

DOI 10.15589/jnn20170402
УДК 629.563.3
Г93

ANALYSIS OF THE FORMULAS FOR CALCULATION OF THE DRILL SHIP'S LIGHTWEIGHT

АНАЛИЗ ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ ПОРОЖНЕМ БУРОВЫХ СУДОВ

Mykhailo M. Guk
mykhailo.guk@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6695-0856

М. Н. Гук,
канд. техн. наук, доц.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The article presents the analysis of applicability of known formulas for the formation of weight groups of transport vessels to the calculation of the drill ship's lightweight. The goal of the study is the selection of suitable expressions for calculation of the drill ship's lightweight at the stage of preliminary design. The literary sources on ship design have been analyzed. The applicability of the available formulas is assessed by calculating the lightweight for three drill ships of different generations with a known distribution to weight groups. There are selected and modified the formulas for calculating the weight of the hull, general ship equipment, power plants, drilling rigs, drilling equipment, and technological equipment of the drill ship. The formulas are checked as for being used to determine the weight groups by comparing the lightweight of 10 drill ships in operation. The results obtained can be used in ship design to assess the drill ship's lightweight at the stage of preliminary design. The proposed expressions allow associating the ship's weight group to its size, hull shape and technological characteristics, such as the drilling depth d_d (measured in meters).

Keywords: drill ship; principal dimension; displacement; lightweight; weight groups.

Анотація. Проведено аналіз застосованості відомих формул для розділів масового навантаження транспортних суден до розрахунку водотоннажності порожнем бурових суден. Для оцінки достовірності застосованості обчислювалась водотоннажність порожнем для трьох бурових суден різних поколінь з відомим розподілом масового навантаження за статтями. Зроблено порівняння фактичних і розрахункових водотоннажностей для інших бурових суден.

Ключові слова: бурове судно; головні розміри; водотоннажність; водотоннажність порожнем; статті вагового навантаження.

Аннотация. Проведен анализ применимости известных формул для разделов массовой нагрузки транспортных судов к расчету водоизмещения порожнем буровых судов. При оценке достоверности применимости вычислялось водоизмещение порожнем для трех буровых судов разных поколений с известным распределением массовой нагрузки по статьям. Сделано сравнение фактических и расчетных водоизмещений порожнем для других буровых судов.

Ключевые слова: буровое судно; главные размерения; водоизмещение; водоизмещение порожнем; статьи весовой нагрузки.

REFERENCES

- [1] Performance specifications on board scientific measurement capabilities, and survey of drilling vessels. Report from the Conceptual design committee to the U.S. National Science Foundation, 2000. 50 p.
- [2] Guk M. N. *Izmenenie glavnykh elementov burovnykh sudov v protsesse ikh razvitiya* [Changes to the main elements of drill ships in the course of their development]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of scientific publications of NUOS*. Nikolaev, NUK Publ., 2015, no. 2 (458), pp. 23–26.
- [3] Moskovko O. S., Bondarenko O. V. *Analiz ta utochnennia formul dlia rozrakhunku rozdiliv navantazhennia mas universalnykh naukovo-doslidnykh suden* [Analysis and elaboration of the formulas for calculation of the weight groups of multi-purpose research vessels]. *Visnyk SevNTU : zb. nauk. pr. Serii : Mekhanika, enerhetyka, ekolohiia — Bulletin of the Sevastopol National Technical University. Series: Mechanics, Energy, Ecology*. Sevastopol, SevNTU Publ., 2014, issue 147/2014, pp. 64–67.

- [4] Shostak V. P. *Effektivnost tekhniki osvoeniya okeana* [Effectiveness of the facilities for ocean development]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2002. 319 p.
- [5] Disouza V., Detrisac L., Opdyke S., Rugnetta M., Sultani K. Drillship Nereus. International Student Offshore Design Competition. Michigan, The University of Michigan, 2003. 119 p.
- [6] Kumar S. Design of a 4500 feet RWD drill ship. Thesis of the Degree of Bachelor of Technology in Naval Architecture and Shipbuilding. Kochi, Cochin University of Science and Technology, 2011. 257 p. Available at: <https://ru.scribd.com/doc/243169170/Drill-Ship-Dissertation-Sachin-Kumar>.
- [7] Schneekluth H., Bertram V. Ship design for efficiency and economy. Oxford, Butterworth-Heinemann, 1998, pp. 149–179.
- [8] Watson D. G. M. Practical ship design. Elsevier, 2002. 531 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

По прогнозам экспертов, всего в шельфе Черного моря находится около 3,5 трлн куб. м газа, большая часть этого ресурса — на глубоководной части шельфа, начиная с 800 метров. Ресурсы месторождения в поднятии Палласа, расположенного на северо-востоке Восточно-Черноморской впадины, оцениваются примерно в 98 млрд куб. м газа. Это месторождение удалено на 30 миль от береговой линии. Глубина моря здесь — от 500 до 800 м. Сегодня в Украине нет технических средств для бурения на такой глубине. Даже «Черноморнефтегаз» обладал технологиями для работы на глубинах только до 100 м.

Среди подвижных буровых установок океанотехники буровые суда выделяются высокими значениями полезной загрузки и автономности, что актуально при освоении месторождений в глубоководных частях океана — в отдалении от береговых баз.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Один из путей определения главных размеров судов — использование статистических данных по проектам судов, находящихся в эксплуатации [1]. В качестве исходного параметра при выборе главных размерений бурового судна может выступать максимальная глубина воды в точке бурения d_b в метрах. О существовании корреляционной связи между расчетной глубиной воды и длиной бурового судна L отмечалось в [2].

При расчете водоизмещения первого приближения используют либо пересчет нагрузки прототипа, либо статистические данные по коэффициентам и измерителям модулей нагрузки. По буровым судам первых поколений измерители весовой нагрузки известны из [4], но современные буровые суда имеют большую энерговооруженность и могут брать на борт больше технологических грузов (variable deck load), а это требует некоторой корректировки коэффициентов и измерителей. Кроме того, на начальных стадиях проектирования удобно иметь формулы, связывающие разделы нагрузки масс судна с его размерами, формой корпуса и технологическими характеристиками, такими, например, как глубина бурения d_b

в метрах для бурового судна. Подобные формулы, но для расчета составляющих масс порожнем транспортных судов известны из [7, 8].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ — анализ известных формул на предмет их применимости к расчету нагрузки масс современных буровых судов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Водоизмещение порожнем рассматриваем состоящим из следующих укрупненных разделов [7], откорректированных с учетом специфики бурового судна:

$$\Delta_{\text{пор}} = P_{\text{к}} + P_{\text{в}} + P_{\text{об}} + P_{\text{т}} + P_{\text{эу}} + P_{\text{зв}},$$

где $P_{\text{к}}$ — масса корпуса судна с надстройками (жилой и корпуса); $P_{\text{об}}$ — масса оборудования; $P_{\text{в}}$ — масса буровой вышки с буровым оборудованием; $P_{\text{т}}$ — масса технологического оборудования, кроме оборудования буровой вышки; $P_{\text{эу}}$ — масса энергетической установки; $P_{\text{зв}}$ — запас водоизмещения (3% от водоизмещения).

Рассмотрев известные формулы, которые используют для расчета нагрузки масс, установили зависимости для определения массы порожнего судна. Анализ формул [3, 4, 7, 8] осуществлялся путем вычисления по ним величин масс и сравнения полученных значений с известными значениями масс разделов нагрузки проектов буровых судов. Для сопоставления использованы таблицы нагрузки масс следующих судов: «Наука» СССР, ЦКБ «Черноморсудопроект» проект 16281, 1996 г. [4], проект «CUSAT» (Cochin University of Science and Technology), Индия (при технической поддержке компаний ИНС Holland, Gusto Engineering, Голландия), 2011 г. [5], проект «Nereus» Мичиганского университета 2003 г. [6]. Анализ формул представлен в табл. 1.

В разделе «Корпус» результаты наиболее близкие к фактическим (погрешность 3...6,5%), получены по формуле: $P_{\text{к}} = W_{s7} \cdot (1 + 0,5 \cdot (C_{b1} - 0,7)) \cdot k_1 \cdot k_2$, где $W_{s7} = K \cdot E^{1,36}$ — масса стандартного стального корпуса с коэффициентом общей полноты $C_b = 0,7$; $K = 0,045$ — для судов обеспечения [8], $E = L_{\text{ин}}(B + d) + 0,85 \sum_{i=1}^n l_{1i} h_{1i} + 0,75 \sum_{i=1}^m l_{2i} h_{2i}$; $n, m, l_{1i}, h_{1i}, l_{2i}, h_{2i}$ — количество, длина и высота ярусов надстроек и рубок

соответственно; $C_{b1} = C_b + (1 - C_b)(0,8D - d) / 3d$ — редуцированный на 80% высоты борта D коэффициент общей полноты C_b при осадке d , ширине судна B и длине между перпендикулярами $L_{\text{мм}}$; k_1 — коэффициент ледового подкрепления корпуса судна; k_2 — коэффициент, учитывающий наличие высокопрочной стали.

В разделе «Общесудовое оборудование» приемлемые результаты (см. табл.1) определены по зависимости вида: $P_{\text{об}} = L \cdot B \cdot C$, где $C = 0,7$.

Масса энергетической установки (с оборудованием) вычислялась по выражению: $P_{\text{эу}} = \sum_{i=1}^{n_1} 0,72(MCR)^{0,67}$, где MCR — максимальная длительная мощность одного главного дизель-генератора (на большинстве буровых судов применяется дизель-электрическая установка); n_1 — количество главных дизель-генераторов.

Для расчета массы буровой вышки с оборудованием использовалось уравнение: $P_{\text{в}} = 0,1 \cdot (d_{\text{в}} + d_{\text{б}})$, где $d_{\text{в}}$, $d_{\text{б}}$ — глубина воды и глубина бурения соот-

Таблица 1. Расчетные формулы и результаты расчетов

| Расчетная формула | Буровое судно | | | Источник |
|--|---|--|--|----------|
| | «Наука» $d_{\text{б}} = 300 \text{ м};$ $d_{\text{б}} = 6100 \text{ м}$ | «CUSAT» $d_{\text{б}} = 1370 \text{ м};$ $d_{\text{б}} = 7600 \text{ м}$ | «Nereus» $d_{\text{б}} = 3048 \text{ м};$ $d_{\text{б}} = 10668 \text{ м}$ | |
| Корпус | | | | |
| | $P_{\text{к}} = 5850 \text{ т}$ | $P_{\text{к}} = 5769 \text{ т}$ | $P_{\text{к}} = 22814 \text{ т}$ | |
| | Расчетное значение, т | | | |
| 1. $P_{\text{к}} = W_{\text{с7}} \cdot (1 + 0,5 \cdot (C_{b1} - 0,7)) k_1 \cdot k_2$ | 5514 | 6316 | 23554 | [8,3] |
| 2. $P_{\text{к}} = 0,0832 \cdot X \cdot (e^{-5,73 \cdot X \cdot 10^{-7}}) k_1 \cdot k_2; X = L^2 B \frac{\sqrt[3]{C_b}}{12}$ | 2892 | 3159 | 15410 | [7] |
| 3. $P_{\text{к}} = C_b^{2/3} \cdot L \cdot B / 6 \cdot D^{0,72} (0,002(L/D)^2 + 1)$ | 3346 | 3765 | 17420 | [7] |
| 4. $P_{\text{к}} = 0,52 \cdot \Delta \cdot k_1 \cdot k_2$ | 10110 | 10320 | 44390 | [3] |
| Общесудовое оборудование | | | | |
| | $P_{\text{об}} = 3790 \text{ т}$ | $P_{\text{об}} = 2700 \text{ т}$ | $P_{\text{об}} = \text{н/д}$ | |
| | Расчетное значение, т | | | |
| 1. $P_{\text{об}} = 0,05 \cdot \Delta$ | 1023 | 1045 | 4493 | [3] |
| 2. $P_{\text{об}} = (LBD)^{2/3} C$ | 314 | 347 | 759 | [7] |
| 3. $P_{\text{об}} = L \cdot B \cdot C$ | 2515 | 2853 | 6496 | [7] |
| 4. $P_{\text{об}} = P_{\text{к}}^{2/3} C_1$ | 374 | 404 | 983 | [7] |
| Энергетическая установка | | | | |
| | $P_{\text{эу}} = 860 \text{ т}$ | $P_{\text{эу}} = 1265 \text{ т}$ | $P_{\text{эу}} = 1931 \text{ т}$ | |
| | Расчетное значение, т | | | |
| $P_{\text{эу}} = \sum_{i=1}^{n_1} 0,72(MCR)^{0,67}$ | 839 | 1097 | 1659 | [3] |
| Буровая вышка с оборудованием | | | | |
| | $P_{\text{в}} = 621 \text{ т}$ | $P_{\text{в}} = 863 \text{ т}$ | $P_{\text{в}} = 1200 \text{ т}$ | |
| | Расчетное значение, т | | | |
| $P_{\text{в}} = 0,1 \cdot (d_{\text{в}} + d_{\text{б}})$ | 640 | 897 | 2743 | [4] |
| Технологическое оборудование (кроме оборудования буровой вышки) | | | | |
| | $P_{\text{т}} = 124 \text{ т}$ | $P_{\text{т}} = 1491 \text{ т}$ | $P_{\text{т}} = \text{н/д}$ | |
| | Расчетное значение, т | | | |
| $P_{\text{т}} = (d_{\text{в}} + d_{\text{б}})^{0,762}$ | 795 | 1028 | 1421 | автор |
| Запас водоизмещения | 800 т | 800 т | 1200 т | |
| $P_{\text{зв}} = 0,03 \cdot \Delta$ | 614 | 627 | 2696 | [7] |
| Водоизмещение порожнем, т | 12040 | 12095 | 43206 | |
| Водоизмещение порожнем расчетное, т | 10900 | 12818 | 37198 | |
| Ошибка определения, % | -10 | 6 | -16 | |

Таблица 2. Расчет водоизмещения порожнем для буровых судов

| № п/п | Буровое судно, год | P_k | $P_{з\text{у}}$ | $P_{об}$ | P_v | P_T | $P_{зв}, \text{т}$ | $\Delta_{пор}^{расч}$ | $\Delta_{пор}$ | Ошибка, % |
|-------|---------------------------|-------|-----------------|----------|-------|-------|--------------------|-----------------------|----------------|-----------|
| 1 | Наука, 1996 | 5514 | 839 | 2515 | 640 | 795 | 614 | 10916 | 12040 | -10 |
| 2 | GUSAT (2011, проект) | 6316 | 1097 | 2853 | 897 | 1028 | 627 | 12818 | 12095 | 6 |
| 3 | Jasper Explorer, 1973 | 5066 | 1097 | 2288 | 640 | 795 | 604 | 10491 | 11790 | -12 |
| 4 | Valentin Shasin 1981 | 5174 | 758 | 2308 | 778 | 922 | 547 | 10487 | 10393 | 1 |
| 5 | Aban Abraham 1976 | 4943 | 836 | 2251 | 811 | 952 | 495 | 10288 | 8721 | 15 |
| 6 | Peregrine II 1979 | 5158 | 714 | 2261 | 710 | 861 | 517 | 10220 | 8030 | 21 |
| 7 | Noble Muravlenko 1982 | 5261 | 758 | 2328 | 884 | 1017 | 510 | 10757 | 8859 | 17 |
| 8 | Roger Eason 1977 | 5990 | 612 | 2591 | 975 | 1096 | 755 | 12018 | 12480 | -4 |
| 9 | Deepwater Expedition 1995 | 7227 | 1057 | 3133 | 1219 | 1299 | 722,1 | 14657 | 11290 | 23 |
| 10 | Pride Africa 1999 | 12442 | 1264 | 4005 | 1505 | 1525 | 1290 | 22031 | 20500 | 7 |
| 11 | Ensco DS-2 1999 | 12118 | 1264 | 3942 | 1505 | 1525 | 1260 | 21614 | 20280 | 6 |
| 12 | Deepsea Metro1 2011 | 16560 | 1802 | 5295 | 2377 | 1586 | 2031 | 30443 | 29700 | 2 |

ветственно. Массу технологического оборудования предложено определять по формуле: $P_T = (d_v + d_o)^{0,762}$.

В табл. 2 представлены результаты расчета $\Delta_{пор}$ для некоторых буровых судов и ошибки расчетных значений по сравнению с реальными значениями $\Delta_{пор}$.

Отклонение расчетных значений от проектных данных (точки, соединенные ломаной линией) иллюстрирует также рис. 1.

Номер по горизонтальной оси на рис. 1 соответствует номеру судна из табл. 2. При оптимальном, с визуальной точки зрения, расположении результатов вычислений (расчетные точки облегают линию проектных значений как сверху, так и снизу), наблюдаются отдельные «выбросы» относительной ошибки до 20% (например, для судов № 6, 7, 9).

ВЫВОДЫ. 1. При анализе зависимостей небольшая ошибка определения массовой нагрузки 6% наблюдалась при расчете нагрузки проекта современного бурового судна CUSAT. Для бурового судна «Наука»: -10%. Относительно высока ошибка определения для проекта «Nereus»: -16%. Источник погрешности — особенность конструкции последнего,

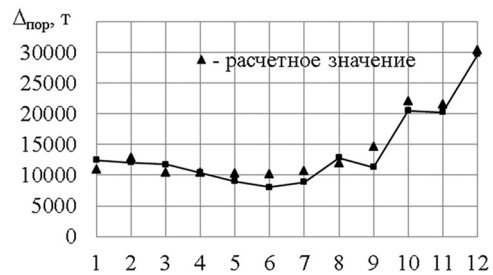


Рис. 1. Расчет водоизмещения порожнем буровых судов

связанная с наличием на его борту танков для хранения нефти объемом 32528 м³. Для подобных судов необходимо вводить дополнительный раздел массовой нагрузки — $P_{тан}$, учитывающий массу погрузочно-разгрузочных трубопроводов, механизмов и грузовых танков.

2. Проверена применимость выбранных зависимостей на базе данных 10 судов. В дальнейших исследованиях необходимо установить причину значительного (до 20%) отклонения расчетных значений от проектного водоизмещения порожнем для некоторых буровых судов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Performance specifications on board scientific measurement capabilities, and survey of drilling vessels [Text] // Report from the Conceptual design committee to the U.S. — USA : National Science Foundation, 2000. — 50 p.
- [2] Гук М. Н. Изменение главных элементов буровых судов в процессе их развития [Текст] / М. Н. Гук // 36. науч. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2015. — № 2 (458). — С. 23–26.
- [3] Московко О. С. Аналіз та уточнення формул для розрахунку розділів навантаження мас універсальних науково-дослідних суден [Текст] / О. С. Московко, О. В. Бондаренко // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. — Севастополь : СевНТУ, 2014. — Вип. 147/2014. — Серія : Механіка, енергетика, екологія. — С. 64–67.
- [4] Шостак В. П. Эффективность техники освоения океана [Текст] / В. П. Шостак. — К. : Наукова думка, 2002. — 319 с.
- [5] Drillship Nereus. International Student Offshore Design Competition [Text] / V. Disouza, L. Detrisac, S. Opdyke, M. Rugnetta, K. Sultani. — Michigan : The University of Michigan, 2003. — 119 p.

- [6] **Kumar S.** Design of a 4500 feet RWD drill ship [Electronic resource] / S. Kumar // Thesis of the Degree of Bachelor of Technology in Naval Architecture and Shipbuilding. — Kochi : Cochin University of Science and Technology, 2011. — 257 p. — Режим доступа: <https://ru.scribd.com/doc/243169170/Drill-Ship-Dissertation-Sachin-Kumar>.
- [7] **Schneekluth H.** Ship design for efficiency and economy [Text] / H. Schneekluth, V. Bertram. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 1998. — Pp. 149–179.
- [8] **Watson D. G. M.** Practical ship design [Text] / D. G. M. Watson // Elsevier. — 2002. — 531 p

© М. М. Гук

Надійшла до редколегії 30.10.17
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *В. О. Некрасов*