

Особенности математической модели наливного судна смешанного (река-море) плавания

Малов Д. А., Кочнев Ю. А.

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, Российская Федерация

Применяемая на ранних этапах разработки проекта, математическая модель должна иметь высокую адекватность и чувствительность к изменениям варьируемых параметров. Добиться требуемой для неё точности можно широким применением регрессионных зависимостей полученных анализом характеристик и элементов существующих судов последних лет постройки.

Обоснование главных неизвестных судна, к которым относятся коэффициент общей полноты и главные размерения, выполняется на стадиях исследовательского проектирования. Для них характерно применение математических моделей взаимосвязи вектора внешних данных о судне (A_1), вектора искомых элементов (A_2), вектора связей между ними (A_3), представляемого на основе системного подхода, и вектора множества свойств судна (A_4), таких характеристики остойчивости, плавучести, прочности, ходкости и т. д. Взаимосвязь между перечисленными векторами осуществляется системой уравнений, отражающей некий критерий эффективности

$$F = f_i(A_1, A_2, A_3, A_4),$$

где f_i – функции взаимосвязи, которые раскрываются в виде математической модели.

Вектор внешних данных для танкера включает грузоподъемность $P_{гр}$, минимальную плотность перевозимого груза $\rho_{гр}$, класс, ограничительные характеристики линии эксплуатации, экономические данные постройки и эксплуатации судна, требования нормативных документов.

Вектор искомых элементов состоит из независимо варьируемых параметров, включающих длину, ширину судна (L, B), коэффициент общей полноты (δ), и зависимых величин судна: водоизмещения (D), осадки (T), высоты борта (H) и мощности СЭУ (N), которые связаны друг с другом математической моделью. Последняя для обеспечения достаточного уровня точности прогнозирования результатов должна состоять из нескольких витков «спирали проектирования».

Водоизмещение первого приближения находится через коэффициент утилизации η [2]

$$D_1 = \frac{P_{cp}}{\eta},$$

$$\eta = 0,682 + 1,765P_{cp} \cdot 10^{-5}.$$

Осадка судна взаимосвязана с водоизмещением через уравнение плавучести

$$T = \frac{D_1}{\rho \delta L B},$$

где ρ – плотность воды, т/м³.

Обоснование высоты борта при применение современных средств вычислительной техники может быть выполнено из условия обеспечения требуемой грузовместимости, минимального надводного борта и соотношения длины к высоте борта, регламентируемого требованиями Правил классификационного общества, то есть

$$H = \max \left\{ \begin{array}{l} T + \Delta H(L, B, T, \delta) \\ \frac{L}{(L/H)'} \\ \frac{1,03P_{cp}}{\rho_{cp} L_{ГТ} (B - 2b'')} + h'' \end{array} \right.$$

где $T + \Delta H(L, B, T, \delta)$ – минимально необходимый надводный борт судна, определяемый в соответствии с требованиями классификационного общества (КО); $(L/H)'$ – требуемое Правилами КО отношение длины к высоте борта; $L_{ГТ}$ – длина грузовых трюмов, м; b'' , h'' – ширина межбортового пространства, м, и высота междудонного пространства, определяемые из экологических требований [3].

Полный дедвейт наливного судна представляет собой сумму его заданной грузоподъёмности, массы экипажа ($P_{эк}$) и величины запасов (P_3), определяемых в зависимости от норм снабжения судна продовольствием, питьевой водой и топливом

$$Dw = P_{гр} + P_{эк} + P_3$$

Длина грузового трюма рассчитывается из условия общей компоновки основных отсеков судна (рисунок 1) при традиционном их расположении и составляет

$$L_{ГТ} = \left(0,98L - \frac{B}{2} - L_{ПУ} - L_{МО} - L_{БО} \right) 0,97,$$

где $L_{ПУ}$, $L_{МО}$, $L_{БО}$ – длины отсека подруливающего устройства, машинного отделения и балластного отсека соответственно, определяемые по [2].

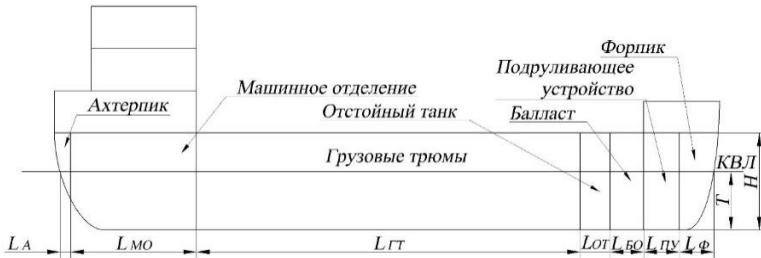


Рис. 1. Компоновка танкера, принятая в математической модели

В первом приближении, когда известны только ориентировочные значения массы судна и его осадка мощность главных двигателей определяется по приближённой формуле, полученной анализом характеристик существующих наливных судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания

$$N = 0,804 (Dw \times v)^{0,73}.$$

Уточнение водоизмещение порожнём выполняется по развёрнутому уравнению масс, отражающему сумму основных разделов составляющих нагрузки масс

$$D_{(0,k)} = 1,03 \sum_{j=1}^9 P_j,$$

где k – номер второго и последующего приближений; P_1 – масса металлического корпуса, т; P_{2-9} – соответственно массы фундаментов, дельных вещей, окраски, изоляции, судовых устройств, судовых систем, СЭУ и оборудования помещений.

Масса металлического корпуса, составляющая на наливном судне более 70 % водоизмещения порожнём, определяется по уравнению

$$P_1 = k_l (P_{п} + P_{об} + P_{поп.пер.} + P_{прод.пер.} + P_{н} + P_{вч}),$$

где k_l – коэффициент, учитывающий неучтенные массы и индивидуальные погрешности предлагаемых зависимостей; $P_{п}$ – масса палуб, платформ; $P_{об}$ – масса обшивки наружной, настила второго дна, примыкающих частей; $P_{поп.пер.}$ – масса поперечных переборок; $P_{прод.пер.}$ – масса продольных переборок корпуса; $P_{н}$ – масса надстроек, рубок и мачт; $P_{вч}$ – масса выступающих частей.

Из теории проектирования судов [5; 6] известно, что на начальных этапах проектирования любую массу можно рассчитать через её измеритель

$$P_i = \frac{P_i}{M},$$

где P_i – рассматриваемая масса судна-прототипа; M – модуль масс, равный

$$M = \prod_{j=1}^n X_j^{\alpha_j},$$

где X_j – j -ый элемент или характеристика судна; α_j – показатель степени.

Тогда массы P_{2-9} определяются через измерители приведённые в [7], а составляющие массы металлического корпуса, оказывающие доминирующее влияние на водоизмещение порожнём, по полученным регрессионным зависимостям

$$P_{об} = [-0,05 \cdot 10^{-3} (L(B+H)) + 0,433]L(B+H);$$

$$P_{(н)} = [4,00 \cdot 10^{-5}]LB + 0,0578]LB;$$

$$P_{(поп.пер.)} = [-2,38 \cdot 10^{-2}BH + 3,56]BH;$$

$$P_{(прод.пер.)} = [0,05 \cdot 10^{-2}LH - 0,22]LH;$$

$$P_{\text{н}} = [0,08 \cdot 10^{-3} LBH - 0,074] LBH .$$

Уточнённое по фактическим элементам и характеристикам судна водоизмещение позволяет откорректировать осадку по формуле (1) и более точно рассчитать суммарную мощность главных двигателей

$$N = \frac{Rv}{\mu} ,$$

где R – сопротивление движению судна, кН, которое для судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания с сверхполными обводами корпуса рассчитывается по дополненному методу Холтропа-Меннена [4]; μ – протпульсивный КПД.

При решении ряда задач проектирования судна возникает необходимость расчёта не только полного водоизмещения, но и дополнительных, при различном количестве перевозимого груза и, при необходимости, балласта

$$D_j = D_{0,k} + P_i + P_{\text{жк}} + P_3 + P_{\text{б}} ,$$

где D_0 – итоговое водоизмещение порожнём; P_i – масса принятого на судно груза; $P_{\text{б}}$ – масса балласта, определяемая условием обеспечения требуемой посадки судна.

Результаты выполненных тестовых расчётов по разработанной модели и их сравнение с существующими судами приведено в табл. 1.

Таблица

Сравнение результатов расчёта элементов и характеристик судна

Характеристика судна	Проект № 630	Расчет по модели	Проект № 550	Расчет по модели	Проект № 587	Расчет по модели
Длина L , м						
Ширина B , м						
Грузоподъёмность, т						
Высота борта H , м						
Осадка T , м						
Водоизмещение, т						

Выполненный анализ по разнородным наливным судам внутреннего и смешанного (река-море) плавания показал возможность применения разработанной математической модели для расчёта главных неизвестных танкера. Из анализа вычислений следует, что точность математической модели достаточна для начального этапа или этапа исследовательского проектирования. Максимальная погрешность составляет менее 5%, а средне-квадратичные отклонения контролируемых величин по расчетным значениям составляет порядка 1,9 %.

Большая погрешность обусловлена в первую очередь разнообразием конструкций корпуса (типом диаметральных переборок, системой набора и т.п), от которой зависит доминирующая составляющая массы водоизмещения порожнём.

Разработанная математическая модель может быть использована как самостоятельный элемент, а также и в составе задачи оптимизации главных размерений, от которых чувствительны большинство уравнений предлагаемой системы. Включение в состав модели зависимости для эксплуатационного водоизмещения при различных состояниях нагрузки позволяет дополнительно решать частные задачи, например, на обеспечение общей прочности корпуса, допустимой посадки и обеспечения мореходных качеств при ней.

Литература

1. Гайкович, А. И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов / А. И. Гайкович. – В 2-х т., Т1: Описание системы «Корабль». – Санкт-Петербург: НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. – 819 с.
2. Кочнев, Ю. А. Математическая модель расчета массы танкера смешанного (река-море) плавания / Ю. А. Кочнев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2010. – № 1. – С. 7–12.
3. Правила классификации и постройки судов. – Режим доступа: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/izveshenia/Rossiyskiy-Rechnoy-Registr.-PRAVILA-2019.-May-2021.pdf>. – Дата доступа 09.03.2023.
4. Кочнев, Ю. А. Прогнозирование сопротивления движению грузовых комбинированных судов в задаче их оптимизации / Ю. А. Кочнев, И. А. Гуляев // Великие реки - 2020: Труды 22-го международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 27–29 мая 2020 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2020. – С. 27.
5. Роннов, Е. П. Проектирование судов внутреннего плавания: Учебное пособие / Е. П. Роннов. – Н. Новгород: ВГАВТ, 2009. – 305 с.

6. Кочнев, Ю. А. Математическая модель расчёта массы металлического корпуса комбинированного судна / И. А. Гуляев, Е. П. Роннов, Ю. А. Кочнев // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – Вып. 63. – С. 48–54.

7. Давыдова, С. В. Анализ расчетов при создании теоретического чертежа буксира интерполяционным методом / С. В. Давыдова, И. В. Андриянов // Научные проблемы водного транспорта. – 2021. – № 67. – С. 24–32.

УДК 627.748

Оптимальный режим работы грунтового насоса земснаряда

Хвйтик К. В., Качанов И. В., Шаталов И. М.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Описаны основные режимы гидротранспорта пульпы, а также выбран оптимальный режим работы гидротранспортной системы, который тесно связан с гидравлическими потерями в нагнетательной трубе.

В производственных условиях гидротранспорт пульпы в нагнетательном трубопроводе грунтового насоса земснаряда осуществляется в различных гидравлических режимах.

При этом, режим эксплуатации гидросистем земснарядов не всегда является оптимальным с точки зрения энергозатрат и экономической эффективности.

Рассмотрим более подробно определение гидравлических потерь в системе напорного гидротранспорта земснаряда, с целью установления оптимального режима эксплуатации гидросистемы земснаряда.

Гидротранспорт пульпы происходит при турбулентном режиме движения потока.

В зависимости от соотношения фактической и критической скоростей в пульпопроводе различают три режима гидротранспорта:

I – $v > v_{кр}$ – область больших скоростей, весь грунт транспортируется во взвешенном состоянии;

II – $v \sim v_{кр}$ – скорость близка к критической, основная часть грунта транспортируется во взвешенном состоянии. Одновременно большое количество частиц влечется потоком в придонной области;

III – $v < v_{кр}$ – на дне потока находится постоянный слой заилиения и напорный трубопровод земснаряда работает как илопровод.

Величина критической скорости по исследованиям В. С. Кнороза, Г. Н. Роева, А. М. Царевского, А. П. Юфина и других зависит от гидравли-