

УДК 629.125.1/3

**ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ МОМЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ
ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО БРУСА СУДНА
С КИЛЕВАТЫМ КОРПУСОМ**

А.О. Канифольский

к.т.н.,

доцент кафедры «Теория и проектирование корабля им. проф. Воробьева Ю.Л.»

Одесский национальный морской университет

***Аннотация.** В статье определено значение относительного момента сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса малого судна переходного режима движения. Предложенные рекомендации базируются на совместном графическом решении уравнения общей прочности, с учетом ускорений на волнении и уравнения для относительного момента сопротивления, учитывающего геометрию корпуса. Проведен сравнительный анализ полученных данных с данными о прочности и весе балки двутаврового профиля, аналогичной с судном длины.*

***Ключевые слова:** момент сопротивления поперечного сечения; эквивалентный брус; малотоннажное судно; переходный режим движения.*

УДК 629.125.1/3

**ВІДНОСНИЙ МОМЕНТ ОПОРУ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ
ЕКВІВАЛЕНТНОГО БРУСА МАЛОГО СУДНА З КІЛЕВАТИМ КОРПУСОМ**

О.О. Канифольський

к.т.н., доцент

кафедри «Теорія та проектування корабля ім. проф. Воробйова Ю.Л.»

Одеський національний морський університет

***Анотація.** У статті визначено значення відносного моменту опору поперечного перерізу еквівалентного бруса малого судна перехідного режиму руху. Запропоновані рекомендації базуються на спільному графічному рішенні рівняння загальної міцності, з урахуванням прискорень на хвилюванні і рівняння для відносного моменту опору, що враховує геометрію корпусу. Проведено порівняльний аналіз отриманих даних з даними про міцність і вагу балки двотаврового профілю, аналогічної з судном довжини.*

***Ключові слова:** момент опору поперечного перерізу; еквівалентний брус; малотонажне судно; перехідний режим руху.*

© Канифольський А.О., 2018

UDC 629.125.1/3

THE RELATIVE SECTION MODULUS OF AN EQUIVALENT
GIRDER FOR A DEADRISE HULL VESSEL

O.O. Kanifolskyi

PhD, Docent

of the Department «Ship Theory and Design named after prof. Vorobyev Yu.L.»

Odessa National Maritime University

Abstract. *The value of the relative section modulus of an equivalent girder for a small vessel of transitional mode is defined in this article. The proposed recommendations are based on a joint graphical solution for the equation of general strength, taking into account wave acceleration and the equation for the relative section modulus, taking into account the geometry of the hull. Comparative analysis of the obtained data with the data about strength and weight of the H-girder with length similar to the ship was conducted.*

Keywords: *the relative section modulus; an equivalent girder; small vessel; transitional mode.*

Постановка проблеми и анализ публикаций. При проведении различных исследований в области малых судов переходного режима движения, возникает дефицит информации об относительном моменте сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса судна $\frac{W}{\Delta}$, относительно водоизмещения Δ . Такая ситуация может возникнуть при определении длины, характеризующей малость судна, из уравнения общей прочности $\sigma_{don} W_{min} \geq \frac{\Delta_{min} L_{min}^n}{k}$ [1]. Также, эти сведения могут быть полезны при решении задачи о максимальном значении относительной длины малотоннажного судна переходного режима движения, с применением уравнения $\sigma_{don} \frac{kgW}{0,3v^2 \Delta} \geq \frac{L}{\sqrt[3]{V}}$, в котором учтены перегрузки на волнении [2].

В литературе по проектированию судов и литературе о конструкции корпуса судна приводятся подобные относительному моменту сопротивления величины, характеризующие различные типы балок. Например, в [3] предлагается показатель конструктивного качества профилей балок $\frac{W}{F}$, относительно площади их поперечного сечения. Также в этом первоисточнике отмечено, что масса балок, при их одинаковой прочности

будет находиться примерно в таком же соотношении, как и $\frac{W}{F}$. В книге

[4] представлена зависимость веса одного погонного метра балки от момента ее сопротивления. Из графика видно, что для каждого типа балок (тавра, симметричного и несимметричного, полосообразных) характерна своя, присущая только этому типу зависимость.

Для проведения приведенных выше исследований, возможно применение знаний о минимальном моменте сопротивления поперечного сечения судна, приведенные различными авторами, также содержащиеся в Правилах. Для примера, минимальный момент сопротивления эквивалентного бруса W_{min} корпуса малого судна, для прямоугольной формы

(с нулевой килеватостью), определен в работе [5] $W = D(B + \frac{D}{3})t$.

Цель исследования. Определить значение относительного момента сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса судна $\frac{W}{\Delta}$, характерного для малых судов переходного режима движения.

Изложение основного материала исследования. При движении судна с относительными скоростями переходного режима от взаимодействия днища судна и волны возрастают ударные нагрузки. Соответственно увеличиваются и ускорения, что неблагоприятно сказывается на самочувствии пассажиров и экипажа. От воздействия сильных ударов корпусные конструкции и оборудование может быть повреждено. Предел ускорений, которые принято считать приемлемыми с точки зрения физиологии, ограничивается значениями (0,1-0,2)g. Реально же ускорения на борту скоростного судна достигают гораздо больших значений. В современных требованиях классификационных обществ существенно поднята планка для значений допустимых ускорений на борту скоростных судов. Для уменьшения ударных нагрузок и улучшения обитаемости судов применяют различные способы. Один из них – это увеличение угла килеватости β шпангоутов. В зависимости от угла килеватости различают следующие типы обводов: плоскодонные, малокилеватые, умеренно-килеватые, «глубокое V», или «deep V» ($\beta > 20^\circ$). Суда с последним типом обводов в зарубежной прессе часто называют «monohull deep V». В зависимости от изменения угла килеватости от носа в корму существует следующая классификация: «закрученное днище» имеет заостренные ватерлинии и узкие килеватые шпангоуты в носу с уменьшением килеватости до плоского транца; «моногодрон» – постоянный угол килеватости от миделя до транца [6].

Примечательна работа [7] об изменении формы обводов судна при переходе от водоизмещающего режима к глиссированию. В работе выделено два направления. Первое из них – срезание кормы. Выработаны формы судов, у которых корма на некотором расстоянии от мидель-

шпангоута срезана в виде транца. Вначале переходного режима срезается только крайняя часть оконечности и за мидель-шпангоутом сохраняется значительный участок сужения корпуса. С ростом скорости отбрасываемый участок все увеличивается и достигает мидель-шпангоута. В итоге изменяется, и средняя часть корпуса и судно приобретает клинообразную форму с сечениями, непрерывно расширяющимися к корме. Другое направление изменения формы обводов судна при переходе от водоизмещающего режима к глиссированию – приближение формы днища к форме глиссирующей поверхности. Это связано со стремлением извлечь пользу из эффекта глиссирования, для чего днищу судна придается по возможности уширенная и плоская форма, у транца. На некотором этапе роста относительной скорости это приводит к отказу от плавного сопряжения днищевой и бортовой поверхности и к переходу острокорпусным формам.

Все вышесказанное говорит о широком применении килеватых корпусов в переходном режиме движения. Соответственно, в данной работе будет рассмотрена форма корпуса с килеватостью на миделе, рис. 1б.

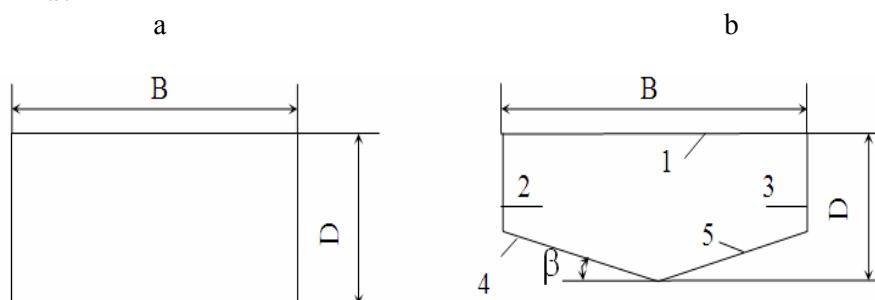
Записав элементы поперечного сечения судна в таблицу 1, можно получить формулу для момента сопротивления эквивалентного бруса килеватого корпуса, с углом $\beta = 25^\circ$

$$W_{min} = (0,33D^2 + 0,015B^2 + 0,82DB - 0,028 \frac{B^3}{D})t_{min}, \quad (1)$$

где D – высота борта судна;

B – ширина судна;

t_{min} – толщина обшивки.



*Рис. 1. Миделевые сечения корпуса
с нулевой килеватостью и килеватой формы*

При применении в расчетах $\beta = 0$, будет получена формула

$$W_{\beta=0} = (0,33D^2 + DB)t \quad (2)$$

аналогичная формуле, представленной в работе [5], и упомянутая выше в этой статье.

Таблица 1

Элементы поперечного сечения судна (рис. 1)

Номера элементов соответствуют рис. 1 б	Площадь элемента F	Расстояние от центра тяжести элемента до н.о. z
1	tB	$\frac{D}{2}$
2, 3	$(D - \frac{B}{2} \operatorname{tg} \beta) t$	$\frac{B}{2} \operatorname{tg} \beta$
4, 5	$\frac{Bt}{2 \cos \beta}$	$\frac{D}{2} - \frac{B}{4} \operatorname{tg} \beta$

В этой работе принято предположение о том, что положение нейтральной оси находится посередине высоты борта (рис. 1). Эта гипотеза основана на том, что килеватость днища сместит положение этой оси по направлению к палубе, а необходимость создать более прочную, по отношению к палубе, способную выдерживать нагрузки от ударов встречных волн, днищевую конструкцию требует смещения нейтральной оси по направлению к днищу.

Это предположение частично может быть проверено с помощью формулы $e = (0.34 + \frac{0.06L}{100})D$ [8]. В этом уравнении положение нейтральной оси e относительно основной плоскости зависит от высоты борта D и длины судна L .

Как известно момент сопротивления для палубного пояса $W_{нал} = \frac{I_y}{z_{нал}}$, а момент сопротивления для днищевоего пояса $W_{дн} = \frac{I_y}{z_{дн}}$. В этих формулах I_y – главный момент инерции площади поперечного сечения корпуса относительно его нейтральной оси, z – расстояние от нейтральной оси этого сечения до точки, в которой вычисляют напряжения. Нейтральная ось проходит через центр тяжести поперечного сечения. При равноудаленном положении нейтральной оси от крайних волокон палубного и днищевоего поясов моменты сопротивления палубы и днища будут равны.

В [9] отмечено, что минимальная толщина обшивки палубы должна составлять не менее чем 2,5 мм. Толщина обшивки днища должна быть

минимум $s_{\text{дн}} = 1,35L^{1/3} \geq 2,5$. Рассмотрим малое судно, которому присущи следующие параметры: длина $L = 24$ м, отношение длины судна к высоте борта $\frac{L}{D} = 15$ и относительная длина $\frac{L}{B} = 5,5$. Последний показатель выбран из соображений обеспечения ходкости в переходном режиме движения. Примем для расчета поперечное сечение корпуса без килеватости (рис. 1). После преобразований можно получить значение отношения ширины судна к высоте борта $\frac{B}{D} = 2,7$.

Толщина обшивки днища такого судна $s_{\text{дн}} = 3,9$ мм, что в 1,56 раза больше, чем минимальная толщина обшивки палубы. Соответственно и нейтральная ось сдвинется от середины высоты борта, в сторону днища.

Другой фактор, влияющий на положение нейтральной оси – килеватость корпуса. Учитывая, что центр тяжести половины днища лежит примерно на расстоянии равном $0,25B$ от диаметральной плоскости судна, получим смещение центра тяжести днищевой конструкции, в сторону палубы равным $0,25B \operatorname{tg}\beta$. После подстановки принятых соотношений главных размерений и среднего значения угла килеватости, можно определить смещение нейтральной оси от середины высоты борта, в сторону палубы.

Таким образом, для малых судов переходного режима движения, положение нейтральной оси можно принимать посередине высоты борта.

Информация о конструктивном качестве профилей балок $\frac{W}{F}$, приведенная в начале статьи, может быть спроецирована на расчеты относительного момента сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса судна $\frac{W}{\Delta}$. Учитывая, что при приблизительных расчетах прочности, форма профиля, который соответствует эквивалентному брусу корпуса судна – это двутавровый профиль и, учитывая прямую зависимость площади поперечного сечения от длины судна, можно предположить наличие такого значения относительного момента сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса судна $\frac{W}{\Delta}$, которое характерно для определенного типа судов. Эта величина сохраняет примерно одинаковое значение для однотипных судов, при заданной длине судна, одинаковом материале корпуса и скоростном режиме.

После преобразования формулы (2) к виду

$$\frac{W}{\Delta} = \frac{D(B + \frac{D}{3})t}{\gamma_b L B d} = \frac{k_D d (B + \frac{D}{3})t}{\gamma_b L B d} = \frac{k_D B t}{\gamma_b L B} + 0,33 \frac{k_D^2 d t}{\gamma_b L B} = \frac{k_D t + 0,07 k_D^2 t}{\gamma_b L} = \frac{k_D t (1 + 0,07 k_D)}{\gamma_b L} \quad (3)$$

с учетом того, что $k_D = \frac{D}{d}$ и $\frac{B}{d} = 4,7$ (соответствует минимуму сопротивления воды в переходном режиме [10]), можно получить новую формулу для расчета относительного момента сопротивления, учитывающую геометрию корпуса.

Значение относительного момента сопротивления $\frac{W}{\Delta}$ также можно найти из уравнения общей прочности, учитывающего перегрузки на волнении

$$\frac{W}{\Delta} = \frac{L}{k \sigma_{\text{дон}}} n, \quad (4)$$

где n – перегрузка на волнении;

L – длина судна;

$\sigma_{\text{дон}}$ – допускаемые напряжения;

k – коэффициент характерный для данного типа судов.

Для последующих расчетов выбраны данные о перегрузках на волнении приведенные в Правилах [11], в которых предлагается принимать коэффициент перегрузки не зависимо от относительной скорости: для пассажирских судов $n = 2$, для прогулочных катеров $n = 2,3$.

Значение коэффициента k принято равным 21. Более подробная информация по этой теме изложена в [2].

После совместного графического решения двух уравнений (3) и (4), рис. 2, можно определить значение $\frac{W}{\Delta} = 0,0003 \text{ м}^3/\text{т}$, для малых судов длиной менее чем 64 м, удовлетворяющее требованиям общей прочности и учитывающее геометрию корпуса. Это значение может быть принято для дальнейших исследований в области малых судов переходного режима движения. Интересно отметить, что некоторые Правила создаются специально для судов длиной менее, чем 65 м [11].

Полученное графическим методом решение уравнений не учитывает килеватости корпуса. В [12] найдено решение задачи по определению момента сопротивления поперечного сечения корпусов с различной формой. Уравнения, предложенные в упомянутой работе, достаточно сложно привести к упрощенному виду, с целью дальнейшего их решения для определения относительного момента сопротивления. Поэтому в дальнейшем, будет сделан анализ того на сколько момент сопротивления

корпусов с различной килеватостью отличается от момента сопротивления корпуса без килеватости.

На основании анализа коэффициента утилизации профиля η , в формуле $W = \frac{\eta}{2} D \Omega$ [12], рис. 3, можно предположить, что отличие моментов сопротивления килеватого и некилеватого профиля в среднем около 10 %. Таким образом, с учетом этого факта, значение относительного момента сопротивления поперечного сечения килеватого корпуса малого быстроходного судна принятое для дальнейших расчетов можно считать около $\frac{W}{\Delta} = 0,00027 \text{ м}^3/\text{т}$.

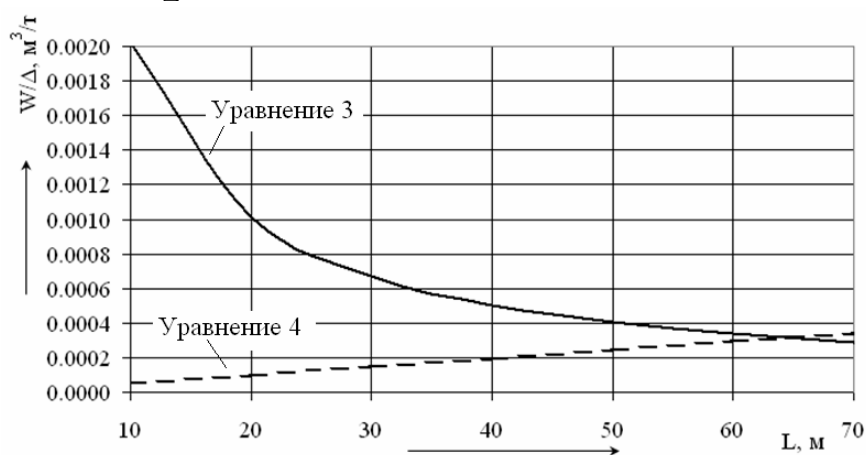


Рис. 2. Значение относительного момента сопротивления

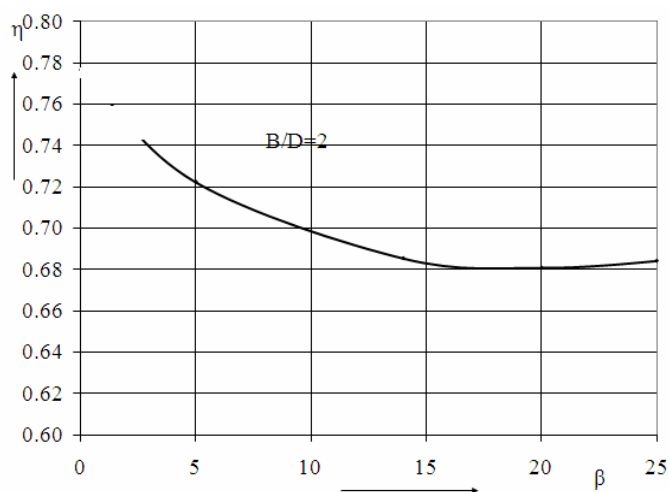


Рис. 3. Зависимость коэффициента утилизации профиля

от угла килеватости

Для проверки полученных значений $\frac{W}{\Delta}$, возможно проведение дополнительного расчета. Как было отмечено выше, форма профиля, который соответствует эквивалентному брусу корпуса судна, в приближенных расчетах – это двутавровый профиль. Используя данные [4] о зависимости веса одного погонного метра двутавровой балки от момента ее сопротивления и приняв длину балки 64 м, как показано на рисунке 2, можно получить значение $\frac{W}{\Delta}$ близкое к 0,0003 м³/т.

Выводы. В процессе проектирования судна или при проведении исследований, может возникнуть необходимость применения в расчетах обоснованного значения относительного момента сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса судна $\frac{W}{\Delta}$. Для решения этой задачи были применены методы строительной механики корабля и теории проектирования судов: уравнение общей прочности, с учетом возникающих перегрузок на волнении и способ предварительного расчета момента сопротивления поперечного сечения корпуса. Совместное решение упомянутых выше уравнений дает значение относительного момента сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса судна около 0,0003 м³/т, что характерно для малых судов переходного режима движения длиной 64 м и менее. С учетом килеватости корпуса, может быть принята величина 0,00027 м³/т. Корпуса меньшей, чем 64 м, длины будут обладать, при принятых в расчетах, соотношениях главных размерений избыточной прочностью. Данные проверочного расчета относительного момента сопротивления балки двутаврового профиля, одинаковой с судном длины, подтвердили полученные результаты. Решение задачи подобного типа, применительно к быстроходным однокорпусным судам, предложено впервые.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Канифольский А.О. Термин «быстроходное малое судно прибрежного плавания» // Вісник Одеського національного морського університету. – 2010. – № 29. – С. 17-25.
2. Канифольский А.О. Относительная длина малых судов прибрежного плавания переходного режима движения // Зб. наук. праць національного університету кораблебудування. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, 2010. – № 5. – С. 35-39.
3. Лесюков В.А. Теория и устройство судов внутреннего плавания. – М.: Транспорт, 1982. – 303 с.

4. Барабанов Н.В. Конструкция корпуса морских судов. – Л.: Судостроение, 1969. – 695 с.
5. Опыт проектирования и постройки, состояние и перспективы малотоннажного судостроения, тезисы докладов научно-технической конференции. – Вып. НТО им. акад. А.Н. Крылова. – № 79. – 1966. – 140 с.
6. Справочник по малотоннажному судостроению / Аливагабов М.М., Бирюкович Д.Л., Бирюкович Ю.Л., Бирюкович К.Л., Васильев В.И., Махаринский Л.Г., Мирошниченко Э.Ф., Мордвинов Б.Г., Немзер А.И., Павлов А.И., Разгоняева И.А., Сквирский Д.И., Скубко А.Р., Соколов В.П., Фишбеин Е.И., Хейфец Л.Л., Якиширов П.С. – Л.: Судостроение, 1988. – 573 с.
7. Павленко Г.Е. Избранные труды. – К.: Наукова думка, 1978. – 496 с.
8. Жинкин В.Б. Теория и устройство корабля. – СПб.: Судостроение, 2002. – 335 с.
9. Germanischer Lloyd. Rules for Classification and Construction. Chapter 5. High Speed Craft. – Hmburg: Gebrüder Braasch, 1996. – 272 S.
10. Канифольский А.О. Выбор значения отношения ширины судна к осадке для судов переходного режима движения // Вісник Одеського національного морського університету. – 2010. – № 31. – С. 51-55.
11. Bureau Veritas. Rules and Regulations for the Classification of Ships of less than 65 m in length. Part II-B. Hull Structure. Chapter 13. Light highspeed ships. – France: Imprimerie strasbourgeoise, 1990. – 16 p.
12. Канифольский А.О. Влияние угла килеватости днища на прочность и вес корпуса быстроходного судна // Вісник Одеського національного морського університету. – 2010. – № 30. – С. 47-52.

Стаття надійшла до редакції 19.10.2018

Рецензенти:

технічний директор Морського інженерного бюро **В.І. Тонюк**