

DOI 10.15589/jnn20160201

УДК 629.5.01

Д83

## THE OPTIMAL MAIN DIMENSIONS OF LNG CARRIERS FOR DIFFERENT ROUTES

### ОПТИМАЛЬНЫЕ ГЛАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СУДОВ-ГАЗОВОЗОВ LNG ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МАРШРУТОВ

**Dong Xinshuo**

michael3123@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-7248-2294

Дун Синьшо

асп.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** The method for determining the main parts of LNG carriers at the initial stages of design has been improved in this article. The method is reduced to solving the nonlinear optimization problem with a techno-economic criterion. With the help of the simulation modeling method, there were studied the main ship operations, possible emergencies during operations and the influence of random factors on the economic performance of LNG carriers. The extremum of the nonlinear function was found by using the conjugate gradient direction method. As an example, a problem of determining the optimal main parts of ships that cruise on routes Dampier (Australia) — Dapeng (China) and Tangguh (Indonesia) — Putian (China) is considered. The results indicate that due to the proposed method the optimal main parts of ships change significantly depending on the navigation area and volume of deliveries.

**Keywords:** LNG carriers; main parts of ships; optimal design; simulation modeling method.

**Аннотация.** В статье усовершенствован процесс проектирования судов-газовозов LNG на основе создания современного метода определения на начальных стадиях проектирования главных элементов этих судов, оптимальных по технико-экономическим показателям. В работе с использованием метода имитационного моделирования рассмотрены основные задачи функционирования судов-газовозов LNG, возможные аварийные ситуации и влияние случайных факторов на показатели экономической эффективности судов. В качестве примера определены оптимальные главные элементы судов-газовозов LNG, ходящих по маршрутам: Дампир (Австралия) — Дапэн (Китай) и Тангу (Индонезия) — Путянь (Китай).

**Ключевые слова:** суда-газовозы LNG; главные элементы судов; оптимальное проектирование; метод имитационного моделирование.

**Анотація.** У статті удосконалено процес проектування суден-газовозів LNG на основі створення сучасного методу визначення на початкових стадіях проектування головних елементів цих суден, оптимальних за техніко-економічними показниками. У роботі з використанням методу імітаційного моделювання розглянуто основні завдання функціонування суден-газовозів LNG, можливі аварійні ситуації і вплив випадкових факторів на показники економічної ефективності судів. В якості прикладу визначено оптимальні головні елементи суден-газовозів LNG ходять за маршрутами: Дамп'єр (Австралія) — Дап'єн (Китай) і Тангу (Індонезія) — Путянь (Китай).

**Ключові слова:** судна-газовози LNG; головні елементи суден; оптимальне проектування; метод імітаційного моделювання.

## REFERENCES

- [1] Ashik V. V. *Proektirovanie sudov* [Ship design]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1990. 320 p.
- [2] Barabanova M. N., Kosheleva I. V. *Model vybora osnovnykh elementov gazovozov* [Model for selecting the main parts of gas carriers]. Trudy TsNIIMF, issue 222, 1977, pp. 47–55.
- [3] Vashedchenko A. N. *Avtomatizirovannoe proektirovanie sudov* [Automated ship design]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 164 p.
- [4] Venttsel E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Science Publ., 1969. 576 p.
- [5] Gaykovich A. I. *Primenenie sovremennykh matematicheskikh metodov v proektirovanii sudov* [Use of modern mathematical methods in ship design]. Leningrad, LSI Publ., 1982. 89 p.
- [6] Davidan I. N., Lopatukhin L. I., Rozhkov V. A. *Registr SSSR. Veter i volny v okeanakh i moryakh. Spravochnye dannye* [Register of the USSR. Wind and waves in oceans and seas. Reference data]. Leningrad, Transport Publ., 1974. 360 p.
- [7] Dong Xinshuo. *Analiz sovremennogo sostoyaniya i puti sovershenstvovaniya metoda opredeleniya kharakteristik sudov-gazovozov LNG* [Analysis of the current state and ways of improvement of the method for determining the characteristics of LNG carriers]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2014, no. 5, pp. 12–16.
- [8] Dong Xinshuo. *Zavisimosti dlya opredeleniya gruzovmestimosti gazovozov LNG so sfericheskimi vkladnyimi i membrannymi tankami na nachalnykh stadiyakh proektirovaniya* [Dependencies for determining the cargo capacity of LNG carriers with spherical independent and membrane tanks at the initial stages of design]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2016, no. 1, pp. 18–20.
- [9] Dong Xinshuo. *Model funktsionirovaniya sudna-gazovoza LNG* [Model of LNG carrier operation]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2015, no. 1, pp. 18–20.
- [10] Dong Xinshuo. *Opredelenie nagruzki mass sudov-gazovozov LNG na nachalnykh stadiyakh proektirovanii* [Determination of mass load of LNG carriers at the initial stages of design]. Astrakhan, *Vestnik Astrakhan'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies], 2015, no. 4, pp. 16–22.
- [11] Dong Xinshuo. *Opredelenie ploshchadi i plecha parusnosti sudna-gazovoza LNG* [Determination of the wind area and lever arm of LNG carriers]. Nizhny Novgorod, *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Transactions of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev], 2015, no. 4, pp. 218–221.
- [12] Ershov A. D., Kuzmenko A. V. *Prakticheskie voprosy normirovaniya projektno-konstruktorskiykh rabot* [Practical issues of design work standardization]. Sudostroenie – Shipbuilding, 1978, no. 6, pp. 37–39.
- [13] Zaytsev V. V., Korobanov Yu. N. *Suda-gazovozy* [Gas carriers]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1990. 304 p.
- [14] Zaytsev V. V., Eganov A. E., Tolyshev E. V. *Tekhniko-ekonomicheskie voprosy proektirovaniya i stroitelstva sistem morskoy transportirovki gazov* [Techno-economic issues of design and construction of marine gas transportation system]. Mykolaiv, USMTU Publ., 2002. 150 p.
- [15] Zaytsev V. V. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya sistemy morskoy transportirovki gazov* [Theoretical basis of marine gas transportation system design. Doct. Diss.]. Mykolaiv, 2001.
- [16] Kamenetskiy Yu. T., Shostak V. P., Tantsyura A. G. *K voprosu o vybore arkhitekturno-konstruktivnogo tipa i glavnykh razmereniy sudna-gazovoza* [On the issue of selecting the architectural type and main dimensions of gas carrier] Mykolaiv, *Sbornik nauchnykh trudov NKI* [Collection of Scientific Publications of NSI], 1974, no. 85, pp. 114–122.
- [17] Mikhailov B. N. *Analiz osnovnykh parametrov i razrabotka matematicheskoy modeli morskikh metanovozov so sfericheskimi gruzovymi tsisternami* [Analysis of the main parameters and development of the mathematical model of marine methane carriers with spherical tanks. Cand. Diss.]. Mykolaiv, 1982.
- [18] Moreinis F. A., Barabanova M. N., Nakhimovskii M. A., Naumova I. A. *Issledovanie osnovnykh kharakteristik sudov dlia perevozki szhizhennykh prirodnykh gazov* [Study of the main characteristics of LNG carriers]. Trudy TsNIIMF, issue 209, 1976, pp. 44–57.
- [19] Pashin V. M. *Optimizatsiya sudov* [Ship Optimization]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1983. 296 p.

- [20] Ship theory handbook. Ed. by Voytkunskiy Y. I. In 3 Volumes. Vol. 1. *Spravochnik po teorii korablya. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli*. [Guide on ship theory. Hydromechanics. Resistance at sea. Ship propulsion devices]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1985. 768 p.
- [21] Fiakko A., Mak-Kormik G. *Nelineynoe programmirovaniye. Metody posledovatel'noy bezuslovnoy minimizatsii* [Nonlinear programming. Sequential unconstrained minimization techniques]. Moscow, Mir Publ., 1971. 240 p.
- [22] Duan Yulong. Hu Yihuai. Analysis of LNG tanker accidents and the risk control. *Ship & Ocean Engineering*, China, 2013, no. 6.
- [23] Schneekluth H., Bertram V. *Ship Design for Efficiency and Economy*. Butterworth — Heinemann, 1998. 224 p.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Природный газ как один из самых эффективных и безопасных источников энергии широко применяется в промышленности и быту. Месторождения природного газа в мире расположены неравномерно, большинство из них находится далеко от стран-потребителей и газ к этим странам необходимо доставлять. В случае если газовые месторождения отдалены от стран-потребителей газа морями на больших расстояниях, использование морского транспорта является единственным экономически эффективным [13]. Природный газ транспортируется судами-газовозами LNG. В связи с тем, что природный газ обеспечивает энергетическую и экономическую безопасность страны-потребителя, на проектирование такого типа судов следует обращать особое внимание.

Процесс традиционного проектирования судов разделяется на следующие взаимосвязанные стадии [1]: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект и рабочая конструкторская документация. По статистическим данным о трудоемкости отдельных стадий разработки проектов, предэскизная проработка проекта занимает в объеме общих работ до 10%. Но показатели эффективности будущих судов именно зависят от решений, принятых на этой стадии, вся последующая трудоемкая работа является детализацией этих решений [12].

На стадии предэскизной проработки проекта или так называемой начальной стадии проектирования, главным образом, предварительно определяются рациональные главные элементы судов. В настоящее время такая задача решается с помощью специализированных оптимизационных задач проектирования, использующих методы нелинейного программирования [7]. Это направление является актуальным и представляет как научный, так и практический интерес.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

На сегодня опубликовано небольшое количество научных работ, посвященных определению оптимальных главных элементов судов-газовозов LNG.

В работе [16] с использованием уравнений теории проектирования и графического метода разработана методика выбора оптимальных главных размерений судна-газовоза LNG при заданной грузоемкости.

В работе [18] с помощью вариантных расчетов изложено обоснование и выбор основных параметров крупнотоннажного судна-газовоза LNG. В этой работе предложена следующая последовательность исследования: обоснование грузоемкости и скорости; выбор тип грузовых танков; выбор категории ледовых усилений; выбор типа ЭУ.

Барабанова М.Н. и Кошелева И.В. [2] создали алгоритм выбора основных элементов судна-газовоза LNG в результате совместного решения уравнений и неравенств теории проектирования судна.

В работе [17] разработан метод определения оптимальных главных характеристик судов-газовозов LNG типа Moss с использованием метода нелинейного программирования. В основу задач функционирования и оптимизации судов положен детерминистический подход, в качестве критерия эффективности выбран критерий приведенных затрат.

В диссертационной работе Зайцева В. В. [15] приведен детерминированный метод определения оптимальных параметров флота судов-газовозов LNG. В этой работе также применен критерий приведенных затрат.

В настоящее время в научной литературе отсутствуют публикации, посвященные оптимальному проектированию судов-газовозов LNG на основе использования моделей их функционирования, обновленных моделей инженерных и мореходных свойств этих судов и экономических моделей в стохастической постановке.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** — определение оптимальных главных элементов судов-газовозов LNG для различных маршрутов с помощью усовершенствованного метода оптимального проектирования судов-газовозов LNG.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Чтобы сформулировать оптимизационную задачу необходимо [19]: определить независимые переменные и входные данные; выбрать критерий оптималь-

ности; разработать математическую модель; определить ограничения задачи оптимизации; выбрать метод поиска оптимума.

Пусть  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  — вектор независимых переменных. В данной работе в качестве компонентов  $X$  принимаются следующие параметры:  $x_1 = L$  — длина судна;  $x_2 = B$  — ширина судна;  $x_3 = H$  — высота борта судна;  $x_4 = T$  — осадка судна;  $x_5 = C_B$  — коэффициент общей полноты;  $x_6 = v_s$  — скорость хода;  $x_7 = n_{LNG}$  — количество судов во флоте.

Пусть  $U(u_1, u_2, \dots, u_m)$  — вектор входных данных. Его компонентами являются, например, дальность плавания, автономность, объем поставок грузов по контракту, плотность LNG, характеристики района плавания, экономические данные и т. д.

Главным принципом оптимизации транспортных судов является поиск компромиссных решений, обеспечивающих достижение наивысшей экономической эффективности судов за весь их жизненный цикл и выполнение многочисленных и во многих случаях противоречивых требований к их качествам [19]. В связи с этим, в качестве критерия оптимальности используется критерий максимизации прибыли. Таким образом, оптимизационная задача сводится к нахождению максимума критерия оптимальности:

$$F(X, U) = P - I - C \rightarrow \text{максимум,}$$

где  $P, I, C$  — прибыль, доходы и расходы от эксплуатации судов в течение всего срока эксплуатации без учета дисконтирования.

Критерий оптимальности вычисляется в математической модели проектирования судов (ММПС) — это система алгебраических и дифференциальных уравнений, включающая также вычислительную процедуру, позволяющую определить значение критерия оптимальности [5]. В данной работе ММПС состоит из трех взаимосвязанных моделей: модель инженерных и мореходных качеств судов, модель функционирования судов и экономическая модель судов.

В модели инженерных и мореходных качеств судов с использованием регрессионных зависимостей, приближенных формул и близких прототипов вычисляются коэффициенты полноты судна, мощность главного двигателя, нагрузка масс судна и грузопместимость.

Коэффициенты полноты вычисляются с помощью следующих приближенных зависимостей [23]:

– коэффициент полноты площади мидель-шпангоута

$$C_M = 0,9 + 0,1 C_B,$$

– коэффициент полноты площади ватерлинии

$$C_{WP} = \frac{C_B}{0,471 + 0,551 C_B}.$$

Необходимая мощность главного двигателя определяется по формуле, кВт [20]:

$$P_S = \frac{P_E}{\eta_D \eta_{\Pi}} = \frac{R_{Total} v_s}{\eta_H \eta_0 \eta_R \eta_{\Pi}},$$

где  $P_S$  — необходимая мощность ГД;  $P_E$  — буксировочная мощность ГД;  $\eta_D$  — пропульсивный коэффициент;  $\eta_{\Pi}$  — КПД передачи мощности от двигателя к движителю;  $\eta_H$  — коэффициент влияния корпуса;  $\eta_0$  — КПД гребного винта в свободной воде;  $\eta_R$  — коэффициент неравномерности потока;  $R_{Total}$  — полное сопротивление движению судна;  $v_s$  — скорость хода судна.

Полное сопротивление движению судна вычисляется по формуле, кН:

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A + R_{AW} + R_{AA},$$

где  $R_F$  — сопротивление трения;  $(1 + k_1)$  — коэффициент формы корпуса;  $R_{APP}$  — сопротивление выступающих частей;  $R_W$  — волновое сопротивление;  $R_B$  — сопротивление бульба;  $R_{TR}$  — сопротивление транца;  $R_A$  — дополнительное сопротивление, связанное с переходом от модели к натуре;  $R_{AW}$  — дополнительное сопротивление, вызванное волнением моря;  $R_{AA}$  — сопротивление воздуха.

Составляющие полного сопротивления  $R_F, k_1, R_{APP}, R_W, R_B, R_{TR}, R_A$  определяются по методу Холтропа-Меннена. Дополнительное сопротивление, вызванное волнением моря  $R_{AW}$  определяется по формулам, предложенным в справочнике [20].

Сопротивление воздуха определяется по формуле [23]:

$$R_{AA} = C_{AA} \frac{\rho_A}{2} v_A^2 A_T,$$

где  $C_{AA}$  — коэффициент сопротивления воздуха;  $\rho_A$  — плотность воздуха;  $v_A$  — относительная скорость воздушного потока;  $A_T$  — поперечная площадь парусности.

Поперечная площадь парусности определяется по формулам, полученным автором на основе обработки статистических данных 30 вариантов судов-газовозов LNG [11]:

для судна-газовоза LNG типа Moss

$$A_T = 10,04 W^{0,432} \text{ или } A_T = 2,542 (H - T) B,$$

для судна-газовоза LNG мембранного типа

$$A_T = 5,234 W^{0,471} \text{ или } A_T = 2,273 (H - T) B,$$

где  $W$  — грузопместимость судна, м<sup>3</sup>.

И так, после определения необходимой мощности главного двигателя  $P_S$  можно из базы данных подобрать главный двигатель для проектируемого судна.

Нагрузка масс судна состоит из водоизмещения порожнем и дедвейта, т [1]:



$$\Delta = D_{\text{пор}} + DW,$$

где  $D_{\text{пор}}$  — водоизмещение порожнем;  $DW$  — дедвейт судна.

Водоизмещение порожнем и дедвейт судна-газовоза LNG определяются по следующим формулам, т [10, 13]:

$$D_{\text{пор}} = P_{\text{к}} + P_{\text{об}} + P_{\text{т.и}} + P_{\text{эу}} + P_{\text{з.в}},$$

$$DW = P_{\text{г}} + P_{\text{топ}} + P_{\text{топ.о}} + P_{\text{эк}} + P_{\text{доп}} + P_{\text{диф.б}},$$

где  $P_{\text{к}}$  — масса металлического корпуса;  $P_{\text{об}}$  — масса оборудования, включая криогенное оборудование;  $P_{\text{т.и}}$  — масса системы грузовых танков;  $P_{\text{эу}}$  — масса энергетической установки;  $P_{\text{з.в}}$  — запас водоизмещения;  $P_{\text{г}}$  — грузоподъемность судна;  $P_{\text{топ}}$  — масса топлива для ГД;  $P_{\text{топ.о}}$  — масса топлива для остальных установок;  $P_{\text{эк}}$  — масса экипажа, провизии и снабжения;  $P_{\text{доп}}$  — дополнительная масса, в которую входят переменные жидкие грузы, запасы масла и котельная вода и т.д.;  $P_{\text{диф.б}}$  — масса жидкого дифферентовочного балласта.

Грузовместимость судна-газовоза LNG определяется по формулам, полученным автором на основе обработки данных по 80 судам разных размерений [8]:

для судов-газовозов LNG типа Moss:

$$W = 0,074 (LBH)^{1,134},$$

для судов-газовозов LNG мембранного типа:

$$W = 0,055 (LBH)^{1,17}.$$

Для определения ограничений задачи оптимизации в модели инженерных и мореходных качеств судов также проверены посадка судна, остойчивость, минимальный надводный борт, прочность и непотопляемость судна.

В модели функционирования рассмотрены основные функциональные операции судов и возможные аварийные ситуации. Транспортная операция судна-газовоза LNG — типичный круговой рейс. В состав основных функциональных операций судна-газовоза LNG входят погрузочная операция, транспортировка груза в порт назначения, разгрузочная операция и балластный переход в порт отправления.

Погрузочная операция в порту включает [9]: подход к порту, швартовка буксирами-кантовщиками, подготовка к погрузке, погрузка, подготовка к отходу, отход от порта.

Время погрузочной операции может определяться по формуле:

$$t_{\text{пор.оп.}} = t_{m1} + t_{m2} + t_{m3} + t_{m4} + t_{m5} + t_{m6},$$

где  $t_{\text{пор.оп.}}$  — время погрузочной операции, сут;  $t_{m1} \dots t_{m6}$  — соответствующее время составляющих погрузочной операции в порту отправления, сут.

Время разгрузочной операции также может определяться аналогично:

$$t_{\text{разг.оп.}} = t_{n1} + t_{n2} + t_{n3} + t_{n4} + t_{n5} + t_{n6},$$

где  $t_{\text{разг.оп.}}$  — время разгрузочной операции, сут;  $t_{n1} \dots t_{n6}$  — время подхода к порту назначения, время швартовки, время подготовки к разгрузке, время разгрузки, время подготовки к отходу, время отхода от порта назначения.

Время транспортировки груза и время балластного перехода определяются в виде:

$$t_{\text{тр}} = \frac{S}{v_0}, \quad t_{\text{бал}} = \frac{S}{v_0^*},$$

где  $t_{\text{тр}}$  — время транспортировка груза, сут;  $t_{\text{бал}}$  — время балластного перехода, сут;  $S$  — расстояние между портами, миль;  $v_0, v_0^*$  — скорость судна в грузу и балласте с учетом потери скорости на волнении, уз.

В связи с этим, что обычно суда-газовозы LNG перевозят грузы по долгосрочным контрактам, для таких судов отсутствует простой из-за недостатка заказов. Время годового продуктивного периода  $T_{\text{п.п}}$  судна-газовоза LNG определяется по формуле, сут:

$$T_{\text{п.п}} = 365 - T_{\text{т.рем}} - T_{\text{к.рем}} - T_{\text{авар.рем}},$$

где  $T_{\text{т.рем}}$  — время текущего ремонта в год;  $T_{\text{к.рем}}$  — время капитального ремонта в год;  $T_{\text{авар.рем}}$  — время аварийного ремонта в год.

Во время кругового рейса судов-газовозов LNG возможны различные аварии. За время эксплуатации 1964–2010 гг. произошло 158 аварийных ситуаций, подразделяющихся на восемь типов: столкновение (19), посадка на мель (8), касание (8), пожар (10), неисправность оборудования и механизмов (55), непогода (9), авария при погрузке и выгрузке (22) и неисправность системы управления грузом (27) [22]. Аварии, возникающие при эксплуатации судов-газовозов LNG завершаются ремонтом.

Время аварийного ремонта в год определяется по формуле, сут:

$$T_{\text{авар.рем}} = \sum_{i=1}^8 n_{\text{авар}i} \overline{t_{\text{авар.рем}i}},$$

где  $n_{\text{авар}i}$  — количество  $i$ -го типа аварий в год;  $\overline{t_{\text{авар.рем}i}}$  — среднее время аварийного ремонта  $i$ -го типа аварии. Время аварийного ремонта и указанное время текущего и капитального ремонта определяются по данным судоремонтных заводов.

Перед выходом судна в море проверяются гидрометеорологические условия в районе эксплуатации. Есть погодные условия не подходящие для выхода в море, например шторм, то судно будет отстаиваться в порту до улучшения погоды. В данной работе критерием гидрометеорологических условий является  $h_{3\%}$  — высота волны 3% обеспеченности.

Время ожидания в порту определяется по формуле (с учетом возможности появления нескольких штормов подряд):

$$t_{ож} = \sum_{i=1}^m t_{ож\ i},$$

где  $t_{ож\ i}$  — продолжительность  $i$ -го шторма, которая определяется по результатам обработки гидрометеорологических данных района эксплуатации судна;  $m$  — количество штормов. Время ожидания делится на два типа:  $t_{ож.наз}$  — время ожидания в порту назначения,  $t_{ож.отп}$  — время ожидания в порту отправления.

На основе анализа основных функциональных операций судна-газовоза LNG создана модель функционирования судна. Укрупненная блок-схема модель представлена в рис. 1.

В модели функционирования параметры разделяются на детерминированные и случайные. К параметрам первой группы относятся, например, расстояние между портами. К параметрам второй группы относятся, например, такие:

- высота волны 3% обеспеченности  $h_{3\%}$ , величина которой зависит от района эксплуатации судна. Справочник [6] предлагает, что функция распределения  $h_{3\%}$  подчиняется логнормальному закону. Судно выходит в море только при условии, когда  $h_{3\%}$  в районе эксплуатации меньше критической высоты волны 3% обеспеченности  $h_{3\%кр}$  для судна-газовоза LNG.

- количество аварий  $i$ -го типа в год, которое подчиняется распределению Пуассона. Распределение Пуассона представляет собой вероятностное распределение дискретного типа, функция вероятности определяется как [4]:

$$P(X = k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

где  $k$  — целые неотрицательные числа;  $e$  — основание натурального логарифма;  $\lambda$  — параметр, равен математическому ожиданию и дисперсии случайной величины.

- время текущего и капитального ремонтов в год, время аварийного ремонта аварии  $i$ -го типа подчиняются равномерному распределению.

- продолжительность шторма подчиняется нормальному распределению.

Случайные параметры в модели функционирования рассматриваются с помощью метода имитационного моделирования.

На рис. 1 время кругового рейса определяется по формуле, сут:

$$t_p = t_{пор.оп.} + t_{тр} + t_{разг.оп.} + t_{бал} + t_{ож.наз} + t_{ож.отп.},$$

где  $t_p$  — время кругового рейса судна.

Общее время круговых рейсов судна в год вычисляется в виде, сут:

$$t_{total} = \sum_{i=1}^n t_{pi},$$

где  $t_{total}$  — общее время круговых рейсов судна в год;  $t_{p\ i}$  — время  $i$ -го кругового рейса;  $n$  — количество круговых рейсов в год, в модели функционирования величина  $t_{total}$  будет набираться, пока условие  $t_{total} \geq T_{п.п}$  не выполняется.

После определения количества круговых рейсов в год, последовательно можно рассчитывать количество круговых рейсов за жизненный цикл судна:

$$n_T = \sum_{i=1}^T n_i,$$

где  $n_T$  — количество круговых рейсов за жизненный цикл судна;  $n_i$  — количество круговых рейсов в  $i$ -й год;  $T$  — продолжительность жизненного цикла судна, лет.

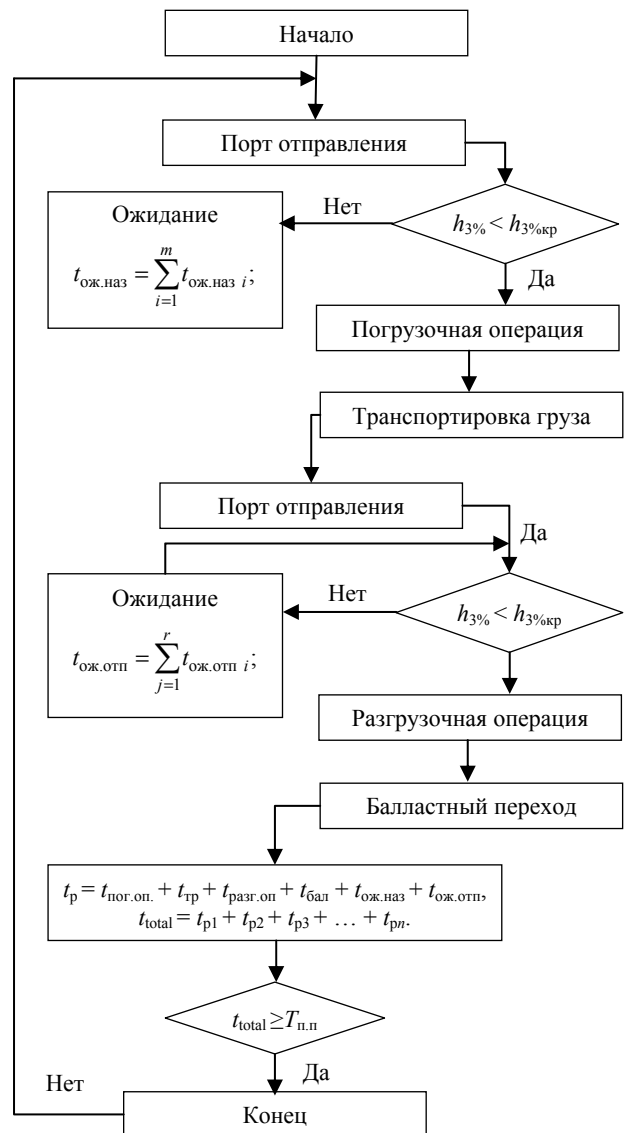


Рис. 1. Блок-схема модели функционирования судна-газовоза LNG

В экономической модели на основе полученных результатов в первых двух моделях вычисляется критерий оптимальности. Прибыль рассчитывается как разница между доходами и расходами. Доходы от эксплуатации судов, то есть фрахтовые доходы от использования судов тесно связаны с фрахтовой ставкой груза. К расходам относят строительную стоимость судов и эксплуатационные расходы.

Прежде эти экономические показатели рассматривались как детерминированные величины. Но значения таких параметров как цена на сталь, цена на топливо, зарплата рабочих на судостроительном заводе и т. д. носят случайный характер, они колеблются в зависимости от конъюнктуры рынка. В данной работе они рассматриваются как случайные величины. Методологической основой их исследования являются теория вероятностей и метод имитационного моделирования.

Строительная стоимость судна определяется по формуле:

$$C_c = C_n + C_{пр},$$

где  $C_n$  — стоимость постройки судна;  $C_{пр}$  — стоимость проектирования судна.

На начальных стадиях проектирования стоимость постройки судна может определяться по группам конструктивной разбивки. В этом случае стоимость постройки по каждой из групп конструктивной разбивки рассчитывается произведением массы конструкции на стоимость одной единицы массы, установленная по статистическим данным или близким прототипам. В общем виде стоимость постройки судна представляется следующим выражением [14]:

$$C_n = C_k + C_{об} + C_{т.и} + C_{эу} + C_p,$$

где  $C_k$ ,  $C_{об}$ ,  $C_{т.и}$ ,  $C_{эу}$ ,  $C_p$  — стоимость металлического корпуса, оборудования, системы грузовых танков, ЭУ и работ.

Эксплуатационные расходы судна за жизненный цикл вычисляется по формуле:

$$C_{эк} = C_{пос} + C_{топ} + C_{порт},$$

где  $C_{пос}$  — постоянные эксплуатационные расходы;  $C_{топ}$  — расходы на топливо;  $C_{порт}$  — портовые сборы.

Постоянные эксплуатационные расходы за жизненный цикл рассчитываются по формуле:

$$C_{пос} = (E_{ам} + E_{рем} + E_{сн} + E_{стр} + E_{эк}) T_{life},$$

где  $E_{ам}$ ,  $E_{рем}$ ,  $E_{сн}$ ,  $E_{стр}$ ,  $E_{эк}$  — годовые амортизационные отчисления, расходы на ремонт и обслуживание, расходы на снабжение, страховая премия и расходы на содержание экипажа;  $T_{life}$  — жизненный цикл судна, лет.

На начальных стадиях проектирования  $E_{ам}$ ,  $E_{рем}$ ,  $E_{сн}$  и  $E_{стр}$  определяются по упрощенному варианту — величины этих параметров принимаются в зависи-

мости от строительной стоимости судна, расходы на содержание экипажа  $E_{эк}$  включает в себя заработную плату, вознаграждение, отчисление в пенсионный фонд и т.д.

$$E_{ам} = k_{ам} C_c; E_{рем} = k_{рем} C_c; E_{сн} = k_{сн} C_c;$$

$$E_{стр} = k_{стр} C_c; E_{эк} = 12c_{эк} N_{эк},$$

где  $k_{ам}$  — норма амортизационных отчислений;  $k_{рем}$  — норма расходов на ремонт и обслуживание;  $k_{сн}$  — норма расходов на снабжение;  $k_{стр}$  — коэффициент страховой премии;  $c_{эк}$  — расходы на содержание одного человека в месяц;  $N_{эк}$  — численность экипажа, чел.

Расходы на топливо занимают довольно значительную часть эксплуатационных расходов судна. Расходы на топливо за жизненный цикл судна определяются в виде:

$$C_{топ} = c_{топ} g_{см} \sum_{i=1}^{n_T} e_{топ i},$$

где  $c_{топ}$  — стоимость 1 т топлива, величина  $c_{топ}$  зависит от типа топлива, применяющегося в СЭУ;  $g_{см} = 1,02...1,04$  — коэффициент учета смазочных материалов;  $e_{топ i}$  — масса расходуемого топлива за  $i$ -й круговой рейс;  $n_T$  — количество рейсов за жизненный цикл судна.

Основные портовые сборы  $C_{порт}$  включают корабельный, причальный, лоцманский, швартовный, буксирный, сбор на стоянку и агентская комиссия. Факторами, определяющими подлежащую к уплате сумму сбора, являются характеристики судна (вместимость, длина, посадка судна), форма судоходства, количество судозаходов, род и количество груза, время стоянки в порту и т. д. Ставки портовых сборов с судов зависят от требований морских портов.

Доходы от эксплуатации судна-газовоза LNG за весь период эксплуатации рассчитываются по формуле:

$$I^* = \sum_{i=1}^T f \cdot Q_i,$$

где  $I^*$  — доходы от эксплуатации одного судна-газовоза LNG за весь срок службы, долл.;  $f$  — фрахтовая ставка груза, долл./т;  $Q$  — объем поставок в  $i$ -м году, т.

Фрахтовая ставка в зависимости от различных конъюнктурных факторов, например длительность рейса, район плавания и т. д.

Таким образом, критерий оптимальность — общая прибыль от эксплуатации судов-газовозов LNG определяется по формуле:

$$P = I - C = n_{LNG} (I^* - C_c - C_{эк}),$$

где  $P$ ,  $I$ ,  $C$  — общая прибыль, доходы и расходы

от эксплуатации судов-газовозов LNG за весь срок службы.

На компоненты вектора  $X$  накладывается множество ограничений, которое подразделяется на тривиальные и функциональные [3]. Таким образом, задача определения оптимальных главных элементов судов-газовозов LNG может быть сформулирована следующим образом: при заданном векторе  $U$  определить такой вектор  $X$ , чтобы при выполнении тривиальных и функциональных ограничений критерий оптимальности  $F(X, U)$  достигал максимума.

В рассматриваемой задаче критерий оптимальности является нелинейной функцией независимых переменных. Поэтому задача поиска его экстремума относится к задачам нелинейного программирования. В данной работе для поиска максимума критерия оптимальности при наличии ограничений использу-

ются метод сопряженных направлений (метод Пауэлла) и метод внешней точки [21].

В качестве примера рассмотрены два маршрута поставок природного газа: Дампир (Австралия) — Дапэн (Китай) и Тангу (Индонезия) — Путянь (Китай) (рис. 2). Задание на проектирование (величины в скобках для маршрута между Тангу и Путянем): автономность плавания — 30 сут; дальность плавания — 13000 миль; количество членов экипажа — 38 чел.; срок службы судна — 30 лет; тип системы грузовых танков — мембранный тип; длина линии — 2745 миль (2227 миль); плотность перевозимого груза — 0,46 т/м<sup>3</sup> (0,43 т/м<sup>3</sup>); объем поставок LNG в год — 6 млн т (2,6 млн т). Результаты расчетов приведены в табл., поиск оптимальных главных элементов судов для различных маршрутов начинается с одинаковой начальной точки.

Таблица 1. Результаты решения задачи оптимизации

| Наименование показателя                        | Оптимальный вариант предложенной задачи оптимизации (Дампир — Дапэн) | Характеристики судна, эксплуатирующегося на линии в настоящее время (Дампир — Дапэн) | Оптимальный вариант предложенной задачи оптимизации (Тангу — Путянь) | Характеристики судна, эксплуатирующегося на линии в настоящее время (Тангу — Путянь) |
|--|--|--|--|--|
| Длина судна, м                                 | 292,76   | 274,10   | 335,68   | 274,10   |
| Ширина судна, м                                | 49,96  | 43,35  | 49,36  | 43,35  |
| Высота борта судна, м                          | 26,40  | 26,25  | 26,70  | 26,25  |
| Осадка судна, м                                | 11,86  | 11,45  | 10,91  | 11,45  |
| Коэффициент общей полноты                      | 0,726  | 0,750  | 0,780  | 0,750  |
| Скорость хода, уз.                             | 18,69  | 19,50  | 18,59  | 19,50  |
| Количество судов во флоте, ед.                 | 3  | 3  | 1  | 2  |
| Дедвейт, т                                     | 93257  | 73050  | 102127   | 73050  |
| Грузовместимость, м <sup>3</sup>               | 189156   | 147237   | 221772   | 147237   |
| Водоизмещение, т                               | 129086   | 104789   | 143309   | 104789   |
| Мощность главного двигателя, кВт               | 29400  | 27300  | 32400  | 27300  |
| Средняя продолжительность рейса, сут.          | 14,56  | 14,12  | 12,46  | 12,20  |
| Строительная стоимость судна, млн долл.        | 237,29   | 213,50   | 265,86   | 213,50   |
| Общая прибыль от эксплуатации судов, млн долл. | 1698   | 1019*  | 1135   | 755*   |

\*Определены при тех же фрахтовых ставках, что и оптимальные варианты.



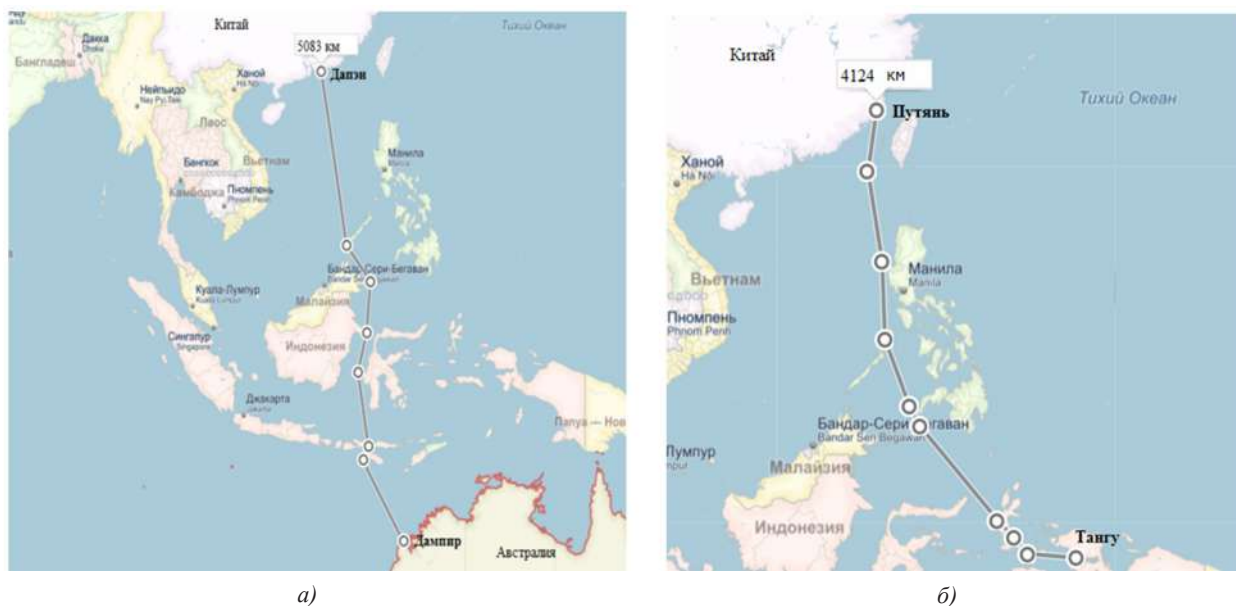


Рис. 2. Маршруты судов-газовозов LNG:  
а) между Дампиром и Дапэнном; б) между Тангу и Путянем

**ВЫВОДЫ.** 1. Разработанный метод определения оптимальных главных элементов судов-газовозов LNG позволяет обеспечить экономическую эффективность и безопасность эксплуатации судов для рассматриваемого объема поставок и условий эксплуа-

тации в стохастической постановке. 2. Как видно из приведенных примеров, по предложенному методу оптимальные главные элементы судов-газовозов LNG существенно изменяются в зависимости от района плавания и объема поставок.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ашик, В. В. Проектирование судов [Текст] / В. В. Ашик. — Л. : Судостроение, 1985. — 320 с.
- [2] Барабанова, М. Н. Модель выбора основных элементов газозовов [Текст] / М. Н. Барабанова, И. В. Кошелева // Труды ЦНИИМФ. — 1977. — Вып. 222. С. 47–55.
- [3] Вашедченко, А. Н. Автоматизированное проектирование судов [Текст] / А. Н. Вашедченко. — Л. : Судостроение, 1985. — 164 с.
- [4] Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. М. : Наука, 1969. — 576 с.
- [5] Гайкович, А. И. Применение современных математических методов в проектировании судов [Текст] / А. И. Гайкович. — Л. : Изд. ЛКИ, 1982. — 89 с.
- [6] Давидан, И. Н. Регистр СССР. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные / И. Н. Давидан, Л. И. Лопатухин, В. А. Рожков. — Л. : Транспорт, 1974. — 360 с.
- [7] Дун Синьшо. Анализ современного состояния и пути совершенствования метода определения характеристик судов-газовозов LNG [Текст] / Дун Синьшо // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2014. — № 5. — С. 12–16.
- [8] Дун Синьшо. Зависимости для определения грузоемкости газозовов LNG со сферическими вкладными и мембранными танками на начальных стадиях проектирования [Текст] / Дун Синьшо // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2015. — № 4. — С. 64–67.
- [9] Дун Синьшо. Модель функционирования судна-газовоза LNG [Текст] / Дун Синьшо // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2015. — № 1. — С. 18–20.
- [10] Дун Синьшо. Определение нагрузки масс судов-газовозов LNG на начальных стадиях проектирования [Текст] / Дун Синьшо // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. : Морская техника и технология. — Астрахань: АГТУ, 2015. — № 4. — С. 16–22.
- [11] Дун Синьшо. Определение площади и плеча парусности судна-газовоза LNG [Текст] / Дун Синьшо // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. — Нижний Новгород : НГТУ, 2015. — № 4. — С. 218–221.
- [12] Ершов, А. Д. Практические вопросы нормирования проектно-конструкторских работ [Текст] / А. Д. Ершов, А. В. Кузьменко // Судостроение. — 1978. — № 6. — С. 37–39.
- [13] Зайцев, В. В. Суда-газовозы [Текст] / В. В. Зайцев, Ю. Н. Коробанов. — Л. : Судостроение, 1990. — 304 с.

- [14] **Зайцев, В. В.** Техничко-економические вопросы проектирования и строительства систем морской транспортировки газов [Текст] : учеб. пособие / В. В. Зайцев, А. Е. Еганов, Э. В. Гольшев. — Николаев : УГМТУ, 2002. — 150 с.
- [15] **Зайцев, В. В.** Теоретические основы проектирования системы морской транспортировки газов: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.03.08 / Зайцев Владимир Васильевич ; УГМТУ. — Николаев, 2001.
- [16] **Каменецкий, Ю. Т.** К вопросу о выборе архитектурно-конструктивного типа и главных размерений судна-газовоза [Текст] / Ю. Т. Каменецкий, В. П. Шостак, А. Г. Танцюра // Сб. науч. трудов НКИ. — Николаев : НКИ, 1974. — Вып. 85. — С. 114–122.
- [17] **Михайлов, Б. Н.** Анализ основных параметров и разработка математической модели морских метановозов со сферическими грузовыми цистернами: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.03.08 / Михайлов Борис Николаевич ; НКИ. Николаев, 1982.
- [18] **Морейнис, Ф. А.** Исследование основных характеристик судов для перевозки сжиженных природных газов [Текст] / Ф. А. Морейнис, М. Н. Барабанова, М. А. Нахимовский, И. А. Наумова // Труды ЦНИИМФ. — 1976. — Вып. 209. — С. 44–57.
- [19] **Пашин, В. М.** Оптимизация судов [Текст] / В. М. Пашин. — Л. : Судостроение, 1983. — 296 с.
- [20] **Справочник по теории корабля** [Текст]: в трех томах. Том-1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / под ред. Я. И. Войткунского. — Л. : Судостроение, 1985. — 768 с.
- [21] **Фиакко, А.** Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации [Текст] / А. Фиакко, Г. Мак-Кормик. — М. : Мир, 1971. — 240 с.
- [22] **Duan Yulong.** The analysis of LNG tanker accidents and the risk control [Text] / Duan Yulong, Hu Yihuai // Ship & Ocean Engineering, China, 2013, no. 6.
- [23] **Schneekluth, H.** Ship Design for Efficiency and Economy [Text] / H. Schneekluth, V. Bertram. — Butterworth-Heinemann, 1998. 224 p.

---

© Дун Сіншо

Надійшла до редколегії 01.04.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. *В. О. Некрасов*