осуществление обновления производственной базы предприятий оборонно-промышленного комплекса;

создание необходимого задела для увеличения доли высокотехнологичной продукции в структуре производства судостроения;

обеспечение создания и полномасштабного функционирования государственного научного центра и центров компетенции в судостроительной отрасли;

развертывание строительства судов для внутренних водных путей, судов рыбопромыслового флота;

решение всех поставленных задач в интересах реализации ГПВ;

укрепление позиции России на отечественных и зарубежных рынках морской техники путем формирования патентной монополии, создаваемой за счет своевременной и полномасштабной правовой охраны новых разработок и технологий;

обеспечение высокого социального эффекта от сохранения и увеличения количества высококвалифицированных рабочих мест в судостроительной и смежных отраслях промышленности;

реализация комплекса мер по стимулированию расширения производства продукции отрасли, повышению эффективности и инвестиционной привлекательности судостроения.

Достижение цели и системное решение поставленных задач позволят сформировать качественно новый, инновационный облик судостроительной промышленности для обеспечения устойчивого социально-экономического развития Российской Федерации и повышения качества жизни населения страны.

www.government. ru

РЕГРЕССИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВОЗОВ СПГ МЕМБРАННОГО ТИПА С РАЗЛИЧНЫМИ ЛЕДОВЫМИ КАТЕГОРИЯМИ

Е. М. Апполонов, докт. техн. наук, **О. В. Таровик** (ФГУП «Крыловский ГНЦ», e-mail: krylov5@krylov.sp.ru)

УДК 629.553

Освоение отечественных шельфовых месторождений природного газа связано с проектированием судов-газовозов для транспортировки сжиженного природного газа (СПГ) и оптимизацией их характеристик. Как правило, важнейшие проектные решения по судну, которые определяют интегральные экономические показатели всей морской транспортной системы, принимаются на самых ранних стадиях технико-экономического обоснования и проектирования. К таким важнейшим проектным параметрам судна-газовоза (в специфических ледовых условиях, характерных для отечественных газовых месторождений) можно отнести: грузовместимость Q, ледовую категорию C, эксплуатационную скорость хода v_s и предельную ледопроходимость $h_{пр}$.

Наиболее универсальным подходом для определения характеристик судна, соответствующего заданным параметрам Q, C, v_s и $h_{пр}$, является прямое расчетное автоматизированное проектирование, позволяющее учесть специфические судостроительные требования по общему расположению, остойчивости, удифферентовке и другим качествам судна и обеспечивающее тем самым высокую точность расчетов. Однако такой подход достаточно сложен в реализации, поэтому для судов устоявшихся типов, к которым относятся суда-газовозы, возможно применение менее точных регрессионных моделей. Последнее обусловлено тем, что ошибки определения характеристик судов, обусловленные отсутствием прямого учета указанных судостроительных требований, оказываются малозначимыми по сравнению с другими погрешностями расчетов, а также могут отчасти компенсировать друг друга. Кроме того, регрессионная модель обеспечивает при заданных Q, C, v_s и $h_{пр}$ именно «среднестатистическое» судно, что важно с точки зрения сопоставления вариантов судов и дальнейшего анализа устойчивости решения, полученного в результате оптимизационных расчетов.

В ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (КГНЦ) накоплен значительный объем проектных проработок и данных модельных испытаний судов-газовозов, позволивший разработать соответствующую методику для реализации регрессионной модели[1]. Поскольку газовозов с ледовым классом выше класса, эквивалентного Ice2 по классификации Российского морского регистра судоходства (РМРС), в настоящее время не существует, для построения регрессионной модели использовались данные проектных проработок и различных исследований газовозов с более высокими категориями, а сама модель была названа регрессионно-аналитической.

Модель позволяет определять характеристики мембранных судов-газовозов СПГ типа Mark III или No96 (наиболее вероятных для реализации в рамках отечественных шельфовых проектов) в диапазоне вместимостей Q = 40 000...260 000 м^3 (98% заполнения танков) и при ледовых категориях C = 0...7 (от «категории нет» до «ARC7» соответственно).

В модель включены приближенные способы расчета ходовых качеств судов-газовозов на тихой воде и в ледовых условиях, верифицированные на данных модельных испытаний, выполненных в КГНЦ. Эксплуатационная скорость хода v_s судов-газовозов может варьироваться в пределах соответствующих ей чисел Фруда:

$$Fr = 0{,}217 - 1{,}5889\cdot10^{-7}\,Q \pm 0{,}02 \quad (1)$$

Предельная ледопроходимость $h_{пр}$ может изменяться в диапазонах, заданных для каждой ледовой категории согласно сложившейся проектной практике и в соответствии с неяв-

[1]Апполонов Е. М., Таровик О. В. Расчетная методика оценки влияния ледовой категории, формы корпуса и конструктивных особенностей на весовые характеристики судов ледового плавания//Труды Крыловского государственного научного центра. 2012. Вып. 70 (354).

ными требованиями Правил РМРС к минимальной мощности на валах, форме корпуса и др. При этом v_s и $h_{пр}$ не учитываются в числе параметров, явно определяющих соотношения главных размерений судна или локальные параметры геометрии корпуса (например, не используются зависимости вида $L/B(Fr_s)$ или $\varphi(h_{пр})$, где φ — угол наклона форштевня). При заданных Q и C параметры v_s и $h_{пр}$ изменяются исключительно посредством изменения мощности на валах судна. Это обусловлено ограничениями, налагаемыми регрессионным подходом, и приемлемо для тех задач, в которых может применяться регрессионная модель.

Статистическая выборка

При формировании статистической выборки для определения главных размерений и весовой нагрузки мембранных газовозов СПГ была создана детализированная база данных по всем эксплуатирующимся судам этого типа и пяти спроектированным судам. Затем из общей базы данных были исключены суда, построенные по одинаковым проектам (так называемые «sister ships»), для возможности равноценного учета параметров всех проектов. Также были исключены суда, построенные до 1997 г. и эксплуатирующиеся в настоящее время, поскольку на таких судах применяются устаревшие мембранные системы хранения груза (GT No82, GT No85, GT No88, TZ Mark I), а их главные размерения выбиваются из современной статистики. Результирующая выборка включает суда 46 проектов, из которых 41 — проекты судов, сданных в 1998—2011 гг., а оставшиеся 5 выполнены в 2000—2005 гг. (табл. 1). Диапазон вместимостей судов выборки: 18 000—261 000 м^3. Все суда не имеют ледовой категории либо имеют незначительную ледовую категорию — не выше класса, эквивалентного классу Ice2 по классификации РМРС.

Основные источники информации при формировании выборки — проформы Intertanko's Standard Tanker Chartering Questionnaire (Q88) и данные World Shipping Register.

Необходимо отметить, что основным источником погрешностей статистической выборки является неточность указания летнего дедвейта судна Dw и соответствующей осадки. Вместо них могут приводиться данные для расчетного (scantling) или проектного (design) случаев загрузки судна, в результате чего абсолютные колебания Dw при одинаковой вместимости судов достигают ±8%, что нельзя обосновать чисто статистическими отклонениями. Меры для минимизации неточностей, связанных с этими колебаниями, описаны далее.

Таблица 1

Данные о количестве судов статистической выборки

Q, тыс. м^3		18—30	60—80	130—140	140—150	150—180	200—220	250—270
Тип ЭУ*	ПТУ	2	2	12	12	1	—	—
	ДЭЭУ	—	1	—	—	9	—	—
	МОД	—	—	—	—	—	5	2
Суда с данными о весе порожнем		2	2	11	12	7	5	2
Всего судов		2	3	12	12	10	5	2

*МОД — ЭУ на основе малооборотного дизеля; ДЭЭУ — двухтопливная дизель-электрическая ЭУ; ПТУ — паротурбинная ЭУ.

При анализе геометрических характеристик корпусов судов-газовозов использовались восемь теоретических чертежей (ТЧ) судов и результаты модельных испытаний пяти судов (в том числе с ледовой категорией), выполненных в КГНЦ.

Особенности газовозов СПГ с ледовой категорией

Как известно, суда ледового плавания по сравнению с неледовыми судами характеризуются увеличенным водоизмещением судна порожнем. При проектировании ледового судна последнее обстоятельство компенсируется увеличением водоизмещения судна в грузу и изменением соответствующих параметров, описывающих объем погруженной части корпуса: длины между перпендикулярами L, ширины B, осадки d и коэффициента общей полноты Cb. Ледовые газовозы СПГ в настоящее время существуют только в виде единичных проектов, и статистическая обработка их параметров не позволяет достоверно оценить, какие параметры подводной части корпуса будут изменяться в зависимости от ледовой категории. Выполнить указанную оценку можно на основании общих представлений о ледовой эксплуатации судов совместно с анализом специфики судов-газовозов, а именно:

— сохранение значений L, B, d постоянными для судов с различными C нецелесообразно из-за происходящего при росте C увеличения Cb свыше 0,78. Для газовозов ледового класса желательно обеспечить Cb в пределах 0,72...0,78, характерных для неледовых газовозов, поскольку даже ледовые суда в силу специфики перевозимого груза будут характеризоваться достаточно высокими скоростями хода и числами Фруда $Fr = 0,17...0,23$;

— увеличение ширины корпуса B ледового судна нецелесообразно ввиду ухудшения в этом случае параметров ледовой ходкости. Ледовое сопротивление, как известно, в наибольшей степени зависит от ширины корпуса, поэтому, ввиду важности этого вопроса для крупнотоннажных газовозов СПГ, параметр B следует по возможности уменьшать;

— увеличение только осадки d при сохранении неизменными других параметров также нецелесообразно ввиду мелководности арктических морей, а также поскольку это может наложить на судно эксплуатационные ограничения в портах. Допустимо, по-видимому, только небольшое увеличение d на несколько процентов.

Таким образом, единственным параметром, который может относительно свободно варьироваться у ледового газовоза СПГ, является его длина L. Согласно сложившимся представлениям о ледовой управляемости, отношение L/B не должно превосходить значений 6,5...6,7. Для газовозов СПГ мембранного типа эта рекомендация соблюдается, поскольку для них характерно $L/B = 6,0...6,5$, т. е. имеются некоторые резервы по увеличению длины L. Согласно результатам проектных проработок, увеличение L ледовых газовозов не отражается негативно на обеспечении удифферентовки, непотопляемости и других проектных качеств судов, а также не ухудшает существенно условия обслуживания судна в портах.

Увеличение водоизмещения судна порожнем, обусловленное ледовой категорией, в настоящей моде-

ли принимается как сумма двух составляющих: приращения массы металлического корпуса и увеличения массы энергетической установки (ЭУ). Первая составляющая рассчитывается по методике, приведенной в сноске на с. 12, вторая определяется посредством расчета буксировочного сопротивления на основании статистической методики (см. далее) и последующего определения массы ЭУ по регрессионной зависимости.

В качестве типа ЭУ для судов-газовозов всех ледовых категорий принимается двухтопливная дизельная электроэнергетическая установка (ДЭЭУ). Это обусловлено тем, что, с одной стороны, этот тип ЭУ наиболее предпочтителен для судов ледового плавания, а с другой — 88% строящихся газовозов для чистой воды (51 судно по данным на август 2012 г.) имеют ЭУ этого типа. Пропульсивный комплекс на судах всех категорий принимается традиционным — двухвальным с винтами фиксированного шага.

Форма корпуса для судов с ледовыми категориями до ARC4 включительно (C = 0...4) принимается с бульбообразной носовой оконечностью, для судов с категориями ARC5—ARC7 (C = 5...7) — с ледокольным наклонным форштевнем в соответствии с Правилами РМРС. Для судов всех ледовых категорий принимается вертикальный борт, что соответствует современной проектной практике и условиям ограниченной осадки судов-газовозов.

Количество грузовых отсеков на ледовых газовозах СПГ принимается таким же, как на неледовых судах: в диапазоне вместимостей Q = 70...220 тыс. м^3 применяется четыре грузовых танка, а при меньшей и большей вместимостях — 3 и 5 танков соответственно. Основными факторами, оказывающими влияние на выбор числа грузовых танков мембранных газовозов, являются не только непотопляемость и общая прочность корпуса, но и необходимость снижения гидродинамических нагрузок на стенки танка от колебаний груза (слошинг). Согласно исследованиям, выполненным в КГНЦ, ускорения, возникающие при взаимодействии крупнотоннажного газовоза со льдом, оказываются значительно меньшими, чем ускорения от качки на волнении. Поэтому можно достаточно обоснованно полагать, что по числу грузовых танков ледовые газовозы не будут иметь отличий от неледовых.

Расположение надстройки на судах всех ледовых категорий принимается кормовое, как и на всех судах статистической выборки.

Регрессионно-аналитическая модель определения главных размерений

В качестве исходных данных в модели, помимо Q, C, v_s и $h_{пр}$, задается дополнительный параметр — дальность плавания A (по запасам тяжелого топлива), — необходимый для определения Dw.

Для определения длины между перпендикулярами L, ширины B и высоты борта D принят следующий подход: сначала по статистическим данным определяется зависимость кубического модуля LBD от вместимости Q, затем строятся статистические зависимости $L(Q)$ и $B(Q)$, после чего высота борта определяется по соотношению

$$D = LBD/(BL)\,. \qquad (2)$$

Такой подход позволяет учесть взаимозависимость главных размерений при заданной вместимости судна, причем при увеличении L (из-за описанного выше влияния ледовой категории) высота борта D будет снижаться для обеспечения требуемого значения LBD. Результаты выполненных в КГНЦ проектных проработок арктических газовозов подтвердили правильность такого подхода.

Далее определяется дедвейт Dw судна в грузу (соответствует летнему дедвейту судов статистики), осадка в грузу d и водоизмещение порожнем. Как отмечалось ранее, статистические значения Dw отличаются значительными неточностями, кроме того, на большинстве построенных судов установлена паротурбинная ЭУ, для которой характерны повышенные расходы и запасы топлива. Поэтому для рассматриваемой модели значение летнего Dw (т) определяется по упрощенной расчетной зависимости

$$Dw = Q\gamma_{СПГ} + \frac{A}{v_s} N_{ДЭЭУ} g_{ДГ} k_{ДГ} + P_{разн}\,, \qquad (3)$$

где $\gamma_{СПГ}$ — расчетная плотность СПГ, т/м^3; $g_{ДГ}$ — усредненный удельный расход тяжелого топлива в дизель-генераторах (ДГ), т/(кВт·ч); $P_{разн} = P_{разн}(Q)$ — масса различных дополнительных составляющих Dw (запасы дизельного топлива и масла, питьевой и технической воды и т. п.), т; $k_{ДГ}$ — коэффициент использования номинальной мощности ДГ на ходовом режиме при максимальной мощности на валах; $N_{ДЭЭУ}$ — номинальная механическая мощность ДЭЭУ, определяемая по результатам расчетов v_s и $h_{пр}$ (см. далее (13)), кВт.

Дальность плавания A по запасам тяжелого топлива для неледовых судов обычно принимается равной 13 000 морских миль, хотя для газовозов СПГ с высокой ледовой категорией эта величина, вследствие особенностей челночной эксплуатации, может быть снижена. Необходимо отметить, что в штатном режиме движения газовозы, имеющие двухтопливную ДЭЭУ, используют в качестве топлива пары СПГ, однако на данных судах все-таки предусматривается значительный запас тяжелого топлива.

Осадка в грузу d в модели определяется в функции от Dw. На основании статистических данных можно полагать, что и в нагруженном, и в балластном состояниях судно-газовоз удифферентовано на ровный киль.

Водоизмещение порожнем $\Delta_{пор}$ (т) рассчитывается как сумма, учитывающая: массу металлического корпуса судна без ледовой категории $P_{мк0} = P_{мк0}(LBD)$; дополнительную массу конструкций ледовых усилений $P_{лу} = P_{лу}(Q, C)$, определенную на основания серийных расчетов по методике, приведенной в сноске на с. 12; массу оборудования корпуса $P_{ок} = P_{ок}(LBD)$ (масса судовых устройств, общесудовых систем, покраски, изоляции и зашивки, дельных вещей и т. п.); массу грузовых танков $P_т = P_т$ (Q, тип танков), массу грузовых (специальных) систем $P_{гс} = P_{гс}(LB)$ и массу ЭУ $P_{ЭУ} = P_{ЭУ}(N_{ДЭЭУ})$:

$$\Delta_{пор} = [P_{мк0} + P_{лу}] + P_{ок} + P_т + P_{гс} + P_{ДЭЭУ}\,. \qquad (4)$$

Данная разбивка $\Delta_{пор}$ на составляющие принята не только исходя из влияния различных разделов нагрузки масс на итоговое значение $\Delta_{пор}$ при различных ледовых категориях, но также и с учетом влияния каждой составляющей на строительную стоимость судна. Также отметим, что в случае выполнения проектных расчетов в величину $\Delta_{пор}$ следует ввести запас водоизмещения.

Водоизмещение судна Δ при осадке по d, определяемое как сумма Dw и $\Delta_{пор}$, должно быть таким, чтобы коэффициент общей полноты Cb находился в следующих статистических диапазонах:

$$Cb = 0{,}917 - 0{,}8278Fr \pm 0{,}025\ , \quad (5)$$

где Fr — число Фруда при эксплуатационной скорости v_s.

Если условие (5) не выполняется, то для сохранения размерений судна в статистических диапазонах должна корректироваться осадка d. При вычислении Cb и при выполнении других расчетов можно полагать, что длина судна по ватерлинии L_{wl} равна L, так как особенность конфигурации носового бульба и выкружек гребных валов судов-газовозов не позволяет определить L_{wl} более точно статистическим путем. В целом для судов разных ледовых категорий $L_{wl} = (0{,}98...1{,}02)L$.

Для выполнения технико-экономических расчетов часто также требуется информация об осадке судна в балластном состоянии $d_б$. Однако построению прямой статистической зависимости для определения $d_б$ в функции от какого-либо параметра препятствует низкая достоверность статистической информации о загрузке судна, поэтому для обеспечения корректности расчетов применен другой подход. Сначала по регрессионной зависимости определяется объем балластных цистерн $V_{бц} = V_{бц}(LBD)$, на основании которого с использованием статистического коэффициента заполнения балластных цистерн определяется отношение водоизмещений судна в грузу и в балласте $\Delta_б/\Delta$. После этого на основании статистической зависимости $d_б/d$ от отношения $\Delta_б/\Delta$ определяется $d_б/d$ проектируемого судна. Зависимость $d_б/d = (d_б/d)(\Delta_б/\Delta)$ получена при обработке ТЧ судов-газовозов и характеризуется высокой точностью.

На основании полученных значений L, B, D, d, Δ далее по регрессионным зависимостям могут быть определены дополнительные параметры судна, необходимые для ряда экономических и технических расчетов: L_{max} — максимальная длина судна; GRT — брутто-тоннаж; NRT — нетто-тоннаж; $D_{тр}$ — высота тронкового возвышения палубы; BOR — скорость естественного испарения груза и ряд других.

Модель определения ходовых характеристик

Как показал анализ ряда известных аналитических методик определения буксировочного сопротивления судна на чистой воде, последние не позволяют получать устойчивые результаты применительно к судам-газовозам, для которых характерны нетипичные соотношения главных размерений. Например, известная методика Холтропа в отношении газовозов СПГ дает погрешность определения буксировочного сопротивления 10—20%. Кроме того, многие методики не позволяют системно учитывать ледовую категорию судна-газовоза, что важно для рассматриваемой модели. Поэтому был разработан приближенный метод расчета ходовых качеств судов-газовозов с различными ледовыми категориями на чистой воде в диапазоне чисел Фруда Fr = 0,12...0,23 для грузовой и балластной осадок, основывающийся на данных модельных испытаний. Сопротивление воды R (кН) движению судна определяется по зависимости

$$R = C_т \frac{\rho v^2}{2} \Omega\ , \quad (6)$$

где $C_т$ — коэффициент полного сопротивления натурного судна; ρ = 1,025 — плотность морской воды, т/м^3; v — скорость судна, м/с; Ω — площадь смоченной поверхности корпуса судна, м^2.

$C_т$ определяется как сумма вязкостной и волновой составляющих:

$$C_т = C_{f0}(1 + k) + C_W\ , \quad (7)$$

где C_{f0} — коэффициент сопротивления трения эквивалентной пластины; k — коэффициент формы; C_W — коэффициент волнового сопротивления.

Коэффициент формы k определяется по формуле, имеющей структуру известной формулы Грэнвилла $k = k(L/B,\ Cb)$, но с введенными в нее корректировками, полученными на основании данных модельных испытаний судов-газовозов, позволяющими вычислять $k = k(L/B,\ Cb,\ C)$. Значение C_w вычисляется по регрессионной зависимости вида $C_w = C_w(Fr,\ Cb)$. Площадь Ω определяется на основании известной формулы Семеко, откорректированной применительно к судам-газовозам.

Площадь смоченной поверхности Ω и коэффициент полноты $Cb_б$ судна при осадке по балластную ватерлинию $d_б$ определяются с использованием зависимостей

$$\frac{\Omega_б}{\Omega} = \frac{\Omega_б}{\Omega}\left(\frac{d_б}{d}\right);\ \frac{Cb_б}{Cb} = \frac{Cb_б}{Cb}\left(\frac{d_б}{d}\right),$$

построенных путем обработки данных ТЧ судов-газовозов.

Значение мощности на валах Ps (кВт) в зависимости от скорости судна v находится по формуле

$$Ps(v) = \frac{Rv}{\eta_п \eta_в}\ , \quad (8)$$

где $\eta_п$ = 0,99 — КПД валопровода; $\eta_в = \eta_в(C)$ — КПД гребного винта на режиме движения с эксплуатационной скоростью с учетом коэффициентов взаимодействия винта с корпусом.

Для оценки величины предельной ледопроходимости $h_{пр}$ (м) судов-газовозов в модели принята эмпирическая зависимость

$$h_{пр} = C_{ir}\left(\frac{Te}{B}\right)^{2/3}, \quad (9)$$

где Te — тяга движительного комплекса на режиме, близком к швартовному, кН; $C_{ir} = C_{ir}(Q,\ C)$ — регрессионная зависимость, полученная по результатам ледовых модельных испытаний и натурных данных для судов различных типов.

Значение Te определяется по соотношению

$$Te = nP_ш(1 - t_ш)\ , \quad (10)$$

где n — число гребных винтов; $t_ш$ — коэффициент засасывания на режиме, близком к швартовному; $P_ш$ — упор гребного винта на швартовном режиме, кН, определяемый формулой

$$P_ш = 0{,}03\frac{k_т}{k_Q^{2/3}}(D_{гв}N_в)^{2/3}\ , \quad (11)$$

где $k_т$ и k_Q — коэффициенты упора и момента гребных винтов в швартов-

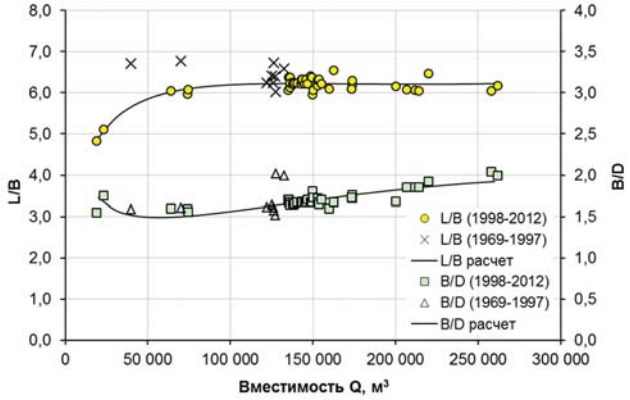

Рис. 1. **Соотношение расчетных и фактических значений *L/B* и *B/D***

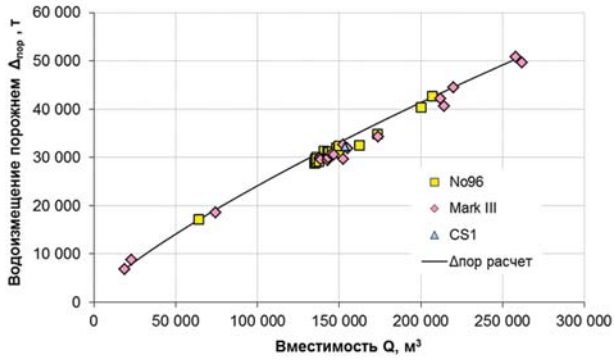

Рис. 2. **Соотношение расчетных и фактических значений $\Delta_{пор}$**

ном режиме; $D_{гв} = D_{гв}(d, C)$ — диаметр гребного винта, м; $N_в$ — мощность, подводимая к одному гребному винту, кВт.

Для определения полной мощности на валах (мощности гребных электромоторов) $N_{вал}$ (кВт)используется зависимость

$$N_{вал} = Ps\,(v_s)\,k_{мор}\,, \qquad (12)$$

где $Ps(v_s)$ — мощность на валах на эксплуатационной скорости, кВт; $k_{мор} = 1{,}21$ — коэффициент морского запаса мощности на валах.

При определении $N_{вал}$ необходимо также проверять ее минимальное значение согласно Правилам РМРС (часть VII, п. 2.1); кроме того, мощность на валах может быть увеличена для достижения требуемой величины $h_{пр}$. После определения $N_{вал}$ можно найти требуемую механическую мощность дизелей $N_{ДЭЭУ}$ (кВт) в составе ДГ по соотношению

$$N_{ДЭЭУ} = \left(\frac{N_{вал}}{\eta_{вал}} + \frac{P_{потр}}{\eta_{потр}}\right)\frac{1}{k_{ДГ}}\,, \qquad (13)$$

где $P_{потр} = P_{потр}(Q)$— электронагрузка от судовых потребителей на ходовом режиме судна, кВт; $\eta_{вал}$ — КПД преобразования и передачи энергии от дизелей к винтам; $\eta_{потр}$ — КПД преобразования и передачи энергии от дизелей к судовым потребителям.

Итак, использование приведенных соотношений позволяет определять все требуемые параметры судов-газовозов для нужд технико-экономического анализа и начальных проектных оценок.

Верификация модели

Верификацию разработанной расчетной модели можно обоснованно выполнить на примере газовозов СПГ без ледовой категории, так как только для них имеются статистические данные. Причем верификацию целесообразно выполнять не путем анализа соответствия параметров судов параметрам, получаемым по регрессионной модели (так как все имеющиеся суда использовались в регрессионном анализе и для них уже обеспечивается хорошее совпадение реальных и прогнозируемых параметров), а в направлении анализа соответствия неких «интегральных» параметров, которые не определяются явно по регрессионным зависимостям. Такими «интегральными» параметрами могут служить: соотношения главных размерений, водоизмещение порожнем, дедвейт, мощность ЭУ и мощность на валах судна. При вычислении этих параметров все размерения судов определяются по регрессионной модели, т. е. у сопоставляемых судов совпадают только вместимость Q и ледовая категория C = 0, а скорость хода расчетных судов определяется с использованием зависимости (1).

На рис. 1 показано соответствие расчетных и фактических соотношений *L/B* и *B/D*. Для подтверждения упоминавшегося ранее положения о том, что суда постройки до 1997 г.

Таблица 2

Характеристики судов-газовозов без ледовой категории (C = 0)

Q (98%), тыс. м³	74	135	155	177	210	260
Длина максимальная, м	224,0	276,0	290,0	304,0	322,0	348,0
Длина между перпендикулярами, м	212,7	263,9	277,4	290,9	309,3	334,0
Ширина на миделе, м	34,9	42,5	44,6	46,9	49,9	53,7
Высота борта, м	23,2	25,6	26,1	26,5	27,1	28,0
Мощность на валах полная, кВт	14 360	23 680	25 780	27 620	30 180	33 840
Мощность ДЭЭУ, кВт	22 000	36 000	39 000	42 000	46 000	52 000
Дедвейт летний, т	38 280	68 650	78 350	89 190	105 300	129 700
Водоизмещение порожнем, т	19 100	30 600	34 000	37 700	43 000	50 600
Автономность, миль	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000
GRT	52 210	90 150	102 820	116 920	138 440	171 940
NRT	15 180	27 000	31 220	36 050	43 670	56 040
Вместимость танков HFO, м³	2900	4400	4700	5100	5600	6300
Характеристики судна в грузу (осадка по летнюю ватерлинию)						
Водоизмещение, т	57 380	99 250	112 350	126 890	148 300	180 300
Осадка, м	10,2	11,5	11,8	12,0	12,3	12,7
Коэффициент общей полноты	0,739	0,751	0,751	0,756	0,762	0,772
Характеристики судна в балласте						
Водоизмещение, т	48 200	80 300	89 900	100 400	115 600	137 800
Осадка, м	8,7	9,5	9,7	9,8	9,9	10,0
Коэффициент общей полноты	0,723	0,731	0,730	0,735	0,740	0,747
Ходовые качества в грузу (сдаточные условия)						
Максимальная скорость, уз	19,12	20,34	20,48	20,48	20,51	20,52
Эксплуатационная скорость, уз	18,24	19,37	19,50	19,50	19,50	19,50
Мощность на валах при эксплуатационной скорости, кВт	11 854	19 564	21 295	22 812	24 936	27 964

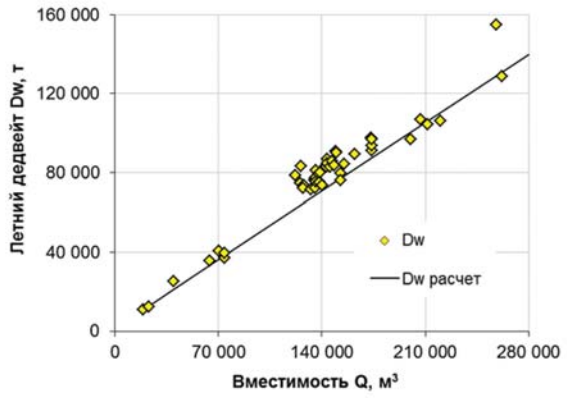

Рис. 3. **Соотношение расчетных и фактических значений летнего *Dw***

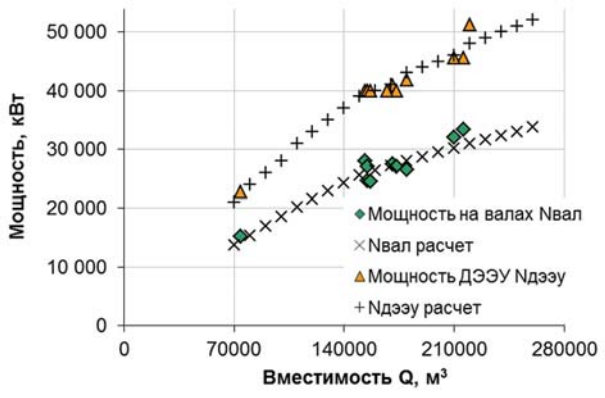

Рис. 4. **Соотношение расчетных и фактических значений $N_{вал}$ и $N_{ДЭЭУ}$**

выбиваются из современной статистики, на рис. 1 также приведены данные по судам, сданным в период 1969—1997 гг. Далее рассматриваются суда, построенные после 1998 г.

На рис. 2 показано соотношение расчетных и фактических значений водоизмещения порожнем $\Delta_{пор}$. Расчетные значения приведены для мембранной системы No96. Следует отметить, что среднестатистическое превышение $\Delta_{пор}$ у судов типа No96 над судами Mark III составляет около 1...2%, и при этом какого-либо влияния типа ЭУ на $\Delta_{пор}$ при анализе статистических данных выявлено не было.

Сравнение расчетных и статистических значений дедвейта (рис. 3) показывает, что расчетный дедвейт соответствует нижнему диапазону статистических значений (причины этого указывались ранее).

Расчетные мощности на валах и мощности ДЭЭУ также близки к среднестатистическим, что подтверждается данными рис. 4, на котором показаны результаты расчетов для судов вместимостью 70—260 тыс. м³ с шагом 10 тыс. м³ (расчетная мощность на валах округляется до 10 кВт, мощность ДЭЭУ — до 10³ кВт).

В табл. 2 приведены полученные по модели расчетные характеристики газовозов без ледовой категории ($C = 0$). Принятые в табл. 2 значения Q относятся к наиболее распространенным группам грузовместимостей.

В табл. 3 показан пример расчета характеристик газовозов вместимостью 90 000 м³ при различных ледовых категориях.

На основании представленных данных можно убедиться, что предлагаемая регрессионно-аналитическая модель обеспечивает хорошее соответствие расчетных и фактических характеристик газовозов СПГ для чистой воды, а также позволяет получать устойчивые оценки характеристик судов-газовозов с различными ледовыми категориями.

Таблица 3

Характеристики судов вместимостью 90 000 м³ при различных ледовых категориях

Q (98%), тыс. м³	90					
Ледовая категория по PMPC	Нет	Ice3	Arc4	Arc5	Arc6	Arc7
Длина максимальная, м	239,0	241,0	242,0	245,0	248,0	252,0
Длина между перпендикулярами, м	228,2	229,3	230,4	233,7	237,1	240,4
Ширина на миделе, м	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0
Высота борта, м	24,1	24,0	23,9	23,5	23,2	22,9
Мощность на валах полная, кВт	16 980	17 380	17 680	21 340	22 320	24 660
Мощность ДЭЭУ, кВт	26 000	27 000	27 000	32 000	33 000	36 000
Дедвейт летний, т	46 200	46 300	46 300	46 400	46 000	45 800
Водоизмещение порожнем, т	22 300	22 600	22 900	24 200	25 400	27 000
Автономность, миль	13 000	13 000	13 000	11 400	9700	8100
GRT	62 100	62 100	62 100	62 100	62 100	62 100
NRT	18 120	18 120	18 120	18 120	18 120	18 120
Вместимость танков HFO, м³	3300	3400	3400	3600	3100	2900
Характеристики судна в грузу (осадка по летнюю ватерлинию)						
Водоизмещение, т	68 500	68 900	69 200	70 600	71 400	72 800
Осадка, м	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7
Коэффициент общей полноты	0,740	0,740	0,740	0,744	0,742	0,746
Характеристики судна в балласте						
Водоизмещение, т	56 900	57 300	57 600	59 000	59 800	61 200
Осадка, м	9,1	9,1	9,1	9,1	9,2	9,2
Коэффициент общей полноты	0,723	0,724	0,723	0,728	0,726	0,730
Ходовые качества в грузу (сдаточные условия)						
Максимальная скорость, уз	19,58	19,57	19,58	19,62	19,63	19,63
Эксплуатационная скорость, уз	18,66	18,66	18,66	18,66	18,66	18,66
Мощность на валах при эксплуатационной скорости, кВт	14 018	14 361	14 610	17 625	18 432	20 367
Собственная ледопроходимость, м	—	0,64	0,70	0,96	1,22	1,60

Единая непрерывная модель определения характеристик газовозов СПГ обеспечивает корректность сопоставления судов различных вместимостей и ледовых категорий и позволяет при этом также варьировать значения эксплуатационной скорости хода и предельной ледопроходимости, что расширяет возможности выполнения на ее основе технико-экономической оптимизации морских транспортных систем, имеющих в своем составе суда-газовозы СПГ.

Для практического выполнения такой оптимизации в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» имеется ряд дополнительных расчетных алгоритмов определения строительной стоимости судов, описания движения судов на линиях эксплуатации, а также другие специальные расчетные математические модели и алгоритмы.