykh vintov fiksirovannogo shaga dlya sudov ledovogo klassa. [Development of the fixed pitch propeller series for ice class vessels]. Tr. tsentr. nauch.-issled. in-ta im. akademika A. N. Krylova, 2012, no. 69 (353), pp. 16—22. (In Russian).
8. Gaikovich A. I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korablei i sudov. V 2 t. T. 2. Analiz i sintez sistemy "Korabl'". [Design theory for water displacing ships and vessels. Vol. 1. "Ship" System Analysis and Synthesis]. St. Petersburg, NITs MORINTEKh, 2014, 872 p. (In Russian).
9. Lindqvist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships. Proc. of the 10th POAC. Lulea, Sweden, 1989, pp. 722—735.
10. Sazonov K. E. Teoreticheskie osnovy plavaniya sudov vo l'dakh. [Theoretical bases of navigation in ice]. St. Petersburg, TsNII im. akad. A. N. Krylova, 2010, 274 p. (In Russian).
11. Zahalka P. Bollard Pull. Hamburg, Association of Hanseatic Marine Underwriters, 2010, 10 p.
12. Matskevich V. A., Matskevich A. V. Prakticheskoe proektirovanie transportnykh sudov. V 2 ch. Ch. 1. [Practical design of transport ships. Pt. 1]. Moscow, Nedra, 2015, 194 p. (In Russian).
13. Tarovik O. V. Metodika opredeleniya mass konstruktivnykh ledovykh usilenii transportnykh sudov na rannikh stadiyakh proektirovaniya. [Methods for determination of the mass of ice transport vessel structures in the early stages of the project design]. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Krylov. gos. nauch. tsentr. St. Petersburg, 2015, 22 p. (In Russian).
14. Kondratenko A. A. Planirovanie raboty flota na kontinental'nom shel'fe. [Planning of offshore fleet operation]. Mor. intellekt. tekhnologii, 2017, vol. 1, no. 1 (35), pp. 29—38. (In Russian).

Information about the authors

Kondratenko Alexander Alekseevich, Postgraduate, Research Engineer, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St.-Petersburg, Russia, 196158), e-mail: aleksandrcondratenko@live.com.

Tarovik Oleg Vladimirovich, PhD of Technical Sciences, Senior Researcher, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St.-Petersburg, Russia, 196158), e-mail: tarovik_oleg@mail.ru.

Bibliographic description of the article

Kondratenko A. A., Tarovik O. V. Arctic Supply Vessel Design taking into account the Cargo Flow Structure of the Transport System. Arctic: Ecology and Economy, 2019, no. 2 (34), pp. 80—96. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-80-96. (In Russian).

© Kondratenko A. A., Tarovik O. V., 2019