Сухогруз «Нева-лидер 8» у достроечной набережной

В цехе постройка серийного сухогруза пр. RSD49

Сборка понтона (42x16,9x2,1 м) плавучего причального комплекса с вертолетной площадкой, которая будет способна принимать вертолет типа Ми-8 взлетной массой до 15 т

реле этого года; серия включает 10 ед. Именно к серийной постройке стремится завод, так как это позволяет наиболее эффективно использовать существующие мощности и сокращать издержки производства.

В области судоремонта на заводе есть все возможности для выполнения дефектации, технического обслуживания, слипования и ремонта корпусных конструкций, судовых механизмов и оборудования, а также осуществления модернизации и переоборудования судов. Есть у завода положительный опыт кооперации в изготовлении корпусных конструкций — секции цилиндрической части корпуса нескольких сухогрузных судов пр. RSD44 дедвейтом 5380 т поставлялись Окской судоверфи.

Для успешного выполнения производственной программы на заводе, являющимся градообразующим предприятием Шлиссельбурга, последовательно и целенаправленно осуществляется модернизация и техническое перевооружение производства.

Фоторепортаж А. Н. Хаустова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС КОНСТРУКЦИЙ ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Е. М. Апполонов, докт. техн. наук (СПбГМТУ),
О. В. Таровик, e-mail: tarovik_oleg@mail.ru (ФГУП «Крыловский ГНЦ»)

УДК 629.553.01

В настоящее время в связи с проектированием большого количества арктических транспортных судов самых разных классов важное значение приобретает оценка влияния ледовой категории на весовые характеристики таких судов. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, интенсивность проектирования и строительства судов в соответствии с современными ледовыми правилами Российского морского регистра судоходства (РМРС) достаточно низка, а информация о существующих проектах труднодоступна, что не позволяет ориентироваться на статистические данные о весовой нагрузке. Во-вторых, современные ледовые суда отличаются не только своими размерами, значительно превосходящими размеры ледоколов, но и большим разнообразием классов: нефтеналивные танкеры, суда-газовозы сжиженного природного газа и углеводородных газов, контейнеровозы, добычные, исследовательские суда и др.

Таким образом, актуальной становится задача разработки практической расчетной методики оценки влияния ледовой категории на весовые характеристики судов, которая должна соответствовать следующим требованиям:

• применимость для всех типов судов, спроектированных на класс РМРС и имеющих широкий диапазон и различные соотношения главных размерений;

• распространение на все ледовые категории, предусмотренные Правилами РМРС;

• возможность учета современных тенденций проектирования судов ледового плавания, таких как применение концепции судна двойного действия (DAS — Double Acting Ship) и использование высокопрочных корпусных сталей;

• высокая точность методики, достаточная для применения на стадиях эскизного и концептуального проектов, и относительная простота применения (представление методики в виде расчетных формул).

Очевидно, что такая методика может быть реализована только с применением прямых расчетных процедур определения масс конструкций ледовых усилений (КЛУ). Поэтому для удовлетворения указанных требований в рамках настоящей работы сначала был реализован расчетный механизм определения масс КЛУ, затем выявлены основные влияющие факторы и выполнены массовые расчеты для сетки судов, на основании которых далее построены искомые регрессионные зависимости.

Базовый подход к определению нагрузки масс судна с ледовой категорией

Определение главных размерений и нагрузки масс судна с ледовой категорией (СЛК) на ранних стадиях проектирования удобно проводить с помощью традиционного уравнения масс в функции главных размерений:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{n} G_i + \sum_{j=1}^{k} C_j + G_{ЛУ}, \qquad (1)$$

где Δ — водоизмещение судна; G_i — массы, зависящие от размерений и других характеристик судна; C_j — независимые массы, принимаемые как константы; $G_{ЛУ}$ — приращение масс конструкций ледовых усилений.

При таком подходе массы G_i вычисляются по традиционным формулам для судна без ледовой категории, включая массу основного металлического корпуса, а $G_{ЛУ}$ представляет собой некоторый «довесок» к массе основного корпуса и вычисляется как разность масс КЛУ и конструкций для открытой воды в районах ледовых усилений. В состав G_i в зависимости от решаемой задачи могут входить как разделы нагрузки масс из состава статей судна порожнем, так и составляющие дедвейта, например масса запасов топлива. За счет C_j могут быть учтены различные фиксированные требования к проектируемому СЛК, такие как, например, заданные мощность и масса энергетической установки. Поскольку в уравнение (1) входит множество формально неизвестных размерений проектируемого судна, необходимо на основании анализа проектных ограничений и дополнительных проектных проработок задаться некоторыми из размерений и их соотношениями и свести, таким образом, уравнение (1) к одному параметру или проработать некий вариантный ряд судов с различными размерениями.

Для успешного применения формулы (1) к задаче проектирования СЛК на ранних стадиях необходимо иметь зависимости для определения $G_{ЛУ}$ в функции от ледовой категории, размерений или водоизмещения судна, которые соответствовали бы требованиям, сформулированным выше.

Последовательность получения регрессионных зависимостей определения $G_{ЛУ}$

Для построения расчетных зависимостей определения $G_{ЛУ}$ была выполнена следующая программа работ:

1. Создание программного обеспечения, обеспечивающего выполнение массовых расчетов по основным направлениям:

• моделирование поверхности корпуса судна ледового плавания;

• выделение конструктивных районов борта и днища судна, выбор систем набора конструкций, разработка конструктивных схем;

• расчет площадей конструктивных районов наружного борта и днища;

• определение суммарных длин балок и их расчетных пролетов в конструктивных районах;

• определение площадей листовых конструкций двойного борта и двойного дна, а также их расчетных пролетов;

• определение гидростатических нагрузок, нагрузок от перевозимого груза и ледовых нагрузок;

• определение толщин обшивки, профилей балок и толщин листовых конструкций с учетом и без учета требований ледовой категории;

• получение итогового значения $G_{ЛУ}$.

2. Выявление факторов, оказывающих наибольшее влияние на массу КЛУ и требующих учета в регрессионных зависимостях.

3. Формирование расчетной сетки судов, в рамках которой варьируются выбранные факторы, и выполнение массовых расчетов.

4. Построение регрессионной модели определения $G_{ЛУ}$ и анализ ее точности.

Ввиду ограниченности объема данной статьи, приведем далее только основные допущения, принятые при выполнении п.1 указанной программы (дополнительные сведения содержатся в [1]), в рамках которого была разработана методология определения $G_{ЛУ}$ на основании процедур прямого проектирования. Для описания поверхности корпуса принята аналитическая модель [2, 3], причем для судов категории Arc5 и выше принимается форма носа с наклонным форштевнем и ледовым зубом, менее Arc5 — форма с бульбом. Система набора наружного борта для судов с ледовыми категориями до Arc4 включительно принимается продольной, более Arc5 — поперечной. Конструкции проектируются на основании требований Правил РМРС, ч. II «Корпус». Начиная с категории Arc5, в массах $G_{ЛУ}$ учитывается двойной борт в машинном отделении и носовых негрузовых отсеках судна.

Выявление характеристик судна, оказывающих наибольшее влияние на массы КЛУ

Численные эксперименты позволили проанализировать влияние на $G_{ЛУ}$ различных конструктивных параметров и параметры формы корпуса судна. Отметим, что параметры топологии КЛУ (шпации набора, положение рамных связей и т. п.) в рамках данной задачи не варьировались и принимались в соответствии с рекомендуемыми значениями Пра-

вил PMPC. Исследованию влияния этих параметров посвящена работа [4]. Итак, к числу параметров, оказывающих минимальное, не превышающее 3—4%, влияние на прирост массы КЛУ, можно отнести:

• угол развала борта на миделе (в диапазоне 0—20°);

• угол наклона форштевня γ и угол входа ватерлинии (в рамках диапазонов значений, характерных для судов каждой ледовой категории);

• число выкружек гребных валов или число установленных поворотных винторулевых колонок (за исключением судов типа DAS);

• балластную осадку судна (при ледовых категориях выше Arc5—Arc6 и балластных осадках на миделе в диапазоне 50—80% от осадки в грузу).

Наибольше влияние на массу КЛУ оказывают:

• ледовая категория;

• главные линейные размерения судна: осадка судна на миделе в грузу d, длина по ватерлинии при осадке d без учета выступающих частей L, ширина судна по ватерлинии B;

• осадка судна в балласте $d_б$ (для судов с ледовыми категориями ниже Arc4...Arc5);

• коэффициент общей полноты C_b при осадке d (для судов с категориями выше Arc5);

• длина носового заострения ватерлинии $L_Н$;

• применение на судне концепции DAS;

• предел текучести материала конструкций R_{eH};

• принятые значения надбавок на коррозию.

При численном исследовании влияния каждого из параметров соблюдались условия равенства размерений судна, значений ледовых нагрузок и, по возможности, равенства всех других параметров. Прокомментируем вначале слабо влияющие параметры. Число выкружек гребных валов судна, не использующего принцип DAS, оказывает малое влияние на дополнительную массу КЛУ, так как относительная площадь обшивки выкружки сравнительно невелика по сравнению с площадями районов ледовых усилений, а внутренние конструкции выкружки ледового и неледового судов отличаются незначительно. Осадка в балласте для судов с высокими ледовыми категориями также оказывает малое влияние на массы КЛУ, так как ледовые нагрузки на районы по высоте номер II и III достаточно велики. Угол развала борта на миделе и коэффициент полноты C_b фактически дублируют друг друга, и поэтому в качестве влияющего фактора был принят C_b как наиболее комплексный. Угол наклона форштевня при изменении его значений в диапазонах, характерных для каждой ледовой категории, и при постоянстве всех прочих факторов оказывает слабое влияние на площади ледовых усилений и ледовые нагрузки.

Таблица 1

Характеристики судов расчетной сетки

Категория	Значение	L, м	$L_Н/L$	B, м	d, м	L/B	L/d	B/d	$d_б/d$	C_b	γ, град
Ice1, Ice2, Ice3	Min	92	0,17	13,3	5,5	5,1	13,7	1,67	0,50	0,725	50
	Max	325	0,34	57,5	19,8	10,7	30,0	4,38	0,87	0,847	70
	Ср.	—	—	—	—	6,5	18,4	2,86	0,67	0,785	60
Arc4	Min	95	0,18	13,3	5,5	5,3	13,9	1,67	0,50	0,733	40
	Max	327	0,34	57,5	19,8	10,7	30,0	4,38	0,87	0,843	60
	Ср.	—	—	—	—	6,5	18,9	2,96	0,67	0,786	51
Arc5	Min	100	0,18	13,3	5,5	4,8	14,0	2,06	0,45	0,705	30
	Max	350	0,29	57,5	19,8	8,9	28,3	4,44	0,87	0,853	50
	Ср.	—	—	—	—	6,7	19,4	2,93	0,67	0,774	39
Arc6, Arc7	Min	104	0,17	13,3	5,5	5,5	13,8	2,10	0,57	0,670	25
	Max	340	0,33	57,5	19,8	8,5	29,0	4,20	0,88	0,807	32
	Ср.	—	—	—	—	6,7	20,0	3,02	0,67	0,757	29
Arc8, Arc9	Min	115	0,16	13,3	5,9	5,2	14,4	2,12	0,57	0,593	20
	Max	348	0,36	57,5	19,8	8,6	27,6	4,15	0,88	0,795	30
	Ср.	—	—	—	—	6,8	19,1	2,84	0,69	0,706	24

В свою очередь, к определяющим относятся факторы, влияющие на величину ледовых нагрузок, положение границ ледовых усилений и запасы на коррозию. Все эти параметры должны быть так или иначе учтены в формируемых регрессионных зависимостях, которые тем самым позволят установить не только качественный, но и количественный характер влияния приведенных факторов. Однако очевидно, что ввиду упущения ряда слабо влияющих факторов регрессионные зависимости будут иметь погрешность не менее 3—4%, что соответствует степени влияния первых.

Формирование расчетной сетки судов

Расчетная сетка судов создавалась с учетом указанных выше факторов и базировалось на наборе серий судов нескольких типов: газовозы СПГ (вместимость 40—260 тыс. м^3), нефтеналивные танкеры (дедвейт 40—300 тыс. т), универсальные контейнерные суда (TEU в диапазоне 200—3000 ед.).

Помимо указанных серий были созданы также дополнительные ряды судов, позволяющие совместно с судами указанных сеток перекрыть широкий диапазон размерений судов и их соотношений. Чтобы избежать систематических ошибок в создаваемой регрессионной модели, характеристики дополнительных судов в рамках каждой ледовой категории задавались в случайном порядке. Суммарное количество судов всех ледовых категорий с различными размерениями, характеристиками формы корпуса и прочностными свойствами сталей составило 1632, диапазоны изменения характеристик судов сетки приведены в табл. 1 (число судов каждой ледовой категории см. в табл. 4).

Предел текучести материала конструкций R_{eH} изменялся в диапазонах 235—390 МПа для судов Ice1...Arc7 и 315—390 МПа для судов Arc8...Arc9, причем в расчетах принималось одинаковое значение R_{eH} для конструкций, учитывающих и не учитывающих требования ледовой категории (см. также [1]). Применение концепции DAS предусмотрено для судов с категориями Arc5 и выше, причем ледовая категория носовой и кормовой оконечностей судна принята одинаковой.

Регрессионные зависимости для определения приращения масс КЛУ

Посредством анализа и статистической обработки результатов массовых расчетов были построе-

ны две регрессионные зависимости для определения приращения массы КЛУ $G_{ЛУ}$ для судов с категориями усилений Ice1...Arc4 и Arc5...Arc9. Соответствующие массы G_{1-4} и G_{5-9} определяются по регрессионным зависимостям в явном виде, тогда как для большинства работ (см., например, [5—7]), посвященных анализу приращений масс КЛУ в рамках предыдущих редакций Ледовых правил РМРС, характерно использование обезразмеренных значений вида $G_{ЛУ}/\Delta$ или $G_{ЛУ}/P_{мк}$, где $P_{мк}$ — масса металлического корпуса. Обезразмеривание вида $G_{ЛУ}/P_{мк}$ нерационально в силу потери универсальности результатов в отношении типов судов, а обезразмеривание $G_{ЛУ}$ относительно водоизмещения Δ возможно, но оно не приводит к какому-либо повышению точности регрессии и при этом делает структуру зависимости менее наглядной. Исходя из этих соображений, в настоящей работе была принята явная форма определения $G_{ЛУ}$. Масса (в т) ледовых усилений G_{1-4} судов с ледовыми категориями Ice1...Arc4 определяется по формуле

$$G_{1-4} = [a_1 L_н^{a_2} d^{a_3} + a_4(a_5 L + a_6 L_н)^{a_7} B^{a_8}(d - d_б)^{a_9}]k_{ReH}, \quad (2)$$

где $a_1...a_{11}$ — коэффициенты регрессии (табл. 2); k_{ReH} — коэффициент влияния предела текучести материала на массу КЛУ; $k_{ReH} = (R_{eH}/235)^{a_{10}\ln(L)+a_{11}}$ (здесь R_{eH} = 235...390 МПа).

Масса (т) ледовых усилений G_{5-9} для судов с ледовыми категориями Arc5...Arc9 определяется по формуле

Таблица 2

Значения коэффициентов регрессии в зависимости (2)

Ледовая категория	Ice1	Ice2	Ice3	Arc4
a_1	0			0,0196
a_2	0			0,8698
a_3	0			2,1668
a_4	2,5406			
a_5	0	0,5718	1,2859	2,0012
a_6	0,4676	0		
a_7	0,5653			
a_8	0	0,0528	0,1240	0,1952
a_9	0,6862			
a_{10}	–0,4730			
a_{11}	2,0473			

Таблица 3

Значения коэффициентов регрессии в зависимости (3)

Ледовая категория	Arc5	Arc6	Arc7	Arc8	Arc9
a_1	0,8056	0,9896	0,9972	1,1447	1,4519
a_2	2,3439	2,4103	2,4767	2,5431	2,6096
a_3	0,6125	0,5984	0,5843	0,5702	0,5561
a_4	0,9946	0,8389	0,6832	0,5276	0,3719
a_5	0,9632	0,9386	0,9139	0,8893	0,8646
a_6	1,7476	1,5607	1,3738	1,1869	1,0000
a_7	0,6388	0,5479	0,4571	0,3663	0,2754
a_8	–2,4796	–2,1627	–1,8459	–1,5290	–1,2122
a_9	0,0890	0,0809	0,0728	0,0646	0,0565
a_{10}	0,2056	0,2790	0,3524	0,4258	0,4992
a_{11}	–0,0672	–0,0969	–0,1265	–0,1562	–0,1859

$$G_{5-9} = [a_1(L + a_2 L_н)^{a_3} B^{a_4} d^{a_5} C_b^{a_6}]k_{ReH} k_{DAS}, \quad (3)$$

где $a_1...a_{11}$ — коэффициенты регрессии (табл. 3); k_{DAS} — коэффициент влияния применения концепции DAS на массу КЛУ;

$$k_{DAS} = \begin{cases} 1, & \text{если DAS нет;} \\ 1 + a_9 L^{a_{10}} \exp(a_{11} L/B), & \text{если DAS есть.} \end{cases}$$

$k_{ReH} = 1 + (390/R_{eH} - 1)(a_7 \ln(L) + a_8)$; для судов категорий Arc8 и Arc9 принимается R_{eH} = 315...390 МПа.

Все линейные размерения в формулах (2) и (3) задаются в метрах. В отношении структуры зависимостей (2) и (3) необходимо сказать, что каждая зависимость представляет собой произведение основной части, помещенной в квадратных скобках, и корректирующих коэффициентов k_{ReH} и k_{DAS}. Основная часть получена для судов, не использующих принцип DAS, при R_{eH} = 235 МПа (категории Ice1...Arc4) и R_{eH} = 390 МПа (категории Arc5...Arc9). Структура основной части уравнения формировалась на основании анализа как полученных результатов массовых расчетов, так и требований РМРС и ряда общепроектных закономерностей изменения характеристик судов. Регрессионные коэффициенты были получены путем минимизации суммы квадратов относительных отклонений регрессионных значений от фактических с помощью методов математического программирования. Причем сначала данная процедура выполнялась для судов каждой ледовой категории по отдельности, затем анализировались зависимости значений каждого регрессионного коэффициента от ледовой категории и выбирались аналитические аппроксимирующие функции вида

$$a_i = f(C), \quad (4)$$

где i = 1...11 — номер регрессионного коэффициента; C — номер ледовой категории (C = 1...4 для категорий Ice1...Arc4, C = 5...9 для категорий Arc5...Arc9).

После этого осуществлялся подбор совокупности значений регрессионных коэффициентов каждой из формул (2) и (3) как зависимостей вида (4) (за исключением коэффициента a_1 в формуле (3), который не укладывается в аналитические функции). Такой подход позволил обеспечить гладкость и монотонность функций (2) и (3) при изменении ледовой категории, а также отсутствие нежелательных осцилляций и каких-либо недопустимых сочетаний значений входных параметров.

Для ряда задач, в рамках которых осуществляются самые приблизительные оценки приращения массы корпуса за счет ледовой категории, могут оказаться полезными сведения о среднем, минимальном и максимальном значениях $G_{ЛУ}/\Delta$. Данные, полученные по результатам обработки данных всех судов расчетной сетки (рис. 1), также имеют очень большой разброс значений $G_{ЛУ}/\Delta$ в рамках одной ледовой категории, поэтому оценки являются крайне приближенными.

Необходимо также сказать несколько слов о точности полученных регрессионных формул.

Как видно из табл. 4, для категорий Arc5...Arc9 относительные погрешности достаточно малы, а при категориях Ice1...Arc4 значительно

возрастают. Последнее обусловлено тем, что для судов с низкой ледовой категорией, имеющих относительно небольшие площади районов ледовых усилений, большое значение имеют локальные конструктивные особенности: выбранные профили балок, точное положение границ районов усилений и конструктивных районов и т. п. С ростом ледовой категории значимость этих факторов снижается, так как поверхность корпуса все больше охватывается районами ледовых усилений. Также отметим, что высокие относительные погрешности аппроксимации для категорий Ice1...Arc4 все же приемлемы для решения практических задач, поскольку доля КЛУ в общей массе корпуса при таких категориях весьма мала (см. рис. 1).

Методика получения расчетных оценок масс КЛУ позволяет также делать выводы относительно вклада различных конструкций в общее приращение масс КЛУ. Из табл. 5 видно, что для категорий Ice1...Arc4 наибольшее приращение наблюдается в массах обшивки и балок основного набора (БОН), а для категорий Arc5...Arc9 существенными становятся также и приращения масс рамных конструкций, дополнительного двойного борта и других элементов. Отметим, что отрицательные значения в столбце «Бортовые рамные балки Т-профиля» для категорий Arc5...Arc9 обусловлены сменой системы набора борта с продольной, используемой для конструкции без ледовых усилений, на поперечную и заменой балок Т-профиля на листовые конструкции. Данные табл. 5 имеют также и практическое значение, так как они позволяют оценить величину $G_{ЛУ}$ при различных отступлениях от допущений, принятых для судов расчетной сетки [1].

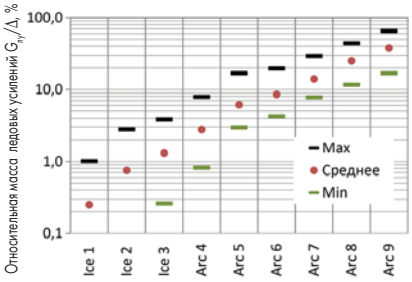

Рис. 1. **Значения $G_{ЛУ}/\Delta$ судов расчетной сетки**

В заключение опишем границы применимости формул (2) и (3). Строго говоря, значения главных размерений судов и их соотношения должны удовлетворять указанным в табл. 1. Однако ряд экспериментов по сопоставлению (2) и (3) с дополнительными расчетными значениями, выходящими за пределы исследованных диапазонов, продемонстрировал, что полученные зависимости и в этом случае обеспечивают точность, аналогичную данным табл. 4. Это позволяет считать полученные зависимости универсальными и применимыми ко всем типам современных морских судов, форма корпуса и корпусные конструкции которых удовлетворяют требованиям Правил РМРС.

Анализ влияния характеристик корпуса судна на массы КЛУ

На основании зависимостей (2) и (3) можно сделать выводы относительно характера влияния характеристик судна на массы КЛУ. Как можно увидеть из формулы (2) и табл. 2, коэффициенты при различных параметрах достаточно хорошо согласуются с требованиями РМРС к границам районов ледовых усилений судов с категориями Ice1...Arc4. Так, для категории Arc4 значимыми являются коэффициенты $a_1...a_3$, определяющие массы КЛУ в районах А и A_1, по всей глубине осадки судна, а для категории Ice1 значимыми стали только a_6, a_7 и a_9, которые соответствуют району усилений А-I, расположенному в районе носового заострения между грузовой и балластной ватерлиниями. В целом, для судов Ice1...Arc4 с ростом ледовой категории происходит увеличение относительного влияния параметров L, B и d, т. е. на значение $G_{ЛУ}$ все больше влияет не только факт наличия ледовой категории, но и размерения судов.

Однако наибольший интерес представляет анализ зависимости (3) для судов категорий Arc5...Arc9, имеющих высокие значения $G_{ЛУ}/\Delta$. По мере роста ледовой категории от Arc5 до Arc9 возрастет относительное влияние параметров B, d и C_b (коэффициенты $a_4...a_6$), тогда как влияние L и $L_н$ (коэффициенты a_2, a_3) незначительно снижается (на фоне роста влияния других факторов). С помощью зависимости (3) может быть проанализировано влияние на значение $G_{ЛУ}$ таких относительных параметров как L/B, C/b, B/d и $L_н/L$. Их влияние может быть оценено путем варьирования каждого из

Таблица 4

Относительные погрешности аппроксимационных формул (2) и (3)

Ледовая категория	Ice1	Ice2	Ice3	Arc4	Arc5	Arc6	Arc7	Arc8	Arc9
Число судов, ед.	126	126	126	108	306	294	294	150	102
Дисперсия, (%)^2	4,279	4,895	1,715	0,934	0,5	0,339	0,313	0,505	0,504
Среднеквадратическое отклонение, %	20,94	22,4	13,10	9,67	7,07	5,82	5,59	7,11	7,10

Примечание. Отклонения определяются в процентах от абсолютных значений, закон распределения погрешностей близок к нормальному [1].

Таблица 5

Вклад различных конструкций в общее приращение масс КЛУ

Ледовая категория	Доля в общем приращении масс КЛУ, %										
	Обшивка борта	Обшивка днища	БОН борта	БОН днища	Бортовые рамные балки Т-профиля	Рамные листовые конструкции борта	Стрингеры днища и вертикальный киль	Флоры	Платформы в форпике, ахтерпике и других районах	Форштевень	Дополнительный двойной борт
Ice1	19,3	0,0	55,4	0,0	6,4	4,9	0,0	0,0	6,9	7,0	0,0
Ice2	24,8	0,0	52,5	0,0	6,1	10,2	0,0	0,0	2,9	3,4	0,0
Ice3	33,4	0,0	47,3	0,0	7,6	6,9	0,0	0,0	2,5	2,4	0,0
Arc4	35,3	0,0	30,7	0,0	24,0	5,1	0,0	0,2	2,6	2,0	0,0
Arc5	29,0	0,6	16,8	0,8	–9,9	35,5	0,0	0,2	1,9	1,2	23,8
Arc6	31,9	1,1	23,1	0,4	–4,2	26,1	0,2	1,6	1,6	2,0	16,3
Arc7	29,6	1,2	27,9	0,7	–4,2	29,0	0,6	2,2	1,6	1,6	9,7
Arc8	26,5	2,7	30,4	1,7	–1,5	24,4	0,9	7,0	1,5	1,1	5,4
Arc9	23,4	3,3	32,3	2,2	0,0	22,9	2,0	7,8	1,5	0,9	3,7

параметров по отдельности при сохранении неизменными значений других параметров. Поскольку при таком варьировании водоизмещение судна существенно изменяется, то в сравнениях следует учитывать не абсолютное значение $G_{ЛУ}$, а отношение $G_{ЛУ}/\Delta$, нормированное относительно некоторого произвольного референсного значения варьируемого параметра (рис. 2).

Обратим особое внимание на то, что в силу относительности значений каждый график справедлив при любых значениях условно-постоянных параметров (например, график для C_b справедлив при любых значениях L/B, B/d, $L_н/L$ и других параметров судна). Как видно из рис. 2, относительное значение $G_{ЛУ}/\Delta$ растет с ростом каждого из параметров. Причем влияние коэффициента C_b возрастает по мере увеличения ледовой категории (поскольку с величиной C_b связана площадь смоченной поверхности корпуса), а влияние отношений L/B, B/d, наоборот, снижается. Последнее обусловлено как особенностями расположения районов ледовых усилений, которые с ростом ледовой категории охватывают все большие площади подводной поверхности корпуса, так и ростом ледовых нагрузок во всех районах. Влияние $L_н/L$ оказывается практически одинаковым для всех ледовых категорий. Стоит также особо отметить, что L/B оказывает существенно более сильное влияние на $G_{ЛУ}/\Delta$, чем параметры C_b, B/d и $L_н/L$, и поэтому, в частности, если при равнообъемных трансформациях корпуса увеличение B/d достигается за счет снижения L/B (т. е. путем увеличения ширины и уменьшения осадки судна при постоянных длине и водоизмещении), то относительное значение $G_{ЛУ}/\Delta$ снижается. Аналогичные рассуждения справедливы для случая снижения L/B за счет роста C_b. Таким образом, единственным путем уменьшения массы КЛУ проектируемого судна посредством трансформаций его размерений при постоянном значении водоизмещения является снижение отношения L/B за счет увеличения C_b и/или B/d в той мере, в какой это допустимо по требованиям ходкости, качки, управляемости и пр. Также эффект снижения массы КЛУ приносит уменьшение отношения $L_н/L$. Однако необходимо сказать, что за счет изменения значений L/B, C_b, B/d и $L_н/L$ можно добиться снижения массы КЛУ проектируемого судна лишь на 3—7%, что не превышает погрешности регрессионной зависимости (3).

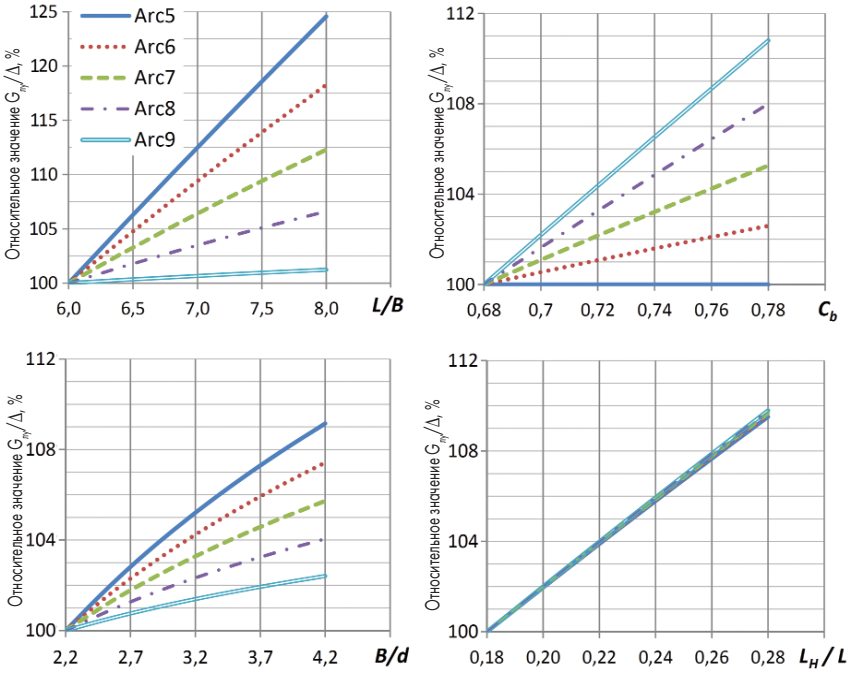

Рис. 2. **Изменение относительных значений $G_{ЛУ}/\Delta$ при варьировании параметров L/B, C_b, B/d и $L_н/L$ судов категорий Arc5...Arc9**

Коэффициент k_{DAS}, показывающий относительное увеличение массы КЛУ за счет применения на судне концепции DAS, изменяется в диапазоне 1,15...1,45. На рис. 3, *а* показано изменение k_{DAS} для судна длиной 250 м при различных значениях L/B. Как видно, значение k_{DAS} растет по мере уменьшения отношения L/B, так как при этом увеличивается вклад кормовых и носовых районов ледовых усилений в общую массу КЛУ. Кроме того, k_{DAS} растет по мере увеличения длины судна, но при этом с ростом ледовой категории его роль снижается. Последнее обусловлено тем, что по мере роста ледовой категории к ледовой прочности кормовой оконечности судов традиционного типа предъявляются все более жесткие требования и применение концепции DAS не приводит к значительному утяжелению корпуса.

В качестве иллюстрации влияния R_{eH} на массу КЛУ на рис. 3, *б* приведены результаты расчетов относительного значения $G_{ЛУ}/\Delta$ для судна длиной 250 м, справедливые, как и данные рис. 2, для всех значений L/B, B/d, $L_н/L$ и других параметров судна. На основании рис. 3, *б*, а также исходя из анализа выражения для определения коэффициента k_{ReH}, можно установить, что R_{eH} является одним из факторов, оказывающих наибольшее влияние на мас-

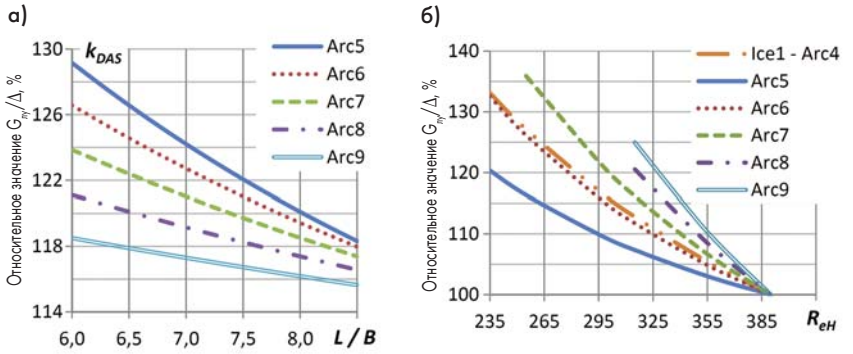

Рис. 3. **Влияние различных факторов на $G_{ЛУ}$ судна длиной 250 м:**
а — влияние концепции DAS; б — влияние R_{eH}

сы КЛУ, причем эффективность применения высокопрочных сталей растет по мере увеличения ледовой категории и длины судна. Это обусловлено тем, что при увеличении ледовых нагрузок и габаритов судна влияние надбавок на коррозию и конструктивных ограничений на размеры связей снижается, и поэтому последние могут быть эффективно снижены за счет применения сталей повышенной прочности.

Необходимо также отметить, что с помощью величины R_{eH} можно оценить некоторый диапазон возможных значений $G_{ЛУ}$. Поскольку в реальных КЛУ достаточно редко все конструкции выполняются из стали одинаковой прочности, R_{eH} может трактоваться как условная величина, играющая, однако, роль своеобразной «функции обеспеченности» значения $G_{ЛУ}$. Т. е. чем ниже R_{eH}, тем выше вероятность того, что реальное приращение массы КЛУ окажется меньше расчетного.

Примеры расчетов характеристик судов с использованием зависимостей (2) и (3) содержатся в [1].

Заключение. В рамках настоящей работы впервые получены универсальные регрессионные зависимости для определения приращения массы корпусных конструкций $G_{ЛУ}$ за счет ледовой категории для транспортных судов всех типов, которые спроектированы по требованиям действующих Правил РМРС и имеют категории ледовых усилений от Ice1 до Arc9. Полученные зависимости учитывают не только главные размерения судов, но и применение на судне концепции двойного действия и корпусных сталей различной прочности. Анализ точности регрессионных зависимостей подтвердил возможность их применения на стадиях проектирования вплоть до эскизной. Кроме того, было установлено, что использование при заданной ледовой категории для судов всех типов одного обобщенного измерителя массы КЛУ вида $G_{ЛУ}/\Delta$ может приводить к значительным ошибкам ввиду существенной зависимости этого показателя от характеристик судна.

Использование полученных зависимостей позволит повысить точность оценок массы корпуса судов ледового плавания на начальных стадиях проектирования, а также обеспечить многовариантность проектных проработок и удобство решения оптимизационных задач, включающих, в том числе, обоснование ледовой категории судна.

Литература

1. *Таровик О. В.* Регрессионная модель определения масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования//Труды КГНЦ. 2014. № 83(367).
2. *Таровик О. В.* Аналитическая модель поверхности корпуса судна ледового плавания. Носовая оконечность//Труды КГНЦ. 2014. № 83(367).
3. *Таровик О. В.* Аналитическая модель поверхности корпуса судна ледового плавания. Кормовая оконечность//Труды КГНЦ. 2014. № 83(367).
4. *Таровик О. В., Апполонов Е. М.* Оптимизационное проектирование конструкций ледовых усилений судов и ледоколов//RAO/CIS Offshore-2009. СПб.: Химиздат, 2009. Т. 2.
5. *Дубов А. А., Фаддев О. В.* Вес ледовых усилений корпуса судна//Труды ААНИИ. 1981. № 376.
6. *Коваль М. Г.* Оценка металлоемкости корпуса морских транспортных судов//Судостроительная промышленность. 1987. № 5.
7. *Цой Л. Г., Фаддев О. В.* Влияние требований к прочности на весовые характеристики металлического корпуса транспортных судов ледового плавания//Перспективные типы морских судов: сб. науч. трудов ЦНИИМФ. 1978. № 232.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МАССИВА ДАННЫХ, ОТНОСЯЩИХСЯ К ОДНОРОДНЫМ ОБЪЕКТАМ, ОДНОТИПНЫМ ПРОЦЕССАМ

В. Б. Жинкин, канд. техн. наук, тел. 812-4940926 (СПбГМТУ)

УДК 629.12.03

В практике научных исследований, особенно при обработке обширного массива экспериментальных данных, большое значение приобретает способ представления полученных результатов в достаточно компактном виде, удобном для дальнейшего использования.

Особенно актуальным такой подход оказывается в том случае, когда предметом изучения оказываются однородные объекты, либо однотипные процессы, характеристики которых находятся не в соответствии со строгой теорией, а скорее эмпирически.

В качестве подобных однородных объектов могут служить отличающиеся шаговым отношением гребные винты одной серии, суда единого назначения (транспортные, ледокольные, промысловые или другие), отличающиеся формой корпуса (коэффициентами полноты теоретического чертежа, соотношением главных размерений и т.д.). Однотипными процессами при этом будут испытания моделей гребных винтов в гидродинамических трубах, поведение моделей судов на волнении в опытовых бассейнах. Преследуемая цель: изучаемые характеристики привести к единообразному безразмерному виду, когда индивидуальные особенности различных объектов учитываются только ограниченным количеством параметров.

Поставленная задача может быть успешно решена в том случае, если исходные индивидуальные зависимости, относящиеся к различным объектам (процессам), имеют подобную форму. Остается только свести эти зависимости к единому виду — на единую кривую.

Автор неоднократно и результативно практиковал предлагаемую методику как при обработке экспериментальных результатов, так и функций, описываемых аналитически. В принципе, исходные, индивидуальные зависимости могут быть куполообразными, пологими, иметь другую форму.

Главная идея описываемой методики заключается в том, чтобы функцию $Y = f(X)$ представить в нормализованном виде: $y_H = f(x_H)$, где нормализованные величины $y_H = Y/Y_{ХАР}$ и $x_H = X/X_{ХАР}$, в то время, как X и Y — текущие, а $X_{ХАР}$ и $Y_{ХАР}$ — характерные значения исходной функции. Основная проблема — правильно выбрать эти самые характерные значения, от этого выбора будет за-