

УДК 629.12.

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi63.75>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА МАССЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОРПУСА КОМБИНИРОВАННОГО СУДНА

И.А. Гуляев

ФАУ «Российский Речной Регистр», г. Москва, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2602-3115>

Ю.А. Кочнев

Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород, Россия

Е.П. Роннов

Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Расчёт полного водоизмещения и максимального дедвейта для судов невозможен без точного определения массы металлического корпуса. На её значение оказывает влияние класс, тип судна, архитектурно-конструктивные особенности, условия эксплуатации, выражаемые в обеспечении общей и местной прочности. Все это необходимо учитывать уже на начальных этапах проектирования, так как даже незначительные погрешности при расчете указанной массы оказывают сильное влияние на конечный результат водоизмещения порожнём. В настоящей работе рассмотрена математическая модель прогнозирования данной составляющей нагрузки масс для комбинированного судна, включающая генерацию теоретической судовой поверхности, пространственную компоновку элементов корпуса, расчёт фактических размеров отсеков и связей конструкции корпуса и на их основании постатейный расчёт массы. Приведены основные эмпирические формулы, составляющие содержание математической модели и результаты тестовых расчётов.

Ключевые слова: Математическая модель, комбинированное судно, металлический корпус

Введение

Комбинированные суда повышают экономическую эффективность танкеров за счёт обратной загрузки. Одновременно они являются более универсальными судами, что становится важным качеством в условиях рыночной нестабильности грузопотоков, от характеристик которых зависит архитектурно-конструктивный тип судна. Этим объясняется выросший интерес к проектированию и постройке судов, способных перевозить как наливные, так и сухие грузы.

Масса металлического корпуса грузовых судов, например танкеров, может достигать до 70% от массы самого судна. Поэтому точность расчета этой составляющей нагрузки существенно влияет на точность определения водоизмещения и, соответственно, на все технико-эксплуатационные и экономические показатели судна. В связи с этим требуется на всех стадиях проектирования судна его массу и ее составляющие рассчитывать с максимально возможной точностью. Отмеченное в полной мере можно отнести и к комбинированным грузовым судам, которые предназначаются для попеременной перевозки или жидких грузов наливом, или насыпных и других твердых грузов навалом. При этом для каждого рода груза предусматриваются отдельные грузовые помещения. В некоторой степени эти суда являются вариантом развития наливного судна. Однако следует иметь в виду, что масса металлического корпуса комбинированного судна будет заметно отличаться от массы танкеров, так как наличие дополнительно помещения для сухого груза приводит к особенностям его конструкции корпуса (рисунок 1), условиям обеспечения общей и местной прочности. По сути, объединяются два различных конструктивных типа корпуса [1].

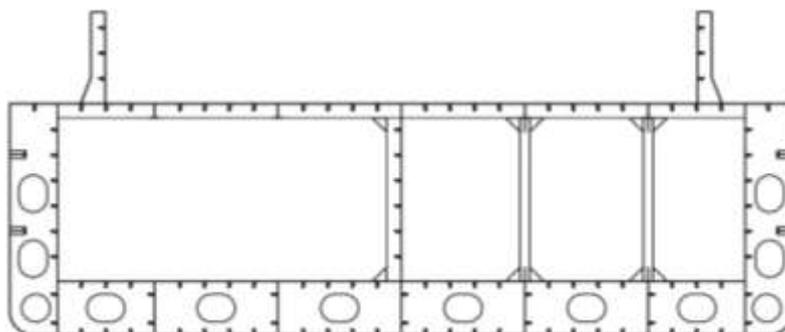


Рис. 1. Типовая схема мидель-шпангоут комбинированного судна

Особенности математической модели корпуса комбинированного судна и расчёта его массы

На начальных стадиях для расчета данной массы используются формулы, в которых устанавливается связь между искомой величиной и элементами и характеристиками судна, объединенные в так называемый модуль. В работе [2] рассматриваются четыре группы формул, позволяющие в зависимости от состава исходных данных, условий постановки задачи и, следовательно, вида модуля, используя статистические данные по близкому судну-прототипу рассчитывать массу металлического корпуса. Вид модуля определяет достигаемую точность расчетной формулы. В [3] предлагается делать выбор вида модуля из возможного множества на основе решения оптимизационной задачи, исходя из экстремальных значений показателей аппроксимации виртуальных значений искомой величины.

Наиболее достоверный результат, как отмечается в [2], достигается по формулам четвертой группы, позволяющим учесть конструктивные особенности корпуса, когда масса металлического корпуса рассчитывается как сумма масс основных его конструктивных элементов, каждый из которых рассчитывается на начальной стадии по своему модулю. По сути, этот подход как бы соответствует расчету, когда соответствующие конструктивные чертежи имеются. Развить и применить этот подход при отсутствии соответствующих чертежей при исследовательском проектировании в настоящее время удается, рассчитывая массу корпуса по всем отдельным конструктивным его элементам, предварительно разработав виртуальную модель конструкции корпуса с последующим поэтапным расчетом по ней интересующей массы. Ниже в статье показана реализация такого способа расчёта массы металлического корпуса применительно к комбинированному судну.

Расчёт массы металлического корпуса является подсистемой общей системы проектирования судна [4] которая, как и любая подсистема, может быть представлена схематично в форме кибернетического «черного ящика», характеризуемого информационным вектором входа $X(x_i)$ (исходные данные), функцией $F[X(x_i), x_i]$, описывающей состояние подсистемы (математическая модель), и выходным информационным вектором $Y\{X(x_i), F[X(x_i), x_i]\}$. Подсистема может рассматриваться как составная часть математической модели проектирования судна. Она по известному информационному вектору $X(x_i)$ определяет его выходной вектор, а именно – значение массы, соответствующее разделу «Корпус», как ставится задача в настоящей работе.

Подсистема «Расчёт массы металлического корпуса» с позиции системного проектирования состоит из трёх частей (подмножеств)

$$F[X(x_i), x_i] = \bigcup_{i=1}^{i=3} R_i,$$

где R_1 – множество пространственных отношений, описывающих пространственную компоновку конструкции корпуса;

R_2 – множество отношений, описывающих геометрические характеристики конструктивных элементов корпуса;

R_3 – множество отношений расчёта массы отдельных элементов корпуса.

Отношения R_1 компоновки включают в себя:

- аналитическое описание судовой поверхности;
- расстановку (определения положения) поперечных и продольных переборок, ограждений грузовой палубы, пиллерсов, ферм;
- расстановку продольных и поперечных связей корпуса.

Отношения R_2 отражают определение геометрических размеров всех связей корпуса, проверку общей и местной прочности.

Судовая поверхность определялись интерполяционным методом по выражению [5]

$$S = f(X_i, Y_{i,j}, Z_j),$$

где $X_i = \frac{L}{2} - i \times \frac{L}{20}$, $i = 0, 1, 2, \dots, 20$ – абсциссы теоретических шпангоутов;

Z_j , $j = 0, 1, 2, \dots$ – аппликаты теоретических ватерлиний;

$Y_{i,j} = \overline{Y}_{i,j} \frac{B}{2}$ – ординаты теоретических шпангоутов;

Относительная ордината судовой поверхности $\overline{Y}_{i,j}$ для i -ого теоретического шпангоута, j -ой теоретической ватерлинии, определяемая по формуле

$$\overline{Y}_{i,j} = \sum_{k=1}^{k=4} \left\{ \left(\overline{Y}_{i,j} \right)_k \times s_k \right\},$$

где $\overline{Y}_{i,j}$ – относительная ордината судовой поверхности корпусов судов прототипов;

s_k – интерполяционный множитель, равный

$$s_1 = \frac{\overline{x}_{c2} - \overline{x}_c}{\overline{x}_{c2} - \overline{x}_{c1}} \times \frac{\overline{\delta}_2 - \overline{\delta}}{\overline{\delta}_2 - \overline{\delta}_1};$$

$$s_2 = \frac{\overline{x}_c - \overline{x}_{c1}}{\overline{x}_{c2} - \overline{x}_{c1}} \times \frac{\overline{\delta}_2 - \overline{\delta}}{\overline{\delta}_2 - \overline{\delta}_1};$$

$$s_3 = \frac{\overline{x}_{c4} - \overline{x}_c}{\overline{x}_{c4} - \overline{x}_{c3}} \times \frac{\overline{\delta} - \overline{\delta}_1}{\overline{\delta}_2 - \overline{\delta}_1};$$

$$s_4 = \frac{\overline{x}_c - \overline{x}_{c3}}{\overline{x}_{c4} - \overline{x}_{c3}} \times \frac{\overline{\delta} - \overline{\delta}_1}{\overline{\delta}_2 - \overline{\delta}_1};$$

$\overline{x}_{c,k}$ – относительная абсцисса центра величины корпусов базовых судов;

$\overline{\delta}_1, \overline{\delta}_2$ – коэффициенты полноты корпусов базовых судов;

$\overline{x}_c, \overline{\delta}$ – исходные значения относительной абсциссы центра величины и коэффициента общей полноты.

Система набора корпуса в средней части принята продольная, а в оконечностях – поперечная. При проектировании конструктивного миделя, исходя из рекомендаций [6,7], производится расстановка и рассчитывается количество холостых и рамных продольных балок по днищу, второму дну, палубе, наружным и вторым бортам, продольной диаметральной переборке, а также количество пиллерсов. Аналогично рассчитывается количество рамных и холостых балок поперечного набора в средней части, машинном отделении, в оконечностях, комингсах ограждения грузовой палубы, либо люковых вырезов.

При делении корпуса на отсеки длина форпика принималась равной половине ширине судна. Размеры других отсеков находились с использованием статистических зависимостей, полученных по современным нефтеналивным танкерам внутреннего и смешанного (река-море) плавания. Так длина подруливающего устройства определялась по формуле

$$l_{ПУ} = (0,0409 - 1,318L \times 10^{-4})L$$

с последующей корректировкой по числу рамных шпаций.

Величина кофердама в носу принималась равной двум шпациям.

Длина машинного отделения при условии применения в качестве движителя винто-рулевых колонок определяется по эмпирическим формулам

$$L_{MO} = \left(a - b \frac{LBT}{Nv} \right) L$$

где a, b – коэффициенты, принимаемые следующим образом:

при одном главном двигателе $a = 0,207$; $b = 1,13$;

при двух главных двигателях $a = 0,25$; $b = 0,23$.

При определении длины грузовой зоны в корпусе учитывается то, что при использовании в качестве грузовых погружных насосов насосное отделение отсутствует. Топливные цистерны располагаются в отсеке перед машинным отделением, и его размеры определяются исходя из автономности и требований по возможности их обслуживания. На танкерах смешанного плавания в соответствии с требованиями [6] предусматриваются отстойные танки объемом 0,03 от объема грузовых танков. Размеры грузового танка, высота междудонного пространства и ширина двойных бортов принимаются с учетом требований [6,7,8,9].

После определения размеров и количества всех связей корпуса, переборок, палуб и платформ выполняется проверка корпуса судна на общую прочность по допускаемым напряжениям. В случае получения отрицательного результата корректируются размеры связей.

Далее выполняется расчет масс статей и подгрупп, составляющих массу группы 0101 «Корпус металлический» в соответствии со стандартом

$$P_{mk} = \sum_{i=5} xP_i$$

где P_i – масса i -ой

P_1 – масса подгруппы «Обшивка наружная, настил второго дна и примыкающие части»;

P_2 – масса подгруппы «Палуба и платформы корпуса»;
 P_3 – масса подгруппы «Переборки корпуса»;
 P_4 – масса подгруппы «Надстройки, рубки и мачты»;
 P_5 – массы подгруппы «Конструкции специальные»

Масса первой и второй подгруппы – наружной обшивки, второго дна, настила главной палубы и платформ определяется исходя из их фактической площади и средней толщины используемых листов и массы набора [10,11]

$$P_{1,2} = \rho_{mk} \sum_j S_{j_1, j_2} \times t_{j_1, j_2} + \sum_j G_{j_1, 2} \times L_{j_1, 2} \times n_{j_1, 2}$$

где ρ_{mk} – плотность материала корпуса;

S_{j_1, j_2} – площадь i -ой статьи первой (второй) подгруппы;

t_{j_1, j_2} – средняя толщина листов i -ой статьи первой (второй) подгруппы;

Масса рамного и холостого набора, составляющих соответствующие статьи первой и второй подгрупп определялись исходя из расчета массы одного погонного метра $G_{j_1, 2}$, длины $L_{j_1, 2}$ и количества балок этого набора $n_{j_1, 2}$.

При расчете массы продольных и поперечных переборок P_3 учитывались размеры и форма переборок и их средняя толщина.

Масса металла надстроек рассчитывалась как сумма основных ее конструктивных элементов, таких как наружные стенки, палубы, переборки и выгородки. При этом общая площадь для надстройки $S_{об}$ определялась по статистической зависимости

$$S_{об} = S_{ж} \times (0,906 - 2,216 \times P \times 10^{-5})^{-1},$$

где P – грузоподъемность судна;

$S_{ж}$ – площадь жилых и общественных помещений в надстройке

$$S_{ж} = (33,196 - 0,505 n_{ЭК}) n_{ЭК}$$

Масса стенок и палуб надстройки при известной их площади определялась исходя из удельной массы, представляющей отношение массы соответствующего конструктивного элемента к его площади. Установлены статистические зависимости удельной массы стенок с набором M_C

$$\overline{M_C} = 654 \times S_C^{-1,57},$$

где S_C – площадь наружных стенок, м².

Для надстройки, имеющей открытые палубы удельная масса равна

$$\overline{M_{по}} = 0,154 - 1,159 \times S_{об} \times 10^{-4} \pm 0,005$$

Если надстройка не имеет открытых палуб

$$\overline{M_{по}} = 0,159 - 2,182 \times S_{об} \times 10^{-4} \pm 0,005$$

Масса 1 м² выгородки с набором принята 0,053 т/м².

Площадь выгородки надстройки определяется в зависимости от их общей длины l

$$l = (5,736 + 2,718 \times P_{гр} \times 10^{-4} \pm 0,956)(L_{ю} + B_{ю}),$$

где $P_{гр}$ – грузоподъемность судна, т

$L_{ю}, B_{ю}$ – длина и ширина юта.

Масса ограждения грузовой площадки рассчитывается по его конструктивным элементам, исходя из принятой длины, ширины и высоты ограждения.

Масса мачт, кожухов дымовых труб, как показал анализ статистических данных, не превышает 14% от массы надстройки. Статистическая зависимость массы мачт имеет вид

$$\frac{M_M}{B} = 0,302 - 4,499 \times L \times 10^{-3} \pm 0,086$$

Кожухов труб

$$\frac{M_T}{P_n} = 0,11 - 5,177 \times LBH \times 10^{-7} \pm 0,05$$

P_n – масса металла надстройки.

Заключение

По изложенной математической модели были разработаны алгоритм и компьютерная программа для расчета массы металлического корпуса комбинированного судна. Тестовый расчет этой массы судна, имеющего элементы и характеристики комбинированного судна проекта RST-54, показали, что расчетное значение соответствует данным базового судна. Это дает основание заключить, что данная программа адекватно отражает особенности конструкции корпуса комбинированных судов и может рассматриваться как методика расчета массы металлического корпуса рассматриваемого типа судов и рекомендуется к использованию на начальных стадиях проектирования, в задачах исследовательского проектирования, обоснования и оптимизации элементов и характеристик.

Список литературы:

1. Dorman W. Combination bulk carriers. «Marine technology», 1966, N4, p. 409–453.
2. Ашик В. В. Проектирование судов: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1985.–320 с.
3. Поспелов В. И. Выбор на ЭВМ оптимальных элементов грузовых судов внутреннего плавания. – Л.: Судостроение, 1978. – 76 с.
4. Гайкович А.И. Моделирование процессов создания морской техники. С-Пб.: Электронное издание, СПбГМТУ. – 2015 – 149с.
5. Coons S.A. Surfaces for computer-aided design of space forms.
6. ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Правила классификации и постройки морских судов. Санкт-Петербург, 2019 г.
7. ФАУ «Российский Речной Регистр». Правила классификации и постройки судов. Москва, 2019 г.
8. Marie Douet. Combined ships: an empirical investigation about versatility, Maritime Policy & Management, 1999, VOL. 26, NO. 3, p. 231-248.
9. Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd (DNV-GL). Rules for Classification of Ships [Electronic resource] rules.dnvgl.com URL: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2019-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt1Ch2.pdf> (Accessed on: 27.11.2019)
10. Angela P. Boiko and Alexander V. Bondarenko. Calculation of Weight of SWATH Ship in Preliminary Design Stages /Journal of Ship Technology, Vol. 5, No.2, July 2009, pp 34–38
11. Jan P. Michalski A parametric method for preliminary determining of mass characteristics if inland navigation ships / Polish maritime research, 3, 2005 pp 9–14

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE MASS OF THE METAL HULL OF A COMBINED VESSEL

Илья А. Гуляев,

Federal Autonomous Institution Russian River Register, Moscow, Russia

Yuri A. Kochnev,

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Evgeniy P. Ronnov,

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The total displacement and maximum deadweight for ships calculation is impossible without the mass of the metal hull accurate determination. Its value is influenced by the class, type of vessel, architectural and design features, and operating conditions that are expressed in providing General and local strength. All this must be taken into account at the initial design stages, since even minor errors in the specified mass calculation have a strong impact on the empty displacement final result. In this paper, the mathematical model of predicting the component loads for the ship combined mass, including the surface ship theoretical generation, the case elements spatial layout, the hull structure the compartments and ties actual size calculation of and on the basis of the mass itemized calculation. The main empirical formulas that make up the mathematical model content and the test calculations results are presented.

Keywords: mathematical model, combined ship, metal hull

References:

1. Dorman W. Combination bulk carriers. «Marine technology», 1966, N4, p. 409–453.
2. Ashik V.V. Proektirovanie sudov: Uchebnik. – 2-e izd., pererab. i dop. – L.: Sudostroenie, 1985.–320 s.
3. Pospelov V.I. Vybora na EVM optimal'nyh elementov gruzovyh sudov vnutrennego plavaniya. – L.: Sudostroenie, 1978. – 76 s.
4. Gajkovich A.I. Modelirovanie processov sozdaniya morskoy tekhniki. S-Pb.: Elektronnoe izdanie, SPbGMTU. – 2015 – 149s.
5. Coons S.A. Surfaces for computer-aided design of space forms.

6. FAI «Russian Maritime Register of Shipping». Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Saint-Petersburg, 2019.
7. FAI «Russian River Register». Rules for the Classification and Construction. Moscow, 2019.
8. Marie Douet. Combined ships: an empirical investigation about versatility, Maritime Policy & Management, 1999, VOL. 26, NO. 3, p. 231–248.
9. Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd (DNV-GL). Rules for Classification of Ships [Electronic resource] rules.dnvgl.com URL: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/ru-ship/2019-07/dnvgl-ru-ship-pt1ch2.pdf> (Accessed on: 27.11.2019)
10. Angela P. Boiko and Alexander V. Bondarenko. Calculation of Weight of SWATH Ship in Preliminary Design Stages /Journal of Ship Technology, Vol. 5, No.2, July 2009, pp 34-38
11. Jan P. Michalski A parametric method for preliminary determining of mass characteristics of inland navigation ships / Polish maritime research, 3, 2005 pp 9-14

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Илья Александрович Гуляев, начальник корпусного отдела ФАУ «Российский Речной Регистр»,
105187, г. Москва, Окружной проезд, 15, кор. 2,
e-mail: guliaev@rivreg.ru

Юрий Александрович Кочнев, к.т.н., доцент, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Евгений Павлович Роннов, д.т.н., профессор, зав. кафедрой Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»),
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5,
e-mail: ptps@vgavt-nn.ru

Илья А. Gulyaev, Head of Hull Department, Federal Autonomous Institution Russian River Register,
bld. 2, 15, Okruzhnoy proezd, Moscow, Russia, 105187

Yuri A. Kochnev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education Volga State University of Water Transport 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Evgeniy P. Ronnov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Статья поступила в редакцию 10.02.2020 г.