

В. Ф. Очков,

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва,

А. В. Соколов,

лицей № 1502 при Московском энергетическом институте

КАК ВЫ КОРАБЛЬ РАССЧИТАЕТЕ И НАЗОВЕТЕ, ТАК ОН И ПОПЛЫВЕТ

Аннотация

В статье обсуждаются вопросы расчета устойчивого плавания судов в пресной и морской воде на основе рассмотрения сил, действующих на судно. Предложена лабораторная работа, охватывающая физику, математику и информатику.

Ключевые слова: остойчивость судна, центр масс, центр водоизмещения, закон Архимеда, пресная вода, морская вода, плотность воды.

Контактная информация

Очков Валерий Федорович, доктор тех. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва; *адрес:* 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14; *телефон:* (495) 362-71-71; *e-mail:* ochkov@twi.mpei.ac.ru

Соколов Алексей Викторович, учитель физики и астрономии лицея № 1502 при Московском энергетическом институте, г. Москва; *адрес:* 111555, г. Москва, ул. Молостовых, д. 10А; *телефон:* (495) 307-11-61; *e-mail:* av_sokol_1502@mail.ru

V. F. Ochkov,

National Research University MPEI, Moscow,

A. V. Sokolov,

Lyceum 1502, Moscow

A SHIP WILL SAIL THE WAY YOU CALCULATED AND NAMED IT

Abstract

The article discusses the calculation of sustainable ships in fresh and seawater based on reviewed the forces acting on the ship. A laboratory work, covering physics, mathematics and informatics is given.

Keywords: ship stability, center of gravity, center of buoyancy, Archimedes' principle, fresh water, seawater, density of water.

Первый автор этой статьи работает в Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (www.iarpws.org). Ее члены каждый год собираются в различных городах

мира, тесно связанных с водой¹. В 2014 году, например, такая встреча проходила в Москве², а заключительный банкет, без которого не обходится ни одно научное мероприятие, состоялся на борту теплохода, курсировавшего под стенами Кремля. В 2015 году такая встреча была в Стокгольме, а финальный банкет прошел в музее легендарного шведского парусного корабля «Ваза», который был спущен на воду в 1628 году и сразу... затонул. В 1961 году корабль был поднят, законсервирован, подвергнут реставрации и в настоящее время экспонируется в специально построенном для него музее (рис. 1).



Рис. 1. Реставрированный корабль «Ваза»

Но встречи в рамках Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара, конечно, состоят не только из банкетов. Приходится и работать — рассматривать и утверждать документы, описывающие порядок расчета свойств этой важной субстанции [4]. Эти *формуляции* становятся стандартами для всех стран и по ним выпускаются справочники, создаются программы для компьютеров. Российский подобный справочник [1] примечателен тем, что он дополнен сайтами Интернета с открытыми интерактивными сетевыми расчетами свойств воды и водяного пара. На рисунке 2 отображен один из таких интернет-расчетов, по которому можно определить плотность морской воды в зависимости от ее температуры, давления и солености.

¹ Почти все поселения мира возникали на берегах рек, озер, морей, океанов. Эти водоемы не разделяют людей, а, наоборот, дают им удобные пути сообщения.

² В названии российской столицы, по одной из легенд, присутствует вода: МоскВА — аКВА.

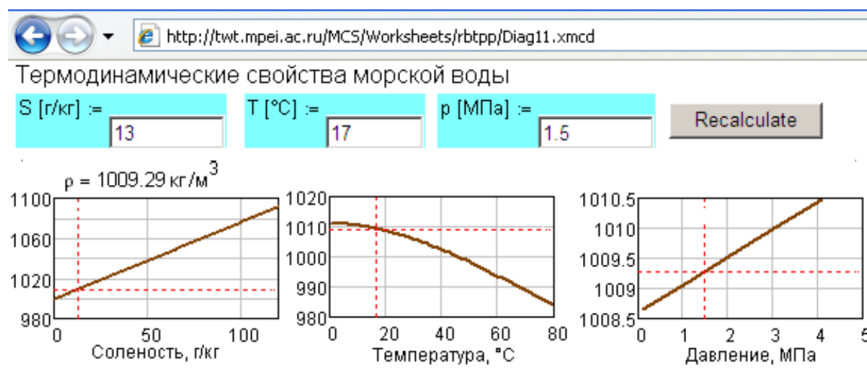


Рис. 2. Сайт, на котором можно оценить плотность морской воды

Интернет-расчет, показанный на рисунке 2, вспомнился автору, когда он сидел на банкете в стокгольмском музее у борта этого незадачливого судна (рис. 1). И вот почему.

По одной из версий³, опрокидывание корабля «Ваза» произошло из-за того, что не было принято во внимание изменение плотности воды при выходе корабля из пресноводного залива в соленое открытое море. Более плотная вода приподняла корабль, порыв ветра накренил его и вода через открытые пушечные люки хлынула в трюмы...

Так это было или иначе, можно спорить, но то, что тут проявила себя некая инженерная ошибка, связанная с неправильными расчетами, — факт бесспорный.

Давайте посмотрим, как можно применить пакет Mathcad для оценки нашей гипотезы.

В качестве модели судна возьмем деревянный брусок в виде параллелепипеда со сторонами 10 мм (ширина «палубы» — переменная u), 30 мм (высота судна — $в$) и 250 мм (длина — $д$) (рис. 3, слева). Это упрощение не так уж далеко от жизни: реальные современные суда имеют почти прямоугольные центральные поперечные сечения (см. рис. 3, справа), и только нос и корма сделаны заостренными для уменьшения сопротивления воды при движении.

³ Есть «филологическая» версия этого кораблекрушения. Для европейского уха «Ваза» — это в первую очередь не королевская династия и не корабль, названный в ее честь, а... сосуд для хранения чего-то. Одна из разновидностей вазы — это тазик, только сделанный не из металла, а из стекла или фарфора: ваза не для цветов, а для фруктов. Вспомним название статьи и английскую народную песенку в переводе С. Маршака «Три мудреца в одном тазу пустились по морю в грозу...» Истинно сказано: как корабль назовешь, так он и поплывет.

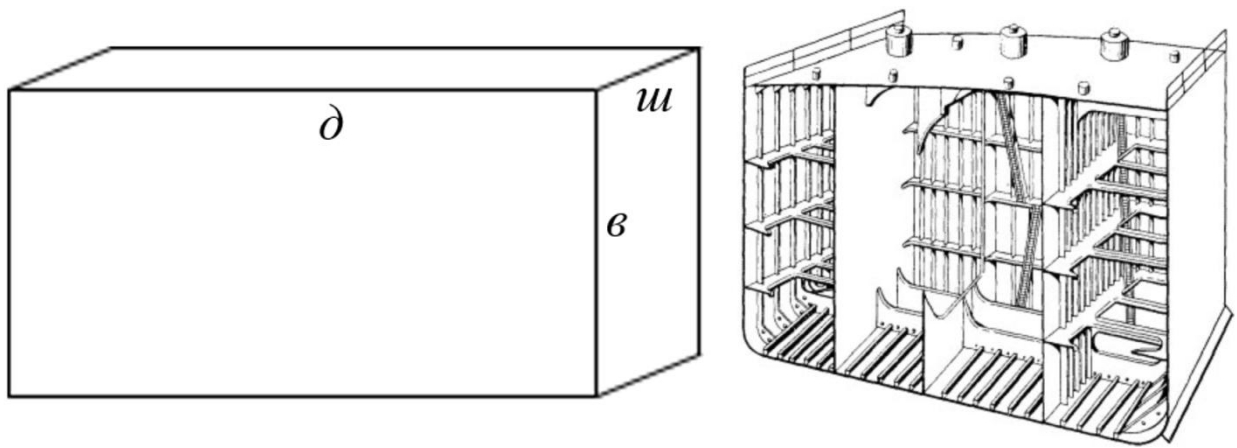


Рис. 3. Модель судна и центральная секция реального судна

Поместим нашу модель судна в воду таким образом, чтобы стороны 10 мм ($ш$) и 250 мм ($д$) образовывали палубу и днище нашего «судна», а сторона 30 мм ($в$) — высоту от днища до палубы. Жизненный опыт показывает, что такое положение деревянного бруска в воде не будет устойчивым (см. рис. 4, слева); сила F_T (сила тяжести, приложенная к центру масс) и сила F_A (выталкивающая сила Архимеда, приложенная к центру водоизмещения, к центру объема жидкости, вытесненной плавающим телом) развернут наше «судно», и оно ляжет набок.

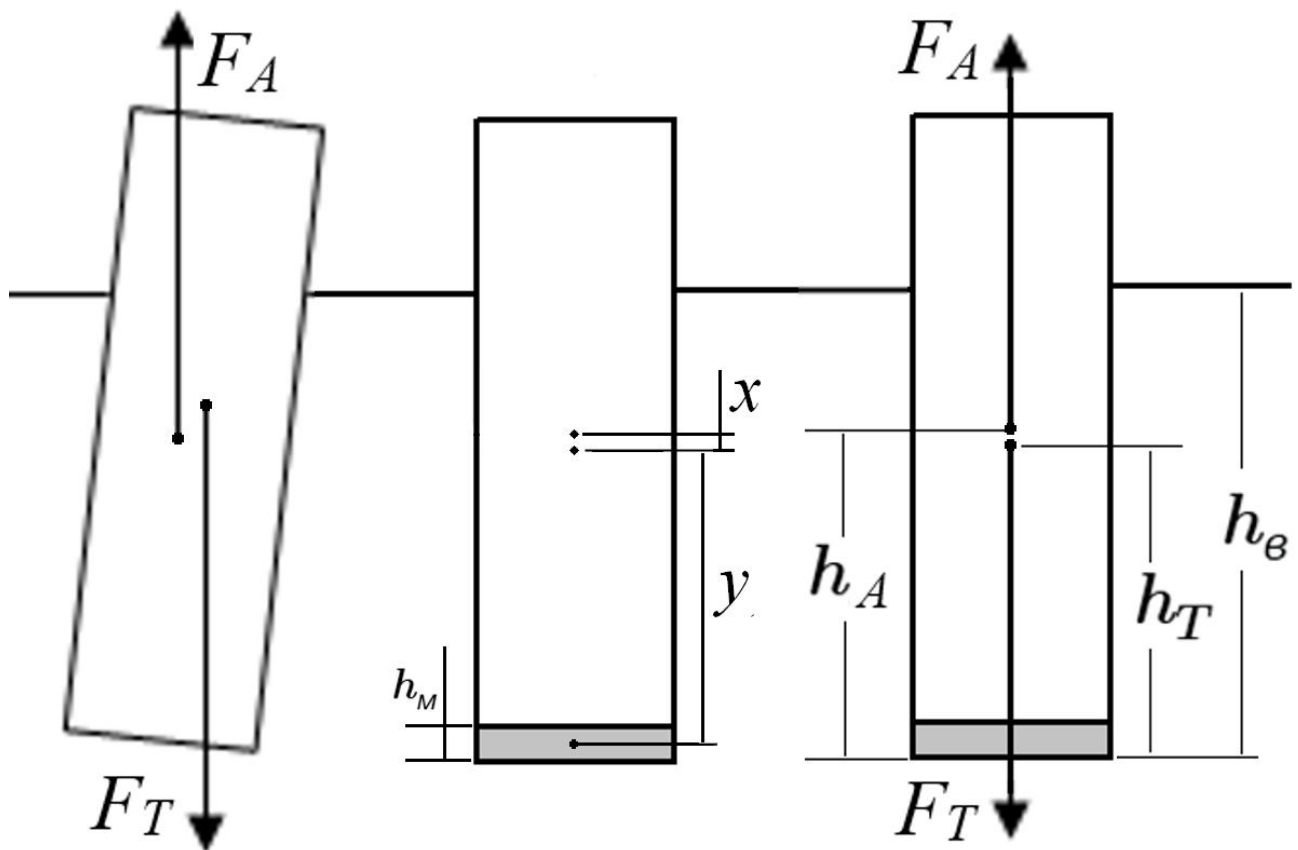


Рис. 4. Силы, действующие на «судно»

(слева — без балласта, справа — с балластом)

Объясняется это тем, что центр масс оказался выше центра водоизмещения, и при любом малом отклонении такого «судна» от положения равновесия оно под действием пары сил перевернется. Но это условие необходимое, но не достаточное, и мы это еще отметим ниже.

Для снижения точки расположения центра масс давайте немного состругаем рубанком днище «судна» и приклеим туда металлическую полоску толщиной h_M . Это будет тот самый балласт, который должен удерживать «судно» от опрокидывания (см. рис. 4, центр и справа). Парусные военные корабли строились высокими, чтобы пушки стреляли дальше и сподручнее было брать на бордаж вражеские корабли. Без довольно массивного балласта такой корабль не удержался бы на плаву даже без поднятых парусов.

Проанализируем устойчивость (*остойчивость*, как говорят профессионалы [3]) нашего «судна» с помощью пакета Mathcad (рис. 5).

$$\left\| \begin{array}{l} \text{“Вес вытесненной воды”} \\ \text{“Объем подводной части”} \cdot \rho_B \cdot g \\ h_e \cdot \omega \cdot \varrho \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{l} \text{“Вес судна”} \\ m \cdot g \end{array} \right\| \xrightarrow{\text{solve, } h_e} \frac{m}{\omega \cdot \varrho \cdot \rho_B}$$

$$\left[\begin{array}{l} x \cdot m_D = y \cdot m_M \\ h_T = \frac{h_M}{2} + y \\ h_M + \frac{\varrho - h_M}{2} = \frac{h_M}{2} + x + y \end{array} \right] \xrightarrow{\text{solve, } \begin{bmatrix} x \\ y \\ h_T \end{bmatrix}} \left[\begin{array}{l} \frac{\varrho \cdot m_M}{2 \cdot m_D + 2 \cdot m_M} \quad \frac{\varrho \cdot m_D}{2 \cdot m_D + 2 \cdot m_M} \quad \frac{\varrho \cdot m_D + m_D \cdot h_M + h_M \cdot m_M}{2 \cdot m_D + 2 \cdot m_M} \end{array} \right]$$

Рис. 5. Вывод формул для расчета высоты центра водоизмещения (h_e) и центра масс (h_T)

Высоту центра водоизмещения (центра объема жидкости, вытесненной плавающим телом) определить несложно через закон Архимеда — см. верхний оператор на рисунке 5, где уравнение (вес вытесненной воды равен весу судна) решается относительно переменной h_e . Для определения центра масс нужно решить уже не одно уравнение, а целых три — см. нижний оператор на рисунке 5. Вот эти уравнения:

- Произведение массы деревянной части судна m_D на расстояние от ее центра до центра масс всего судна (x) равно произведению массы металлической части судна m_M на расстояние от ее центра до центра масс всего судна (y) — см. рис. 4, центр.
- Высота центра масс судна h_T равна половине высоты балласта h_M плюс значение y .
- Высота центра масс деревянной части судна h_D вычисляется двумя способами: $h_M + (\varrho - h_M)/2$ и $h_M/2 + x + y$.

Мы могли бы формулу для h_T вывести вручную, но, имея под рукой пакет Mathcad,

можно автоматизировать эту работу, составив балансы крутящих моментов (первое уравнение) и расстояний (два вторых уравнения).

На рисунке 6 показан расчет остойчивости судна с балластом в пресной воде ($\rho = 1 \text{ г/см}^3$) с использованием формулы для h_T , выведенной на рисунке 5. Высота h_A (13.55 мм) оказалась больше высоты h_T (13.313 мм). Наше «судно» с балластом будет держаться вертикально — пара сил будет возвращать его в исходное положение при небольших отклонениях от вертикали. Но это равновесие неустойчивое (локальная потенциальная яма) — при сильном отклонении судна от вертикали оно все-таки ляжет набок.

$$\begin{aligned}
 & \omega := 10 \text{ мм} \quad \varepsilon := 30 \text{ мм} \quad \partial := 250 \text{ мм} \quad h_M := 0.5 \text{ мм} \\
 & \rho_w := 1.0 \frac{\text{гм}}{\text{см}^3} \quad \text{Плотность воды} \\
 & \rho_d := 0.8 \frac{\text{гм}}{\text{см}^3} \quad \text{Плотность дерева} \\
 & \rho_m := 7 \frac{\text{гм}}{\text{см}^3} \quad \text{Плотность металла} \\
 & m_M := \omega \cdot \partial \cdot h_M \cdot \rho_m = 8.75 \text{ гм} \quad m_d := \omega \cdot \partial \cdot (\varepsilon - h_M) \cdot \rho_d = 59 \text{ гм} \\
 & m := m_M + m_d = 67.75 \text{ гм} \\
 & h_w := \frac{m}{\omega \cdot \partial \cdot \rho_w} = 27.1 \text{ мм} \\
 & h_T := \frac{\varepsilon \cdot m_d + m_d \cdot h_M + h_M \cdot m_M}{2 \cdot m_d + 2 \cdot m_M} = 13.313 \text{ мм} \quad h_A := \frac{h_w}{2} = 13.55 \text{ мм}
 \end{aligned}$$

Рис. 6. Расчет остойчивости судна с балластом в пресной воде

Давайте будем постепенно повышать плотность воды (выводить наше «судно» из пресноводной гавани в открытое море) и смотреть, что с ним произойдет. Для этого введем в расчет функцию с именем Δ (разность h_A и h_T) и с аргументом ρ_w , построим ее график и рассчитаем значение плотности воды, где эта функция поменяет знак — где силы h_A и h_T начнут переворачивать наше «судно» (рис. 7).

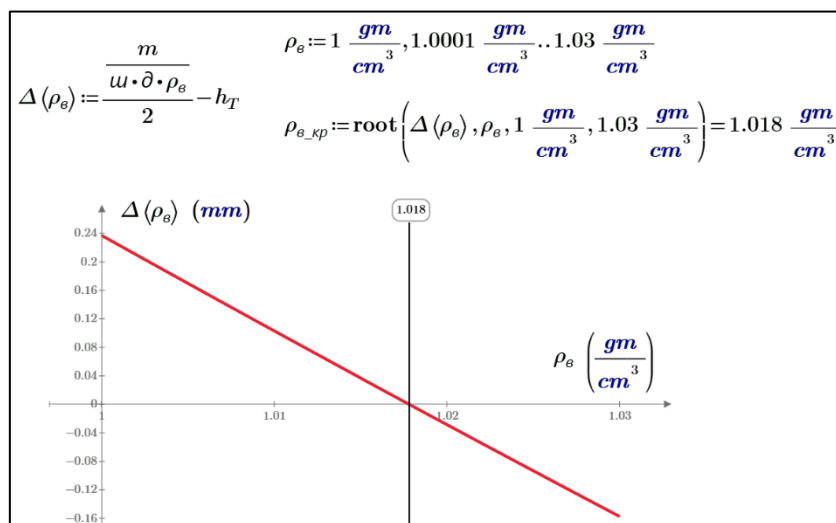


Рис. 7. График остойчивости судна в зависимости от плотности воды

Есть легенда о том, как древние русичи спаслись от набега викингов — предков строителей корабля «Ваза». Когда эти морские разбойники поднялись по реке на своих ладьях к поселению русичей и в полном вооружении приготовились к высадке на берег, русичи стали высыпать в воду из мешков самое дорогое, что у них было, — соль. Плотность воды в реке увеличилась, ладьи викингов потеряли устойчивость и перевернулись. Викинги частью потонули, а частью были взяты в плен.

Эту легенду авторы придумали при работе над статьей. Но она с точки зрения физики и математики ничем не хуже древнегреческой легенды о том, как был сожжен вражеский флот с помощью зеркал, сфокусировавших солнечные лучи на деревянных кораблях [2].

Но если говорить серьезно, то можно предложить такую **лабораторную работу**.

Изготавливается «судно» в виде линейки, сложенной из деревянной и металлической реек (см. рис. 4, центр и справа). Такой «линейный корабль» спускается на воду — опускается в емкость с водой. При этом «судно» спроектировано так (см. рис. 6), что оно устойчиво держится вертикально в пресной воде. Затем в воду начинают подсыпать поваренную соль, аккуратно перемешивают воду и следят, когда «судно» начнет... заваливаться набок.

Затем можно будет нагревать этот водный раствор и смотреть, как судно будет возвращаться к первоначальному вертикальному положению за счет того, что водный раствор с более высокой температурой имеет меньшую плотность (см. центральный график на рисунке 2). Все это можно дополнить расчетами на компьютере устойчивости судна (решение алгебраических уравнений — см. рисунки 6 и 7) и процессов тепло- и массопереноса (решение дифференциальных уравнений [7]). Форму судна можно делать более сложной, приближенной к реальной и т. д. Это будет хорошей учебной темой, связывающей на школьных занятиях математику, физику, химию и информатику. На уроке можно попытаться создать анимацию переворачивания судна [5] или его раскачивания с рисованием векторов действующих на судно сил [6]...

Конечно, расчет устойчивости реальных кораблей существенно сложнее. Это очень красивая инженерная задача, к решению которой приложили руку почти все великие математики. Нам сегодня остается только восхищаться, как они могли это делать без компьютера. Кстати, на современных судах компьютеры управляют специальными «плавниками» и другими устройствами, снижающими качку даже при сильном волнении моря и предотвращающими опасный крен судна. Удивительно, но у реального корабля центр водоизмещения находится все-таки ниже центра масс, но его устойчивость создается в том числе и сложной формой подводной части корабля, компенсирующей отклонение центра масс смещением места расположения центра водоизмещения. Простейший пример. Если наше судно-брусочек без балласта (рис. 4, слева) ляжет набок, то несложно подсчитать, что центр масс по-

прежнему будет выше центра приложения архимедовых сил. Но при наклоне такого судна (вернее, плота) от бокового ветра, например, центр приложения архимедовых сил (центр водоизмещения) будет смещаться так, чтобы вернуть судно в горизонтальное положение – в глобальную потенциальную яму.

Кстати, наше судно-линейка — это своеобразный *ареометр*, прибор для измерения плотности жидкости, принцип работы которого основан на законе Архимеда. Ареометр представляет собой стеклянную трубку, нижняя часть которой при калибровке заполняется дробью или ртутью (балластом) для достижения необходимой массы. В верхней части трубки находится шкала, которая проградуирована в значениях плотности раствора или концентрации растворенного вещества. Подобную «шкалу» можно видеть и по бортам судов для контроля его загрузки. Суда класса «река-море» имеют несколько таких шкал. Верхнюю риску на этой шкале называют *грузовой маркой* (load line), которая не должна погружаться в воду при загрузке судна в морском или речном порту. Иначе судно может перевернуться. И таких случаев, увы, было множество.

Перефразируя А. П. Чехова, можно сказать, что в корабле все должно быть прекрасно — и силуэт, и название и... расчеты, по которым он спроектирован. Такой небольшой, но поучительный расчет мы только что провели.

Литературные и интернет-источники

1. Александров А. А., Орлов К. А., Очков В. Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: интернет-справочник. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. <http://twt.mpei.ac.ru/rbtpp>
2. Очков В. Ф., Калова Яна, Соколов А. В., Чудова Ю. В. Литературно-физическая композиция «Истории о зеркале и линзе» // Открытое образование. 2016. № 1. <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Mirror-Lens.pdf>
3. Основы остойчивости морского судна: учебное пособие / Ф. М. Кацман, Б. П. Коваленко. СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2003.
4. Очков В. Ф. Вода в научном, культурологическом и религиозном аспектах // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2009. № 7. <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/WSCR/WaterSCR.pdf>
5. Очков В. Ф. Живые кинематические схемы в Mathcad // Открытое образование. 2013. № 3. <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Mathcad-15/kinematic.html>
6. Очков В. Ф., Архипцев А. В. Скаляр и вектор в компьютерных вычислениях // Открытое образование. № 4, 2013 г. <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Mathcad-15/ScalarVector.pdf>
7. Очков В. Ф., Богомолова Е. П. Это страшное слово «диффуры»... // Информа-

тика в школе. 2015. № 1. <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/ODE.pdf>

8. <https://www.ptcusercommunity.com/message/442440> — сайт статьи.