

# СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФЛОТА

УДК 656.612

*А. И. Епихин*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ТАНКЕРОВ-ГАЗОВОЗОВ

Рассмотрены основные особенности построения математических моделей, описывающих динамические параметры двух наиболее важных систем (системы хранения груза и главной энергетической установки) современных танкеров-газовозов, которые оказывают наибольшее влияние на комплексные показатели безопасности при переходе судна. Выявлены входные, технологические, функциональные и диагностические параметры, определяющие динамические свойства основных судовых технических систем. Основной опасностью для танкеров, перевозящих сжиженный газ, является характер перевозимого груза, поэтому в целях корректного построения систем поддержки принятия решений необходимо имитационное моделирование перспектив развития опасных ситуаций, что не представляется возможным без использования детерминированных математических моделей, позволяющих оценить состояние грузовой системы и значения параметров главной энергетической установки. Приведены основные расчетные соотношения, характеризующие состояние груза при внешних динамических нагрузках, а также передаточные функции и функции чувствительности современных моделей двух- и трехтопливных судовых двигателей. Особое внимание уделено параметрам, не поддающимся прямому регулированию. К таким параметрам относится внутреннее давление жидкости (сжиженного газа), которое возникает в результате действия ускорения силы тяжести груза, приложенного в его центре, в результате движения или маневрирования судна, а также при продольно-горизонтальной, поперечно-горизонтальной, вертикальной, бортовой и килевой качках. Учитывая невозможность воздействия на причины возникновения таких нагрузок, единственным эффективным методом ослабления вышеперечисленных факторов являются снижение скорости и изменение курса судна, при этом система поддержки принятия решений должна формировать соответствующие рекомендации для персонала. По результатам проведенного исследования можно судить о возможности прогнозирования развития опасных ситуаций с использованием математических моделей соответствующих судовых средств, что может позволить системе поддержки принятия решений своевременно сформулировать необходимые рекомендации для оператора.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, безопасность эксплуатации танкеров, динамические нагрузки, движение судна, наброс нагрузок, давление жидкости (сжиженного газа).

### **Введение**

Построение систем поддержки принятия решений (СППР) для танкеров, перевозящих сжиженные газы, является сложной многофакторной научно-прикладной задачей, поскольку возникновение и развитие опасных ситуаций определяется большим количеством различных факторов, зависящих от ряда внешних, технических и технологических условий, значительная часть которых не поддается прогнозированию.

Выработка СППР корректных рекомендаций для персонала, управляющего комплексом судовых технических средств (СТС), осуществима лишь при возможности прогнозирования будущих состояний СТС и всех контролируемых параметров судна, что невыполнимо без наличия в составе системы соответствующих математических имитационных моделей, позволяющих выполнять прогнозирование с учетом всех возможных статических и динамических воздействий.

### Категории параметров, контролируемых системой поддержки принятия решений

В контексте проблематики исследования следует выделить четыре категории контролируемых параметров:

- входные;
- технологические;
- функциональные;
- диагностические.

К *входным* параметрам СТС относятся исходные данные, характеризующие условия работы СТС в текущий момент времени. Например, для главного двигателя это мгновенные значения частоты вращения, нагрузки и пр.

К группе *технологических* параметров относятся параметры, непосредственно характеризующие процессы, протекающие в рассматриваемом узле или механизме. Для двигателя это давление в масляной системе, рабочая температура, частота вращения и пр.

К группе *функциональных* параметров следует относить так называемые «внешние характеристики»; тип функциональных параметров определяется характером режима функционирования конкретного СТС, например, для детерминированных систем это значение их передаточной функции.

Все три вышеперечисленные группы параметров достаточно тесно связаны между собой, при этом во многих случаях эта связь носит комплексный многофакторный характер, часто нелинейный и вариативный. Более того, в некоторых частных случаях при различных взаимных сочетаниях некоторых параметров существенно изменяется и вид их зависимостей.

К группе *диагностических* параметров следует относить те параметры, которые напрямую не вносят вклад в непосредственное функционирование СТС или их взаимодействие, но при обеспечении безопасности судна-газовоза имеют высокую информационную ценность. К этой группе параметров в первую очередь следует относить данные систем ранней углубленной диагностики узлов и агрегатов. В наших предыдущих исследованиях были достаточно подробно рассмотрены методики первичной параметрической, функциональной и глубокой ранней диагностики, ранее не применявшиеся на судах, реализация которых позволила бы существенно повысить отказоустойчивость СТС, значительно снизить вероятность возникновения внезапных неисправностей, а также повысить экономическую и технологическую эффективность технического обслуживания и ремонта применительно к конкретным СТС.

### Основные факторы опасности для судов-газовозов

В контексте обеспечения безопасности эксплуатации танкеров, предназначенных для перевозки сжиженных газов, необходимо подробно рассмотреть особенности контроля параметров грузовых систем (в первую очередь, непосредственно грузовых танков), для которых можно выявить ряд критичных факторов:

- давление груза;
- давление внешней среды;
- динамические нагрузки, вызываемые движением судна;
- термические нагрузки;
- нагрузки, возникающие в результате всплескивания сжиженного газа;
- нагрузки от изгибов и прогибов корпуса судна;
- вес груза, емкостей, изоляции, сопряженного технологического оборудования, ветровые нагрузки на надпалубные части танков и соответствующие реакции опор и креплений.

Представляется очевидным, что наибольшей степенью опасности характеризуются динамические составляющие нагрузок, при этом следует отметить, что вышеприведенный перечень нагрузок можно классифицировать по важнейшему признаку – наличию возможности *регуляции* воздействующего фактора. Для *нерегулируемых* факторов (гравитационная составляющая нагрузок, ветровые нагрузки, температура окружающей среды) необходимо реализовать систему мониторинга и сигнализации, позволяющую в случае достижения контролируемыми параметрами граничных значений реализовать подготовку нештатных мер реагирования, таких как смена курса и пр. Для *регулируемых* факторов необходимо реализовать возможность соответствующих управляющих воздействий.

### Динамические воздействия на грузовую систему

Вне зависимости от типов используемых танков, в соответствии с требованиями [1], для грузовой системы газоведа необходимо обеспечить соблюдение ряда технологических условий, связанных с параметрами перевозимого груза.

Одним из наиболее важных параметров является *внутреннее давление* жидкости (сжиженного газа), которое возникает в результате действия ускорения силы тяжести груза, приложенного в его центре, в процессе движения или маневрирования судна, а также при продольно-горизонтальной, поперечно-горизонтальной, вертикальной, бортовой и килевой качках и при рыскании на нерегулярном волнении.

В связи с невозможностью воздействия на причины возникновения таких нагрузок единственным эффективным методом ослабления вышеперечисленных факторов становится снижение скорости и изменение курса судна, при этом СППР должна сформировать соответствующие рекомендации для оператора.

Величина внутреннего давления в танках, определяющаяся комбинированным воздействием гравитационного и динамического ускорений, рассчитывается согласно соотношению

$$P_{gd} = \frac{\alpha_{\beta} Z_{\beta} \rho_t}{1,02 \cdot 10^4},$$

где  $\alpha_{\beta}$  – безразмерное ускорение, выражаемое в долях от ускорения силы тяжести, которое возникает в результате воздействия гравитационных и динамических нагрузок в произвольном направлении  $\beta$ ;  $\rho_t$  – максимальная плотность груза при заданной расчетной температуре;  $Z_{\beta}$  – наибольшая высота жидкости над точкой, в которой определяется внутреннее давление, измеряемая от обшивки грузового танка в направлении вектора  $\beta$ , при этом объем куполов танка, рассматриваемых как часть принятого объема всего танка, должен приниматься в расчет при определении  $Z_{\beta}$  только в тех случаях, когда объем всех куполов танка  $V_d$  превышает значение, определяемое по формуле

$$V_d = V_t \frac{100 - FL}{FL},$$

где  $V_t$  – объем танка без куполов,  $FL$  – предел заполнения танка.

Следует дополнительно отметить, что в расчет принимается то направление действия сил, в котором наблюдается максимальное значение  $P_{gd}$ .

При разработке СППР необходимо предусмотреть контроль величины *накапливаемой усталостной нагрузки*, которая может быть определена в соответствии с расчетным соотношением

$$\sum \frac{n_i}{N_i} + \frac{10^3}{N_j} \leq C_w,$$

где  $n_i$  – число циклов напряжений при каждом уровне напряжений в течение всего срока службы танка;  $N_i$  – число циклов до излома для соответствующего уровня напряжений по кривой Велера (S-N);  $N_j$  – число циклов до излома для усталостных нагрузок, возникающих при погрузочно-разгрузочных операциях;  $C_w$  – величина, определяемая в зависимости от применяемого метода испытаний конструкций танков, используемого для построения кривой Велера, при этом стандартное значение  $C_w \leq 0,5$ , в обоснованных случаях [1] допускается отклонение значения  $0,5 \leq C_w \leq 1$ .

Кроме того, необходимо осуществлять непрерывный контроль *суммарных напряжений*:

$$\sigma_x = \sigma_{x.st} \pm \sqrt{\sum (\sigma_{x.dyn})^2},$$

$$\sigma_y = \sigma_{y.st} \pm \sqrt{\sum (\sigma_{y.dyn})^2},$$

$$\tau_{xy} = \tau_{xy.st} \pm \sqrt{\sum (\tau_{xy.dyn})^2},$$

где индексы *.st* соответствуют статическим, а *.dyn* – динамическим составляющим напряжений корпуса судна и танков при прогибах и кручении.

Для расчета величин *ускорений*, возникающих в результате воздействия качки судна, используется группа расчетных соотношений, справедливых для судов длиной более 50 м:

– вертикальное ускорение:

$$a_z = \pm a_0 \sqrt{1 + \left(\frac{5,3 - 45}{L_0}\right)^2 \left(\frac{x}{L_0} + 0,05\right)^2 \left(\frac{0,6}{C_B}\right)^{1,5}};$$

– поперечное ускорение:

$$a_y = \pm a_0 \sqrt{0,6 + 2,5 \left(\frac{x}{L_0} + 0,05\right)^2 K \left(1 + 0,06K \frac{z}{B}\right)^2};$$

– продольное ускорение:

$$a_x = \pm a_0 \sqrt{0,06 + A^2 - 0,25A},$$

где  $L_0$  – длина судна, значение которой используется для определения размеров поперечных сечений связей корпуса в соответствии с принятыми стандартами;  $C_B$  – коэффициент общей полноты;  $B$  – наибольшая теоретическая ширина судна;  $x$  – продольное расстояние от миделя до центра тяжести танка с его содержимым (при этом величина  $x$  характеризуется положительными значениями в нос от миделя и отрицательными – в корму от миделя);  $z$  – расстояние по вертикали от фактической ватерлинии судна до центра тяжести танка с его содержимым (при этом величина  $z$  характеризуется положительными значениями выше ватерлинии и отрицательными – ниже). Значение  $a_z$  не включает составляющую ускорения статического веса;  $a_y$  включает составляющую ускорения статического веса, действующую в поперечном направлении в результате бортовой качки;  $a_x$  включает составляющую ускорения статического веса, действующую в продольном направлении в результате воздействия килевой качки.

При этом

$$K = 13 \frac{GM}{B} \quad \text{при } K \geq 1;$$

$$A = \left(0,7 - \frac{L_0}{1200} + 5 \frac{z}{L_0}\right) \left(\frac{0,6}{C_B}\right);$$

$$a_0 = 0,2 \frac{V}{\sqrt{L_0}} + \frac{34}{L_0} - \frac{600}{L_0^2},$$

где  $V$  – эксплуатационная скорость;  $K$  – коэффициент, обычно принимаемый равным 1 (при этом его величина находится в зависимости от конкретных условий загрузки и характеристик обводов корпуса);  $GM$  – метацентрическая высота.

#### Динамические нагрузки на силовую установку

Одним из наиболее неблагоприятных внешних факторов, оказывающих существенное влияние на рабочие характеристики, техническое состояние и, как следствие, уровень безопасности эксплуатации, для всех типов двигателей является *внезапные набросы и сбросы нагрузок*. В результате таких воздействий возникают знакопеременные динамические и инерционные моменты, величина которых может соответствовать и даже в некоторых случаях превышать аналогичные рабочие значения, что оказывает крайне негативное влияние на двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Оценку влияния наброса нагрузки можно выполнить с использованием уравнения вращающихся масс ДВС [2]:

$$T_a \frac{d\varphi}{d\tau} = k_B \bar{b}_{\text{ц}} \eta_{i0} - T_{\text{МЭХ}} \bar{P}_{\text{ин}}^{0,1} - k_{\text{МФ}} \varphi - \bar{T}_{\text{Н}},$$

где  $T_a = \frac{J\omega_H}{T_{iqH}}$  – постоянная времени разгона ( $J$  – момент инерции вращающихся масс;  $T_{iqH}$  – крутящий момент на номинальном режиме;  $\omega_H$  – угловая скорость на номинальном режиме);  $\varphi = \frac{\omega - \omega_H}{\omega_H}$  – относительное приращение величины  $\omega$ ;  $k_B = \frac{1}{\eta_{\text{МЭХ.Н}}}$  ( $\eta_{\text{МЭХ.Н}}$  – механический КПД на номинальном режиме);  $\eta_{i0} = \frac{\eta_i}{\eta_H}$  – величина относительного индикаторного КПД;  $T_{\text{МЭХ}} = k_B - 1$  – относительные механические потери;  $k_M = (0,12, \dots, 0,14) \frac{105}{P_{eH}}$  – коэффициент, учитывающий изменение механических потерь;  $\bar{p}_{in} = \frac{P_{in}}{P_{inH}}$  – давление наддува;  $P_{eH}$  – среднее эффективное давление;  $\bar{T}_H$  – величина, находящаяся в зависимости от закона регулирования нагрузки, как правило, принимающаяся в пределах 0,995–1,003.

Для контроля и выявления ситуаций, связанных с набросом значительных нагрузок, при которых в главном двигателе возникают значительные механические напряжения, необходимо в составе проектируемой СППР создать адаптивный модуль, отвечающий за повышение оборотов двигателя перед набросом нагрузок.

Математическое описание любого ДВС характеризуется, в первую очередь, основным целесообразным критерием идентификации [3]:

$$E = L[q(e)] \rightarrow \min ,$$

где  $L$  – функционал от четной функции  $q(e)$ ;  $e$  – погрешность идентификации:

$$e = y - w; w = G[u; \alpha],$$

где  $u$  – входное управляющее воздействие,  $x$  и  $w$  – выходные процессы объекта исследования и модели,  $G$  – оператор связи.

Настройка  $G$  осуществляется посредством изменения параметров  $\alpha T = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  в соответствии со значением градиента  $E$ :

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\gamma \nabla E ,$$

где  $\gamma = \alpha(0)$  – начальное условие.

Таким образом,

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha_i} = L \left[ \frac{\partial q(e)}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \alpha_i} \right];$$

$$\frac{\partial e}{\partial \alpha_i} = -\frac{\partial \omega}{\partial \alpha_i} = -\frac{\partial G[u; \alpha]}{\partial \alpha_i},$$

при этом  $\frac{\partial \omega}{\partial \alpha_i}$  представляет собой функцию чувствительности параметра  $\alpha_j$ .

Градиент  $E$  определяется расчетным соотношением  $\nabla E = -L \left[ \frac{\partial q(e)}{\partial e} K_i[u; \alpha] \right]$ , где

$$K_i[u; \alpha] = \frac{\partial G[u; \alpha]}{\partial \alpha_i} .$$

Множество  $K[u, \alpha]$  позволяет получить все функции чувствительности параметров  $\alpha$ .

Использование данных расчетных соотношений позволяет определить все функции чувствительности изменяемых параметров виртуальной модели, характеризующей динамику исследуемого ДВС, позволяющей идентифицировать все мгновенные состояния двигателя.

Детерминирование функции чувствительности позволяет впоследствии при использовании математической модели исследуемого двигателя производить анализ его частотных и временных характеристик, а также выявлять основные зависимости, определяющиеся варьированием значений исходных параметров и прочих внешних факторов. Для такого анализа представляется целесообразным применение функции чувствительности в логарифмической форме – логарифмической функции чувствительности (ЛФЧ), поскольку она позволяет характеризовать величину относительного изменения выходного параметра  $R$  (или его оценки) для исследуемой модели, которое вызвано соответствующим изменением  $i$ -го показателя или модели  $b_i$ . В первом приближении линейная функция чувствительности характеризуется следующей зависимостью [3]:

$$\Lambda_i = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta b_i}{b_i} \approx \frac{\partial R}{R} / \frac{\partial b_i}{b_i} = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln b_i} = \frac{b_i}{R} D_i,$$

где  $D_i = (\partial R / \partial b_i)_0$  представляет собой искомую ФЧ, при этом нулевое значение индекса означает, что частные производные располагаются рядом с начальным значением  $b_i(0)$ .

В случае одновременного изменения  $m$  параметров исследуемой математической модели ДВС величины абсолютного и относительного изменения величины  $R$  будут соответствовать соотношениям

$$\Delta R_i \approx \sum_{i=1}^m D_i \Delta b_i = \sum_{i=1}^m \frac{R}{b_i} \Lambda_i \Delta b_i;$$

$$\delta R_i = \frac{\Delta R_i}{R} = \sum_{i=1}^m \Lambda_i \delta b_i = \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{R} D_i \delta b_i.$$

Для дальнейшей реализации модели ДВС необходимо рассмотреть следующие зависимости:

$$\frac{dy}{dt} + ay = u; \quad \frac{d\omega}{dt} + a\omega = u,$$

где  $\omega(t)$  – динамика угловой скорости,  $\varepsilon(t)$  – динамика углового ускорения коленчатого вала в режимах, близких к квазистатическому режиму ( $\omega = \omega^*$ ).

В этом случае уравнение чувствительности модели принимает следующий вид:

$$\frac{dv}{dt} + av = -\omega,$$

или

$$\frac{d\Lambda_\alpha}{dt} + \alpha\Lambda_\alpha = -\alpha,$$

где

$$v = \frac{\partial \omega}{\partial \alpha} = D_\alpha \quad \text{и} \quad \Lambda_\alpha = \frac{\alpha}{\omega} D_\alpha.$$

### Заключение

Результаты исследования позволяют с высокой степенью точности синтезировать математические модели грузовой системы и ДВС с учетом внешних и технологических динамических воздействий. Продолжением работы является разработка и апробирование моделей остальных СТС, так или иначе задействованных в обеспечении безопасности эксплуатации танкеров, перевозящих сжиженные газы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом* (Кодекс IGC). СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 1999. 292 с.
2. *Толшин В. И.* Автоматизация судовых энергетических установок / В. И. Толшин, В. А. Сизых. М.: РКонсульт, 2003. 303 с.
3. *Добролюбов И. П.* Разработка компьютерной настраиваемой модели двигателя внутреннего сгорания / И. П. Добролюбов, О. Ф. Савченко, В. В. Альт, С. Н. Ольшевский // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, № 6. С. 54–61.

Статья поступила в редакцию 11.03.2016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

*Епихин Алексей Иванович* – Россия, 353918, Новороссийск; Государственный морской университет им. адмирала Ф. Ф. Ушакова; канд. техн. наук; доцент кафедры «Судовые тепловые двигатели»; bsmbeton@mail.ru.



*A. I. Epikhin*

**MODELING OF THE DYNAMICAL PARAMETERS  
OF MARINE HARDWARE FOR DECISION SUPPORT  
SYSTEMS CREATION OF GAS-CARRYING VESSELS**

**Abstract.** The paper considers the main characteristics of the composition of the mathematic models, describing the dynamical parameters for two basic and most important systems (systems of cargo storage and of main power installation) of the modern gas-carrying vessels that affect the most of complex security indicators during the vessel traffic. There were found several initial, technological, functional and diagnostic parameters, specifying the dynamical properties of marine hardware. The basic security risk for the vessels carrying liquefied gas, is determined by the kind of cargo, therefore the correct synthesis of decision support systems must include the algorithms of imitational mathematical modeling for the generation of dangerous situations, that is impossible without using the determined mathematical models, which allow the evaluation of the state of the cargo system and the values of the parameters of the main power unit. The basic estimated ratios for the conditions of cargo system under the influence of external dynamic affections are listed. Also there are listed the basic transfer functions and sensitivity functions for the modern models of dual- and trial- fuel vessel engines. The most attention is paid to the parameters which are not adjusted to direct control. They are internal liquid pressure (liquefied gas) which is resulted in the acceleration of the force of gravity of cargo, placed in its center, during vessel movement and manoeuvring, as well as during surging, rolling, vertical and pitching motions. Taking into account the impossibility of impact on the causes of such load origin, the only effective method of lessening of the above mentioned factors is a reduction of speed and change of ship heading. At the same time the system of decision making support must develop the corresponding recommendations for the crew. The results of the study showed that there is a possibility to forecast the generation of the dangerous situations using the mathematical models of the corresponding marine hardware that may help the decision making support system formulate necessary recommendations for an operator at once.

**Key words:** decision making support system, safety of tanker operations, dynamical loads, motion of vessel, shock of load, liquid pressure (liquefied gas).

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnyi kodeks postroiki i oborudovaniia sudov, perevoziashchikh szhizhennye gazy nalive* (*Kodeks IGC*) [International Code of Construction and Design of the vessels, carrying liquefied gases]. Saint-Petersburg, ZAO «TsNIIMF» Publ., 1999. 292 p.
2. Tolshin V. I., Sizykh V. A. *Avtomatizatsiia sudovykh energeticheskikh ustanovok* [Automation of marine power installations]. Moscow, RKonsul't Publ., 2003. 303 p.
3. Dobroliubov I. P., Savchenko O. F., Al't V. V., Ol'shevskii S. N. Razrabotka komp'iuternoi na-stravaemoi modeli dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia [Development of the computer adjusted model of internal combustion engine]. *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2013, vol. 18, no. 6, pp. 54–61.

The article submitted to the editors 11.03.2016

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

***Epikhin Alexey Ivanovich*** – Russia, 353918, Novorossiysk; State Maritime University named after Admiral F. F. Ushakov; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department "Marine Heat Engines"; bsmbeton@mail.ru.

