

*Е. П. Роннов, Е. В. Купальцева*

## МАССА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОРПУСА МАЛЫХ ПАССАЖИРСКИХ СУДОВ

Разработана математическая модель для расчета составляющих оборудованного металлического корпуса и надстроек малых пассажирских судов. Предлагаемая модель построена на решении вариантной задачи для определения оптимального модуля, находящегося в наиболее тесной взаимосвязи с соответствующим измерителем масс конкретной статьи. Критерием выбора, в данном случае, служит максимальный коэффициент корреляции и значение критерия Фишера не ниже минимально допустимого. Статистический анализ проводится на основании данных отечественных судов рассматриваемого типа как советской, так и современной постройки. Модель построена для каждого из трех архитектурно-конструктивных типов, с учетом конструктивных особенностей, которые отражают принадлежность судна к определенному типу и классу. Основываясь на предложенной математической модели, мы получили оптимальные модули расчета массы раздела «Корпус» как для общего случая, так и при поштатейном расчете. Более подробный подход оправдан для точного анализа данного раздела как наиболее влияющего на полную массу судна. При определении модулей для расчета массы металлической надстройки учитывались следующие свойства, наиболее полно отражающие конструктивные особенности: принадлежность к определенному архитектурно-конструктивному типу и материал надстройки (для рассматриваемых судов в качестве материала используются сталь либо алюминиевые сплавы). Анализ адекватности полученных формул позволяет сделать вывод о достаточно высокой точности предложенной методики. При учете конструктивных особенностей обозначены возможные причины полученных высоких значений погрешностей для некоторых проектов судов.

**Ключевые слова:** масса судна, оптимальный модуль, математическая модель.

### Введение

Задача об определении нагрузки масс судна ставится на каждой стадии проектирования судна. На начальной стадии, когда для точного расчета данных недостаточно, на практике используются приближенные общепринятые методики. Однако эти методики не учитывают особенности судов различных типов. Целью нашего исследования являлась разработка адекватной методики определения массы металлического корпуса малых пассажирских судов на этапе концептуального проектирования.

В соответствии с [1] к малым отнесены пассажирские суда, работающие на внутригородских и пригородных линиях. Область использования малых судов определила их специфический архитектурно-конструктивный тип (АКТ) и особенности обоснования главных элементов и проектных характеристик.

Масса раздела «Корпус» малых пассажирских судов составляет до 53 % собственной массы судна. Масса основной группы – «Металлический корпус и надстройки» может составлять до 78 % массы раздела и определяет точность расчёта не только раздела, но и водоизмещения всего судна.

### Постановка задачи и результаты исследования

Металлический корпус состоит из собственно корпуса и металла надстройки. Масса надстройки у рассматриваемых судов составляет до 30 % общей массы металлического корпуса. Учитывая конструктивные и функциональные особенности составляющих, уже на стадии исследовательского проектирования, когда обосновываются основные элементы и характеристики судна, массу металлического корпуса следует рассчитывать таким образом:

$$P_{\text{м.к}} = P'_{\text{м.к}} + P_{\text{м.н}},$$

где  $P'_{\text{м.к}}$  – масса металла собственно корпуса;  $P_{\text{м.н}}$  – масса металла надстройки.

На стадии, когда конструктивные элементы корпуса (размеры связей, их количество, толщина обшивки и т. д.) еще не определены, массу рассчитывают с использованием соответствующих модулей:

$$P'_{м.к} = \psi'_{м.к} \cdot M'_{м.к} \quad (1)$$

При пересчёте массы металлического корпуса с судна-прототипа в качестве модуля часто используют так называемый кубический модуль ( $LBH$ ) либо квадратичный модуль  $L(B+H)$  [2]. В соответствии с ними измеритель массы  $\psi'_{м.к}$  в формуле (1) представляет собой массу корпуса, приходящегося на  $1 \text{ м}^3$  параллелепипеда со сторонами  $L \times B \times H$  либо на  $1 \text{ м}^2$  развертки  $L(B+H)$ , и принимается в этом случае одинаковым для прототипа и проектируемого судна. Такой подход в известной степени справедлив при условии, что данные суда соответствуют условиям подобия. При исследовательском проектировании, когда принимается один прототип, данное условие не выполняется. Измеритель массы  $\psi'_{м.к} = \frac{P'_{м.к}}{M'_{м.к}}$  на каждом шаге решения вариационной задачи должен находиться по соответствующему прототипу, и поэтому он зависит от главных элементов и характеристик судна. Точность расчёта массы в этом случае можно обеспечить за счет соответствующего выбора формы модуля  $M'_{м.к}$ . В общем случае  $M'_{м.к}$ , который учитывал бы влияние на  $\psi'_{м.к}$  изменяющихся проектных параметров и их зависимость от величины модуля, является функцией от элементов и характеристик судна:

$$M'_{м.к} = f_m(x_1^n, x_2^m, \dots, x_i^k), \quad (2)$$

где  $x_i$  –  $i$ -й элемент или характеристика судна;  $n, m, k$  – показатели степени.

В этой связи, при разработке метода расчета массы корпуса либо другой  $j$ -й составляющей нагрузки масс, актуальной становится задача нахождения сопряженной (2) зависимости

$$\psi_j = F_j(M_j), \quad (3)$$

где  $\psi_j, M_j$  – измеритель массы и модуль  $j$ -й составляющей нагрузки масс соответственно.

Вид зависимости (3) можно найти из решения следующей экстремальной задачи: из заданных возможных видов модулей, отличающихся сочетанием элементов и характеристик судна  $x_i$  и произвольных значений показателей степени при них, найти такие, при которых аппроксимационное выражение, представляющее функциональную взаимосвязь измерителя массы от модуля, будет характеризоваться наибольшим коэффициентом корреляции, а критерий Фишера не будет ниже минимального значения. Это означает, что при заданных исходных данных

$$Y\{P_j, Q, W_j\}, \quad (4)$$

где  $P_j$  – статистическое множество  $\bar{P}$   $j$ -х составляющих нагрузки масс;  $Q$  – статистическое множество  $x_i$  элементов и характеристик судна;  $W_j$  – сформированное множество из  $q$  вариантов  $M_j$  сочетаний элементов и характеристик (видов модуля), необходимо найти наилучший вид модуля  $M_{qj}$

$$X\{M_{qj}\} \rightarrow \text{opt}, \quad (5)$$

при котором коэффициент корреляции  $r$  аппроксимационного выражения статистической зависимости измерителя массы от модуля

$$\Psi_j = F_{qj} \left( P_j, x_i, M_{qj} \right) \quad (6)$$

достигает максимального значения

$$r_i = F_j \left( F_{qj} \right) \rightarrow \max, \quad (7)$$

при этом критерий Фишера не менее предельного (табличного) значения:

$$\Phi \left( F_{qj} \right) \geq \Phi_{\min}, \quad (8)$$

а составляющие нагрузки масс, элементы и характеристики судов и варианты модулей принадлежат соответствующим статистическим множествам:

$$\bar{P}_j \in P_j, x_i \in Q, M_j \in W. \quad (9)$$

В табл. 1 приведены виды рассматриваемых модулей и значения коэффициента корреляции и критерия Фишера, полученные при статистическом анализе в рамках задачи (4)–(9) массы металла корпуса.

Таблица 1

Результаты определения оптимального модуля для пересчета массы металла корпуса малого пассажирского судна

| Модуль                                    | АКТ I    |          | АКТ II   |          | АКТ III  |          |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|   | <i>r</i> | <i>F</i> | <i>r</i> | <i>F</i> | <i>r</i> | <i>F</i> |
| <i>LBH</i>                                | -0,43    | 1,34     | 0,63     | 2,6      | -0,33    | 0,48     |
| $(LBH)^2$                                 | -0,84    | 14,6     | -0,92    | 29       | -0,90    | 42,7     |
| $(LBH)^{2/3}$                             | 0,174    | 0,19     | 0,88     | 13,7     | 0,36     | 0,58     |
| $L(B+H)$                                  | 0,24     | 0,35     | 0,91     | 19       | 0,26     | 0,29     |
| $L^{1,75} B^{1,25} H^{0,5} \delta^{0,33}$ | -0,05    | 0,013    | 0,87     | 12       | 0,18     | 0,14     |

Из этих данных следует, что оптимальным является модуль  $(LBH)^2$ . Он наилучший из рассматриваемых не только по критериальным значениям, но и по логике обратной зависимости (знак «минус» при коэффициенте корреляции) функции от аргумента, объективно свойственной зависимости измерителя массы металла корпуса от размерений.

На рис. 1–3 показаны зависимости измерителя массы металла корпуса от модуля  $(LBH)^2$  для каждого АКТ.

Регрессионная формула этих зависимостей имеет следующий вид:

– для судов класса «О» (I тип):

$$\Psi'_{м.к_I} = 0,31(LBH)^{-1,21}, \quad (10)$$

– для судов классов «Л», «Р» (тип II):

$$\Psi'_{м.к_{II}} = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-7 \cdot 10^{-6} (LBH)^2}, \quad (11)$$

– для судов классов «Л», «Р» (тип III):

$$\Psi'_{м.к_{III}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-2 \cdot 10^{-5} (LBH)^2}. \quad (12)$$

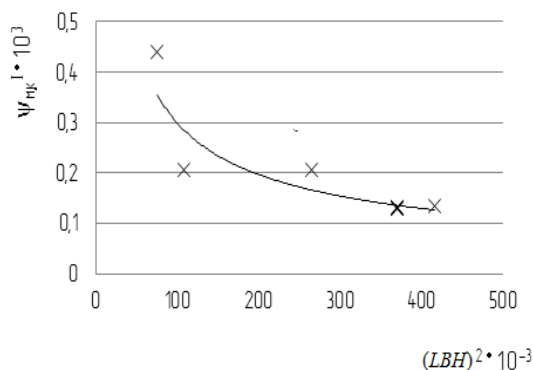


Рис. 1. Измеритель массы металла корпуса судов АКТ I

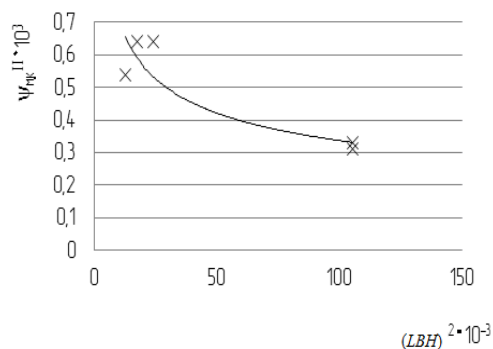


Рис. 2. Измеритель массы металла корпуса судов АКТ II

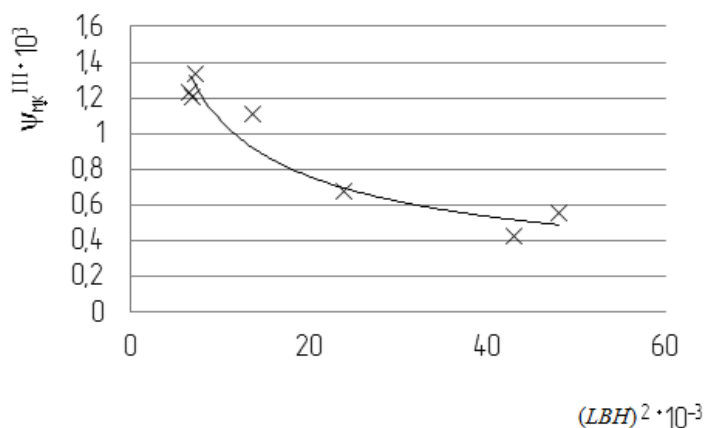


Рис. 3. Измеритель массы металла корпуса судов АКТ III

Статистическая база, используемая при получении данных зависимостей, включает в себя 23 малых пассажирских судна, характеристики которых лежат в следующих диапазонах: длина – от 10 до 50 м, суммарная мощность силовой установки – от 37 до 331 кВт, скорость хода – от 13 до 24 км/ч, пассажироместность – от 40 до 300 чел.

Более точно, учитывая конструктивные особенности, массу металла корпуса можно считать как сумму масс его основных элементов:

$$P'_{\text{м.к}} = \sum_{i=1}^{i=7} P'_{0i},$$

где  $P'_{01}$  – масса наружной обшивки;  $P'_{02}$  – масса настилов палуб;  $P'_{03}$  – масса поперечного набора;  $P'_{04}$  – масса продольного набора;  $P'_{05}$  – масса поперечных переборок;  $P'_{06}$  – масса насыщения корпуса;  $P'_{07}$  – масса фундаментов.

В табл. 2 приведены виды модулей и регрессионные формулы для расчета измерителей массы данных элементов, наиболее полно отражающих их связь с элементами судна, полученные на основе анализа статистических данных по модели (4)–(9).

Масса металла надстройки  $P'_{\text{м.н}}$  зависит от ее АКТ и размеров, во многом определяемых количеством пассажирских мест, предусмотренных в ней. На малых пассажирских судах, как правило, два типа надстроек: одноярусная, при которой пассажирский салон располагается на главной палубе, и полуутопленная, когда пассажирский салон размещен на палубе трюма [1]. В некоторых случаях крыша надстройки используется как дополнительная открытая пассажирская (тентовая) палуба. В качестве материала надстроек, наряду со сталью, используются и алюминиевые сплавы.

Таблица 2

**Модули и измерители масс составляющих металлического корпуса малых пассажирских судов\***

| Статья                     | Модуль  | Измеритель массы   | R <sup>2</sup> | Класс судна   |
|----------------------------|---|--|----------------|---------------|
| Масса наружной обшивки     | $M_{01} = S_{н.о}^{2,5} \cdot \delta^{0,25}$                        | $\psi'_{01} = 10,9(M_{01})^{-0,97}$  | 0,83           | «О»           |
|                            |   | $\psi'_{01} = 6 \cdot 10^{-3}(M_{01})^{-0,43}$   | 0,97           | «Р», «Л»      |
| Масса настилов палуб       | $M_{02} = \alpha^{1/3} \cdot L^3 \cdot B^{1/3}$                     | $\psi'_{02} = 0,6 \cdot 10^{-3}(M_{02})^{-0,19}$   | 0,73           | «О», «Р», «Л» |
| Масса поперечного набора   | $M_{03} = (LBH)^2$  | $\psi'_{03} = 0,019(M_{03})^{-0,54}$   | 0,85           | «О», «Р», «Л» |
| Масса продольного набора   | $M_{04}^{I,II} = \delta \cdot L \cdot B \cdot \frac{T}{H}$          | $\psi'_{04} = 3,1(M_{04}^I)^{-1,43} \cdot \sigma_{доп}$  | 0,97           | «О»           |
|                            |   | $\psi'_{04} = 0,91(M_{04}^{II})^{-1,16} \cdot \sigma_{доп}$  | 0,98           | «Р», «Л»      |
|                            | $M_{04}^{III} = \delta \cdot (L \cdot B)^2 \cdot \frac{T}{H^{0,5}}$ | $\psi'_{04} = 1,65 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-4 \cdot 10^{-4} \cdot M_{04}^{III}} \cdot \sigma_{доп}$ | 0,81           | «Р», «Л»      |
| Масса поперечных переборок | $M_{05} = \delta^{1/4} \cdot m(B \cdot H)^3$                        | $\psi'_{05} = -0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(M_{05}) + 2,3 \cdot 10^{-3}$                            | 0,88           | «О», «Р», «Л» |
| Масса насыщения корпуса    | $M_{06} = (LBH)^2$  | $\psi'_{06} = 6,8 \cdot 10^{-3}(M_{06})^{-0,43}$   | 0,67           | «О», «Р», «Л» |
| Масса фундаментов          | $M_{07} = L^2 \cdot N$  | $\psi'_{07} = 0,4 \cdot 10^{-3}(M_{07})^{-0,36}$   | 0,74           | «О», «Р», «Л» |

\*  $S_{н.о} = S_{см} + S_{н.б}$  – площадь наружной обшивки, м<sup>2</sup>;  $S_{см}$  – площадь смоченной поверхности, м<sup>2</sup>;  $S_{н.б}$  – площадь поверхности надводного борта, м<sup>2</sup>;  $\delta$  – коэффициент общей полноты;  $\alpha$  – коэффициент площади конструктивной ватерлинии;  $L, B, H$  – расчетные длина, ширина и высота борта соответственно, м;  $T$  – осадка судна, м;  $m$  – количество водонепроницаемых переборок;  $\sigma_{доп}$  – допускаемые напряжения в крайних связях эквивалентного бруса;  $N$  – суммарная мощность силовой установки, кВт.

На основе статистического анализа по модели (4)–(9) найдены виды модуля для рассматриваемых типов надстроек и получены регрессионные формулы для расчета их измерителя массы металла (табл. 3).

Таблица 3

**Измеритель массы металла надстроек**

| Тип надстройки | Модуль             | Измеритель массы  | R <sup>2</sup> |
|----------------|--------------------|---|----------------|
| АКТ I          | $n_{max}LBH$       | $\psi_{м.н}^{АКТ I} = 3(M_{м.н}^{АКТ I})^{-0,84}$                     | 0,99           |
| АКТ II         | $n_{max}LBH^{0,5}$ | $\psi_{м.н}^{АКТ II} = 0,6 \cdot 10^{-3}(M_{м.н}^{АКТ II})^{-0,16}$   | 0,56           |
| АКТ III        | $n_{max}LBH^{0,5}$ | $\psi_{м.н}^{АКТ III} = 5,9 \cdot 10^{-3}(M_{м.н}^{АКТ III})^{-0,33}$ | 0,58           |

Зависимости массы металла стальных надстроек в графическом виде показаны на рис. 4.

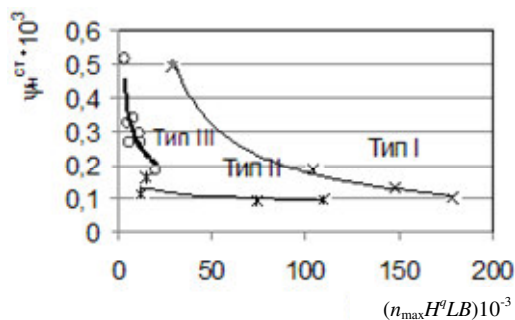


Рис. 4. Измеритель массы металла стальной надстройки

Для надстроек из легкого сплава необходимо ввести поправочный коэффициент  $k_n$ . Формулу для расчета массы такой надстройки представим в виде

$$P_{м.н}^{ал} = k_n \cdot P'_{м.н}.$$

Анализ показал, что для судов всех типов коэффициент  $k_n = 0,6$ .

По предложенным методикам выполнены расчеты массы металлического корпуса ряда наиболее типовых для каждой архитектурной группы проектов малых пассажирских судов (табл. 4).

Таблица 4

## Анализ точности полученных результатов

| Проект<br>(тип) | $P_{м.к}$ по проекту       |                   |                  | $P_{м.к}$ по предложенной методике       |                       |                      |                                |
|-----------------|----------------------------|-------------------|------------------|--|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
|                 | $P'_{м.к}$                 | $P_{м.н}$         | $P_{м.к}$        | $P_{м.к}^{(LBH)^2}$<br>Формулы (10)–(12) | $P'_{м.к}$<br>Табл. 2 | $P_{м.н}$<br>Табл. 3 | $P_{м.к} = P'_{м.к} + P_{м.н}$ |
| 23021 м (I)     | 33,55                      | 14,23             | 47,48            | 26,75                                    | 35,52                 | 14,27                | 49,79                          |
| 935 (I)         | 55,35                      | 17,9              | 73,25            | 52,74                                    | 56,05                 | 18,47                | 74,52                          |
| 544 (II)        | 16,97                      | 3,64              | 20,61            | 14,1                                     | 17,31                 | 2,12                 | 19,43                          |
| P35 (II)        | 32,8                       | 6                 | 38,8             | 35,26                                    | 33,3                  | 6,26                 | 39,56                          |
| 95100 (III)     | 18,42                      | 3,39              | 21,81            | 18,94                                    | 18,46                 | 3,16                 | 21,62                          |
| 3019 (III)      | 8,25                       | 1,45              | 9,7              | 8,76                                     | 8,55                  | 1,23                 | 9,78                           |
| Проект<br>(тип) | Погрешность %              |                   |                  |  |                       |                      |                                |
|                 | $\Delta P_{м.к}^{(LBH)^2}$ | $\Delta P'_{м.к}$ | $\Delta P_{м.н}$ | $\Delta P_{м.к}$                         |                       |                      |                                |
| 23021 м (I)     | 25,4                       | 5,55              | 0,28             | 4,6                                      |                       |                      |                                |
| 935 (I)         | 5                          | 1,25              | 3,09             | 1,7                                      |                       |                      |                                |
| 544 (II)        | 5,7                        | 2                 | 71               | 6,07                                     |                       |                      |                                |
| P35 (II)        | 10                         | 1,50              | 4,15             | 1,9                                      |                       |                      |                                |
| 95100 (III)     | 31                         | 0,21              | 7,3              | 0,9                                      |                       |                      |                                |
| 3019 (III)      | 6,7                        | 3,51              | 17,9             | 0,8                                      |                       |                      |                                |

Анализ результатов показал, что наибольшая точность расчетов достигается при детальном расчете массы металлического корпуса в соответствии с табл. 2 и для рассматриваемых судов не превышает 7 %. Высокая погрешность при укрупненном расчете массы металла корпуса пр. 95 100 обусловлена невозможностью в данном случае учесть все конструктивные особенности. При детальном расчете данная величина не превышает допустимых расчетов. Высокая погрешность при расчете надстройки пр. 544 обусловлена проектной массой, увеличенной из-за использования клепаных соединений.

**Выводы**

Основываясь на результатах исследований, можно сделать выводы о возможности применения предложенной методики для расчета массы металлического корпуса на начальных стадиях проектирования для малых пассажирских судов. Однако следует иметь в виду, что при расчете массы металлического корпуса через квадрат кубического модуля погрешность может составлять 25 % и выше, поскольку все конструктивные особенности малого пассажирского судна учесть невозможно.

Значительные величины погрешности при расчете массы металлической надстройки (для пр. 95 100 она достигает 26 %) обусловлены различным объемом используемых неметаллических материалов (площадью остекления), а также протяженностью по длине. Данные параметры на этапе эскизного проекта могут меняться в зависимости от разрабатываемого экстерьеря.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Купальцева Е. В. Анализ проектных характеристик главных элементов пассажирских судов для внутригородских и пригородных линий / Е. В. Купальцева // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2015. № 2 (30). С. 119–129.
2. Ашик В. В. Проектирование судов: учеб. / В. В. Ашик. Л.: Судостроение, 1985. 320 с.

Статья поступила в редакцию 16.06.2015

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Роннов Евгений Павлович** – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой «Проектирование и технология постройки судов»; [ptps@vgavt-nn.ru](mailto:ptps@vgavt-nn.ru).

**Купальцева Евгения Владимировна** – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; аспирант кафедры «Проектирование и технология постройки судов»; [Evgenia\\_Kupaltseva@rambler.ru](mailto:Evgenia_Kupaltseva@rambler.ru).



*E. P. Ronnov, E. V. Kupaltseva*

## MASS OF METAL HULL OF SMALL PASSENGER VESSELS

**Abstract.** A mathematical model for calculating the components with a metal hull and superstructure of "small" passenger vessels is designed. The proposed model is based on the decision of the variant task to determine the optimal module, which is in the closest relationship to the relevant measure of the mass of the specific unit. The selection criterion, in this case, is the maximum value of the correlation coefficient and Fisher's exact test is not lower than the minimum. Statistical analysis is carried out on the basis of the domestic vessels of this type of both Soviet and modern designing. The model is constructed for each of the three architectural and constructive types, taking into account the design features that reflect the affiliation of a ship to the specific type and class. On the basis of the proposed mathematical model, optimal modules of mass calculation in the section "Hull" are obtained both for the general case and in the itemized calculation. The more detailed approach is justified for the accurate analysis of this section as the most affecting to the total weight of the vessel. When determining the module to calculate the mass of the metal superstructure, the following properties that best reflect the design features were taken into account; they are belonging to a specific architectural and constructive type and the material of superstructure (for the vessels under consideration as a material steel or aluminum alloys are used). The analysis of the adequacy of the formulas obtained allow us to make a conclusion on sufficiently high accuracy of the proposed method. When taking into account the structural features the possible causes of the obtained high values of the errors for some projects of the vessels are indicated.

**Key words:** weight of the vessel, optimum module, mathematical model.

## REFERENCES

1. Kupal'tseva E. V. Analiz proektnykh kharakteristik glavnykh elementov passazhirskikh sudov dlia vnutrigorodskikh i prigorodnykh linii [Analysis of the design features of the basic elements of the passenger vessels for city and regional routes]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2015, no. 2 (30), pp. 119–129.
2. Ashik V. V. *Proektirovanie sudov* [Designing of ships]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 320 p.

The article submitted to the editors 16.06.2015

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ronnov Eugeny Pavlovich** – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department "Design and Technology of Ship Construction"; [ptps@vgavt-nn.ru](mailto:ptps@vgavt-nn.ru).

**Kupaltseva Evgenia Vladimirovna** – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Postgraduate Student of the Department "Design and Technology of Ship Construction"; [Evgenia\\_Kupaltseva@rambler.ru](mailto:Evgenia_Kupaltseva@rambler.ru).

