

ЧТО ТАКОЕ ОСТОЙЧИВОСТЬ

«...Осторожней! — пискнул одноглазый капитан. Но было уже поздно. Слишком много любителей скопилось на правом борту васюкинского дредноута. Переменив центр тяжести, барка не стала колебаться и в полном соответствии с законами физики перевернулась».

Этот эпизод из классической литературы может быть использован как наглядный пример **потери устойчивости** от перемещения центра тяжести из-за скопления пассажиров на одном борту. Не всегда, к сожалению, дело ограничивается забавным купанием: потеря устойчивости нередко приводит к гибели судна, а зачастую и людей, иногда — по несколько сот человек одновременно (вспомним совсем еще недавнюю трагедию — гибель теплохода «Булгария»...).

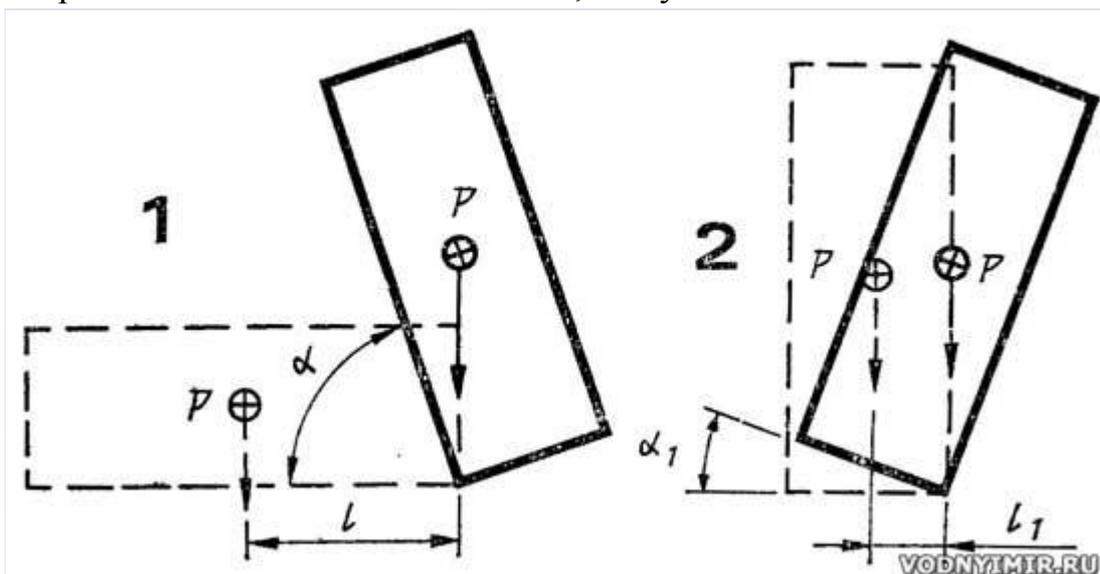
В истории мирового судостроения зарегистрирован ряд случаев, подобных происшедшему в начале века с американским многопалубным речным пароходом «Генерал Слокам». Его конструкторы предусмотрели все для удобства пассажиров, но не проверили, как будет судно вести себя, если сразу все 700 его обитателей поднимутся на верхнюю прогулочную палубу и одновременно подойдут к борту, чтобы полюбоваться открывшимся видом...

Потеря устойчивости — одна из наиболее распространенных причин аварий малых судов. Вот почему каждый из капитанов, независимо от того, как выглядит его судно — байдарка это или, скажем, водоизмещающий катер, каждый из тех, кто отдыхает на воде, должен иметь представление о «законах физики». Другими словами, о том мореходном качестве судна, которое кораблестроители называют устойчивостью.

Устойчивость — это способность судна сопротивляться кренящему действию внешних сил и возвращаться в прямое положение после прекращения этого действия. Появился этот термин у нас в XVIII веке, когда Россия стала морской державой; по происхождению и по смыслу он является разновидностью распространенного слова «устойчивость».

С устойчивостью равновесия мы постоянно сталкиваемся в быту. Для нас не секрет, что стул опрокинуть легче, чем диван; а пустой шкаф — легче, чем заполненный книгами. Кантуя тяжелый ящик через ребро, мы сначала прикладываем наибольшее усилие, потом нам становится легче и, наконец, когда условная линия, проведенная вертикально через центр тяжести ящика, пройдет над ребром, ящик переворачивается уже сам, без нашего участия. Убедившись, что низкий широкий ящик труднее перекантовать, чем высокий и узкий, а тяжелый — труднее, чем легкий, мы можем прийти к выводу, что устойчивость тела на твердой поверхности определяется его весом и

расстоянием по горизонтали от центра тяжести до края опорной плоскости — плечом рычага. Чем больше вес и плечо, тем устойчивее тело.



Устойчивость твердого тела.

На примере кантования ящика наглядно показана роль плеча L — расстояния от ЦТ ящика до точки, вокруг которой производится поворот. Низкий и широкий ящик (1) кантовать труднее, чем узкий и высокий того же веса P (2); плечо $L > L_1$, угол поворота $\alpha > \alpha_1$.

Этот простой закон действителен и для плавающего судна, но здесь дело осложняется тем, что вместо твердой поверхности опорой для «переворачиваемого» судна служит вода. В принципе, как и в только что описанном случае, остойчивость судна определяется его весом и плечом — взаимным расположением точек приложения двух сил.

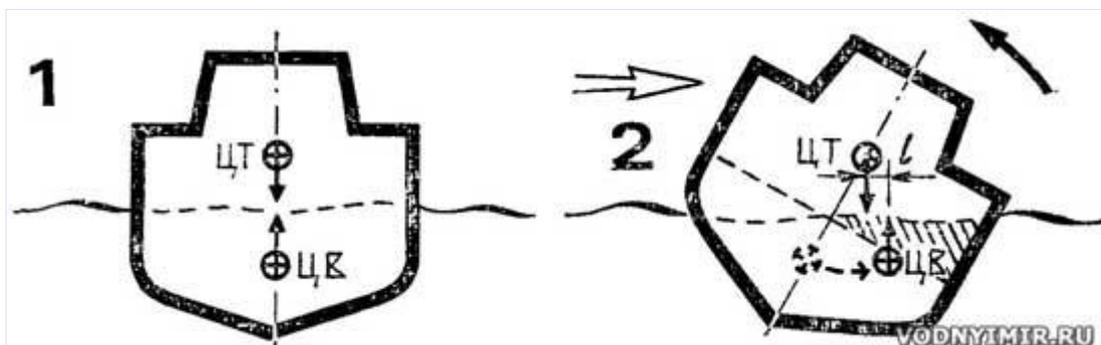
Одна из них — это и есть вес, т. е. **сила тяжести**, приложенная в центре тяжести судна (ЦТ) и всегда направленная вертикально вниз.

Другая — сила плавучести или **сила поддержания**. По закону Архимеда для плавающего судна эта сила по величине равна силе тяжести, но направлена вертикально вверх. Точка приложения равнодействующей сил поддержания и есть точка опоры судна. Находится эта точка в центре погруженного в воду объема корпуса и называется центром плавучести или **центром величины (ЦВ)**.

Когда судно свободно плавает в прямом положении, ЦВ всегда находится на одной вертикали с ЦТ, а действующие на судно равные и противоположно направленные силы уравновешены. Но вот на судно начали действовать **кренящие силы**. Это не обязательно перемещение пассажиров; это может быть порыв ветра или, если речь идет о яхте, просто давление его на паруса, крутая волна, рывок буксирного троса, центробежная сила на крутой циркуляции, подъем купальщика из воды через борт и т. п. и т. д.

Действие момента этой кренящей силы, т. е. **кренящего момента**, наклоняет — кренит судно. При этом ЦТ судна положения не меняет, если, конечно, на судне нет таких грузов, которые могут переместиться в сторону наклона. Поскольку и при крене судно продолжает плавать, т. е. продолжает

действовать закон Архимеда, увеличению погруженного объема со стороны входящего в воду борта соответствует равное уменьшение погруженного объема с противоположного, выходящего из воды борта. Не будем забывать: вес судна от действия кренящего момента не изменяется; следовательно, и общая величина погруженного объема должна остаться неизменной.



Взаиморасположение точек приложения равнодействующих сил тяжести (ЦТ) и сил поддержания (ЦВ).

1 — плавающее судно не имеет крена. Силы тяжести и поддержания взаимоуравновешены, ЦТ и ЦВ расположены в диаметральной плоскости судна;

2 — при крене под действием каких-то внешних сил (светлая стрелка слева) в воду вошел дополнительный объем (заштрихован), ЦВ сместился в новое положение, образовался восстанавливающий момент сил; судно сохраняет остойчивость.

L — плечо остойчивости.

Из-за этого перераспределения подводного объема положение ЦВ изменяется — он отходит в сторону накренения судна; в результате возникает момент сил поддержания, стремящийся восстановить прямое положение судна и поэтому называемый **восстанавливающим моментом**.

Пока судно остойчивость сохраняет, восстанавливающий момент, возрастая по мере увеличения крена, становится равен моменту кренящему и, поскольку он направлен в противоположную сторону, полностью «парализует» его действие. Это значит, что, если величина кренящих сил больше не изменится, судно так и будет плавать с постоянным креном; если же действие кренящих сил прекратится и кренящего момента не станет, восстанавливающий момент немедленно спрямит судно.

Мы можем предположить, что величина возникающего при крене восстанавливающего момента будет тем больше, чем больше плечо — расстояние по горизонтали между новым положением ЦВ и неизменным положением ЦТ; поэтому оно и называется **плечом остойчивости**. Пока есть это плечо — действует восстанавливающий момент — судно сохраняет остойчивость, но как только при дальнейшем нарастании крена плечо исчезнет — ЦВ окажется на одной вертикали с ЦТ, никаких дальнейших усилий для опрокидывания судна уже не потребуется, оно остойчивость потеряет — опрокинется.

Чем дальше в сторону наклона может уходить центр величины — чем больше плечо остойчивости, тем труднее перевернуть судно, т. е. тем оно остойчивее. Именно поэтому широкое судно всегда будет заметно остойчивее узкого. На четырехвесельном яле, имеющем ширину 1,6 м, гребцы могут вставать и ходить без особого риска, а вот на академической восьмерке шириной 0,7 м достаточно одному гребцу сильнее упереться ногой или чуть выше поднять весло, чтобы возник угрожающий крен!

Особенно важно иметь достаточную ширину на самых малых судах. Заметно влияет на их остойчивость и полнота ватерлинии, т. е. показатель того, какую долю прямоугольника, стороны которого составлены максимальной длиной и шириной, занимает площадь действующей ватерлинии. При прочих равных условиях суда с большей полнотой ватерлинии всегда остойчивее тех, у которых ватерлинии в носу и корме острые.

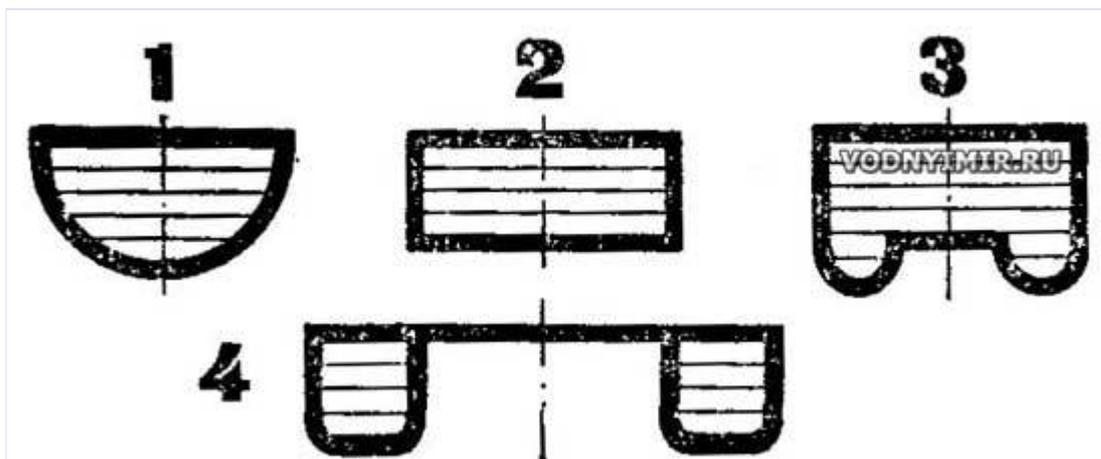


Остойчивость, особенно при малых углах наклона, во многом зависит и от **формы корпуса** — от распределения объемов подводной части корпуса. Ведь, в конечном счете, остойчивость определяется не просто шириной действующей ватерлинии, а положением «точки опоры» — центра фактически погруженного объема.

С точки зрения остойчивости наименее выгодны полукруглые сечения, по условиям ходкости часто применяемые для водоизмещающих судов; близкие к полукруглому сечения имеют корпуса гребных академических лодок, а также относительно узких и длинных катеров, не рассчитанных на глиссирование. Прямоугольное сечение обладает более высокими характеристиками начальной остойчивости. Если же раздвинуть подводные объемы к бортам за счет уменьшения осадки (и объема) в средней части, остойчивость выиграет еще больше.

Идя по тому же пути, можно еще больше увеличить остойчивость, разрезав корпус вдоль — по ДП — и расставив узкие половинки на какую-то ширину. Так мы подошли к идее двухкорпусного судна, которая находит

воплощение в конструкциях как тихоходных плавучих дач или надувных плотов, так и рассчитанных на рекордные скорости гоночных моторных либо парусных катамаранов.



Влияние формы поперечного сечения корпуса малого судна на остойчивость.

Ширина ватерлинии и водоизмещение одинаковы. Характеристики начальной остойчивости варианта 1 будут в несколько раз ниже, чем варианта 4.

С увеличением углов наклона все большее значение приобретает и форма надводной части корпуса в районе, входящем в воду при крене. Наглядный пример — отсутствие остойчивости у имеющего круглое сечение бревна: при любом его «крене» — повороте вокруг оси — никакого дополнительного объема в воду не входит, форма погруженной части и положение ЦВ не изменяются, восстанавливающего момента не возникает.

По той же причине вреден и некогда модный завал бортов. При нарастании крена ширина ватерлинии не только не увеличивается, а иногда и наоборот — уменьшается. Поэтому на резких поворотах нередко переворачивались старые «Казанки», имевшие завал бортов внутрь в и без того довольно узкой кормовой части.

И наоборот: мерами, повышающими остойчивость, являются развал бортов и закрепление по их верхним кромкам дополнительных элементов плавучести. Объяснение простое: при крене входят в воду объемы именно там, где они нужнее всего для опоры — где они дают большое плечо. В принципе, судно с развалом шпангоутов в надводной части и с относительно узкой ходовой ватерлинией сочетает хорошие скоростные качества с высокой остойчивостью. Такую форму корпуса имели, например, старинные галеры, где, как известно, мощность «двигателя» была ограниченной, а требования к скорости и мореходности — довольно высокими. С той же целью по бортам легких казацких «чаек» привязывали над водой пучки сухого камыша.



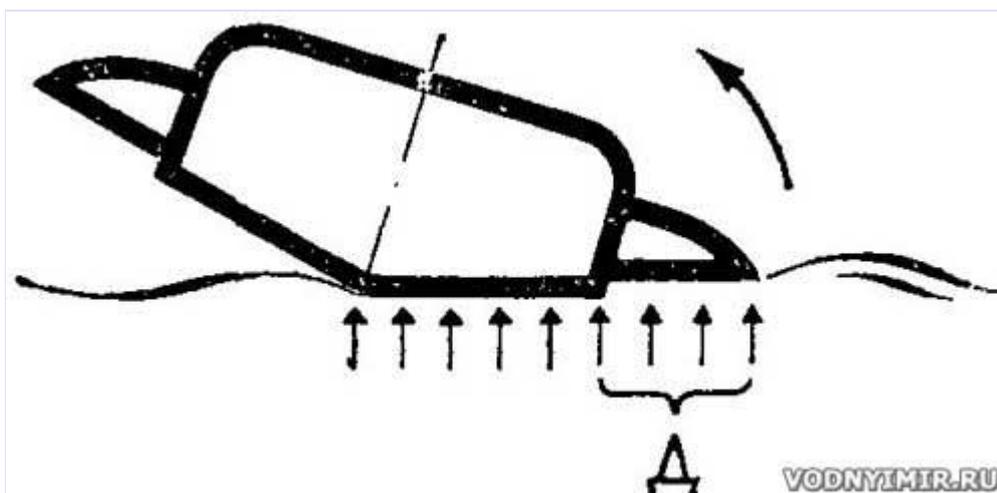
Поперечное сечение запорожской «чайки».

Сочетание выгодных с точки зрения ходкости полукруглых поперечных сечений подводной части с большим развалом бортов и закреплением дополнительных элементов плавучести по верхним кромкам бортов.

По сути дела тем же приемом пользуются наши туристы-парусники, прикрепляя к бортам байдарок надувные баллоны. Еще более эффективным средством повышения остойчивости байдарок при плавании под парусом служат бортовые поплавки, смонтированные на поперечинах. На ровном киле они идут над водой и не тормозят движение. Когда же давление ветра на парус накренивает байдарку-тримаран, подветренный поплавок входит в воду и служит дополнительной опорой, расположенной очень выгодно — далеко от ДП.

Подобной же цели служат и различные бортовые наделки на глиссирующих моторных судах — **були и спонсоны**: они улучшают остойчивость катера или мотолодки и на стоянке и на ходу. Та же «Казанка» становится более безопасной даже при эксплуатации с «Вихрем» благодаря установке дополнительных объемов плавучести — кормовых булей, входящих в воду при явной перегрузке кормы или при крене на стоянке. При движении прямо вперед нижняя рабочая поверхность булей находится выше ходовой ватерлинии, а при опасных для «Казанки» резких поворотах эта поверхность начинает «работать»: образуемая на ней при глиссировании гидродинамическая подъемная сила препятствует увеличению крена на циркуляции.

Длина действующей ватерлинии, хотя и в меньшей мере, чем ширина, тоже существенно влияет на остойчивость самых малых судов. Вот показательный случай. Однажды испытывалась секционная туристская байдарка. В одноместном трехсекционном варианте лодка оказалась слишком «спортивной»: те, кто не имел опыта гребли на «академичках», неизменно опрокидывались у самого берега. Однако достаточно было добавить еще одну среднюю секцию длиной 0,8 м, как та же самая лодка становилась «спокойным» туристским судном.



Работа булей (водонепроницаемых выступов на корпусе) моторной лодки «Казанки» при резких поворотах на ходу.

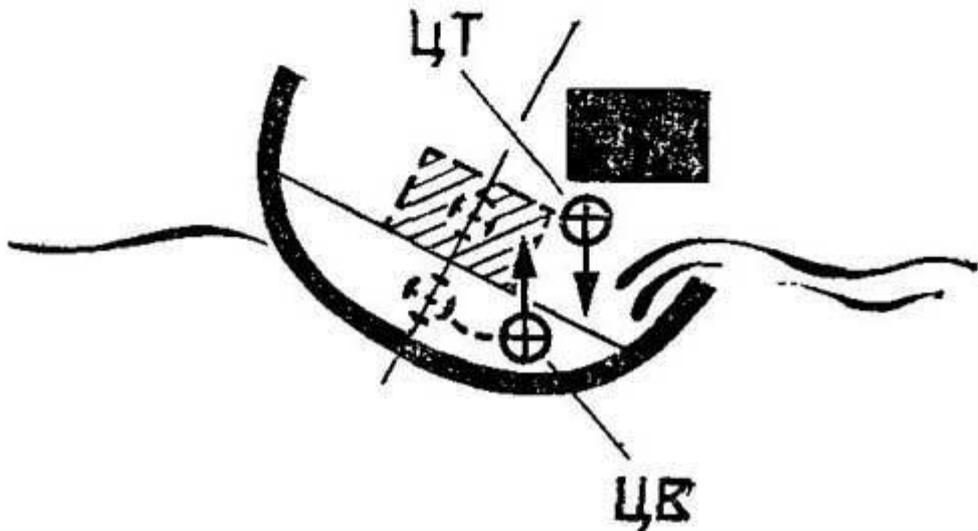
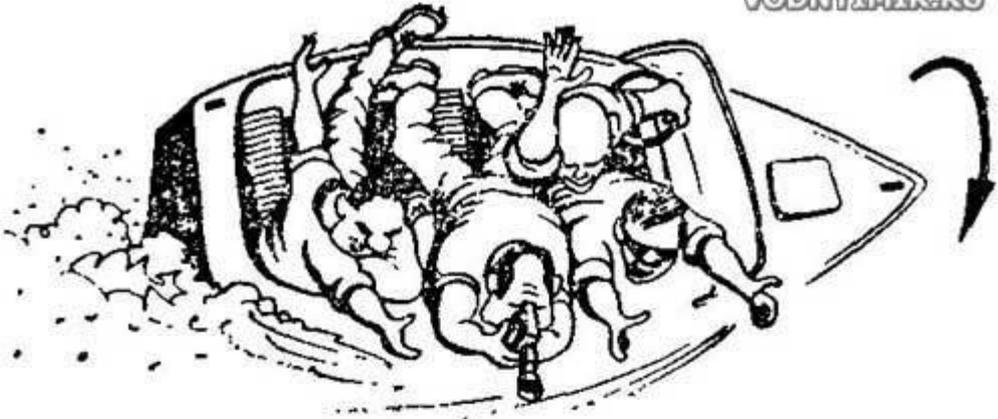
При крене начинает работать нижняя поверхность буля.

Образующаяся на ней при глиссировании гидродинамическая подъемная сила D препятствует нарастанию крена.

Остойчивость очень тесно связана с другим мореходным качеством судна — непотопляемостью. Подчеркнем: оба этих качества в значительной мере определяет фактическая **высота надводного борта**. Если надводный борт низкий, то уже при небольших углах крена палуба будет входить в воду, начнет уменьшаться ширина действующей ватерлинии, а с этого момента станет падать плечо остойчивости и восстанавливающий момент. Открытые — беспалубные лодки после входа в воду верхней кромки борта сразу заливаются и опрокидываются. Ясно, что чем выше надводный борт, тем больше и допустимый угол крена, критическое значение которого называют **углом заливания**.

Самый наглядный показатель опасного увеличения крена и приближения к углу заливания — уменьшение надводной высоты борта со стороны крена лодки. Излишне говорить, что чем меньше лодка, тем опаснее любой крен, тем важнее каждый сантиметр фактической высоты надводного борта! Совершенно недопустимо превышение указанной изготовителем грузоподъемности лодки (перегрузка)! Представляет опасность такое расположение грузов, при котором лодка имеет крен уже в момент отхода от берега: ведь это сразу же уменьшает фактическую высоту борта и запас остойчивости вашей лодки!

Не случайно речь идет о **фактической** высоте надводного борта. История «большого» судостроения знает множество случаев, когда целые и невредимые суда теряли остойчивость только из-за того, что при крене у поверхности воды случайно оказывались какие-либо открытые отверстия в борту.



Что произойдет, если все пассажиры вскочат со своих мест и бросятся к борту?

ЦТ перемещается вверх и к борту, возникает момент пары сил, вызывающий дальнейшее увеличение крена, судно теряет устойчивость. Как только угол крена превысит значение угла заливания, вода хлынет в лодку через борт.

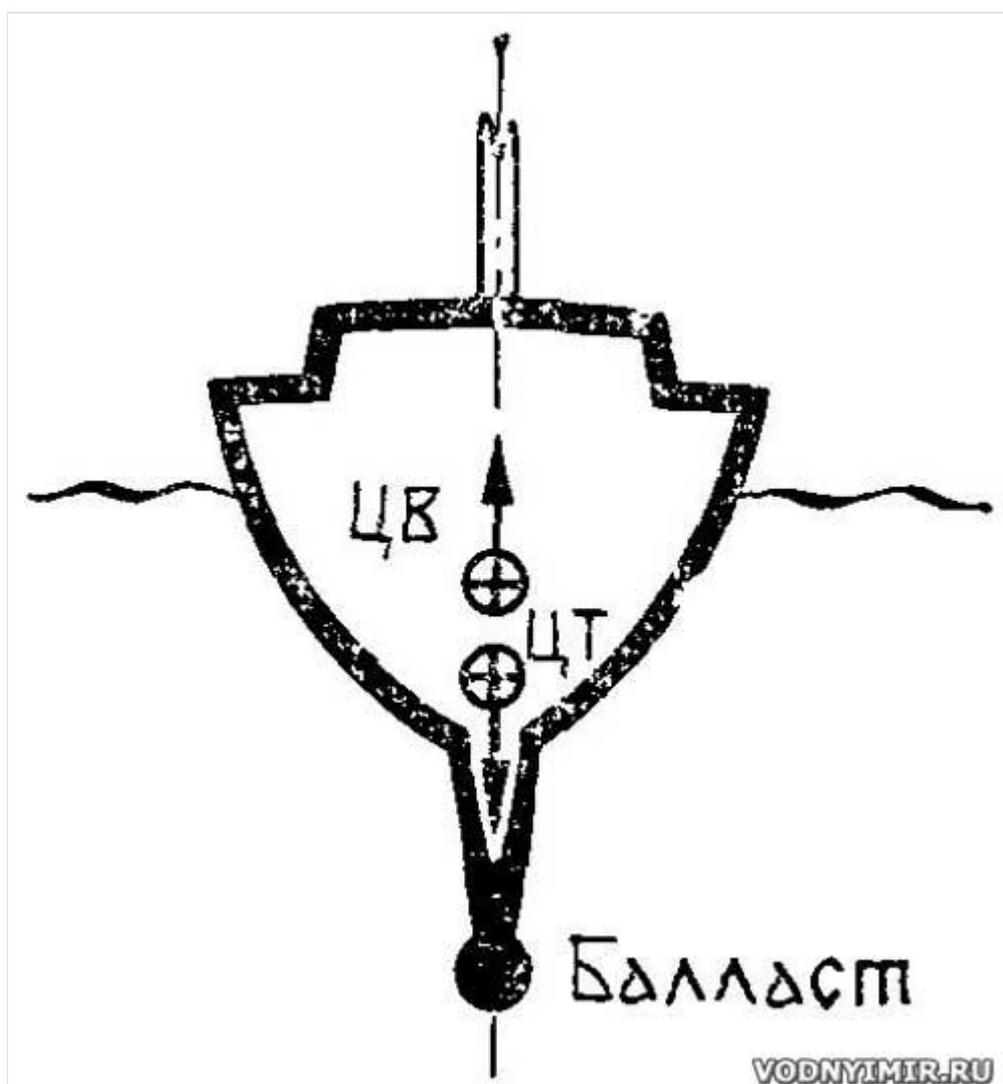
Любопытную историю рассказывает академик А. П. Крылов. Перед выходом в первое плавание 84-пушечного корабля «Кинг Джордж» (происходило это в 1782 г. в Портсмуте) его специально накренили для исправления какой-то неисправности кингстонов. Края нижнего ряда открытых орудийных портов оказались при этом на уровне лишь на 5—8 см выше поверхности воды. Старший офицер, не отдавая себе отчета в опасном положении корабля, когда именно эти 5—8 см, а не обычные 8 м, являлись фактической высотой борта, приказал вызвать команду к орудиям для подъема флага. Очевидно, матросы бежали по накрененному борту и незначительного увеличения крена оказалось достаточно, чтобы корабль лег на борт и унес на дно более 800 человек...

Итак, необходимыми условиями остойчивости судна являются достаточные его ширина и высота борта. Внесем теперь уточнение. Дело в том, что остойчивость принято подразделять на **начальную** (в пределах угла крена до 10—20°) и на остойчивость **при больших наклонениях**. Для малых судов важны, в первую очередь, ширина и характеристики именно начальной остойчивости: до остойчивости на больших углах крена чаще всего «дело не доходит», так как угол заливания обычно лежит в пределах начальной остойчивости. Для более крупных мореходных и закрытых — запалубленных судов важнее высота надводного борта, обеспечивающая остойчивость при больших наклонениях.

Теперь отметим еще одно совершенно очевидное и практически очень важное условие: судно тем остойчивее, **чем ниже расположен его центр тяжести**. Каждый знает, чему обязаны своей высокой «стойчивостью» ваньки-встаньки и неваляшки! По собственному опыту всем хорошо известно, как начинает раскачиваться любая небольшая лодка, когда в ней встают во весь рост и пытаются пройти от одной банки до другой: при увеличении высоты ЦТ (плеча) намного возрастает величина кренящего момента, хотя сам вес человека и не изменяется.

Именно поэтому на тех же байдарках, ширина которых, как правило, находится на опасном минимальном пределе, сидеть приходится практически прямо на днище. Другой пример. Когда на ялах ставят мачту, появляется приложенная на некоторой высоте сила давления ветра на паруса; чтобы компенсировать возникающий при этом значительный кренящий момент, приходится увеличивать остойчивость тем же способом — всей команде пересаживаться с банок на днище.

И третий пример. Редакторы сборника знакомились с довольно узкой двухместной лодкой, спроектированной с расчетом на греблю длинными распашными веслами. Ходовые качества лодки оказались отличными, однако было и одно «но»: пока автор проекта перегонял лодку к месту испытаний, ему уже довелось перевернуться! Оказались в воде и пробовавшие лодку редакторы. Однако достаточно было понизить высоту банок на 150 мм — положение изменилось.



Расположение балласта на яхте.

Благодаря низкому положению ЦТ даже при очень большом крене судно остается устойчивым, образуется восстанавливающий момент.

Несмотря на самый строгий режим экономии веса, на те суда, к устойчивости которых предъявляются особенно жесткие требования, приходится специально для понижения ЦТ принимать «мертвый груз» **балласт**. Обычно крейсерские яхты и спасательные катера несут постоянный твердый балласт, закрепляемый так низко, как только это допускает конструкция судна. (Чем ниже удастся разместить балласт, тем меньше его понадобится для обеспечения определенной высоты ЦТ всего судна!) На таких судах ЦТ стараются располагать под ЦВ. Тогда максимальное значение плеча устойчивости будет достигаться при очень большом крене — вплоть до 90°. Для сравнения достаточно сказать, что большинство обычных морских катеров опрокидывается уже при крене 60—75°.

Иногда принимают временный жидкий балласт. Так, на мореходных мотолодках и катерах с килеватыми обводами днища низкую начальную устойчивость на стоянке (валкость) нередко приходится компенсировать приемом воды в специальные балластные цистерны в днищевой части, которые при движении опоражниваются автоматически.

Очень важно, чтобы ЦТ накрённого судна оставался на своем месте: неслучайно на парусных лодках все тяжелые предметы надежно закрепляют, чтобы предотвратить их смещение. Существуют, однако, грузы, которые считаются опасными, так как могут вызвать потерю устойчивости. Это всякого рода **сыпучие грузы** — от зерна и соли до свежей рыбы, произвольно пересыпающиеся в сторону наклона судна. (Именно от смещения сыпучего груза — зерна — во время урагана опрокинулся и погиб в 1957 г. огромный четырехмачтовый барк «Памир» — последний большой грузовой парусник дедвейтом 4500 т!) Особую опасность представляет жидкий груз. Не будем вдаваться в глубины теории корабля, но подчеркнем, что в данном случае снижает устойчивость не столько вес переливающегося жидкого груза, сколько именно **площадь его свободной поверхности**.

Как же, спросит читатель, плавают тогда по морям и океанам танкеры, перевозящие этот опасный жидкий груз? Во-первых, корпус танкера разделяют поперечными и продольными непроницаемыми переборками на отдельные отсеки — танки, а в верхней их части ставят так называемые отбойные переборки, дополнительно «разбивающие» свободную поверхность (разбивка же ее на 2 части дает уменьшение вредного влияния на устойчивость в 4 раза). Во-вторых, танки заливают полностью.

По тем же соображениям на катере лучше иметь два топливных бака поуже, чем один широкий. Все запасные цистерны перед штормовым переходом надо заполнять целиком (как говорят моряки — запрессовывать). Расходовать жидкости надо по очереди — сначала до конца из одной цистерны, потом из следующей, чтобы свободным уровнем был только в одной из них.

Страшный враг малых судов — вода в трюме, даже если общий вес ее невелик. Однажды вышел на испытания новый рабочий катер. На первом же повороте было отмечено, что на циркуляции катер получает непривычно большой крен и очень «неохотно» выходит из него. Открыли кормовой люк — и увидели, что в ахтерпике гуляет вода, попавшая туда через едва заметную трещину в шве.

Очень важно своевременно осушать корпуса малых судов, принимать меры к тому, чтобы в свежую погоду вода не попадала внутрь через различные отверстия и неплотности.

Ведь по оплошности вставший на борт легкой мотолодки пассажир — огромная кренящая сила, составляющая почти 1/5 часть водоизмещения судна! А два пассажира, вздумавших одновременно пройти по борту «Прогресса-4» с рубкой — это реальная угроза опрокинуть судно (два таких случая с трагическим исходом произошли в Калининe). На самых малых судах бывает нельзя вставать во весь рост и пересаживаться с места на место.

До сих пор говорилось о том, что положение ЦТ изменяться не должно. Есть, однако, многочисленный класс спортивных судов, для которых всемерное перемещение ЦТ в сторону, противоположную крену, является важнейшим условием достижения высоких результатов. Речь идет об откренивании легких гоночных швертботов и катамаранов, а иногда и

крейсерско-гоночных яхт. Вывешиваясь с помощью трапеции за борт, спортсмен своим весом отодвигает ЦТ и увеличивает плечо остойчивости, что и позволяет уменьшить крен, а то и избежать опрокидывания.



Откренивание швертбота.

Регулируя положение ЦТ — смещая его на наветренный борт, экипаж добивается уменьшения крена под действием ветра на парус.

Наконец, следует иметь в виду, что даже судно, остойчивое в одних условиях, может оказаться недостаточно остойчивым в других. Остойчивость может различаться, в частности, на стоянке и во время движения. Поэтому приходится учитывать еще и **ходовую остойчивость**. Например, водоизмещающий катер, на стоянке даже не реагирующий на сидящего у борта пассажира, при плавании на волнах вдруг начинает крениться в его сторону. Оказывается, катер как бы «зависает», опираясь кормой и носом на гребни двух соседних волн, а из-за того, что вся его средняя часть, наиболее широкая, оказывается в волновой впадине, уменьшилась уже известная нам полнота ватерлинии и сразу же снизилась остойчивость.

На глиссирующих мотолодках возникающие при движении значительные гидродинамические силы поддержания остойчивость, как

правило, увеличивают. Однако они же могут стать причиной опрокидывания: например, при слишком резком повороте изменение направления упора винта и резкое повышение (за счет дрейфа) давления у внешней к повороту скулы создают опасную пару сил, которая нередко и переворачивает лодку через внешний к повороту борт.

Наконец, кораблестроители отдельно анализируют случаи динамического приложения кренящих сил (есть и специальное понятие — **динамическая остойчивость**): при внезапном и кратковременном приложении больших внешних нагрузок поведение судна может быть совершенно не похожим на классические схемы статической остойчивости. Вот почему в штормовых условиях, при неблагоприятном динамическом воздействии шквала и удара волны переворачиваются, казалось бы, абсолютно остойчивые яхты, специально рассчитанные на плавание в самых суровых океанских условиях. (Переворачивались же яхты Чичестера, Барановского, Льюиса и других смельчаков-одиночек! Тут тонкость в том, что кораблестроители предусмотрели и это: яхты немедленно вставляли на ровный киль и снова становились остойчивыми.)

Разумеется, инженеров не удовлетворяют оценки вроде того, что «это судно — остойчивое, а то — не очень»; судостроители характеризуют остойчивость точными величинами.

При проектировании любого судна, будь то супертанкер или гребная лодка, конструкторы делают специальные расчеты остойчивости, а когда судно проходит испытания, первым делом проверяется соответствие фактической остойчивости проекту. Чтобы иметь гарантию, что остойчивость любого нового судна при нормальной грамотной эксплуатации его в тех условиях, на которые оно рассчитано, достаточна, наблюдающие организации типа Регистра специально выпускают Нормы остойчивости, а затем следят за их соблюдением. Конструкторы, создающие проект судна, выполняют все расчеты, руководствуясь этими нормами остойчивости, проверяют — не опрокинется ли будущее судно под воздействием волны и ветра. Естественно, к отдельным типам судов предъявляются дополнительные требования. Так, пассажирские суда проверяют на случаи скопления всех пассажиров у одного борта да еще при крене на циркуляции (при этом угол крена не должен превышать угла, при котором входит в воду палуба, и величины 12°). Буксирные суда проверяют на действие рывка буксирного троса, а речные буксиры — и на статическое воздействие буксирного троса.

Результаты расчетов вместе с инструкцией капитану судна оформляются в одном из наиболее важных судовых документов, называемом «Информация об остойчивости судна».