УДК 629.5.015.12: 532.3
DOI: 10.37890/jwt.vi78.410

Остойчивость и углы крена корабля при его малых конечных наклонениях из разных исходных положений

А.Н. Ковалев [1]
Ф.Н. Ковалев [2,3]
[1] *Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия*
[2] *Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*
[3] *Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В статье, в рамках приемлемости метацентрической формулы, представлено решение задачи о сопоставлении остойчивости корабля, углов поворота и углов крена, которые он принимает, находясь в разных исходных положениях: в прямой посадке (с несмещенным с диаметральной плоскости центром тяжести (ЦТ)) и с начальным углом крена (со смещенным ЦТ). Это сопоставление ведется при воздействии на корабль следующих факторов: одинакового кренящего момента; поворота корабля на одинаковый угол крена; переноса параллельно палубе одинакового груза на одинаковое расстояние; наклонения корабля до одинакового положения. Цель указанного сопоставления – наглядно показать, что корабль со смещенным ЦТ проявляет лучшую остойчивость в указанных рамках, чем в прямой посадке. Показано, что перенос груза в любую сторону с борта на борт повернет корабль с исходным креном на меньший угол в направлении переноса, чем тот же самый корабль в исходной прямой посадке. Исключением будет такой же перенос, при котором изначально наклоненный корабль восстановит прямую посадку или примет крен, противоположный исходному. В первом случае поворот корабля (относительно исходного крена) произойдет ровно на такой же угол, что и при наклонении корабля с изначально прямой посадкой, а во втором случае – на больший угол. Материалы статьи могут быть полезны при анализе поведения корабля на малых углах крена.

Ключевые слова: остойчивость, метацентрическая формула, метацентрическая высота, перемещение груза на корабле.

Stability and roll angles of the ship at its small finite tilts from different starting positions

Aleksandr N. Kovalev [1]
Fedor N. Kovalev [2,3]
[1] *Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseyev, Nizhny Novgorod, Russia*
[2] *Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*
[3] *Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The article, within the framework of the metacentric formula acceptability, presents the problem solution of comparing the ship stability, the rotation angles and the roll angles that the ship takes in different starting positions: in a straight state (with the center of gravity (CG) unbiased from the diametrical plane) and with the initial roll angle (with the displaced CG). This comparison is carried out when the ship is affected by following factors: the same heeling moment; the rotation of the ship at the same roll angle; the transfer of the same cargo parallel to the deck at the same distance; the inclination of the ship to the same position. The purpose of this comparison is to clearly show that a ship with a displaced CG exhibits better stability within the specified framework than in a straight state. It is shown that the transfer of cargo in any direction from side to side will turn the ship with the initial angle by a smaller angle in the direction of transfer than the same ship in the initial straight state. The exception will be the same transfer, in which the initially cloned ship will restore a straight state or take a roll opposite to the original one. In the first case, the ship rotation (relative to the initial roll) will occur at exactly the same angle as when the ship is tilted with an initially straight state, and in the second case – by a larger angle. The given material can be useful in analyzing the behavior of a ship at small roll angles.

Keywords: stability, metacentric formula, metacentric height, cargo movement on the ship.

Введение

Настоящая статья является непосредственным продолжением работы [1], где обсуждалась начальная остойчивость корабля при перемещении груза по его палубе. В частности, вопреки существующему обычному мнению о неизменности начальной остойчивости корабля при таком переносе груза в [1] было показано, что на корабле с исходной прямой посадкой перенос груза параллельно палубе увеличивает его метацентрическую высоту, а значит, и начальную остойчивость корабля.

Это хорошо видно из рис. 1, где показано новое положение корабля после поперечного перемещения груза весом p из точки A с ординатой y_A в точку B с ординатой y_B.

На этом рисунке обозначено: θ – угол крена корабля; $\vec{D}$ и $\vec{\gamma}V$ – его весовое водоизмещение вместе с переносимым грузом и сила Архимеда; ВЛ, G, C, m – положение ватерлинии, центра тяжести корабля, центра величины и поперечного метацентра. Индексы 1 и 2 соответствуют начальному и конечному положению корабля.

В новом равновесии поперечная метацентрическая высота h_2 будет больше прежней h_1:

$$h_2 = \frac{h_1}{\cos\theta}, \tag{1}$$

где угол θ определяется из равенства кренящего $M_{\text{кр}}$ и восстанавливающего $M_{\text{вост}}$ моментов:

$$M_{\text{кр}} = M_{\text{вост}}. \tag{2}$$

И поскольку

$$M_{\text{кр}} = pl_y\cos\theta, \tag{3}$$

$$M_{\text{вост}} = Dh_1\sin\theta, \tag{4}$$

то

$$\theta = \operatorname{arctg}\frac{p(y_B - y_A)}{Dh_1} = \operatorname{arctg}\frac{pl_y}{Dh_1}, \tag{5}$$

$l_y = y_B - y_A$ – плечо переноса груза.

Важно указать, что такой подход к начальной остойчивости предполагает его надлежащее соотношение с геометрией конкретного корабля [1]. А именно, подход можно полагать целесообразным, если для данного корабля метацентрическая формула (4) будет приемлема и для конечных углов крена, пусть, хотя бы, и небольших. Вследствие этого начальную остойчивость уместнее здесь даже называть остойчивостью на малых конечных наклонениях, что и отражено в названии статьи и используется по ходу её изложения.

Имея это в виду, в [1] также было обосновано, что введение в оборот высоты h_2 позволяет порой глубже и легче проанализировать поведение корабля при малых углах его наклонения, в то время как в теории начальной остойчивости различие между высотами h_2 и h_1 обычно не делают – т.е. полагая для малых θ в (1) $\cos\theta \approx 1$, принимают, что $h_2 \approx h_1$.

Кроме того, в [1] было указано, что увеличение высоты h_2 по сравнению с h_1 неразрывно связано с последующим изменением остойчивости корабля на больших углах крена. И как раз это обстоятельство нуждается, на наш взгляд, в соответствующем более полном освещении, с чем и связан материал настоящей статьи, а также нашей последующей статьи по данной теме. Без такого освещения теория начальной остойчивости в существующем виде может вызвать некоторые недоразумения у изучающих её лиц.

Так, в учебнике [2, с. 199] при обобщении задачи о перемещении груза на корабле на произвольные углы крена указано: «*После горизонтально-поперечного переноса груза с левого борта на правый* (*из точки А в точку В*) … *её* (т.е. диаграммы статической остойчивости – наше примечание) *элементы при этом ухудшаются*: *уменьшаются угол заката*, *максимальный восстанавливающий момент и возникает угол крена*. *Элементы диаграммы при крене на противоположный борт соответственно улучшаются*.»

Аналогичное положение прописано, например, и в [3, с. 165]: «… после переноса груза на правый борт ($y_2 > y_1$) … диаграмма остойчивости становится несимметричной: ухудшаются характеристики ее ветви для крена на правый борт и улучшаются для крена на левый борт.»

На наш взгляд, процитированные положения (и подобные им в других учебниках и справочниках по теории корабля) вступают в противоречие с нашими доводами из [1]:

- как выяснилось в [1] и показано здесь чуть выше, если у корабля с прямой посадкой немного сместить центр тяжести (ЦТ) параллельно палубе, то его метацентрическая высота увеличится, и должна быть преемственность в ее изменении при произвольных углах крена. В свою очередь увеличение метацентрической высоты привычно и правильно воспринимается как улучшение остойчивости корабля.
- Однако, если принять во внимание процитированные положения из [2,3], то может показаться, что не все так однозначно. А именно, получается, что увеличение метацентрической высоты приводит к тому, что при дальнейшем увеличении крена корабля элементы диаграммы статической остойчивости, а значит, и сама остойчивость корабля ухудшаются (по сравнению с остойчивостью корабля в прямой посадке). При крене же на противоположный борт остойчивость корабля улучшается.

Можно и вовсе не привязываться к *увеличению* метацентрической высоты (при смещении ЦТ корабля параллельно его палубе), а говорить лишь о том, что корабль при любом крене имеет только одну поперечную метацентрическую высоту, но никак не две и не более. Но следуя процитированным положениям из [2,3] можно непринужденно прийти к выводу о том, что эта единственная метацентрическая высота двойственно отражается на остойчивости корабля в зависимости от направления его крена. Может ли такое быть? Может ли метацентрическая высота иметь двойственный характер – и ухудшать и улучшать остойчивость корабля в связи с его креном на правый или левый борт?

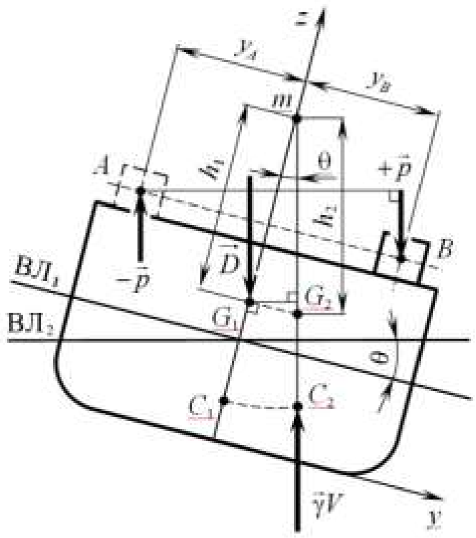

Рис. 1. Перемещение груза по палубе с левого борта на правый

Настоящая статья имеет целью подготовить информацию для исчерпывающего ответа на этот вопрос, который окончательно будет раскрыт в нашей последующей статье по данной теме.Самостоятельный же интерес в настоящей статье – что и отражено в её названии – имеет решение задачи о сопоставлении остойчивости корабля, углов поворота и углов крена, которые он принимает, находясь в разных исходных положениях: в прямой посадке (с несмещенным с диаметральной плоскости центром тяжести) и с начальным углом крена (со смещенным центром тяжести). Такое сопоставление ведется в рамках приемлемости метацентрической формулы и при воздействии на корабль в указанных его исходных положениях следующих факторов:

одинакового кренящего момента;

поворота корабля на одинаковый угол крена;

переноса параллельно палубе одинакового груза на одинаковое расстояние;

наклонения корабля до одинакового положения.

Цель указанного сопоставления – наглядно показать, что в указанных рамках корабль со смещенным центром тяжести проявляет лучшую остойчивость, чем в прямой посадке.

Данная задача рассматривается в канве обозначенного вопроса о двойственном характере метацентрической высоты и одновременно служит примером целесообразности использования в теории остойчивости высоты h_2 наряду с высотой h_1 для малых конечных наклонений корабля.

Так же, как и в [1], изложение материала настоящей статьи было удобнее и нагляднее расположить в виде последовательных, пронумерованных пунктов.

Остойчивость, углы крена и углы поворота корабля при его малых наклонениях из разных исходных положений

1. Сначала уделим внимание поставленному выше вопросу – может ли метацентрическая высота, увеличенная за счет смещения параллельно палубе ЦТ корабля, проявлять двойственный характер: уменьшать остойчивость корабля при его крене в сторону смещения его ЦТ и увеличивать в противоположную сторону?

Этот вопрос, по сути, опирается на другой – действительно ли метацентрическая высота однозначно связана с остойчивостью корабля? Чтобы ответить на последний вопрос, нужно иметь показатель (измеритель, меру) остойчивости и установить его связь с метацентрической высотой. Такую связь в теории начальной остойчивости и заодно однозначный ответ на поставленный вопрос дает метацентрическая формула (4), для которой, напомним, что абсолютной мерой остойчивости (статической) конкретного корабля является его восстанавливающий момент. Чем большее значение он может принимать, тем больше остойчивость данного корабля, т.е. тем больше корабль способен сопротивляться его наклонениям. При этом восстанавливающий момент является основной мерой остойчивости для любых углов крена в отличие от элементов диаграммы статической остойчивости, являющимися частными и производными от этой основной меры.

Что касается метацентрической высоты

$$h = \frac{M_{\text{вост}}}{D\sin\theta}, \tag{6}$$

то она является относительной мерой начальной остойчивости и позволяет сравнивать остойчивости различных кораблей,

А) воздействуя на них одинаковым, постоянным кренящим моментом. В этом случае, с учетом (2), по величине h можно судить, какой из кораблей повернется на меньший угол. Действительно, при фиксированном отношении $M_{\text{вост}}/D$ бо́льшая высота h будет соответствовать меньшему углу θ и, значит, большей остойчивости корабля.

Б) наклоняя их на одинаковый угол θ. В этом случае по величине h можно судить, у какого из кораблей будет больше относительный восстанавливающий момент $M_{\text{вост}}/D$ и, соответственно, лучшая остойчивость.

В обоих случаях кренящий момент не должен зависеть от угла θ. Такой кренящий момент называется постоянным. А из (6) для конкретного корабля непосредственно следует однозначная связь остойчивости (т.е. её основной меры) и метацентрической высоты

$$h \sim M_{\text{вост}}$$

при любом малом θ и с учетом того, что $M_{\text{вост}}$ и $\sin\theta$ всегда имеют одинаковый знак.

2. Проиллюстрируем эту связь, сопоставляя остойчивость двух абсолютно одинаковых кораблей (или, что то же, одного конкретного корабля в разных положениях), первый из которых имеет несмещенный ЦТ и прямую посадку, а второй – смещенный с диаметральной плоскости (ДП) центр тяжести и крен (рис. 2). При этом смещение ЦТ второго корабля вызвано перемещением по его палубе груза весом p на расстояние l_y. Оба корабля находятся в равновесии и изначально на них не действуют никакие кренящие моменты.

Новую посадку кораблей, характеризуемую возникшим углом крена, будем определять относительно вертикальной оси (см. по этому поводу пункт **4** в [1]).

В исходном положении ось z корабельной системы координат каждого корабля проходит по единой линии действия силы тяжести и силы Архимеда и совпадает с вертикальной осью, нормальной к свободной поверхности воды. Наклонение корабля вызывает поворот связанной с ним оси z на угол крена, который традиционно считается положительным при крене корабля на правый борт [4, с. 8].

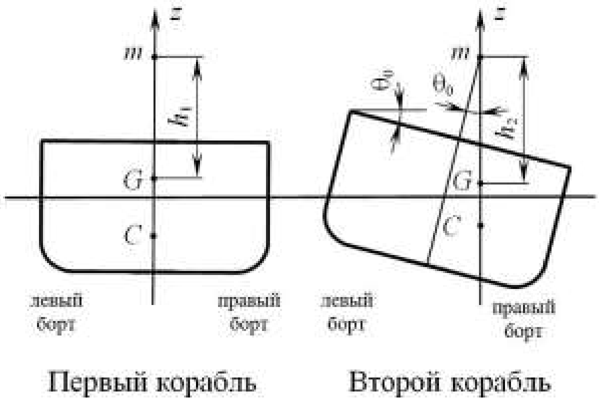

Рис. 2. Исходное положение кораблей

Соответственно восстанавливающий момент при таком крене будет тоже положительным (действует против хода часовой стрелки), а противоположный ему кренящий момент – отрицательным. Рассмотрим поведение кораблей под влиянием факторов А и Б из пункта **1**.

А) *Одинаковый кренящий момент* $M_{кр}$. Пусть на оба корабля действует одинаковый постоянный момент, кренящий их на левый борт. Тогда с учетом (2) первый корабль повернется в направлении этого момента на отрицательный угол $-\theta_1$, определяемый по модулю из выражения

$$\sin\theta_1 = \frac{M_{кр}}{Dh_1} . \tag{7}$$

Для второго корабля аналогично получается

$$\sin\theta_2 = \frac{M_{кр}}{Dh_2} . \tag{8}$$

Поскольку $h_2 > h_1$, то $\sin\theta_2 < \sin\theta_1$ и, соответственно, $\theta_2 < \theta_1$ (при изменении аргумента синуса от нуля до $\pi/2$). Более того, поскольку согласно (2) восстанавливающие моменты кораблей будут одинаковыми, то таковыми будут и плечи этих моментов

$$h_1 \sin\theta_1 = h_2 \sin\theta_2 , \quad \text{откуда} \quad \frac{\theta_2}{\theta_1} \approx \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{h_1}{h_2} .$$

Таким образом, второй корабль сильнее сопротивляется одинаковому кренящему моменту и повернется на меньший угол. Этот результат вполне укладывается в обыденные представления о поведении корабля.

Если кренящий момент будет теперь действовать на правый борт (при сохранении приемлемости формулы (4) для второго корабля), то из тех же формул (7), (8) получим, что и в этом случае второй корабль повернется на меньший угол благодаря большей метацентрической высоте. Этот результат может показаться непривычным, отчасти, может быть, из-за мыслей, навеянных из книг [2, с. 199; 3, с. 165] положением об ухудшении остойчивости наклоненного корабля при увеличении его крена (см. цитаты во «Введении»).

Б) *Крен на одинаковый угол* θ. Пусть кренящий момент на левый борт заставляет корабли повернуться на одинаковый угол θ. Тогда для удержания первого корабля в таком положении потребуется иметь кренящий момент величиной

$$M_{\text{кр }1} = Dh_1 \sin\theta .$$

А для удержания в новом положении второго корабля потребуется момент

$$M_{\text{кр }2} = Dh_2 \sin\theta .$$

Поскольку $h_2 > h_1$, то $M_{\text{кр }2} > M_{\text{кр }1}$. Причем, так как величина $\sin\theta$ одинакова для обоих кораблей, то

$$\frac{M_{\text{кр }2}}{M_{\text{кр }1}} = \frac{h_2}{h_1} .$$

Таким образом, для поворота второго корабля на тот же угол крена, что и первого, потребуется иметь больший кренящий момент. И с учетом (2) у второго корабля восстанавливающий момент и плечо этого момента будут больше, чем у первого:

$$|Dh_2 \sin\theta| > |Dh_1 \sin\theta| \text{ и } |h_2 \sin\theta| > |h_1 \sin\theta|.$$

Этот результат также чувствуется интуитивно и соответствует указанному выше положению из книг [2, с. 199; 3, с. 165] о лучшей остойчивости второго корабля при его крене на левый борт.

Если же кренящий момент будет наклонять корабли на правый борт, поворачивая их на один и тот же угол θ, то хотя это и может показаться непривычным, но остойчивость второго корабля будет по-прежнему лучше, чем у первого:

$$h_2 \sin\theta > h_1 \sin\theta ,$$

благодаря тому, что $h_2 > h_1$. В этом случае, как и прежде, полагаем, что полученный вторым кораблем дополнительный крен не выводит за рамки метацентрической формулы.

Итак, при наклонении кораблей и на правый, и на левый борт второй корабль, благодаря большей метацентрической высоте, проявляет лучшую остойчивость по сравнению с первым. Этот результат однозначен, т.е. не зависит от направления крена.

Но этот вывод как будто бы противоречит цитатам из [2, с. 199; 3, с. 165], приведенным во «Введении», согласно которым второй корабль имеет ухудшенные элементы диаграммы статической остойчивости при крене на правый борт и, поэтому, домысливаем мы, должен проявлять худшую остойчивость в этом направлении. И, наоборот, при крене на левый борт элементы диаграммы статической остойчивости второго корабля, а значит, и его остойчивость будут лучше, чем у первого.

Будем последовательны в наших доводах и источник противоречия укажем в приведенных цитатах из [2, с. 199; 3, с. 165]. Но отложим это указание до последующей нашей статьи по данной теме. А здесь продолжим исследовать поведение кораблей из пункта **2** и рассмотрим более интересную ситуацию в продолжение статьи [1].

3. Пусть теперь для крена обоих кораблей (см. рис. 2) используется и не одинаковый кренящий момент (литера А в пунктах **1**, **2**), и не одинаковый угол крена (литера Б в пунктах **1**, **2**), а одинаковый груз весом p, переносимый по палубе с борта на борт на одинаковое расстояние l_y. То есть в данном случае при крене кораблей одинаковой будет величина pl_y – произведение веса груза на плечо его переноса. Обозначим этот фактор литерой В:

В) *Воздействие одинаковой величиной* pl_y. Поскольку вес груза направлен всегда вертикально, а положение плеча переноса определяется наклоном палубы – плечо всегда параллельно палубе, то кренящий момент от такого переноса груза не будет постоянным (как было в литере А из пунктов **1**, **2**). Он зависит от угла крена корабля через функцию косинус:

$$M_{\text{кр}} = pl_y \cos(\theta_0 + \theta), \tag{9}$$

где θ_0 – начальный угол наклона палубы (но не крена корабля (!), т.е. корабельной системы координат). У первого корабля $\theta_0 = 0$.

θ – угол крена корабля, возникающий от переноса груза.

Условие равновесия (2) для каждого корабля теперь запишется в виде

$$pl_y \cos(\theta_0 + \theta) = Dh \sin\theta. \tag{10}$$

Как уже видно из исходной постановки рассматриваемой ситуации, в отличие от литер А и Б из пунктов **1**, **2**, здесь не удастся за счет переноса одинакового груза весом p на одинаковое плечо l_y провести сравнение остойчивости кораблей через величину h

а) воздействуя на них одинаковым кренящим моментом. Действительно, несмотря на одинаковую величину pl_y, аргумент косинуса в (9) для кораблей с разным значением θ_0 будет всегда разный (когда наклонение кораблей осуществляется в одинаковую сторону). То есть к кораблям невозможно приложить одинаковый кренящий момент при переносе одинакового груза весом p на одинаковое плечо l_y.

б) наклоняя их на один и тот же угол θ (в одинаковом направлении). Действительно, согласно (10) для первого корабля следует записать

$$pl_y \cos\theta = Dh_1 \sin\theta, \tag{11}$$

откуда

$$\frac{pl_y}{D} = h_1 \frac{\sin\theta}{\cos\theta}. \tag{12}$$

Для второго корабля согласно (10)

$$pl_y \cos(\theta_0 + \theta) = Dh_2 \sin\theta, \tag{13}$$

и

$$\frac{pl_y}{D} = h_2 \frac{\sin\theta}{\cos(\theta_0 + \theta)}. \tag{14}$$

Сопоставляя (12) и (14), получим

$$\frac{h_1}{\cos\theta} = \frac{h_2}{\cos(\theta_0 + \theta)}.$$

И так как cos $\theta > \cos(\theta_0 + \theta)$ (на промежутке от нуля до $\pi/2$), то должно быть $h_1 > h_2$. То есть при крене обоих кораблей на один и тот же угол θ метацентрическая высота второго корабля должна быть меньше, чем у первого. Но поскольку в реальности, наоборот, $h_1 < h_2$, то сказанное эквивалентно тому, что большая метацентрическая высота h_2 второго корабля не позволит ему за счет переноса груза весом p на плечо l_y накрениться на такой же угол θ. Другими словами, кренящего момента от фиксированной величины pl_y будет недостаточно, чтобы наклонить второй корабль на тот же угол, что и первый.

К такому же выводу можно прийти и непосредственно, сопоставляя равенства (11) и (13):

так как

$$pl_y \cos\theta > pl_y \cos(\theta_0 + \theta),$$

то должно быть

$$Dh_1 \sin\theta > Dh_2 \sin\theta,$$

и, следовательно, $h_1 > h_2$, что противоречит реальности.

Таким образом, тестируя рассматриваемые корабли (или один и тот же корабль в разных положениях) постоянной величиной pl_y ничего определенного об отношении их остойчивостей в рамках формулы (4) сказать невозможно. В том числе, на основании такого теста нельзя утверждать, что остойчивость второго корабля будет хуже, чем у первого, при крене их на правый борт и лучше – при крене на левый борт.

4. Но при помощи постоянной величины pl_y из опыта кренования возможно определить метацентрическую высоту каждого корабля. И тогда, сравнивая метацентрические высоты кораблей, можно будет сделать однозначный вывод об отношении их остойчивостей (в пределах приемлемости формулы (4)). Впрочем, этот вывод в рассматриваемых пределах был уже сделан в пункте **1** из [1] – остойчивость корабля, наклоненного за счет переноса груза по его палубе, лучше, чем у того же корабля в прямой посадке, т.е. до такого переноса груза. Сам же опыт кренования достаточно провести только для одного из кораблей – для другого корабля метацентрическая высота определится из соотношения (1).

В связи с опытом кренования имеет смысл сейчас более конкретно, чем в пункте **3**, остановиться на влиянии на оба корабля одинаковой величины pl_y. Пусть сначала груз весом *p* перенесен на расстояние l_y <u>с правого борта на левый</u>. Тогда

– на первый корабль будет воздействовать кренящий момент (3), т.е.

$$pl_y \cos(\theta_0 - \theta)\big|_{\theta_0=0} = pl_y \cos(-\theta) = pl_y \cos\theta, \tag{15}$$

который вызовет крен корабля на угол (– θ). Эта типовая ситуация была постоянно в поле нашего зрения в статье [1] и в зеркальном отображении (симметрично относительно произвольной вертикальной оси) её иллюстрирует здесь рис. 1.

– на второй корабль будет воздействовать кренящий момент

$$pl_y \cos(\theta_0 - \theta'),$$

который вызовет крен корабля на угол $(-\theta')$. Начать рассмотрение этой ситуации удобнее и нагляднее с частного случая, когда равновесное положение второго корабля было изначально создано переносом по его палубе такого же груза весом *p* на такое же расстояние l_y, но только лишь с левого борта на правый. Это исходное равновесное положение второго корабля непосредственно иллюстрирует рис. 1 (или рис. 5 из [1]), и в данном частном случае следует принять $\theta_0 = \theta$.

Если же теперь тот же самый груз вернуть на его прежнее место, то, очевидно, второй корабль восстановит прямую посадку. Тогда принимая $-\theta' = -\theta$, будем видеть, что в этой прямой посадке второй корабль будет удерживаться кренящим моментом

$$pl_y \cos(\theta_0 - \theta') = pl_y \cos(\theta - \theta) = pl_y. \qquad (16)$$

(Такое равновесное положение второго корабля теперь уже иллюстрирует непосредственно рис. 6 из [1].)

Рассматриваемый частный случай ($\theta_0 = \theta$) является элементом опыта кренования и уже был предметом нашего внимания в пункте **7** [1]. Поэтому здесь лишь еще раз укажем,

– если на корабле с исходной прямой посадкой при переносе груза весом *p* на плечо l_y возникает кренящий момент (3) (или, что то же, (15)), т.е. $pl_y \cos\theta$ (см. рис. 1), и корабль получает крен на угол θ,

– то при возвращении этого груза обратно возникает больший кренящий момент (16), т.е. pl_y:

$$pl_y > pl_y \cos\theta, \qquad (17)$$

который наклоняет корабль всего лишь на такой же угол крена θ (в обратном направлении). Это значит, что теперь корабль сильнее сопротивляется его наклонению на тот же угол θ – его остойчивость улучшилась.

То же самое касается и наклонения первого и второго корабля за счет переноса груза весом *p* на плечо l_y с правого борта на левый – чтобы повернуть корабли на одинаковый угол θ, ко второму кораблю надо приложить больший кренящий момент, чем к первому (см. (17)). Это будет чувствоваться и на уровне физических ощущений: поднимать груз вверх по наклонной палубе, даже при постепенном уменьшении её крена, тяжелее, чем спускать тот же груз вниз по этой палубе, тем более, когда её наклон увеличивается.

Большее сопротивление крену у второго корабля обусловлено, соответственно, бо́льшим значением высоты h_2 (см. (8) [1]) по сравнению с h_1 (см. (9) [1]):

$$h_2 = \frac{p}{D}\frac{l_y}{\sin\theta} \quad \text{и} \quad h_1 = \frac{p}{D}\frac{l_y}{\operatorname{tg}\theta} \quad \left(\sin\theta < \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \operatorname{tg}\theta\right).$$

Таким образом, здесь привычно имеем, что бо́льшая метацентрическая высота второго корабля ведет к улучшению его остойчивости по сравнению с первым кораблем.

Рассматриваемый частный случай ($\theta_0 = \theta$ у второго корабля) при переносе груза с правого борта на левый формально подпадает под литеру Б из пунктов **1**, **2**, когда остойчивость кораблей можно сравнивать по величине кренящего момента (а значит, и восстанавливающего момента с учетом (2)) при наклонении их на одинаковый угол θ.

Пусть теперь в рассматриваемом частном случае ($\theta_0 = \theta$ у второго корабля) груз весом p перенесен на плечо l_y <u>с левого борта на правый</u>. Для первого корабля новое положение равновесия после такого переноса показано непосредственно на рис. 1 (или рис. 5 в [1]), а для второго корабля – соответствует ватерлинии 3 на рис. 3, где высота h_3 отвечает новому смещению ЦТ корабля в точку G_3. При этом, как и прежде, полагаем приемлемым использование метацентрической формулы.

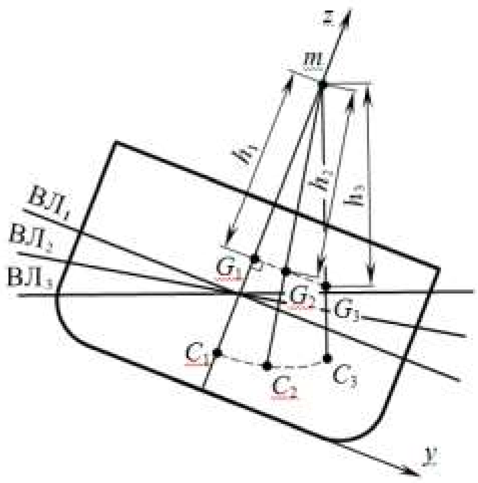

Рис. 3. Последовательное, параллельно палубе, смещение с ДП центра тяжести корабля

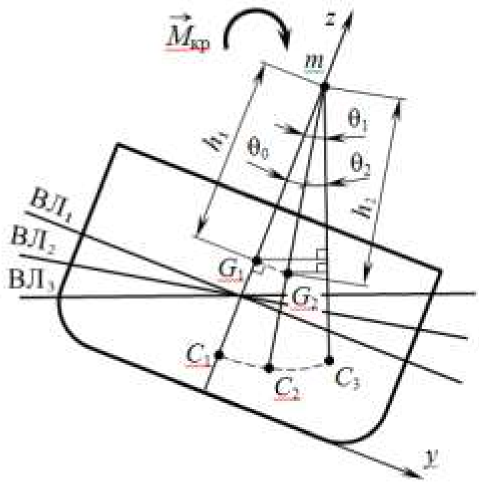

Рис. 4. Поворот корабля из разных исходных положений до одинаковой посадки

На первом корабле возникающий от такого переноса груза кренящий момент $pl_y \cos\,\theta$ наклонит корабль на угол $+\theta$ (аналогично тому, как это было при повороте этого корабля на угол $-\theta$ за счет такого же по величине кренящего момента $pl_y \cos\,\theta$).

Перенос же груза на втором корабле создаст меньший кренящий момент $pl_y \cos\,(\theta+\theta')$, так как $\cos(\theta+\theta') < \cos\theta$ при изменении аргумента косинуса от нуля до $\pi/2$. Такой момент повернет второй корабль на угол $\theta' < \theta$. Действительно, в новом равновесии равенство (2) следует записать

– для первого корабля в виде (11), откуда следует (12);

– а для второго корабля в виде

$$pl_y \cos(\theta+\theta') = Dh_2 \sin\theta' , \tag{18}$$

откуда

$$\frac{pl_y}{D} = h_2 \frac{\sin\theta'}{\cos(\theta+\theta')}.$$

Сопоставляя (12) и последнюю формулу, получим

$$\frac{h_1 \sin\theta}{\cos\theta} = \frac{h_2 \sin\theta'}{\cos\,(\theta+\theta')}.$$

Так как

$$\cos\ \theta > \cos\ (\theta + \theta'),$$

то должно быть

$$h_1 \sin\theta > h_2 \sin\theta',$$

или

$$\frac{\sin\ \theta'}{\sin\ \theta} < \frac{h_1}{h_2}. \tag{19}$$

Но поскольку $h_2 > h_1$, то заведомо $\sin\theta' < \sin\theta$ и, следовательно, $\theta' < \theta$ (при изменении аргумента синуса от нуля до $\pi/2$).

Если говорить об опыте кренования корабля с изначальной прямой посадкой, то нужно иметь в виду, что перенос первого груза весом *p* на плечо l_y вызовет крен корабля на угол θ. А перенос второго такого же груза на такое же плечо наклонит корабль уже на меньший угол θ′. Причиной этого будет не только меньший кренящий момент от переноса второго груза, но и б*о*льшая метацентрическая высота наклоненного корабля.

5. Обычно при выполнении опыта кренования суммарный вес первого и второго примерно одинаковых грузов выбирают «исходя из того, чтобы получаемый угол крена составлял $4°$ при плече переноса груза … около $3/4$ ширины судна» [4, с. 113]. Величину кренящего момента определяют так [5, с. 552]: «Первый груз p_1 переносится с левого борта на правый на расстояние l_1; окончанию переноса соответствует … кренящий момент $M_1 = p_1 l_1$. После переноса второго груза p_2 на расстояние l_2 в сумме получится кренящий момент $M_2 = p_1 l_1 + p_2 l_2$.» Аналогично об этом говорится и в других изданиях по статике корабля. Например, в [2, с. 184] указано, что «кренящий момент при переносе кренбалласта равен весу p переносимого груза, умноженному на плечо переноса l.»

Таким образом, следуя рекомендациям по проведению опыта кренования, суммарный кренящий момент от переноса на один борт двух грузов нужно принять в виде

$$p_1 l_{y1} + p_2 l_{y2} = 2pl_y,$$

где было учтено, что веса грузов и плечи их переноса теоретически одинаковы: $p_1 = p_2 = p$ и $l_{y1} = l_{y2} = l_y$. А если быть ближе к действительности, то кренящий момент от переноса двух грузов согласно пункту **4** будет равен

$$p_1 l_{y1} \cos\theta + p_2 l_{y2} \cos(\theta + \theta') = pl_y(\cos\theta + \cos(\theta + \theta')).$$

Несложно дать оценку относительной ошибки при расчете суммарного кренящего момента из-за неучета в его выражении функции косинус. Полагая угол $(\theta + \theta')$ в районе $4°$ и то, что $\theta' < \theta$, примем условно $(\theta + \theta') = 4°$, $\theta = 2{,}5°$. Тогда относительная ошибка суммарного кренящего момента без учета погрешностей измерения угла крена, веса *p* грузов и их плеча переноса l_y будет равна

$$\frac{|\ pl_y(\cos\theta + \cos(\theta + \theta')) - 2pl_y\ |}{pl_y(\cos\theta + \cos(\theta + \theta'))} 100\,\% =$$

$$=\frac{|\cos\theta+\cos(\theta+\theta')-2|}{\cos\theta+\cos(\theta+\theta')}100\,\%= \tag{20}$$
$$=\frac{|\cos 2{,}5^\circ+\cos 4^\circ-2|}{\cos 2{,}5^\circ+\cos 4^\circ}100\,\%\approx 0{,}17\,\%$$

В [5, с. 557] указано, что «относительная ошибка наблюдений при производстве опыта будет ε/h. Чтобы получить общую абсолютную ошибку метацентрической высоты Δh, необходимо еще учесть относительную ошибку от неточности определения водоизмещения, которая будет $\Delta D/D$ и может быть порядка 1 %, а также относительную ошибку от неточности метацентрической формулы, которую обозначим $\Delta h_1/h$ и которая может быть порядка 1 %. Общая относительная ошибка получается как сумма относительных ошибок в таком виде

$$\frac{\Delta h}{h}=\frac{\varepsilon}{h}+\frac{\Delta D}{D}+\frac{\Delta h_1}{h}.»$$

Исходя из этой цитаты нельзя утверждать, что относительная ошибка (20) является малой, т.е. на порядок меньше величин $\Delta D/D$ и $\Delta h_1/h$, и поэтому ей можно пренебречь. В цитате говорится лишь о максимальных оценках величин $\Delta D/D$ и $\Delta h_1/h$. При современных более точных расчетах водоизмещения, а также для некоторых обводов корпуса корабля (например, близких к круговым, см. [5, с. 163]) ошибки $\Delta D/D$ и $\Delta h_1/h$ могут оказаться заметно меньше 1 % и будут сопоставимы по величине с (20). Поэтому при расчете относительной ошибки опыта кренования в общем случае не следует забывать про ошибку определения кренящего момента. Причем, в отличие от измерительных погрешностей, которые могут быть уменьшены более качественными измерениями, ошибка от неучета функции косинус является неуменьшаемой, т.е. стабильной. Этой своей мало изменяемой величиной в районе (0,15 ÷ 0,2) % погрешность от неучета функции косинус входит составной частью в ошибку ε/h.

6. Пусть теперь угол θ_0 является произвольным в рамках рассматриваемой модели остойчивости. После анализа предыдущего случая, когда $\theta_0=\theta$ (см. пункт **4**), сделать вывод о поведении корабля с произвольным углом θ_0 несложно. А именно, перенос груза

– с левого борта на правый независимо от величины $\theta_0\neq 0$ вызовет поворот второго корабля на меньший угол, чем первого;

– с правого борта на левый повернет второй корабль по сравнению с первым

на меньший угол при $\theta_0>\theta$,

на такой же угол при $\theta_0=\theta$,

на больший угол при $\theta_0<\theta$.

Этот вывод достаточно очевиден, но чтобы он не был безосновательным, ниже приведено более обстоятельное исследование этих случаев.

Итак, пусть теперь угол θ_0 – произвольный. По сравнению с пунктом **4** это принципиально ничего не меняет, если груз переносится с <u>левого борта на правый</u>. Для первого корабля, как и раньше, имеет место (11). А для второго корабля по аналогии с (18) следует записать

$$pl_y\cos(\theta_0+\theta')=Dh_2\sin\theta'. \tag{21}$$

Поскольку $\cos(\theta_0 + \theta') < \cos\theta$ (на промежутке от нуля до $\pi/2$), то из сравнения (11) и (21) с учетом того, что $h_2 > h_1$, опять получим $\theta' < \theta$. При этом будет справедливо (19).

Указанное соотношение между косинусами одновременно означает, что на второй корабль будет действовать меньший кренящий момент, чем на первый:

$$pl_y \cos(\theta_0 + \theta') < pl_y \cos\theta.$$

Соответственно и восстанавливающий момент второго корабля будет меньше, чем у первого

$$Dh_2 \sin\theta' < Dh_1 \sin\theta,$$

при том, что $h_2 > h_1$. Напомним, что рассматриваемый перенос груза не подпадает под литеры А и Б из пунктов **1**, **2**. Поэтому сравнивать остойчивости кораблей на основании сравнения восстанавливающих моментов, которые корабли развивают при таком переносе груза, не имеет смысла.

Отметим еще следующее естественное соотношение. Перенос груза весом p на плечо l_y на первом корабле вызвал его крен на угол θ. Второй корабль уже имел крен θ_0 в этом же направлении. Поэтому, если на втором корабле сделать такой же перенос, то он получит больший крен, чем первый: $\theta_0 + \theta' > \theta$, где, как и раньше, θ' – дополнительный крен второго корабля от переноса груза, причем $\theta' < \theta$.

После переноса груза весом p на плечо l_y с правого борта на левый первому кораблю по-прежнему соответствуют равенства (11), (12) взятые по модулю для функции синус. А для второго корабля будут характерны три ситуации:

1) $\theta_0 > \theta$ – перенос груза из такого исходного положения корабля не позволит ему достигнуть прямой посадки, и он сохранит крен на правый борт с углом $(\theta_0 - \theta') > 0$. Такому равновесию корабля соответствует равенство

$$pl_y \cos(\theta_0 - \theta') = Dh_2 \sin\theta',$$

Откуда

$$\frac{pl_y}{D} = h_2 \frac{\sin\theta'}{\cos(\theta_0 - \theta')}.$$

Сопоставляя последнее выражение с (12), получим

$$\frac{h_1 \sin\theta}{\cos\theta} = \frac{h_2 \sin\theta'}{\cos(\theta_0 - \theta')}. \tag{22}$$

Принимая во внимание соотношение (1), т.е. $h_2 = h_1/\cos\theta_0$, перепишем (22) в виде

$$\cos(\theta_0 - \theta') \frac{\cos\theta_0}{\cos\theta} = \frac{\sin\theta'}{\sin\theta}.$$

Поскольку по исходному условию $\theta_0 > \theta$, то $\cos\theta_0 < \cos\theta$ (при изменении аргумента косинуса от нуля до $\pi/2$), и кроме того, всегда $\cos(\theta_0 - \theta') < 1$. Следовательно,

$$\frac{\sin\theta'}{\sin\theta} < 1,$$

откуда заключаем, что $\theta' < \theta$, или в общей последовательности: $\theta' < \theta < \theta_0$.

Что касается сопоставления кренящих моментов, действующих на корабли: $pl_y \cos\theta$ и $pl_y \cos(\theta_0 - \theta')$, то возможны следующие два случая:

*) $\theta_0 - \theta' > \theta$ – угол θ_0 настолько велик (в рамках формулы (4)), что рассматриваемый перенос груза не позволяет второму кораблю достигнуть угла крена θ. Здесь имеем

$$pl_y \cos(\theta_0 - \theta') < pl_y \cos\theta.$$

Соответственно для восстанавливающих моментов с учетом (2) получим

$$Dh_2 \sin\theta' < Dh_1 \sin\theta$$

(при том, что $h_2 > h_1$).

**) $\theta_0 - \theta' < \theta$ – угол θ_0 не сильно превышает угол θ, так что рассматриваемый перенос груза выведет второй корабль на крен, меньший угла θ. Здесь будет

$$pl_y \cos(\theta_0 - \theta') > pl_y \cos\theta,$$

и $$Dh_2 \sin\theta' > Dh_1 \sin\theta$$

(при том, что $\sin\ \theta' < \sin\ \theta$).

2) $\theta_0 = \theta$ – эта ситуация была исследована в пункте **4**.

3) $\theta_0 < \theta$ – при переносе груза из такого исходного положения второго корабля он сначала восстанавливает прямую посадку и далее получает крен на левый (т.е. противоположный) борт на угол $(-\theta'') = \theta_0 - \theta'$. В результате корабль повернется на угол $|\theta'| = \theta_0 + |\theta''|$.

В новом равновесии для второго корабля соблюдается равенство

$$pl_y \cos\theta'' = Dh_2 \sin\theta',$$

откуда

$$\frac{pl_y}{D} = h_2 \frac{\sin\theta'}{\cos\theta''}.$$

Сопоставляя это выражение с (12), запишем

$$\frac{h_1 \sin\theta}{\cos\theta} = \frac{h_2 \sin\theta'}{\cos\theta''}.$$

Поскольку $h_2 = h_1/\cos\theta_0$ (см. (1)), и $|\theta'| = \theta_0 + |\theta''|$, то последовательно получаем

$$pl_y \cos\theta'' = Dh_2 \sin\theta' = D\,\frac{h_1}{\cos\theta_0}\sin(\theta_0 + \theta'') =$$

$$= Dh_1\,\frac{\sin\theta_0\cos\theta'' + \cos\theta_0\sin\theta''}{\cos\theta_0} = Dh_1\cos\theta''(\mathrm{tg}\theta_0 + \mathrm{tg}\theta'') \qquad (22)$$

откуда

$$\frac{pl_y}{Dh_1} = \mathrm{tg}\theta_0 + \mathrm{tg}\theta''. \qquad (23)$$

Сопоставляя это выражение с (12) находим, что

$$\mathrm{tg}\theta = \mathrm{tg}\theta_0 + \mathrm{tg}\theta'' \qquad (24)$$

С другой стороны,

$$\mathrm{tg}\theta' = \mathrm{tg}(\theta_0 + \theta'') = \frac{\mathrm{tg}\theta_0 + \mathrm{tg}\theta''}{1 - \mathrm{tg}\theta_0\mathrm{tg}\theta''} \qquad (25)$$

Так как

$$\mathrm{tg}\theta_0 + \mathrm{tg}\theta'' < \frac{\mathrm{tg}\theta_0 + \mathrm{tg}\theta''}{1 - \mathrm{tg}\theta_0\mathrm{tg}\theta''},$$

то из (24), (25) следует, что $\mathrm{tg}\theta < \mathrm{tg}\theta'$ и $\theta < \theta'$, а в общей последовательности: $\theta_0 < \theta < \theta'$. Из (24) также видно, что $\theta'' < \theta$.

Что касается кренящего момента (изменяющегося по величине в процессе крена кораблей), то в новом равновесии

$$pl_y\cos\theta'' > pl_y\cos\theta,$$

и, соответственно,

$$Dh_2\sin\theta' > Dh_1\sin\theta.$$

Таким образом, на корабле, имеющем произвольный (в пределах приемлемости метацентрической формулы) исходный крен, перенос груза в любую сторону с борта на борт повернет корабль в направлении переноса на меньший угол, чем такой же перенос на этом же корабле в исходной прямой посадке.

Исключением будет такой же перенос, при котором изначально наклоненный корабль восстановит прямую посадку или примет крен, противоположный исходному. В первом случае поворот корабля (относительно исходного крена) произойдет ровно на такой же угол, что и при наклонении корабля с изначально прямой посадкой, а во втором случае – на больший угол.

Причиной такого соотношения поворотов корабля являются, с одной стороны, разное отношение кренящих моментов, возникающих на корабле при разных его исходных положениях, а с другой стороны, всегда бо́льшая метацентрическая высота исходно наклоненного корабля (со смещенным с ДП центром тяжести) по сравнению с метацентрической высотой корабля в прямой посадке (с несмещенным ЦТ).

Результаты, полученные в пунктах **4** и **6**, а также **7** [1], сведены в таблицы 1 и 2. Эти результаты были получены при помощи различия между метацентрическими высотами h_2 и h_1, которым теория начальной остойчивости обычно пренебрегает – об этом говорилось в пункте **2** [1].

Без указанного различия углы поворота корабля, рассмотренные выше, можно было бы считать неразличимыми. Между тем, углами такой величины теория начальной остойчивости не пренебрегает и, наоборот, они находятся в центре её внимания – см. формулу (5). Эта формула, даже в упрощенном варианте $\theta \approx pl_y / Dh_1$ приписывает углу θ вполне отличимую от нуля величину.

Укажем еще, что угол поворота корабля при переваливании на противоположный борт (см. ситуацию 3 в настоящем пункте **6**) может превышать углы крена, приемлемые для метацентрической формулы.

Таблица 1

Перенос груза с левого борта на правый (↷)

Параметр	Первый корабль	Соотношение между параметрами	Второй корабль
Исходный угол крена [1]	0	$<$	θ_0 – любой ($>$, $<$ или $= \theta$)
Угол поворота	θ	$>$	θ'
Полученный угол крена [1]	θ	$<$	$\theta_0 + \theta'$
Кренящий момент	$pl_y \cos\theta$	$>$	$pl_y \cos(\theta_0 + \theta')$
Восстанавливающий момент	$Dh_1 \sin\theta$	$>$	$Dh_2 \sin\theta'$
Метацентрическая высота [2]	h_1	$<$	h_2

[1] *Относительно вертикального положения ДП*
[2] *В исходном положении корабля.*

Но это не лишает такой угол правомерности, поскольку ограничения на использование этой формулы вносят именно углы крена корабля, а не углы его поворота. Такие ограничения проистекают из протяженности начального участка диаграммы статической остойчивости, отвечающего в большей или меньшей степени синусоиде (4), имеющей аргументом угол крена (см. пункт **2** в [1]).

Обратим также внимание на то, что формула (23) позволяет определить угол крена изначально наклоненного корабля (при $0 < \theta_0 < \theta$) после переноса на нем груза параллельно палубе с правого борта на левый. При $\theta_0 = 0$ эта формула по смыслу совпадает с (11), (12) или, что то же, с (5). Однако подробную методику расчета крена изначально наклоненного корабля авторы намерены изложить в отдельной статье.

7. Наш обзор был бы не полным, если бы мы не затронули еще один типовой случай:

Г) *Крен до одинаковой посадки*. Пусть первый и второй корабли при помощи сторонних сил (т.е. сил, не вызывающих смещение ЦТ корабля) наклоняются <u>на правый борт</u> до одинакового положения, в котором центр величины оказывается в

точке C_3
на рис. 4.

Тогда первый корабль повернется на угол θ_1, определяемый из равенства

$$M_{\text{кр 1}} = Dh_1 \sin\theta_1 .$$

Второй корабль повернется на меньший угол θ_2 согласно уравнению

$$M_{\text{кр 2}} = Dh_2 \sin\theta_2 ,$$

при том, что $\theta_1 = \theta_0 + \theta_2$. Естественно, что для крена второго корабля до заданного положения к нему нужно приложить меньший кренящий момент: $M_{\text{кр 2}} < M_{\text{кр 1}}$.

Таблица 2

Перенос груза с правого борта на левый (↶)

<table>
<tr><th>Параметр</th><th>Первый корабль</th><th>Соотношение [2)]</th><th>Второй корабль</th><th>Соотношение [2)]</th><th colspan="3">Второй корабль</th><th>Соотношение [2)]</th><th>Второй корабль</th></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td colspan="3">6</td><td>7</td><td>8</td></tr>
<tr><td>Исходный угол крена [1)]</td><td>0</td><td>$<$</td><td>$\theta_0 = \theta$</td><td>$<$</td><td colspan="3">$\theta_0 > \theta$</td><td>$<$</td><td>$\theta_0 < \theta$</td></tr>
<tr><td>Угол поворота</td><td>$|-\theta|$</td><td>$=$</td><td>$|-\theta|$</td><td>$>$</td><td colspan="3">$|-\theta'|$</td><td>$<$</td><td>$|-\theta'|$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Полученный угол крена [1)]</td><td rowspan="2">$|-\theta|$</td><td rowspan="2">$>$</td><td rowspan="2">0</td><td>5</td><td>6</td><td>5</td><td>6</td><td rowspan="2">$>$</td><td rowspan="2">$|-\theta''|$</td></tr>
<tr><td>$<$</td><td>$\theta_0 - \theta'$</td><td>$>$</td><td>$\theta_0 - \theta'$</td></tr>
<tr><td>Кренящий момент</td><td>$pl_y \cos(-\theta) = = pl_y \cos\theta$</td><td>$<$</td><td>$pl_y$</td><td>$>$</td><td>$pl_y \cos(\theta_0 - \theta')$</td><td>$<$</td><td>$pl_y \cos(\theta_0 - \theta')$</td><td>$<$</td><td>$pl_y \cos(-\theta'') = = pl_y \cos\theta''$ [3)]</td></tr>
<tr><td>Восстанавливающий момент</td><td>$|Dh_1 \sin(-\theta)|$</td><td>$<$</td><td>$|Dh_2 \sin(-\theta)|$</td><td>$>$</td><td>$|Dh_2 \sin(-\theta')|$</td><td>$<$</td><td>$|Dh_2 \sin(-\theta')|$</td><td>$<$</td><td>$|Dh_2 \sin(-\theta')|$</td></tr>
<tr><td>Метацентрическая высота [4)]</td><td>h_1</td><td>$<$</td><td>h_2</td><td>$<$</td><td>h_2</td><td>$<$</td><td>h_2</td><td>$<$</td><td>h_2</td></tr>
</table>

[1)] Относительно вертикального положения ДП. [2)] Соотношение между модулями параметров первого корабля (столбец [2)] и второго корабля (последовательно столбцы 4, 6 и 8).
[3)] В процессе поворота корабля кренящий момент принимает максимальное значение pl_y при достижении кораблем прямой посадки (когда $\theta = \theta_0$). 4) В исходном положении корабля.

А из рис. 4 непосредственно видно, что, несмотря на соотношение $h_2 > h_1$, плечо восстанавливающего момента у второго корабля будет меньше, чем у первого

$$h_2 \sin\ \theta_2 < h_1 \sin\ \theta_1 . \qquad (26)$$

Уменьшение плеча у второго корабля обусловлено смещением его ЦТ параллельно палубе ближе к линии действия силы Архимеда. И здесь опять возникает кажущееся противоречие: метацентрическая высота у второго корабля больше, чем у первого, но несмотря на это развиваемый вторым кораблем восстанавливающий момент оказывается меньше.

Однако соотношение (26) совсем не означает, что для рассматриваемого наклонения кораблей остойчивость второго корабля меньше, чем первого, как это утверждалось в цитатах [2, с. 199; 3, с. 165], приведенных во «Введении». В данном случае кренящие моменты $M_{\text{кр 1}}$ и $M_{\text{кр 2}}$, действующие на корабли, и углы θ_1 и θ_2

их поворота под действием таких моментов будут разными. Так что данный случай не подпадает под литеры А и Б пункта **1**, и поэтому остойчивость кораблей при таком наклонении сравнивать нельзя.

То же самое относится к наклонению кораблей на противоположный – левый – борт до одинакового положения. Отличием здесь будет только обратное соотношение между восстанавливающими моментами

$$Dh_2 \sin \theta_2 > Dh_1 \sin \theta_1, \qquad (27)$$

при том, что по абсолютной величине $\theta_2 = \theta_0 + \theta_1$.

Поскольку $h_2 > h_1$, то может показаться, что из этого неравенства следует соотношение (27). То есть благодаря большей метацентрической высоте у второго корабля он имеет больший восстанавливающий момент, а значит, и лучшую остойчивость по сравнению с первым кораблем. Однако этот вывод будет неправильным, так как остойчивость кораблей при таком наклонении сравнивать нельзя.

Заключение

В настоящей статье, являющейся развитием работы [1], в рамках приемлемости метацентрической формулы исследована модель остойчивости корабля, учитывающая изменение метацентрической высоты при смещении с ДП параллельно палубе его центра тяжести. В результате было установлено, что в рамках такой модели

корабль со смещенным с ДП параллельно палубе центром тяжести действительно проявляет лучшую остойчивость по сравнению с его прямой посадкой, и

это свойство наклоненного корабля не зависит от направления его дальнейшего крена.

Полученный вывод был проанализирован в статье на примерах воздействия на корабль с разной исходной посадкой следующих факторов

одинакового кренящего момента;

поворота корабля на одинаковый угол крена;

переноса параллельно палубе одинакового груза на одинаковое расстояние;

наклонения корабля до одинакового положения.

Для каждого случая были определены метацентрические высоты, углы крена, углы поворота корабля, кренящие и восстанавливающие моменты, и проведено их соответствующее сопоставление. Эти результаты непосредственно поясняют вывод об указанном улучшении остойчивости наклоненного корабля.

Благодаря аналитическому характеру принятой модели остойчивости, происходящему из использования метацентрической формулы, в статье получено аналитическое обоснование всех решений, что удобно для их обобщенного, целостного восприятия.

Результаты проведенного исследования помогают составить более обстоятельное представление об остойчивости корабля на малых углах крена, а точнее на углах, которые для данного корабля позволяет рассматривать метацентрическая формула. Такие углы в зависимости от обводов корабля могут принимать и конечные значения, что для использованной здесь модели остойчивости будет предпочтительнее. И наоборот, следует иметь в виду, что изменение метацентрической высоты, рассмотренное в принятой модели, становится исчезающе малым при уменьшении крена корабля. Поэтому, если метацентрическая формула допускает лишь небольшие углы крена, что характерно для многих современных судов, то исследованная модель будет приводить к теории начальной остойчивости в её традиционном смысле.

Список литературы

1. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Методические заметки к начальной остойчивости корабля при перемещении груза по его палубе // Научные проблемы водного транспорта. 2023. № 76. С. 15 – 31. DOI: https://doi.org/10.37890/jwt.vi76.385.
2. Дорогостайский Д.В., Жученко М.М., Мальцев Н.Я. Теория и устройство судна. Л.: Судостроение, 1976. 416 с.
3. Сизов В.Г. Теория корабля. О.: Фенікс; М.: ТрансЛит, 2008. 464 с.
4. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 2. Статика судов. Качка судов / Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 440 с.
5. *Семенов-Тян-Шанский В.В*. Статика и динамика корабля. Л.: Судпромгиз, 1960. 576 с.

References

1. Kovalev A.N., Kovalev F.N. Metodicheskie zametki k nachal'noi ostoichivosti korablya pri peremeshchenii gruza po ego palube [Methodical notes to the initial stability of the ship when moving cargo on its deck] Russian Journal of Water Transport. 2023. № 76, pp. 15 – 31. (In Russ). DOI: https://doi.org/10.37890/jwt.vi76.385.
2. Dorogostaiskii D.V., Zhuchenko M.M., Mal'tsev N.Ya. Teoriya i ustroistvo sudna [Theory and design of the vessel]. L.: Sudostroenie, 1976. 416 p. (In Russ.).
3. Sizov V.G. Teoriya korablya [Theory of the ship]. O.: Feniks; M.: TranSLit, 2008. 464 p. (In Russ.).
4. Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomakh. Tom 2. Statika sudov. Kachka sudov [Hand-book of Ship Theory: In three volumes. Volume 2. Ship statics. Tossing of ships] / Pod red. Ya.I. Voitkunskogo. L.: Sudostroenie, 1985. 440 p. (In Russ.).
5. Semenov-Tyan-Shanskii V.V. Statika i dinamika korablya [Statics and dynamics of the ship].L.: Sudpromgiz, 1960. 576 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ковалев Александр Николаевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Гидро- аэродинамика, прочность машин и сопротивление материалов» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, e-mail: kovalev@nntu.ru

Aleksandr N. Kovalev, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department «Hydro-aerodynamics, strength of machines and resistance of materials», Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseyev, 24, Minin str., Nizhny Novgorod, 603950, e-mail: kovalev@nntu.ru

Ковалев Федор Николаевич, д.т.н., доцент, старший научный сотрудник «Федерального исследовательского центра Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46; профессор кафедры «Радиотехника» Национального исследовательского Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, e-mail: kovalyov@ipfran.ru

Fedor N. Kovalev, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46, Ulyanov str., Nizhny Novgorod, 603950;Professor of the Department «Radio engineering»,Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky, 23, Gagarin av., Nizhny Novgorod, 603022, e-mail: kovalyov@ipfran.ru

Статья поступила в редакцию 12.10.2023; опубликована онлайн 20.03.2024.
Received 12.10.2023; published online 20.03.2024