

УДК 629.122

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.158>

Анализ устойчивости комбинированных судов на стадии исследовательского проектирования

И. А. Гуляев¹

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

Е. П. Роннов²

¹ФАУ «Российский Речной Регистр», г. Москва, Россия

²Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Приводится метод анализа устойчивости комбинированного судна типа танкер/судно-площадка на стадии исследовательского проектирования. Отмечается, что не все их основные мореходные и эксплуатационные качества являются результатом простого сложения качеств наливного судна и площадки. Имеет место их взаимное влияние, что следует учитывать при анализе устойчивости в решениях многовариантных оптимизационных задач внешнего и внутреннего проектирования таких судов. Это привело к необходимости корректировки известных методов анализа устойчивости на начальных стадиях проектирования судна, что и составило цель выполненной работы и ее новизну.

Учитывая многовариантность задачи и конструктивный тип корпуса судна, принят способ оценки устойчивости, анализируя предельное значение метацентрической высоты, рассчитываемой из условия обеспечения требований Российского Речного Регистра по допустимому углу крена при статическом действии ветра. Для учета нелинейности диаграммы устойчивости при наклонениях до углов входа палубы в воду и выхода скулы из воды предлагается использовать приближенный способ определения метацентрического радиуса.

Предложенный метод оценки устойчивости комбинированного судна рекомендуется использовать на стадии обоснования и анализа их главных элементов, как ограничение в задачах математического моделирования оптимизации данного типа судов. Он позволяет уже на этапе исследовательского проектирования исключать из дальнейшего рассмотрения варианты, не удовлетворяющие уровню этого мореходного качества.

Ключевые слова: комбинированное судно, танкер/судно-площадка, обеспечение устойчивости, метацентрическая высота, оптимизация главных размеров.

Stability analysis of combined vessels at the stage of research design

Ilya A. Gulyaev¹

Evgeniy P. Ronnov²

¹Russian River Register, Moscow, Russia

²Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A method of stability analysis of a combined tanker / platform vessel at the stage of research design is presented. It is noted that not all of their main seaworthiness and operational qualities are the result of a simple addition of the qualities of a tanker and a platform. Their mutual influence takes place, which should be taken into account when analyzing stability in solutions of multivariate optimization problems of external and internal design of such ships. This has led to the need to adjust the known methods of stability

analysis at the initial stages of ship design, which has been the purpose of the work performed and its novelty.

Taking into account the multivariance of the problem and the structural type of the ship's hull, a method for assessing stability has been adopted by analyzing the limiting value of the metacentric height calculated from the condition of meeting the requirements of the Russian River Register for the permissible bank angle under static wind action. Considering the nonlinearity of the stability diagram at inclinations to the angles of the deck entry into the water and the exit of the chine from the water, it is proposed to use an approximate method for determining the metacentric radius.

The proposed method for assessing the stability of a combined vessel is recommended to be used at the stage of justification and analysis of their main elements, as a limitation in the problems of mathematical modeling of optimization of this type of vessels. It allows already at the stage of research design to exclude from further consideration options that do not meet the level of this seaworthiness.

Keywords: combined vessel, tanker / platform vessel, stability assurance, metacentric height, optimization of main dimensions.

Введение

Большинство жидких грузов, перевозимых на судах внутреннего и смешанного (река-море) плавания, это нефть и различные нефтепродукты. Существенным недостатком нефтеналивных судов является их односторонняя загрузка нефтегрузом и обратный порожний пробег, что отрицательно отражается на экономической эффективности этого флота. В морском торговом судоходстве используются комбинированные суда, способные в прямом рейсе везти жидкий груз, а в обратном – сухой. Их архитектурно-конструктивной особенностью является размещение грузовых помещений как для жидких, так и для сухих грузов в корпусе [1], [2], [3], [4], [5]. В отечественной практике речных перевозок использовались комбинированные суда типа нефтерудовозы, у которых сухие и жидкие грузы в разных рейсах размещались в корпусе [6]. Однако их грузовые танки не имели вторых бортов и второго дна. Установка в их корпусе требуемых конструкций приводила к существенному уменьшению грузоподъемности танков жидких грузов. С повышением требований по защите окружающей среды в настоящее время эксплуатация нефтерудовозов запрещена. В связи с ограничениями на главные размерения судна, накладываемыми габаритами внутренних водных путей, являются перспективными комбинированные суда типа танкер/судно-площадка. У них жидкий груз размещается как на обычном танкере в корпусе, а сухой (навалочный либо тарноштучный) в обратном рейсе – на грузовой площадке над танками. Построенная серия таких судов проекта RST54 показала их эффективность в определенных условиях эксплуатации [7].

Постановка задачи

Рассматривая вопросы исследовательского проектирования, при которых решаются задачи внутреннего и внешнего проектирования таких судов, следует иметь в виду, что их мореходные и эксплуатационные качества не всегда являются результатом простого сложения качеств наливного судна и площадки. Это следует учитывать и при анализе обеспечения остойчивости, одного из важнейших мореходных качеств, поскольку от ее уровня зависит безопасность людей и грузов, находящихся на судне, экологическая безопасность.

Методика нормирования остойчивости судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания [8] заключается в сопоставлении значения внешнего кренящего момента, приложенного либо статически, с моментом, кренящим судно до допустимого (нормируемого) угла. Она хорошо отработана и для ее реализации требуется наличие соответствующей подробной информации, получаемой, прежде

всего, с использованием теоретического чертежа (ТЧ). Однако на стадиях, когда с использованием методов математического моделирования решаются многовариантные оптимизационные задачи обоснования основных элементов и характеристик судна, не всегда реально иметь соответствующие варианты теоретического чертежа. Поэтому для оценки остойчивости в этом случае можно использовать приближенные аналитические методы построения ТЧ, например, [9], [10], [11], [12] и др. На стадиях предварительного анализа главных элементов судна уровень остойчивости оценивается в рамках метода начальной остойчивости обобщенными показателями в виде неравенств:

$$h_0 \geq h_{кр}, \text{ или для данного судна } z_g \leq z_{g_{кр}} \quad (1)$$

где z_g, h_0 – аппликата центра тяжести и начальная метацентрическая высота при рассматриваемом состоянии нагрузки судна;

$z_{g_{кр}}, h_{кр}$ – предельные значения z_g и h_0 с точки зрения обеспечения остойчивости.

Учитывая приближенность методов расчета z_g и h_0 и стадию проектирования неравенства (1), как показано в нашей работе [14], правильнее записывать с учетом запаса остойчивости:

$$z_g \leq z_{g_{кр}} + \Delta h \quad \text{и} \quad h_0 \geq h_{кр} + \Delta h, \quad (2)$$

где Δh – запас остойчивости.

Отмеченные методы являются приближенными; при их разработке учитывались особенности архитектурно-конструктивного типа конкретных судов, и поэтому они требуют корректировки применительно к комбинированным судам, что и рассмотрено ниже.

Разработка метода

Для верхнего (предварительного) уровня анализа достаточности остойчивости, используя условие (1), нужно уточнить особенность расчета h_0 и $h_{кр}$ комбинированного судна.

Начальная метацентрическая высота h_0 находится из классического (по Эйлеру) уравнения начальной остойчивости

$$h_0 = r_0 + z_c - z_g$$

Малый метацентрический радиус r_0 и аппликата центра величины z_c рассчитываются по известным решениям, устанавливающим их связь с главными размерениями и параметрами формы корпуса

$$r_0 = f_r(\alpha, \delta) \frac{B^2}{T}, \quad z_c = f_z(\alpha, \delta) T$$

Для судов с полными обводами, к которым относятся комбинированные суда, можно использовать решение Фан-дер-Флита и Л. Эйлера [8]

$$r_0 = \frac{B^2}{11,4T} \cdot \frac{\alpha^2}{\delta}, \quad z_c = \frac{1}{1 + \delta/\alpha} \cdot T$$

Значения аппликаты центра тяжести z_g при возможных состояниях нагрузки следует находить с учетом особенностей архитектурно-конструктивного типа комбинированного судна танкер/судно-площадка. Так аппликата z_g для варианта обратной загрузки, когда танки порожние, а сухой груз размещается на грузовой площадке, может быть рассчитана

$$z_g = (D_0 z_{g_0} + P_{гр} z_{гр}) D^{-1},$$

где D_0, z_{g_0} – водоизмещение и аппликата центра масс комбинированного судна порожнем;

$P_{гр}, z_{гр}$ – грузоподъемность по сухому грузу и аппликата центра масс этого груза;

D – полное водоизмещение в обратном рейсе.

Аппликата центра масс сухого груза с учетом возможной нагрузки его с «горкой» и угла естественного откоса 45° (щебень, гравий) рассчитывается по выражению

$$z_{гр} = 0,9(0,45h_{гр} + H) + (H + 0,9h_{гр} + 0,17b_{гр}),$$

где $h_{гр}, b_{гр}$ – высота ограждения и ширина грузовой палубы;

H – высота борта судна.

При перевозке других навалочных грузов угол естественного откоса меньше, что приведет к уменьшению $z_{гр}, z_g$ и увеличению h_0 .

Определение критического (предельного) уровня начальной остойчивости через предельное значение метацентрической высоты комбинированного судна в соответствии с Правилами [8] допустимо определить из условия действия на судне статического ветра, при котором допустимый угол крена не должен превышать $0,8$ угла заливания или угла входа кромки палубы в воду, в зависимости от того, что меньше. Нефтеналивные суда, так же, как и суда-площадки являются низкобортными. Поэтому допустимый угол крена этих судов, так же, как и комбинированных, имеет небольшие значения и поэтому наклонение до таких углов можно рассматривать в рамках метода начальной остойчивости. В соответствии с этим будем иметь

$$M_{кр} \leq M_{доп} \tag{3}$$

Момент, кренящий от статического ветра находится по [8]

$$M_{кр} = 0,001 \cdot 0,47 p_g S z_c,$$

где p_g, S, z_c – условное расчетное давление ветра, площадь парусности и приведенное плечо кренящего момента.

Допустимый момент - кренящий момент до допустимого угла крена - численно равняется восстанавливающему моменту при этом угле

$$M_{доп} = D h_0 \sin \theta$$

Отсюда критическое значение начальной метацентрической высоты будет

$$h_{кр} = \frac{M_{кр}}{D \cdot \sin \theta_{доп}}$$

Учитывая, что $\theta_{доп}$ по углу заливания зависит от конструктивных решений по расположению открытых отверстий, и они в основном расположены на главной палубе и выше, за допустимый угол можно принять угол входа палубы в воду.

При углах входа палубы в воду больше 12° , когда нелинейность диаграммы плеч может привести к заметной погрешности в оценке остойчивости, например, при ходе порожнем, допустимый момент следует находить с использованием диаграммы плеч статической остойчивости

$$M_{доп} = l_{доп} \cdot D,$$

где $l_{доп}$ – плечо статической остойчивости, принимаемое по диаграмме $l = f(\theta)$ при допустимом угле крена. Необходимые для ее расчета построения плечи остойчивости веса и формы зависят от координат центра величины, являющихся функцией угла крена [11]

$$y_c = \int_0^{\theta} r_{\theta} \cos \theta d\theta$$

$$z_c - z_{c0} = \int_0^{\theta} r_{\theta} \sin \theta d\theta,$$

где r_{θ} – метацентрический радиус при угле крена θ ; z_{c0} – аппликата центра величины при угле крена 0 градусов.

Значение метацентрического радиуса при $\theta=0$ может быть найдено по формуле Фан-дер-Флита, а при произвольном θ - по предложению В.Л. Поздюнина как соотношение относительно r_{θ}

$$r_{\theta} = k_{\theta} \cdot r_0$$

Коэффициент метацентрического радиуса при различных углах равнообъемного наклона для полных грузовых судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания с вертикальными бортами и плоским днищем, как показано в [13], может быть рассчитан по формуле

$$k_{\theta} = \frac{(0,5\delta + 0,415)B_{\theta}}{1,05\alpha^2 B^3} (B_{\theta}^2 + 12 \eta_{\theta}),$$

где δ, α – коэффициенты полноты водоизмещения и площади действующей ватерлинии, соответствующей расчетному водоизмещению D ;

B_{θ} – ширина наклонной ватерлинии при угле крена θ ;

B – расчетная ширина судна;

η_{θ} – функция, характеризующая расстояние между центральными осями действующей и вспомогательной ватерлинии при наклоне судна на угол крена θ .

Величины B_{θ} и η_{θ} для актуальных в данном случае двух фаз наклона судна $\theta_{вс} \geq \theta \leq \theta_{вп}$ и $\theta_{вс} < \theta \leq \theta_{вп}$ рассчитываются по следующим формулам

$$B_{\theta} = \begin{cases} \frac{B_{\theta}}{\cos \theta} \\ \left(\frac{B}{2} + \frac{T}{\operatorname{tg} \theta}\right) \cos^{-1} \theta \end{cases} \quad \eta_{\theta} = \begin{cases} 0 & \text{если } \theta_{вс} \geq \theta \leq \theta_{вп} \\ \frac{B}{2} - \frac{T}{\sin \theta} & \text{если } \theta_{вс} < \theta \leq \theta_{вп} \end{cases}$$

где $\theta_{вс}, \theta_{вп}$ – угол выхода скулы из воды и входа палубы в воду соответственно;

H, T – высота борта судна и осадка.

Рассчитав k_{θ} для ряда θ , получаем значения r_{θ} для этих углов наклона, координаты центра величины $y_{c\theta}$ и z_c и величину плеч статической остойчивости. Представлением их в виде функции $l = f(\theta)$, решается задача определения $l_{доп}$ по допускаемому углу крена и проверяется выполнение условия (3).

Заключение

Предложенный метод предварительной оценки достаточности остойчивости главных элементов комбинированного судна типа танкер/судно-площадка в целом соответствует критериям, принятым в [8]. Он реализуем в рамках математической модели оптимизации этого типа судна, рассматриваемой при решении задач исследовательского проектирования и позволяет уже на этом этапе исключать из дальнейшего рассмотрения варианты, не удовлетворяющие этому важному мореходному качеству.

Литература

1. Железяков Ж.К. комбинированные суда для перевозки нефти и навалочных грузов / Железяков Ж.К. // Ленинград: Судостроение, 1976.
2. Козлов С.Н. Головной крупнотоннажный нефтерудовоз «Борис Бутома» / Козлов С.М., Цыбенко А.Ф. // Журнал «Судостроение», № 12, 1977.
3. Burneett A. Toown a combination ship «Marine desigen international», march 26, 1971, P.19.
4. Dorman W. Combination bulk carriers «Marine technology», 1966, № 4, P.409-453.
5. Marie Donet. Combined ships: an empirical investigation about versatility, Maritime Policy Management, 1999, VOL. 26.NO.3, p.231-248.
6. Животовский А.А. Особенности конструкции головного теплохода «Нефтерудовоз-1» / Животовский А.А., Шалкин М.К., Самунин В.Г. // Журнал «Судостроение», № 5, 1971.
7. Егоров Г.В. «Сверхполные» комбинированные суда проекта RST54 для перевозки нефтепродуктов и сухих грузов, а также контейнеров, накатной техники и проектных грузов / Егоров Г.В., Тонюк В.И., Дурнев Е.Ю. // Журнал «Судостроение», № 4, 2017.
8. Российский Речной Регистр в 5 т. Т.2 / Российский Речной Регистр. – М., 2019. – 432 с.
9. Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Статика корабля. Том 1 / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин. – Л.: Судостроение, 1976. – 312 с.
10. Севостьянов Н.Б. Остойчивость промысловых судов / Н.Б. Севостьянов. – Л.: Судостроение. 1970. – 200 с.
11. Алферьев М.Я. Теория корабля / М.Я. Алферьев. – М.: Речной транспорт, 1959. – 291 с.
12. Ногид Л.М. Теория проектирования судов / Л.М. Ногид. – Л.: Судпромгиз. 1955. – 497 с.
13. Роннов Е.П. Расчет характеристик остойчивости грузовых судов внутреннего плавания на ранних стадиях проектирования / Е.П. Роннов // Труды ГИИВТа, 1985. – Вып. 211. – С. 151–159.
14. Роннов Е.П. Анализ запаса остойчивости судна внутреннего и смешанного (река-море) плавания / Е.П. Роннов, Ю.А. Кочнев, И.А. Гуляев // Журнал «Морские интеллектуальные технологии», № 4, 2020 – 56-61 с.

References

1. Zhelezjakov Zh. K. Kombinirovannye suda dlja perevozki nefi i navalochnyh gruzov. Leningrad, «Sudostroenie», 1976.
2. Kozlov S.M. Cybenko A. F. Golovnoj krupnotonnazhnyj nefterudovoz «Boris Butoma», zhurnal «Sudostroenie», No 12, 1977.
3. Burneett A. Toown a combination ship «Marine desigen international», march 26, 1971, P.19.
4. Dorman W. Combination bulk carriers «Marine technology», 1966, № 4, P.409-453.
5. Marie Donet. Combined ships: an empirical investigation about versatility, Maritime Policy Management, 1999, VOL. 26. NO.3, p.231-248.
6. Zhivotovskij A.A. Shalkin M.K. Samunin V.G. Osobennosti konstrukcii golovnogo teplohoda «Nefterudovoz-1», zhurnal «Sudostroenie», No 5, 1971.
7. Egorov G. V. Tonyuk V.I., Durnev E. Y. "Saturated" multi-purpose P.RST54 ships for transportation of oil and dry cargo, as containers, rolling equipment and special-purpose cargo and other containers. Marine Engineering Bureau, zhurnal «Sudostroenie», No 4, 2017.
8. FAI «Russian River Register». Rules for the Classification and Construction. Moscow, 2019.
9. Blagoveshchenskij S.N. Spravochnik po statike i dinamike korablya. Statika korablya. Book 1 / S.N. Blagoveshchenskij, A.N. Holodilin. – Leningrad, «Sudostroenie», 1976. – P. 312
10. Sevost'yanov N.B. Ostojchivost' promyslovyh sudov / N.B. Sevost'yanov. – Leningrad, «Sudostroenie». 1970. – P. 200
11. Alfer'ev M.Ya. Teoriya korablya / M.Ya. Alfer'ev. – Moscow, Rechnoj transport, 1959. – P. 291
12. Nogid L.M. Teoriya proektirovaniya sudov / L.M. Nogid. – L.: Sudpromgiz. 1955. – P. 497
13. Ronnov E.P. Raschet harakteristik ostojchivosti gruzovyh sudov vnutrennego plavaniya na rannih stadiyah proektirovaniya / E.P. Ronnov // Trudy GIIVTa, 1985. – No. 211. – P. 151–159.
14. Ronnov E.P. Analiz zapasa ostojchivosti sudna vnutrennego i smeshannogo (reka-more) plavaniya / E.P. Ronnov, Yu.A. Kochnev, I.A. Gulyaev // Zhurnal «Morskie intellektual'nye tekhnologii», No 4, 2020, P. 56-61.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Роннов Евгений Павлович, 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

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 (VSUWT), 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950

Статья поступила в редакцию 04.12.2020; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 04.12.2020; published online 23.03.2021