

СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА

SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY OF THE SHIP

УДК 629.5.015.12: 532.3

DOI: 10.37890/jwt.vi76.385

Методические заметки к начальной остойчивости корабля при перемещении груза по его палубе

А.Н. Ковалев¹

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 обсуждаются некоторые положения задачи о перемещении груза на корабле в пределах теории начальной остойчивости. Указывается, что изложение вопроса об остойчивости корабля при поперечном и продольном перемещении груза на нем в некоторых традиционных учебниках недостаточно конкретно. По возможности проанализированы причины возникновения неконкретных моментов в задаче. Предлагается вести изложение этой задачи с использованием более четких формулировок ее положений. В частности, вопреки существующему мнению о неизменности начальной остойчивости корабля при переносе груза по его палубе, в статье наглядно показано, что начальная остойчивость корабля, наклоненного за счет смещения его центра тяжести, будет больше, чем у того же корабля в прямой посадке (с несмещенным центром тяжести). И это неразрывно связано с последующим изменением остойчивости корабля на больших углах крена. Материалы статьи помогут сформировать лучшее понимание поведения корабля при малых углах крена, вызываемых перемещением груза по палубе, и будут способствовать устранению из литературы по статике корабля иногда некорректных выводов из решения задачи о таком переносе груза.

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

Methodical notes to the initial stability of the ship when moving cargo on its deck

Aleksandr N. Kovalev¹

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 discusses some provisions of the problem of moving cargo on a ship within the theory of initial stability. It is indicated that the presentation of the issue of the stability of the ship during the transverse and longitudinal movement of cargo on it in some traditional textbooks is not specific enough. If possible, the reasons for the occurrence of non-

specific moments in the problem are analyzed. It is proposed to present this task using clearer formulations of its provisions. In particular, contrary to the existing opinion about the invariability of the initial stability of a ship when carrying cargo on its deck, the article clearly shows that the initial stability of a ship tilted due to the displacement of its center of gravity will be greater than that of the same ship in a straight state (with an unbiased center of gravity). And this is inextricably linked with the subsequent change in the stability of the ship at large roll angles. The materials of the article will help to form a better understanding of the ship's behaviour at small roll angles caused by the movement of cargo on the deck, and will help to eliminate from the literature on ship statics sometimes incorrect conclusions from solving the problem of such cargo transfer.

Keywords: initial stability, metacentric height, cargo movement on the ship **Введение**

В настоящее время теория начальной остойчивости считается вполне устоявшимся разделом теории корабля. Её многократно выверенные и отредактированные положения сведены к каноническому виду и поэтому должны быть ясными, прозрачными, не вызывать каких-либо сомнений. В том числе это относится и к классической задаче о перемещении груза на корабле.

Эта задача важна не только тем, что в ней изучается поведение корабля под воздействием наиболее типичного эксплуатационного фактора, но и тем, что схема ее решения является основой в исследовании многих других задач статики корабля. Кроме того, решение этой задачи используется в важном опыте кренования. Поэтому при изучении теории остойчивости указанной задаче всегда отводится пристальное внимание. И всегда есть желание привить студентам умение до автоматизма пользоваться ее решением; привить четкое осознание происхождения окончательных формул и выводов этого решения.

Однако, на наш взгляд, в учебной литературе по теории корабля присутствуют выводы, которые уводят от четкости понимания рассматриваемого вопроса и даже могут ввести студента и другого читателя в заблуждение. В свою очередь, из учебной литературы такие выводы закономерным образом перекочевывают в практические руководства для проектантов и эксплуатационников. А это уже вызывает некоторую настороженность.

Настоящая статья имеет целью внести уточнения в *методику* изложения и результаты задачи о перемещении груза на корабле и разностороннее осветить её решение. Эта статья открывает небольшой цикл наших публикаций, посвященных этим цели и задаче.

Заявленные уточнения и пояснения к ним далее представлены последовательно в виде небольших пронумерованных заметок, что и отражено в названии статьи.

Положения, решения и обсуждение

1. Итак, пусть на корабле, имеющем прямую посадку, был перемещен груз. Масса груза может быть и не малой; важно лишь, чтобы вследствие его перемещения наклонение корабля было мало. Это позволяет пренебрегать взаимным влиянием крена и дифферента и пользоваться метacentрическими формулами начальной остойчивости. В задаче спрашивается – какова будет посадка и остойчивость корабля после перемещения груза (в новом равновесном положении)?

Чтобы ответить на этот вопрос, традиционно вводится связанная с кораблем, прямоугольная декартова левая система координат: ось z – направлена вверх и является пересечением диаметральной плоскости (ДП) и плоскости мидель-шпангоута корабля; ось y – направлена на правый борт и есть пересечение основной плоскости (ОП) и плоскости мидель-шпангоута; ось x – направлена в нос корабля и есть пересечение ОП и ДП.

Далее решение задачи ведется в три этапа: исследуется изменение посадки и остойчивости корабля после каждого из трех взаимно-перпендикулярных, вдоль

координатных осей, перемещений груза, на которые разлагается его общее перемещение на корабле. Окончательный вывод, получаемый в ходе решения, следующий [1, с. 107]: «Таким образом, перемещение в продольном и поперечном направлениях изменяет посадку корабля, но не изменяет остойчивости. Перемещение же в вертикальном направлении ... изменяет только остойчивость, но не изменяет посадку корабля.»

Такую формулировку окончательного вывода можно считать классической в том смысле, что она в явном или неявном виде повсеместно присутствует в литературе по статике корабля, а студенты, отвечая на вопрос рассматриваемой задачи, как правило, стремятся вставить в свой ответ эту фразу. Мы остановимся в настоящей статье только на той части этой цитаты, в которой говорится о продольном и поперечном перемещениях груза. Чтобы акцентировать на этом внимание, приведем еще цитату из [2, с. 238]: «При продольном перемещении груза параллельно плоскости начальной ватерлинии происходит только наклонение корабля ... без изменения среднего углубления и начальной остойчивости. Механика наклонения та же, что и при поперечном перемещении груза.»

Аналогичный вывод прослеживается, к примеру, и в учебниках [3,4,5], а также в практическом руководстве [6]. Еще большее запутывание вопроса встречаем в учебнике [7, с. 169], по которому обучалось не одно поколение студентов, начинающих знакомиться с азами теории корабля: «При горизонтально-поперечном переносе груза из точки $A(Y_1)$ в точку $B(Y_2)$ начальная остойчивость не изменится, так как ни аппликата метацентра, ни аппликата центра тяжести не получают приращений (рис. 1).» В этой фразе, на наш взгляд, содержится софизм в чистом виде, т.е. рассуждение формально кажущееся правильным, но на самом деле содержащее ошибку, приводящую к искажению реальности.

Так в чем же здесь ошибка? Чтобы ее обнаружить, достаточно вспомнить определение понятия «метацентрическая высота», которая является мерой начальной остойчивости. В том же учебнике [7, с. 163] находим: «Расстояние между начальным метацентром и центром тяжести судна носит название ... метацентрической высоты». Таким образом, метацентрическая высота – это расстояние между метацентром и центром тяжести (ЦТ) корабля, а не расстояние между аппликатами этих точек (в корабельной системе координат, показанной на рис. 1). Поэтому любое перемещение груза на корабле повлечет за собой смещение ЦТ последнего. И, следовательно, **при любом перемещении груза на корабле, в том числе поперечном и продольном, расстояние между ЦТ корабля и его метацентром изменится, а потому изменится и остойчивость корабля.** Если более конкретно и в рамках начальной остойчивости, то на корабле с исходной прямой посадкой перенос груза параллельно палубе **увеличивает** его метацентрическую высоту.

Это хорошо видно из рис. 2, 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; ν и $\bar{\gamma}V$ – его весовое водоизмещение вместе с переносимым грузом и сила Архимеда; $ВЛ, G, C, m$ – положение ватерлинии, ЦТ 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 :

$$h_2 = \frac{h_1}{\cos \theta} \quad (1)$$

или

$$h_2 = h_1 + \Delta h, \text{ где } \Delta h = h_1 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)$$

а угол θ определяется из равенства кренящего $M_{кр}$ и восстанавливающего $M_{вос}$ моментов (см. указанные учебники):

$$M_{кр} = M_{вост} \cdot \quad (2)$$

И поскольку

$$M_{кр} = pl_y \cos \theta, \quad (3)$$

$$M_{вост} = Dh_1 \sin \theta, \quad (4)$$

то

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

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

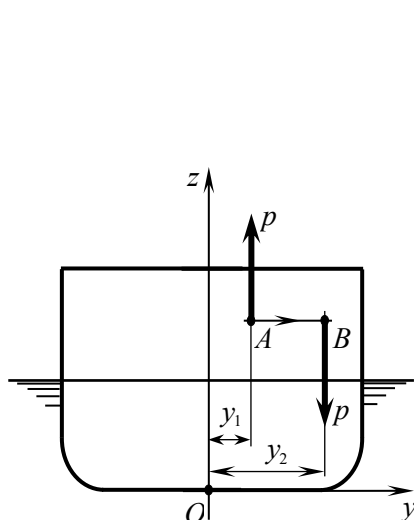


Рис. 1. Горизонтально-поперечный перенос груза [7, с. 169]

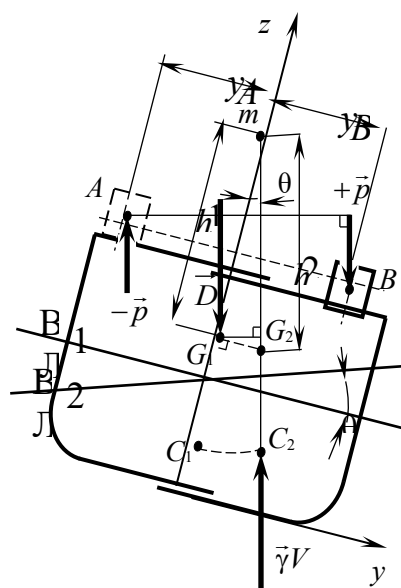


Рис. 2. Перемещение груза по палубе с левого борта на правый

Таким образом, еще раз – начальная остойчивость корабля, наклоненного за счет смещения параллельно палубе его ЦТ, оказывается больше, чем у того же корабля в прямой посадке (с несмещенным ЦТ), каким бы, может быть, парадоксальным или непривычным не казался этот результат. Далее в статье и последующих наших публикациях по этой теме он неоднократно будет подтвержден.

2. Следует сразу оговориться, что в теории начальной остойчивости, рассматривающей обычно только малые углы θ , различие между высотами h_2 и h_1 не делают. То есть, полагая для малых θ в (1) $\cos \theta \approx 1$, принимают, что $h_2 \approx h_1$. Исходя из этого и не заостряя внимание на словесных формулировках, можно считать приведенные выше цитаты справедливыми. И отсюда далее можно усомниться в целесообразности последующих изысканий, опирающихся во многом на (1), т.е. на различие h_2 и h_1 .

Однако введение в оборот высоты h_2 позволяет порой глубже и легче проанализировать поведение корабля при тех же малых углах его наклона. В следующей нашей статье будет дан пример этому. Там попутно будет решена конкретная задача о наклоне корабля из разных положений при перемещении груза по его палубе. В этой задаче сопоставляются углы крена корабля – сами по себе малые величины, именно с которыми имеет дело теория начальной остойчивости и их малостью не пренебрегает. А сделать различие между этими малыми углами как раз помогает различие более высокого порядка малости между метацентрическими высотами h_2 и h_1 .

Учет величин последующих порядков малости, чем, например, обычно (но, не всегда!) является различие между h_2 и h_1 , вряд ли уместен в практических расчетах. Но в теоретическом плане такой учет бывает полезен. Последующее приближение может быть одновременно и следующим шагом в построении нелинейной модели явления, и «взглядом со стороны» на пренебрегаемые эффекты предыдущего приближения. В публикациях нашего цикла будет идти речь об этих эффектах, которые исчезают, если не принять во внимание (1). Такой эффект виден хотя бы уже из пункта 1: если считать, что $h_2 \approx h_1$, то остойчивость корабля после перемещения груза по его палубе не изменится, что утверждается в учебниках; если же учесть (1), то, несмотря на малое различие между h_2 и h_1 , становится видно, что остойчивость наклоненного корабля все-таки чуть-чуть будет больше, хотя, может быть, и незначительно для практики. Но практика относительна к решаемым задачам. И незначительность для практики в каком-либо конкретном случае – не повод вообще ограничиваться от более разностороннего анализа явления. Существуют плавающие тела, например, с круговыми и близким к ним обводами, для которых метацентрическая формула (4) работает и при больших углах θ [1, с. 163]. И для таких тел различие между h_2 и h_1 уже будет практически заметным.

Вообще, главным условием применимости теории начальной остойчивости не является малость углов θ , благодаря чему можно принять, что $\sin \theta \approx \theta$ и $\cos \theta \approx 1$. Таковым условием является допущение о том, что при наклоне корабля его центр величины перемещается по окружности с центром в исходном метацентре и радиусом равным исходному метацентрическому радиусу [8, с. 51]. Но у большинства кораблей кривая центра величины начинает достаточно быстро отличаться от указанной окружности, что и позволяет конкретизировать условие применимости теории начальной остойчивости в более удобном для практики виде, как условие малости углов наклона корабля.

Поэтому против положения об увеличении метацентрической высоты на основе (1) можно было бы сказать, что при наклоне корабля метацентр смещается с ДП ниже и в сторону наклона. Это будет уменьшать метацентрическую высоту, частично или полностью нивелируя её прирост за счет (1). Однако дело так обстоит не всегда. Обозначенная ситуация со смещением метацентра в сторону наклона корабля соответствует часто встречающемуся выпуклому типу диаграммы статической остойчивости. Если же диаграмма имеет S-образный тип, что тоже не редкость, то метацентр, наоборот, будет сначала уходить с ДП выше и противоположно наклону корабля. Это приведет к увеличению метацентрической высоты и еще большему её отличию от h_1 по сравнению с (1).

Естественным тогда будет принять во внимание и тип диаграммы, промежуточный между выпуклым и S-образным, т.е. у которого начальный квазилинейный участок, в том числе близкий к синусоиде (4), является достаточно протяженным, чтобы для соотношения (1) можно было рассматривать не совсем уж малые углы. Начальная квазилинейность диаграммы, близкая к синусоиде (4), свидетельствует о том, что метацентр почти не меняет своего положения при начальных наклонах корабля. И

при перемещении груза по его палубе прирост метацентрической высоты происходит в основном за счет (1). (Кроме того, близкая к синусоиде (4) квазилинейность начального участка диаграммы более схожа с её выпуклым типом, который все же встречается чаще, чем S-образный тип.)

Целесообразным видится начинать анализ поведения корабля именно с этой простой ситуации начальной (как можно более протяженной) квазилинейности диаграммы, благодаря чему и возникла теория начальной остойчивости.

С учетом сказанного в настоящем пункте 2, использование в теории высоты h_2 , на наш взгляд, не лишено смысла, который отчасти проиллюстрирован в данной статье. После сделанной оговорки, продолжим обсуждение вышеприведенных цитат из учебников.

3. Имея сейчас в виду цитату из [7, с. 169] о неизменности аппликата метацентра и ЦТ корабля *«при горизонтально-поперечном переносе груза»*, следует заметить, что ось z какой-либо системы координат часто располагается вертикально, и поэтому аппликаты привычно ассоциируются с координатами по высоте. В частности, когда корабль имеет прямую посадку, вертикальное положение в ДП метацентра и ЦТ корабля (а также, центра величины) удобно определять аппликатами корабельной системы координат, о которой говорилось в начале пункта 1 и которая показана на рис.1.

В цитате из [7, с. 169] правильно сказано, что *«при горизонтально-поперечном переносе груза ... ни аппликата метацентра, ни аппликата центра тяжести не получают приращений»*. При этом, однако, умалчивается о том, что после крена корабля за счет смещения его ЦТ и поворота связанной с ним системы координат эти аппликаты уже не будут вертикальными координатами на линии расположения метацентра и ЦТ корабля (см. далее рис. 5). Тем самым читатель [7] вводится в заблуждение.

4. Вообще, на наш взгляд, не лишним было бы в задачах о крене корабля указывать, что крен – это поворот корабля (в плоскости мидель-шпангоута) и связанной с ним системы координат относительно Земной координатной системы (горизонтальные координаты которой обычно располагаются на невозмущенной поверхности водоема). Благодаря этому угол крена бывает полезно рассматривать как угол в плоскости мидель-шпангоута между осью z корабельной системы координат и вертикалью. Например, такая полезность проявилась при анализе цитаты из [7, с. 169] об аппликатах метацентра и ЦТ корабля.

Однако в литературе по статике корабля используется традиционное определение: *«В качестве угла крена рассматривают угол между осью Oy и следом ватерлинии на плоскости мидель-шпангоута»* [8, с. 8]. Такой подход к определению угла крена непреднамеренно сужает взгляд на ту или иную задачу и может ограничить возможности для её исследования. В силу процитированного традиционного определения угла крена угол между осью z корабельной системы координат и вертикалью воспринимается уже как вторичный, дополнительный к «традиционному» углу крена; как угол, организованный из вспомогательных геометрических построений. Ну а на самом деле он полностью равноправен углу *«между осью Oy и следом ватерлинии на плоскости мидель-шпангоута»*.

5. Вернемся к аппликатам метацентра и ЦТ корабля и еще раз обратимся к цитате из [7, с. 169], которая с нашей подачи приведена в отрыве от контекста, следующего за ней. То есть в [7, с. 169] процитированная нами фраза о неизменности аппликата метацентра и ЦТ корабля при *«при горизонтально-поперечном переносе груза»* выступает тезисом-утверждением, после чего сразу дается поясняющий контекст в привязке к рис. 1: *«Заметим, что перенос груза на расстояние AB можно представить как снятие груза из точки A и прием такого же груза в точку B . Приложив к судну в этих точках две равные, но противоположно направленные силы p , видим, что перенос*

груза приводит к образованию пары сил на плече $(y_2 - y_1)$, момент которой вызывает крен судна.»

Теперь пояснения сделаем мы. Действительно, предлагаемая в [7] расчетная схема о переносе груза кажется самой простой и поэтому удобной. Как следствие, она неизменно встречается в литературе по статике корабля. Наш комментарий к этой схеме будет сделан в следующем пункте 6. А пока лишь укажем, что поясняющий контекст в [7, с. 169], а также, например, в [1, с. 106; 2, с. 240; 5, с. 81, 82], следовало бы дополнить словами о том, что в данной расчетной схеме надо «считать, что переносимый груз остался на месте и что центр тяжести корабля тоже не изменил своего положения» [9, с. 291].

В [7] об этом ничего не сказано, но, видимо, негласно подразумевается. А для читателя, наоборот, утверждается, что происходит «снятие груза из точки A и прием такого же груза в точку B », т.е. «перенос груза на расстояние AB » [7, с. 169]. Тем самым читатель [7] вводится в заблуждение, оставаясь в неведении того, о чем подразумевается в предлагаемой расчетной схеме. Он должен полагаться на свою внимательность и самостоятельный, глубокий анализ данной схемы. Но отслеживать и разрешать все недомолвки и недоразумения (очевидно, непреднамеренные), заложенные в книгу, тем более, учебник, конечно, не просто. И поэтому удобная расчетная схема может оказаться не такой простой, как была воспринята при первом ознакомлении с ней.

Подразумеваемая же, «что переносимый груз остался на месте и что центр тяжести корабля тоже не изменил своего положения», в цитате-тезисе из [7, с. 169] как раз и полагается, что аппликата ЦТ корабля не получит приращения. Рассматриваемая расчетная схема до того, как корабль примет крен, показана на рис. 1, а корабля с креном – на рис. 2 (которого в [7] нет). Из рис. 2 видно, что ЦТ наклоненного корабля – точка приложения силы D – сохранил свое положение на оси z корабельной системы координат.

Поэтому, следуя использованной расчетной схеме, в цитате из [7, с. 169] правильно сказано, что «при горизонтально-поперечном переносе груза ... ни аппликата метацентра, ни аппликата центра тяжести не получают приращений». При этом, однако, умалчивается о том, что в отличие от расчетной схемы, в реальности ЦТ корабля будет смещенным с оси z . И, наоборот, говоря о том, «что перенос груза на расстояние AB можно представить как снятие груза из точки A и прием такого же груза в точку B », умалчивается о неизменности положения груза в точке A в принятой расчетной схеме.

6. Одна из причин софизма, заложенного в цитату-тезис из [7, с. 169] и поясняющий её контекст, заключается в том, что само описание расчетной схемы, представленной в настоящей статье и на рис. 1 и на рис. 2, не совсем конкретно. Действительно, «приложив к судну в этих точках (в точках A и B – наше примечание) две равные, но противоположно направленные силы p », не следует забывать, что в точке A сила $+p$ не исчезла.

То есть, если рассматриваемую расчетную схему пояснять либо рисунком 1 либо рисунком 2 более конкретно, то на этих рисунках должно быть сохранено в точке A изображение силы $+p$ – силы тяжести груза, направленной вниз так же, как это сделано и для силы D , не изменившей точки своего приложения в данной расчетной схеме. Но на рис. 1 и рис. 2 силы $+p$ в точке A нет. А не может её быть только в том случае, если в точке A не будет и силы $-p$, т.е. когда эти силы друг друга компенсируют. Изображая же на схеме силу $-p$, нужно не забыть и про силу $+p$, либо обе эти силы убрать с чертежа.

Обсуждаемая расчетная схема с переносом груза должна на чертеже выглядеть в одном из эквивалентных видов, представленных на рис. 3. Откуда видно, что на самом деле перенос груза **не** «приводит к образованию пары сил на плече ($Y_2 - Y_1$)», как это постулируется в [7, с. 169] или, например, в [2, с. 240]: «Перемещение груза на корабле по тому или иному направлению механически приводится к действию наклоняющей пары, изменяющей посадку корабля.» А в действительности «перенос груза приводит к образованию»

– либо пары сил на плече переноса груза с сохранением самой силы в исходной точке его расположения, т.е. в точке A (схемы «б» и «в» на рис. 3);

– либо силы в точке переноса груза, т.е. в точке B (схема «г» на рис. 3). При этом схема «д» не вполне эквивалентна схеме «г», поскольку момент создаваемый силой, приложенной к телу, – это лишь одна сторона проявления её воздействия на тело. Для исследования его равновесия необходимо рассматривать как равенство нулю суммы моментов сил, действующих на тело, так и равенство нулю суммы самих этих сил.

Рассматриваемую расчетную схему и её виды не следует путать с теоремой из теоретической механики о параллельном переносе силы [10, с. 37]: «силу, приложенную к абсолютно твердому телу, можно, не изменяя оказываемого ею действия, переносить из данной точки в любую другую точку тела, прибавляя при этом пару с моментом, равным моменту переносимой силы относительно точки, куда сила переносится.»

Действительно, пусть сила $+\vec{P}$ приложена в точке A тела (рис. 4). Тогда, если в точке B того же тела приложить две силы $+\vec{P}$ и $-\vec{P}$, уравновешивающие друг друга, то действие силы в точке A не изменится. То есть состояние равновесия или движения тела сохранится прежним. Но полученную систему трех сил можно рассматривать как силу $+\vec{P}$, приложенную теперь уже в точке B , и момент от пары сил: $+\vec{P}$ и $-\vec{P}$, первая из которых приложена в точке A , а вторая – в точке B .

Таким образом, в этой теореме говорится о том, что наряду с уже имеющейся силой $+\vec{P}$, действующей в точке A , к телу прикладывается в точке B уравновешенная система двух сил: $+\vec{P}$ и $-\vec{P}$. После чего тело остается в прежнем равновесии (движении).

А в расчетной схеме принято, что наряду с уже имеющейся силой $+\vec{P}$, действующей в точке A , к телу (кораблю) прикладывается *неуравновешенная* система сил – момент от пары сил: $-\vec{P}$ и $+\vec{P}$, начинающих действовать соответственно в точках A и B . После чего корабль не сможет сохранить равновесие. Для его восстановления к кораблю требуется приложить еще один момент – восстанавливающий, равный по модулю моменту от указанной пары, но противоположно направленный.

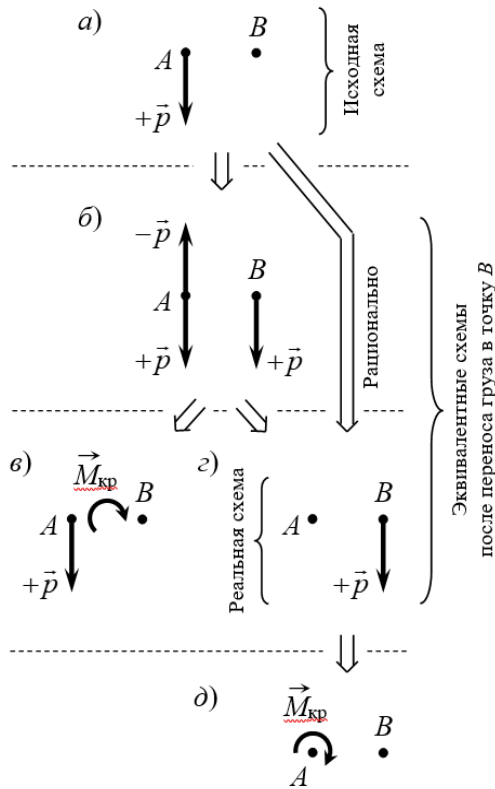


Рис. 3. Расчетные схемы при переносе груза из точки A в точку B .

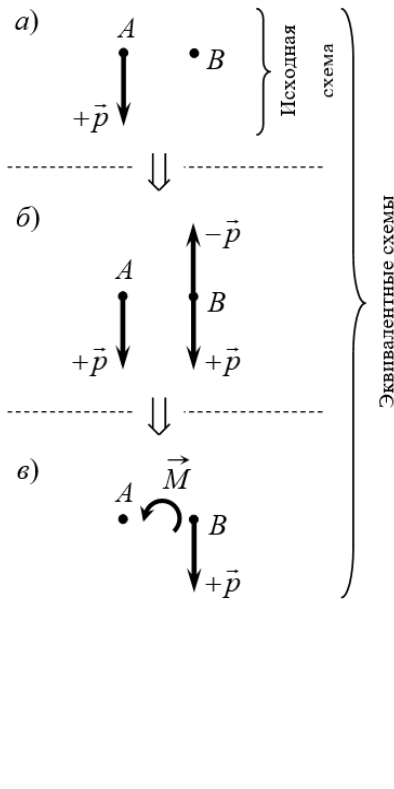


Рис. 4. Эквивалентные схемы к теореме о параллельном переносе силы

На схеме «в» $\overline{M_{кр}}$ – момент пары сил.
 На схеме «д» $\overline{M_{кр}}$ – момент силы относительно точки A .
 Момент пары сил и момент силы – это не одно и то же.

Отметим еще, что в процитированной теореме из теоретической механики и в рассматриваемой расчетной схеме точки A и B могут располагаться произвольно относительно друг друга. То есть отрезок $[AB]$ совсем не обязательно должен быть перпендикулярным к линиям действия сил, как показано на рис. 3 и рис. 4. В частности, если точка B лежит на линии действия силы, приложенной в точке A , то

– из теоремы получим следствие [10, с. 12]: «действие силы на абсолютно твердое тело не изменится, если перенести точку приложения силы вдоль линии её действия в любую другую точку тела»;

– а из рассматриваемой расчетной схемы получим иллюстрацию к задаче о вертикальном переносе груза на корабле. В этой иллюстрации также не надо забывать про изображение в точке A силы $+p$, чего не сделано, например, в [5, с. 80]. Если же это сделать, то наглядно будет видно, что перенос груза по вертикали формально эквивалентен процитированному следствию из теоремы, поскольку и в том, и в другом случае к абсолютно твердому телу прикладывается уравновешенная система двух сил (хотя и к разным точкам в разных случаях). Одновременно это значит, что согласно следствию из теоремы, положение корабля не изменится после вертикального переноса груза на нем. И это правильно утверждается во всех книгах по статике корабля.

Есть подозрение, что указанное формальное совпадение следствия из теоремы и расчетной схемы для вертикального переноса груза когда-то послужило одним из поводов для широкого распространения такого типа схем в решениях задач статики корабля. То есть, усматривая внешнюю схожесть теоремы о параллельном переносе силы (и следствия из неё) с задачей о переносе груза, было принято каждый раз в задачах статики корабля задействовать такой показательный прием из доказательства теоремы как приложение к телу двух противоположно направленных сил, равных по величине переносимой силе. С тех пор этот прием в неизменном виде (обычно неконкретном, о чем шла речь в настоящем пункте **6**) перетекает автоматически из одного издания по статике корабля в другое.

А на самом деле, в этом приеме совершенно нет необходимости. Он излишний, по крайней мере, в задаче о переносе груза на корабле, которая как раз и похожа на теорему о переносе силы. И даже, наоборот. Как только что можно было убедиться, этот прием своими совсем ненужными действиями по приложению к телу (кораблю) дополнительных сил лишь запутывает процесс решения задачи, уведит от рационального подхода к ней.

Вместо этого приема с приложением к кораблю дополнительных сил гораздо проще, гораздо удобнее, гораздо реалистичнее от исходной схемы «а» на рис. 3 сразу перейти к схеме «г». Надо, следуя физике задачи, просто перенести груз и его силу тяжести из точки А в точку В. И всё – никаких дополнительных сил вводить не надо. Перенесенная в точку В сила создаст кренящий момент (3), который вызовет крен корабля на угол (5).

Однако, чтобы решение задачи по схеме «г» из рис. 3 было действительно простым, изящным и, главное, практичным, потребуется раскрыть еще одну особенность этой задачи. Особенность, хотя и является ключом к решению, в известной нам литературе по статике корабля обходится стороной. Это является другим поводом к использованию в литературе расчетной схемы «б» или «в» из рис. 3 при переносе груза на корабле. Раскрытию указанной особенности и решению задачи по схеме «г» (рис. 3) будет посвящена наша отдельная статья. А здесь не будем более задерживать внимание читателя и продолжим следовать основной теме настоящей статьи – об остойчивости наклоненного корабля.

7. Заметим, что наряду с (1) новую метацентрическую высоту h_2 можно выразить еще через величину смещения ЦТ корабля или через вес и плечо переносимого груза. В первом случае из рис. 2 несложно определить

$$h_2 = \frac{\Delta y_G}{\sin \theta}, \quad (6)$$

где $\Delta y_G = |G_1 G_2|$ – смещение ЦТ корабля (параллельно палубе). Если корабль имел изначально несмещенный ЦТ, то $\Delta y_G = y_{G_2}$ – ордината смещенного ЦТ корабля.

Для второго случая нужно воспользоваться следствием из теоремы Вариньона: если одно из тел, составляющих систему, переместится в каком-либо направлении, то центр тяжести всей системы переместится в том же направлении на расстояние, пропорциональное отношению веса тела к весу системы. Таким образом, перемещение груза вдоль оси y приведет к перемещению ЦТ корабля вдоль той же оси на расстояние

$$\Delta y_G = \frac{p}{D} (y_A - y_B). \quad (7)$$

Тогда из (6)

$$h_2 = \frac{p}{D} \frac{l_y}{\sin \theta}. \quad (8)$$

Следовательно, если знать вес и плечо перемещаемого груза и измерить угол крена, вызванный этим перемещением, то по формуле (8) можно быстро рассчитать метацентрическую высоту наклоненного корабля заданного водоизмещения. Другими словами, высота h_2 легко (в теории) определяется из опыта кренования.

Что же касается самого опыта кренования, то изначальная его цель состоит в определении высоты h_1 , которая согласно (2), (3), (4) рассчитывается по формуле

$$h_1 = \frac{P}{D} \frac{l_y}{\operatorname{tg} \theta}. \quad (9)$$

Чтобы повысить точность опыта его выполняют несколько раз на правый и на левый борт. Результаты опыта потом обрабатывают по методу наименьших квадратов [8, с. 113].

Пусть на корабле с прямой посадкой груз перенесен на правый борт и, замерив угол крена, по (9) рассчитана величина h_1 . Наклоненный корабль имеет теперь метацентрическую высоту h_2 (рис. 5). Вернем груз обратно. Сейчас целесообразно уточнить – если во втором опыте снова воспользоваться формулой (9), то высота h_1 или h_2 будет по ней рассчитана? То есть, продельвая опыт кренования несколько раз, находим ли мы среднее значение из величин h_1 , или среднее значение из совокупности величин h_1 и h_2 ?

Анализируя формулу (9) и рис. 6, где изображено равновесие корабля после обратного переноса груза, видим, что величина pl_y в этом случае есть кренящий момент.

Если плечо $l_\theta = |G_2G_1|$ восстанавливающего момента выразить через метацентрическую высоту h_2 , то традиционно так же, как и в (4), будем иметь $M_{\text{вост}} = Dl_\theta = Dh_2 \sin \theta$. И тогда из (2) получится формула (8) для расчета высоты h_2 . Если вспомнить вывод формулы (8) из (6), то будет понятно, что она справедлива при произвольном изменении величины pl_y в рамках начальной остойчивости. Но сейчас, применительно к рис. 6, под величиной pl_y следует иметь в виду конкретный кренящий момент, возвращающий кораблю исходную прямую посадку.

Обращаясь опять к формуле (9), заметим, что в отличие от (8) при том же конкретном значении pl_y кренящего момента в ней присутствует функция $\operatorname{tg} \theta$, но не $\sin \theta$. А для того, чтобы плечо l_θ выразить через $\operatorname{tg} \theta$, эту тригонометрическую функцию нужно умножить именно на величину h_1 , что видно из рис. 6. Следовательно, продельвая опыт кренования несколько раз и используя при этом формулу (9), мы всегда рассчитываем по ней метацентрическую высоту h_1 .

Отметим еще, что возвращение груза на штатное место можно рассмотреть как его горизонтальное перемещение и дальнейший подъем вертикально вверх. Из сказанного в пункте 1 понятно, что горизонтальное перемещение несколько увеличит высоту h_2 . А последующий вертикальный подъем груза вверх уменьшит ее до значения h_1 .

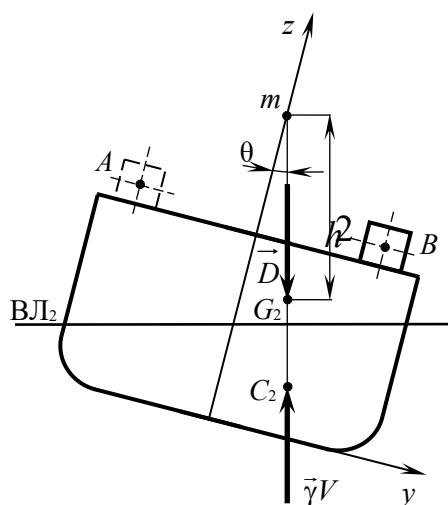


Рис. 5. Равновесие корабля после перемещения груза с его штатного места

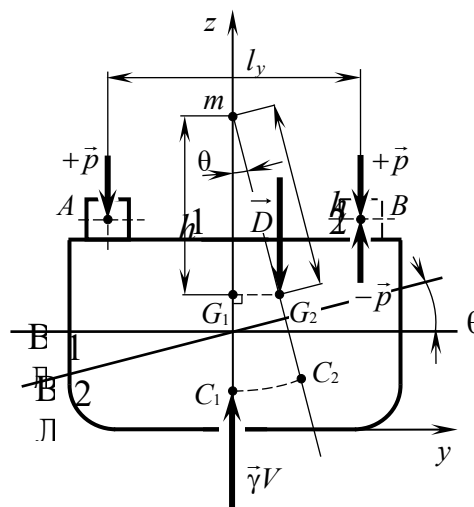


Рис. 6. Равновесие корабля после возвращения груза на его штатное место

8. Здесь попутно следует сделать небольшое уточнение, касающееся использования терминов «горизонтальное поперечное» и «горизонтальное продольное» перемещение груза, которые есть, например, в [3,4,5,7,8]. Уточнение будет относиться и к термину-синониму о перемещении груза, поперечном или продольном, «параллельно плоскости ватерлинии», который есть, например, в [2, с. 238].

Если сказать как в учебнике [7, с. 169], что «при горизонтально-поперечном переносе груза ... остойчивость не изменится», то может последовать естественный вывод: сколько бы раз груз не переносили на корабле горизонтально с борта на борт, его остойчивость не изменится. В действительности же каждое горизонтальное, т.е. параллельное плоскости ватерлинии, перемещение груза приводит к некоторому понижению ЦТ корабля и, как следствие, к увеличению его метацентрической высоты (в рамках начальной остойчивости). Если даже при каждом таком перемещении груза корабль наклоняется на малые углы так, что изменением остойчивости от каждого перемещения можно пренебречь, то в результате достаточно большого количества таких перемещений груза, он может оказаться глубоко в трюме. А это эквивалентно опусканию груза с верхней палубы вниз. Любое же перемещение груза вниз остойчивость корабля увеличивает (см., например, [7, с. 169]).

Понятно, что практически осуществить большое количество горизонтальных перемещений груза может оказаться сложно, так как для этого на каждом горизонтальном уровне нужно иметь место для фиксации груза. Но, тем не менее, всегда следует понимать, какой смысл вкладывается в термины «горизонтально-поперечное (горизонтально-продольное) перемещение» и «поперечное (продольное) перемещение вдоль палубы (по палубе, параллельно палубе)». Так, в опыте кренования, уместнее говорить не о горизонтально-поперечном перемещении грузов, а об их поперечных перемещениях по палубе.

9. В добавление к формулам (1), (6), (8), определяющим метацентрическую высоту h_2 , дадим еще одно выражение для этой величины. В авторитетном справочнике [8, с. 83] указано, что после переноса груза в произвольном направлении (необязательно параллельно палубе) метацентрическая высота примет значение

$$h_2 = h_1 + \Delta y_G \sin \theta - \Delta z_G \cos \theta, \quad (10)$$

Δz_G – смещение ЦТ корабля за счет вертикального перемещения груза. Если груз перенесен только по горизонтали ($\Delta z_G = 0$), то [8, с. 84]

$$h_2 = h_1 + \Delta y_G \sin \theta. \quad (11)$$

В этой формуле, скорее всего, подразумевается, что при крене корабля высота h_1 поворачивается вокруг метацентра как радиус окружности, по которой как будто бы смещается ЦТ корабля (см. рис. 2). Такое вращение вокруг метацентра приемлемо для метацентрического радиуса, так как при малых наклонениях корабля можно принять, что центр величины перемещается по дуге окружности [8, с. 51] – об этом говорилось в пункте 2. Но для метацентрической высоты, как видно из того же рис. 2, точнее было бы записать

$$h_2 = h_1 \cos \theta + \Delta y_G \sin \theta.$$

При этом нельзя сказать, что поскольку для малых углов крена $\cos \theta \approx 1$, то косинус в (11) был упущен. Если бы это было так, то косинуса не было бы и в (10) множителем при Δz_G . Но в (10) косинус при Δz_G учтен, а при h_1 почему-то отсутствует.

Но сам факт существования в [8] формул (10), (11) является неявным признанием того, что авторы настоящей статьи не одиноки в своем мнении об увеличении начальной остойчивости корабля за счет смещения его ЦТ параллельно палубе.

О том, что остойчивость такого корабля изменилась, хотя и мало, сказано также в [9, с. 292, 293]. Однако в этой книге изменение метацентрической высоты не называется конкретно её увеличением.

10. Выйдем ненадолго за рамки начальной остойчивости. Это повлечет за собой обращение к диаграмме статической остойчивости.

В учебнике [7, 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 [5, 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, приведенные процитированные положения (и аналогичные им в других учебниках и справочниках по теории корабля) могут еще более усугубить путаницу в мыслях и сбить с толку внимательного читателя.

Во-первых, если раньше в этих книгах утверждалось, что перемещение груза по палубе корабля не изменяет его начальной остойчивости (см. об этом пункт 1). То теперь, при увеличении крена корабля до произвольных углов, оказывается, что остойчивость корабля все же изменяется. При этом никаких оснований для скачкообразной смены остойчивости при переходе от малых углов наклона корабля к большим ни в каких книгах, конечно, не содержится. Последнее естественно, поскольку таких оснований объективно нет. И как выяснилось в предыдущих пунктах настоящей статьи, даже при малых наклонениях корабля за счет смещения его ЦТ

параллельно палубе метацентрическая высота соответственно мало, но тоже изменяется. Тем самым существует естественная преемственность в изменении остойчивости при наклонении корабля от малых углов к большим.

В этом аспекте существует еще одна полезность соотношения (1), которым теория начальной остойчивости обычно пренебрегает, считая различие между высотами h_2 и h_1 величиной излишнего порядка малости (см. об этом пункт 2).

Во-вторых, процитированные положения вступают в противоречие с нашими доводами. Как выяснилось в настоящей статье, если у корабля с прямой посадкой немного сместить ЦТ параллельно палубе, то его метацентрическая высота увеличится (и существует 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 в настоящем пункте 10 положения из [7,5], 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 [7,5] 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?

Раскроем интригу этого вопроса в последующих наших публикациях по данной теме.

11. А из настоящей статьи уже видно, что традиционное изложение решения задачи о переносе груза по палубе корабля лишь на первый взгляд кажется простым и быстрым – в часто цитируемом нами учебнике [7] оно занимает всего лишь один абзац примерно на треть страницы. Но оказывается, что это простое решение влечет за собой массу моментов для обсуждения и уточнения. Закономерно регламентируемый объем статьи в настоящем журнале не смог бы вобрать в себя все наши заметки к рассматриваемой интересной задаче, поэтому их продолжение следует (в будущих наших публикациях по этой теме).

В данном пункте **11** отметим еще, что список использованной литературы к данной статье был составлен лишь из тех источников, которые были у нас под рукой. Наши критические заметки к положениям из этих книг совсем не означают, что эти книги неправильные и поэтому теперь недостойны внимания. В том числе, это касается и учебника [7], в основном, на примере которого в настоящей статье проводился анализ задачи о переносе груза на корабле. Наоборот, цитированные выше книги написаны достаточно добротнo, наглядно, информативно. А наши заметки направлены на то, чтобы последующие издания по статике корабля были еще лучше для будущих читателей.

Также надеюсь, что прочитав наши заметки, читатель сможет более осмысленно подойти к задаче о переносе груза на корабле, изложенной в книгах, не указанных нами.

И в качестве справочной информации сообщим, что совокупный тираж

• последних двух изданий учебника [1] составил 13 600 экз. (издание 1976 г. – 7 600 экз.;

издание 1973 г. – 6 000 экз.);

• двух изданий учебника [2] – 11 500 экз. (1959 г. – 6 500 экз., 1972 г. – 5 000 экз.);

- четырех изданий учебника [3] – 23 500 экз. (1961 г. – 5 000 экз., 1967 г. – 4 000 экз., 1974 г. – 5 000 экз., 1982 г. – 9 500 экз.).

Если же говорить об учебнике [7], то в 1964 г. он был издан тиражом 7 500 экз., а в 1976 г. – 18 500 экз. Но существуют еще книги

Кацман Ф.М., Дорогостайский Д.В. Теория судна и движителя. – Л.: Судостроение, 1979. – 280 с. (тираж 11 300 экз.),

Теория и устройство судов / Ф.М. Кацман, Д.В. Дорогостайский, А.В. Коннов, Б.П. Коваленко. – Л.: Судостроение, 1991. – 416 с. (тираж 8 000 экз.),

которые не вошли в наш список использованной литературы и которые в части теории корабля близки к [7]. Так что процитированные нами фразы из [7] разошлись общим тиражом 45 300 экз., что для учебника по специальной дисциплине, наверное, не так уж и мало.

12. Везде выше в статье рассматривалось поведение корабля при малых углах крена. Укажем, что все полученные результаты справедливы и для малых углов дифферента, поскольку в этом случае теория начальной остойчивости имеет аналогичное содержание.

Заключение

Если плавающее тело имеет круговые обводы, то углы крена могут быть и не малыми [1, с. 163]. Значительный крен можно рассматривать также у тел с прямостенными бортами [8, с. 52] (в пределах этой прямобортности). Исследование поведения таких специальных тел на воде имеет самостоятельный интерес, и для них наши заметки применимы в большей мере, чем для традиционных водоизмещающих судов.

Но и для последних теория начальной остойчивости имеет важное значение и поэтому приведена во всех книгах по статике корабля. С учетом этого, полагаем, что наши уточнения по *теории* начальной остойчивости корабля будут нести некоторую разъяснительную пользу. Тем самым свидетельствуя о том, что эта *теория* является «живой» наукой – в ней сохраняются дискуссионные вопросы, и она продолжает развиваться.

А с точки зрения *практических* расчетов остойчивости наши уточнения обычно не играют большой роли, поскольку изменение метацентрических высот при малых наклонах корабля очень мало. За исключением указанных специальных тел метацентрической формулой поперечной начальной остойчивости, т.е. формулой (4), практически пользуются до углов крена корабля, не превышающих 20° [8, с. 52], но не более «углов входа в воду верхней палубы у борта или выхода из воды скулы судна» [7, с. 166].

Но все же рамки применимости теории начальной остойчивости устанавливаются для каждого судна индивидуально. Так, у морских «танкеров и сухогрузов с большой начальной остойчивостью» углы крена для этой теории могут достигать 30° [6, с. 10]. Для крена 30° высота h_2 будет больше высоты h_1 согласно (1) в 1,155 раза (или на 15,5%). А если рассматривать более умеренный и более отвечающий теории крен в 20° , то согласно (1) высота h_2 будет больше высоты h_1 лишь в 1,064 раза (или на 6,4%), что можно считать незначительным для практики расхождением. Полагая же, что при малых углах крена $\sin \theta \approx \theta$ и $\operatorname{tg} \theta \approx \theta$, видим, что различие между формулами (8) и (9) исчезает (если не принимать во внимание, что тангенс квазилинеен до больших углов по сравнению с синусом).

Поэтому данная наша статья имеет более методический характер. Это отражено в её названии, которое начинается со слов «Методические заметки». И отправной посыл

к её написанию в основном замыкался на методику изложения студентам задачи о перемещении груза на корабле. Нам представляется, что лучше все-таки не говорить, что вследствие поперечного и продольного перемещения груза на корабле его начальная остойчивость не изменяется – см. цитаты из учебников в пункте 1. А уместнее отметить, что изменение остойчивости происходит. Однако при малых наклонениях корабля этим изменением практически можно пренебречь, где акцент сделать на слове «практически».

Список литературы

1. Семенов-Тянь-Шанский В.В. Статика и динамика корабля. Л.: Судпромгиз, 1960. 576 с.
2. Алферьев М.Я. Теория корабля. М.: Транспорт, 1972. 448 с.
3. Лесюков В.А. Теория и устройство судов внутреннего плавания. М.: Транспорт, 1982. 303 с.
4. Мирохин Б.В., Жинкин В.Б., Зильман Г.И. Теория корабля. Л.: Судостроение, 1989. 352с.
5. Сизов В.Г. Теория корабля. О.: Фенікс; М.: ТрансЛит, 2008. 464 с.
6. Аксютин Л.Р. Контроль остойчивости морских судов. Одесса: Фенікс, 2003. 178 с.
7. Дорогостайский Д.В., Жученко М.М., Мальцев Н.Я. Теория и устройство судна. Л.: Судостроение, 1976. 416 с.
8. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 2. Статика судов. Качка судов / Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 440 с.
9. Власов В.Г. Собрание трудов: В семи томах. Том 6. Л.: Судпромгиз, 1961. 412 с.
10. Тарг С.М. Каткий курс теоретической механики. М.: Высш. шк., 1995. 416 с.

References

1. Semenov-Tyanshanskii V.V. Statika i dinamika korablya [Statics and dynamics of the ship]. L.: Sudpromgiz, 1960. 576 p. (In Russ.).
2. Alfer'ev M.Ya. Teoriya korablya [Theory of the ship]. M.: Transport, 1972. 448 p. (In Russ.).
3. Lesyukov V.A. Teoriya i ustroistvo sudov vnutrennego plavaniya [Theory and design of inland navigation vessels]. M.: Transport, 1982. 303 p. (In Russ.).
4. Mirokhin B.V., Zhinkin V.B., Zil'man G.I. Teoriya korablya [Theory of the ship]. L.: Sudostroenie, 1989. 352 p. (In Russ.).
5. Sizov V.G. Teoriya korablya [Theory of the ship]. O.: Feniks, 2008. 464 p. (In Russ.).
6. Aksyutin L.R. Kontrol' ostoichivosti morskikh sudov [Control of stability of sea vessels]. Odessa: Feniks, 2003. 178 p. (In Russ.).
7. 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.).
8. Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomakh. Tom 2. Statika sudov. Kachka sudov [Handbook 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.).
9. Vlasov V.G. Sbranie trudov: V semi tomakh. Tom 6 [Collected works: In seven volumes. Volume 6]. L.: Sudpromgiz, 1961. 412 p. (In Russ.).
10. Targ S.M. Katkii kurs teoreticheskoi mekhaniki [A short course in theoretical mechanics]. M.:Vyssh. shk., 1995. 416 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.

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

Алексеева, 603950, г. Нижний Новгород, ул.
Минина, д. 24, 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 28.05.2023; опубликована онлайн 20.09.2023.
Received 28.05.2023; published online 20.09.2023.