

УДК 629.12.

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.159>

Диаграмма статической остойчивости судна находящегося в условиях волнения

Ю.А. Кочнев

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6864-4473>

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

Аннотация. При построении диаграммы статической остойчивости судна в соответствии с требованиями Правил классификационных обществ необходим учет особых условий плавания: обледенения, наличия жидких грузов в цистернах и т.п. При этом наличие бортовой качки у судна, вызванной действием волн, учитывается только в момент определения восстанавливающих моментов. В настоящей статье приведён анализ влияния на диаграмму статической остойчивости формы водной поверхности (профиля волны), на которой происходит наклонение. Построение сложной формы объемного водоизмещения, вызванного не только формой судовой поверхности, но и изменением действующей ватерлинии, выполнено с применением твердотельного моделирования теоретического корпуса и объема водного бассейна в среде Autodesk AutoCAD и Visual Lisp. Для тестовых расчётов получено, что возможное отклонение плеча статической остойчивости и площади под положительной частью диаграммы может достигать двенадцати процентов, что необходимо учитывать при проведении проверочных расчётов.

Ключевые слова. Диаграмма статической остойчивости, твердотельная модель судна

Diagrams of static stability of a ship in rough conditions

Yuriy A. Kochnev

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. When constructing a diagram of the static stability of a vessel in accordance with the requirements of the Rules of Classification Societies, it is necessary to take into account special navigation conditions: icing, the presence of liquid cargo in tanks, etc. In this case, the presence of rolling in the ship caused by the action of waves is taken into account only at the moment of determining the restoring moments. This article provides an analysis of the influence on the static stability diagram of the shape of the water surface (wave profile), on which the inclination occurs. The construction of a complex shape of the volumetric displacement, caused not only by the shape of the ship's surface, but also by a change in the current waterline, has been carried out using solid modeling of the theoretical hull and the volume of the water basin in the Autodesk AutoCAD and Visual Lisp environment. For test calculations, it has been found that the possible deviation of the static stability shoulder and the area under the positive part of the diagram can reach twelve percent, which must be taken into account when carrying out verification calculations.

Keywords: Static stability diagram, solid ship model.

Введение

Нормирование остойчивости судов на конечных (больших) углах наклонения осуществляется с применением диаграммы статической остойчивости (ДСО), а её построение осуществляется на «тихой воде», при плоской ватерлинии, наклоняющейся вокруг своего центра тяжести. Реальные условия возникновения у

судна восстанавливающих моментов имеют место на волнении. В [1,2] предлагается методика учета попутной волны на ДСО, но также имеется оговорка, что необходима рекомендация судоводителям избегать подобных курсовых углов. Взаимодействие корпуса судна с трехмерной волной, распространяющейся как в продольном, так и в поперечном относительно судна направлении, может приводить к негативному изменению диаграммы статической остойчивости. Построение диаграммы, учитывающей конечные скорости перемещения волны относительно судна и скорости его качки, является актуальной задачей для повышения безопасности.

Точное положение судна на волнении при действии на него кренящей пары (динамического или статического ветра, иных нагрузок) может быть определено решением уравнений качки в нелинейной постановке [1]. Решение шести уравнений, описывающих нелинейный процесс на случайном волнении, является трудоёмкой задачей, требующей больших затрат машинного времени, к тому же результат во многом зависит от принятых начальных условий.

Морское волнение, являющееся трехмерным случайным процессом, может быть описано различными законами [3, 4] и в общем случае представлено в виде функции двух координатных переменных ξ, η в неподвижной в пространстве системе координат и времени t

$$\zeta_w(\xi_w, \eta_w, t)$$

Положение судна на нерегулярном волнении описывается наиболее полно нелинейной теорией качки [1,6,7], представляющей пространственное положение судна как твердого тела с шестью степенями свободы и времени

$$f_s(\xi, \eta, \zeta, \alpha, \chi, \varphi, t),$$

где ξ, η, ζ – координаты судна в неподвижной в пространстве системе координат;

α, χ, φ – углы рыскания, бортовой и килевой качки судна.

Плечо статической диаграммы остойчивости в наиболее общем виде будет определяться взаимным положением судна и волны, что в настоящей работе рассмотрено в виде квазистатической задачи

$$l = F(\zeta_w, f_s, t)$$

Математическая модель определения плеча статической остойчивости

По определению, плечо статической остойчивости судна или плечо восстанавливающей пары – это перпендикуляр, опущенный из центра тяжести судна на линию действия силы поддержания, положение которой описывается углом наклона судна и действующими координатами центра величины. При традиционном подходе их определение осуществляется через метацентрический радиус, зависящий от момента инерции действующей ватерлинии I_x и объемного водоизмещения V . При нахождении судна на волнении определить момент инерции крайне затруднительно в связи со сложностью аппроксимации ватерлинии двоякой кривизны, вызванной профилем волны, с достаточной степенью точности. Наличие, в дополнение к бортовой, еще вертикальной и килевой качек, приводит к отклонению объёмного водоизмещения от равновесного значения на тихой воде, однако в связи с

конечной скоростью качек можно пренебречь невыполнением уравнения плавучести в бесконечно коротком интервале времени.

Отклонение профиля волны от уровня «тихой» воды в произвольный момент времени приводит при наклонении к дополнительному смещению центра величины как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Такая корректировка может вызывать увеличение плеча статической остойчивости, но, что более опасно, и его уменьшение (рисунок 1)

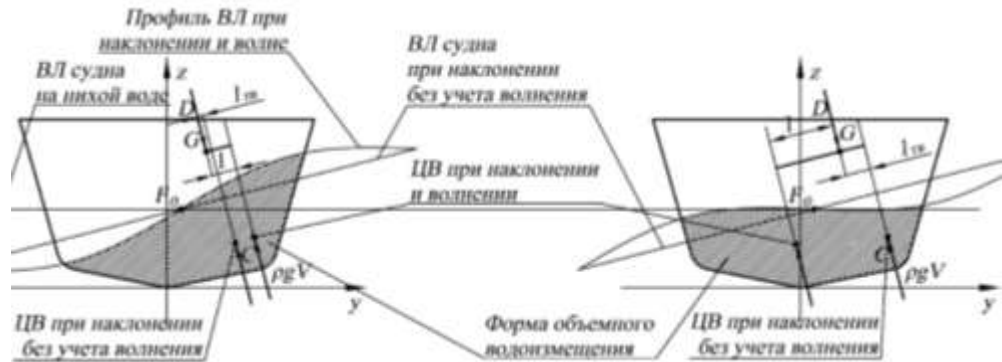


Рис. 1. Наклонение судна на волне

Определение фактического объемного водоизмещения, координат центра величины, площади и координат центра тяжести ватерлинии в данном случае возможно с применением твердотельного моделирования корпуса судна и участка водной среды, что нами было реализовано в системе AutoCAD, используя дополнительные его возможности по алгоритмизации в среде AutoLisp [8,9] (рисунок 2).

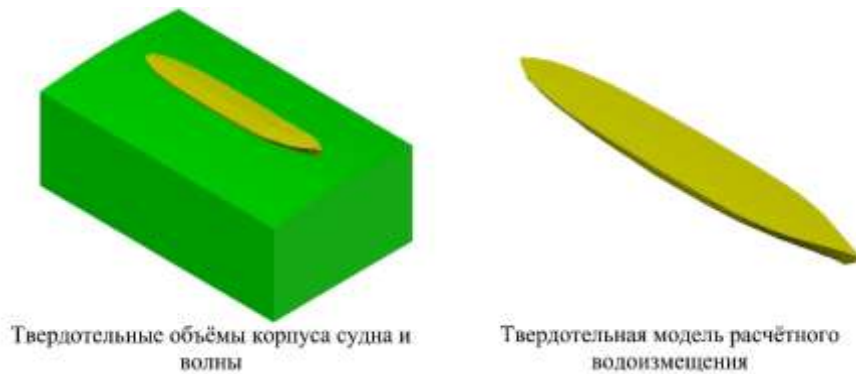


Рис. 2. Моделирование объемного водоизмещения

Результаты определения плеча статической остойчивости без учета формы и движения волны были сопоставлены с аналогичными величинами по программе SeaHydro, имеющей признание Российского Речного Регистра (рисунок 3). Расхождение в сопоставительных расчётах наблюдается на нисходящей ветви кривой ДСО, которое в относительных значениях составляет не более 5%, а до угла, соответствующего максимуму диаграммы, кривые визуально совпадают и имеют погрешность менее 0,2%. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования предложенного метода твердотельного моделирования для построения ДСО, в том числе и с учётом волнения.

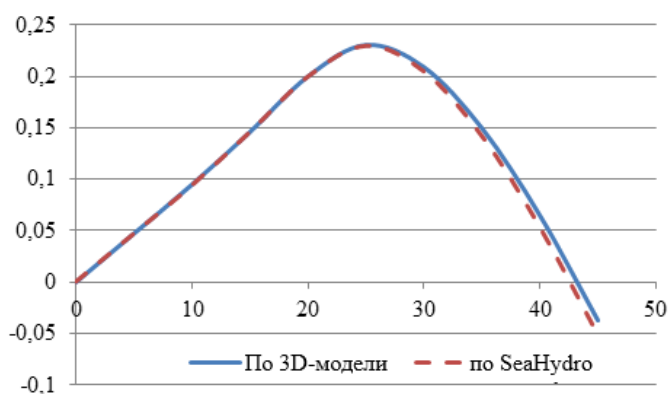


Рис. 3. Сопоставление результатов расчёта ДСО

Плечо статической остойчивости при наклонении судна, расположенного лагом к неподвижной волне, приведено на рисунке 4. Характеристики статической волны выбраны соответствующими разряду «О»: высота – 2,0 м, длина 50м [10]. Максимальная погрешность отмечается на вершине волны и при угле, равном максимуму ДСО, составляет порядка 10%. Положение судна на подошве волны, практически не ухудшает плечи остойчивости.

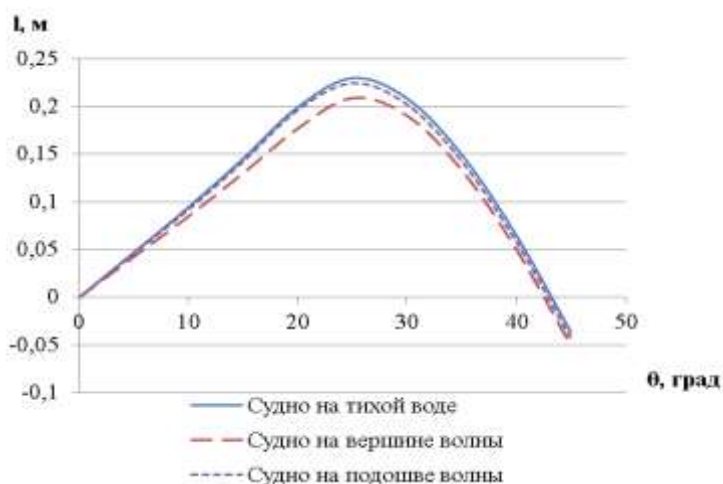


Рис. 4. Сопоставление результатов расчёта ДСО

Рассматривая определение плеча статической остойчивости как частный случай имитационной задачи, при начальных условиях в системе координат жёстко связанной с судном (α_0 – курсовой угол судна по отношению к волне, y_{w0} – положение вершины волны в начальный момент времени, v_w – скорость перемещения волны, θ_0 – начальный угол крена судна, ω – угловая скорость качки судна), наклонение на некоторый угол θ приводит к смещению в горизонтальном направлении профиля волны на величину

$$\Delta y_w = \frac{\theta}{\omega} \times v_w,$$

что, в свою очередь, дополнительно смещает точку действия силы поддержания и изменяет плечо восстанавливающей пары (рисунок 5).



Рис. 5. Смещение профиля волны при наклонении судна

Действующие нормы Российского Речного Регистра регламентируют проверку остойчивости судов класса «О» и выше при плавании на волнении и имеют в своем составе методику определения характеристик качки (амплитуды (начального положение) и периода) [11]. Скорость движения волны, как её высота и длина, являются случайными процессами, однако рассматривая фиксированный начальный и конечный момент времени, они могут быть приняты постоянными [1]. Построив для рассматриваемых условий ДСО (рисунок 6) можно определить, что погрешность максимального плеча составляет порядка 12% и возникает у судна, наклоняющегося против движения волны.

Правила [11, 12] также предъявляют требования к площади под положительной частью диаграммы до различных углов, а она, в свою очередь, характеризует остойчивость судна на динамических наклонениях. Приращение площадей для наихудшей из рассматриваемых диаграмм, составляет так же, как и для самого плеча около 12%.



Рис. 6. ДСО на перемещающейся волне

Заключение

Отклонение значений плеч статической остойчивости при построении ДСО в настоящий момент не учитывается Правилами Регистра, что может привести к аварийным ситуациям. Рассмотренные частные случаи наклона, на наш взгляд, наиболее опасные с точки зрения взаимного положения судна и волны, дают наглядное представление об уровне снижения запаса остойчивости.

Задачу построения диаграмм, учитывающую худшее взаимное положение судна и волны, можно сформулировать как оптимизационную, решение которой позволит иметь ДСО, соответствующую худшему случаю эксплуатации,

$$l(X, Z, \theta) \rightarrow \min$$

где X – известные элементы и характеристики системы судно-волна;

Z – оптимизируемые параметры, такие, как длина и высота волны, начальное положение рассматриваемой системы;

θ – угол крена.

Для речного судна, обладающего, как правило, избыточной остойчивостью, полученное снижение плеча при принятых характеристиках волнения не является критичным, однако при совместном действии более опасных характеристик волнения и ряда факторов, таких, как отклонения в аппликате центра тяжести и центра парусности, неучёт влияния жидких грузов в «малых» цистернах, ошибки судоводителя и других, может существенно повлиять на безопасность судна.

Литература

1. Справочник по теории корабля: в трех томах. Том 2. Статика корабля. Качка судов / под ред. Я.И. Войткунского. – Л. Судостроение, 1985. – 440с.
2. Благовещенский С.Н., Холодильник А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Изд. 2-е, перераб. и доп. Том 1. Статика корабля. – Л. Судостроение, 1976. – 336 с.
3. Longuet-Higgins Michael S. The statistical analysis of a random, moving surface // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1957 T. 249, № 966 C. 321–387.
4. Динамика океана. Учебник / под ред. Ю.П. Доронина. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 304 с.
5. Ремез Ю.В. Теория качки. Л.: Судостроение, 1980. – 328 с.
6. Pawlowski, J.. A nonlinear theory of ship motion in waves. 2010
7. Nonlinear Ship Motions and Wave-Induced Loads by a Rankine Method / D.Kring, Y.-F.Huang, P.Sclavounos, T.Vada, A.Braathen // Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, 1997 – p. 45-62
8. Полищук Н.Н., Лоскутов П.В., AutoLisp и VisualLisp в среде AutoCad. – СПб. БХВ Петербург, 2006 – 906с.
9. Кочнев Ю.А. Расширение возможностей AutoCad для применения на начальных этапах проектирования // Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки – 2012». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Том 1.– Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ» – 2012 – с. 291-293
10. Учебный справочник по прочности судов внутреннего плавания / Давыдов В.В., Маттес Н.В., Сиверцев И.Н. изд. 2-ое, перераб. и доп. М.: Речной транспорт, 1958 – 755 с.
11. ФАУ «Российский Речной Регистр». Правила классификации и постройки судов. Москва, 2019 г.
12. ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Правила классификации и постройки морских судов. Санкт-Петербург, 2020 г.

References

1. Spravochnik po teorii korablya: v trekh tomah. Tom 2. Statika korablya. Kachka sudov. pod red. YA.I. Vojtkunskogo. – L. Sudostroenie, 1985. – 440s.
2. Blagoveshchenskij S.N., Holodilin A.N. Spravochnik po statike i dinamike korablya. V dvuh tomah. Izd. 2-e, pererab. i dop. Tom 1. Statika korablya. – L. Sudostroenie, 1976. – 336 s.
3. Longuet-Higgins Michael S. The statistical analysis of a random, moving surface. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1957 T. 249, № 966 S. 321–387.
4. Dinamika okeana. Uchebnik. pod red. YU.P. Doronina. – L.: Gidrometeoizdat, 1980. – 304 s.
5. Remez YU.V. Teoriya kachki. L.: Sudostroenie, 1980. – 328 s.
6. Pawlowski, J.. A nonlinear theory of ship motion in waves. 2010
7. Nonlinear Ship Motions and Wave-Induced Loads by a Rankine Method / D.Kring, Y.-F.Huang, P.Sclavounos, T.Vada, A.Braathen. Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, 1997 – p. 45-62
8. Polishchuk N.N., Loskutov P.V., AutoLisp i VisualLisp v srede AutoCad. – SPb. BHV Peterburg, 2006 – 906s.
9. Kochnev YU.A. Rasshirenie vozmozhnostej AutoCad dlya primeneniya na nachal'nyh etapah proektirovaniya. Trudy 14-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki – 2012». Materialy nauchno-metodicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, specialistov i studentov «Problemy ispol'zovaniya i innovacionnogo razvitiya vnutrennih vodnyh putej v bassejnah velikih rek». Tom 1.– N. Novgorod: Izd-vo FBOU VPO «VGAVT» – 2012 – s. 291-293
10. Davydov V.V., Mattes N.V., Sivercev I.N. Uchebnyj spravochnik po prochnosti sudov vnutrennego plavaniya. izd. 2-oe, pererab. i dop. M.: Rechnoj transport, 1958 – 755 s.
11. FAU «Rossijskij Rechnoj Registr». Pravila klassifikacii i postrojki sudov. Moskva, 2019 g.
12. FAU «Rossijskij morskoy registr sudohodstva». Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Sankt-Peterburg, 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Александрович Кочнев, к.т.н., доцент, доцент кафедры проектирования и технологии постройки судов Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf_pts@vsuwt.ru

Yuri A. Kochnev, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of ship design and construction technology, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education Volga State University of Water Transport (VSUWT), 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603951

Статья поступила в редакцию 02.12.2020; опубликована онлайн 23.03.2021.
Received 02.12.2020; published online 23.03.2021.