

Конструкция корпуса

Материалы корпуса и надстроек

В качестве конструкционных материалов для корпусных конструкций водоизмещающих судов и кораблей используются:

- судостроительные стали различных марок;
- алюминиевые сплавы;
- титановые сплавы;
- судостроительный бетон;
- судостроительные полимерные композиционные материалы;
- конструкционная древесина.

Основным конструкционным материалом современного судостроения является судостроительная сталь.

Алюминиевые сплавы



Достоинства

1. малый удельный вес ($2,7 \text{ т/м}^3$ против $7,8 \text{ т/м}^3$ у стали);
2. удельная прочность сопоставима со сталью;
3. высокая коррозионная стойкость;
4. немагнитность;
5. по сравнению со сталями меньшая склонность к обрастанию морскими организмами;
6. хорошая пластичность, что обеспечивает надежность корпусов при ударных нагрузках;
7. алюминиевые сплавы не склонны к хладоломкости и хрупким разрушениям.



Недостатки

1. необходимо принятие мер по обеспечению жесткости корпусных конструкций;
2. худшая технологичность материала, необходимость использовать особые приемы сварки и правки сварочных деформаций;
3. горючесть — при воздействии открытого огня алюминиевые сплавы не только плавятся, но и горят, развивая высокую температуру;
4. при соединении конструкций из алюминиевых сплавов со стальными возникает контактная коррозия;
5. относительно высокая стоимость сплавов: больше в 3–4 раза стоимости конструкций из сплавов по сравнению с аналогичной стальной.

Титановые сплавы



Достоинства

1. высокой механической прочностью;
2. высокой коррозионной стойкостью;
3. меньшей удельной массой ($4,5 \text{ т/м}^3$), чем у стали;
4. немагнитностью;
5. хладостойкостью.

Конструкции из титана при равной прочности примерно на 40 % легче стальных.



Недостатки

1. высокая стоимость;
2. высокая чувствительность к надрезу;
3. холодная ползучесть (при комнатных температурах и длительных нагрузках свыше 50...60 % предела текучести сплава).

Судостроительный бетон



Достоинства

1. исключительная долговечность и коррозионная стойкость;
2. высокая огнестойкость;
3. низкая строительная и эксплуатационная стоимость железобетонных конструкций;
4. упрощенная технология изготовления конструкций.



Недостатки

1. большой собственный вес конструкции на единицу объема корпуса;
2. невысокая трещиностойкость.

Судостроительные полимерные композиционные материалы



Достоинства

1. большой относительной прочности;
2. коррозионной стойкости;
3. высокой технологичности;
4. относительной дешевизне в эксплуатации.



Недостатки

1. изменение свойств материала в зависимости от температуры и влажности;
2. подверженность старению (снижение предела прочности за 10 лет на 10...20%).

Судостроительные полимерные композиционные материалы создаются на базе различных стеклопластиков.

Конструкционная древесина



Достоинства

1. относительно высокая механическая прочность;
2. малая удельная масса;
3. высокая технологичность;
4. хорошие теплоизоляционные и звукоизоляционные качества;
5. немагнитность и диэлектричность;
6. легкодоступность и относительно низкая стоимость.



Недостатки

1. анизотропность физических и механических свойств;
2. легкая возгораемость;
3. способность изменять размеры и форму в результате воздействия влажности в определенных пределах;
4. способность гнить;
5. повреждаемость древоточцами.

Понятие о прочности судна

В строительной механике корпус плавающего судна рассматривается как тонкостенная балка переменного по длине коробчатого сечения. Под действием совокупности внешних и внутренних сил различной природы эта балка деформируется, в её элементах возникают нормальные и касательные напряжения, следовательно, она должна обладать достаточной прочностью.

Прочность можно определить, как способность корпуса воспринимать, не разрушаясь, нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации судна.

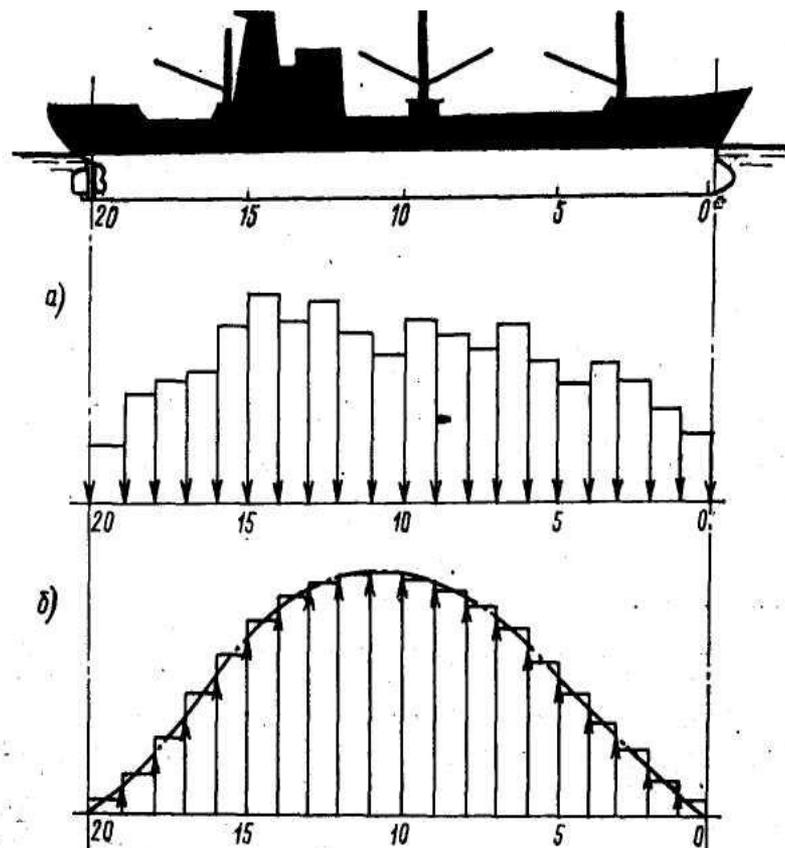
Обеспечение прочности и жёсткости корпуса при наименьшей затрате материала — одна из основных задач, решаемых при постройке судна.

Строительная механика корабля — наука о прочности судна — занимается изучением следующих трёх проблем:

- определение внешних сил, действующих на корпус в целом и на отдельные его конструкции в наиболее неблагоприятных условиях эксплуатации;
- определение внутренних сил — напряжений и деформаций, возникающих в связях корпуса под действием заданной системы внешних нагрузок;
- сопоставление действующих напряжений с допускаемыми и назначение обоснованного запаса прочности.

Корпус судна испытывает нагрузку от собственной массы, массы перевозимого груза, запасов и давления воды.

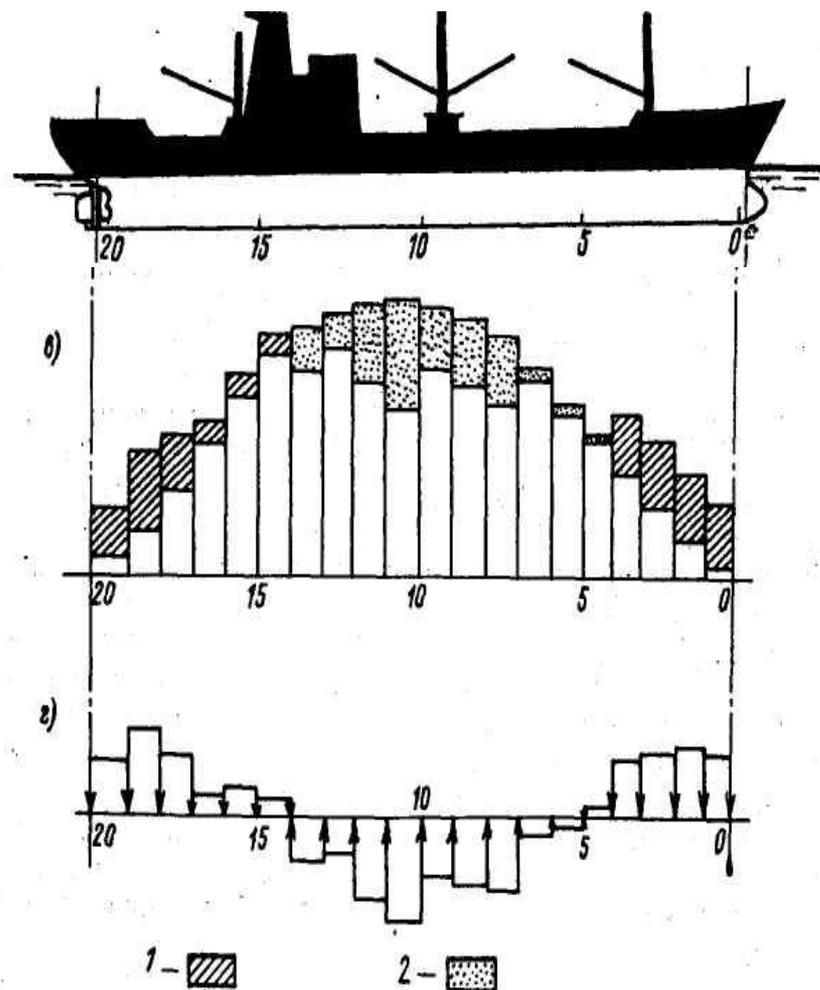
Силы веса (тяжести) корпуса судна, его механизмов, оборудования, а также перевозимого груза и судовых запасов (топлива, воды, масла, провизии и пр.) действуют в месте расположения этих составляющих нагрузки масс и направлены вертикально вниз (рис.а). Силы давления воды — силы поддержания — пропорциональны объему погруженной части судна в данном месте и действуют вертикально вверх (рис.б).



Нагрузка судна:
а - кривая сил веса; б – кривая сил поддержания (с приведением к ступенчатой кривой)

Суммарная нагрузка от действия этих сил вызывает общий продольный изгиб судна (рис. в и г).

Силы веса (тяжести) судна и груза в течение рейса постоянны; силы веса (тяжести) судовых запасов в течение рейса изменяются. Однако в какой-то определенный момент их также можно рассматривать как постоянные. Силы поддержания в условиях тихой воды постоянны, а в условиях волнения непрерывно меняются, в зависимости от того, на вершине или подошве волны в данный момент находится судно.

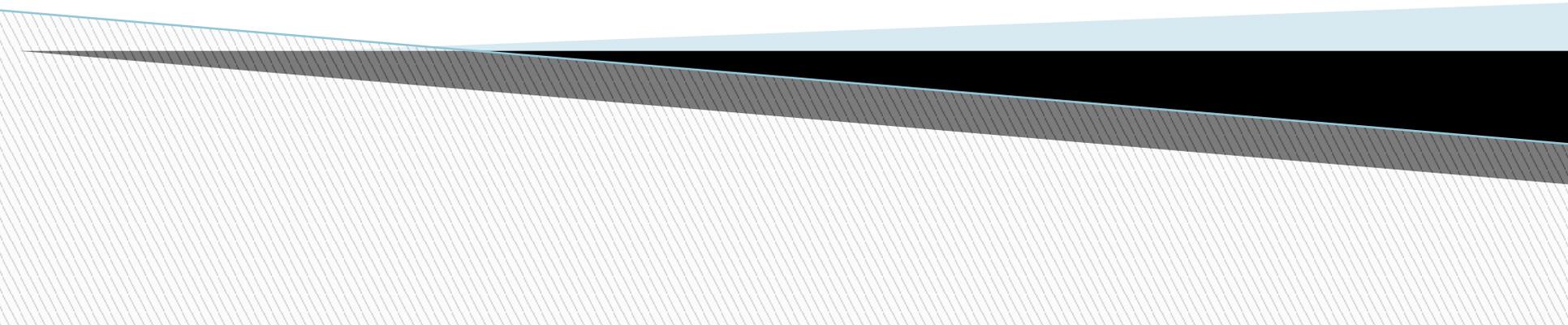


Нагрузка судна:

в – наложение сил веса на кривую сил поддержания; г – результирующая кривая нагрузки, действующей на судно.

1 – избыток сил веса; 2 – избыток сил поддержания.

Длина судна, как правило, существенно превышает его ширину. Поэтому для большинства современных судов обеспечение продольной общей прочности обычно означает и автоматическое обеспечение прочности поперечной. Исключение составляют некоторые специальные суда, у которых длина и ширина корпуса имеют один порядок: многокорпусные суда (катамараны, суда с малой площадью ватерлинии и др.), а также суда на воздушной подушке, особенно амфибийные.



Общая и местная прочность корпуса судна

Для удобства изучения все силы, действующие на корпус судна, поделим на две категории:

- возникающие при плавании на тихой воде и
- дополнительные, вызванные волнением моря и качкой судна.

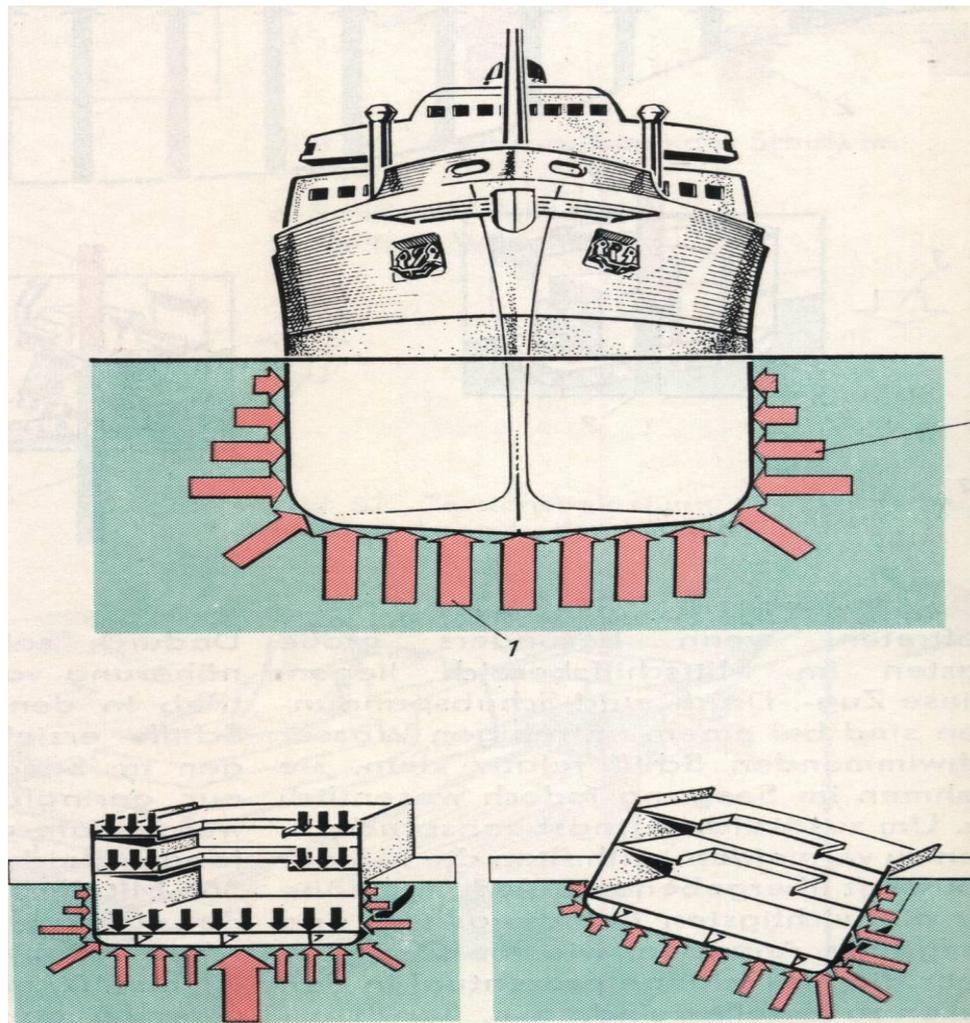
К последним отнесём как гидростатические силы, своим появлением обязанные изменению формы свободной поверхности воды, так и гидродинамические, обусловленные орбитальным движением частиц окружающей жидкости. Сюда же причислим и инерционные силы, вызываемые продольной качкой судна.

Под действием этих сил корпус испытывает сложное деформационное состояние. Его изучение существенно облегчается, если ввести подразделение на более простые деформации:

- от общего изгиба в продольной и поперечной плоскостях;
- под действием локальных, местных, нагрузок.

Соответственно в строительной механике корабля принято рассматривать общую и местную прочность.

Корпус судна — свободно плавающая балка. Под действием вертикальных сил всех типов в его поперечных сечениях будут возникать изгибающие моменты и перерезывающие силы, знание которых необходимо для определения действующих от общего изгиба нормальных и касательных напряжений.



Нагрузка на корпус судна от действия гидростатического давления воды и веса груза (чёрные стрелки): 1 – давление на корпус судна (сила поддержания); 2 – давление воды на борт судна

Плавание на тихой воде

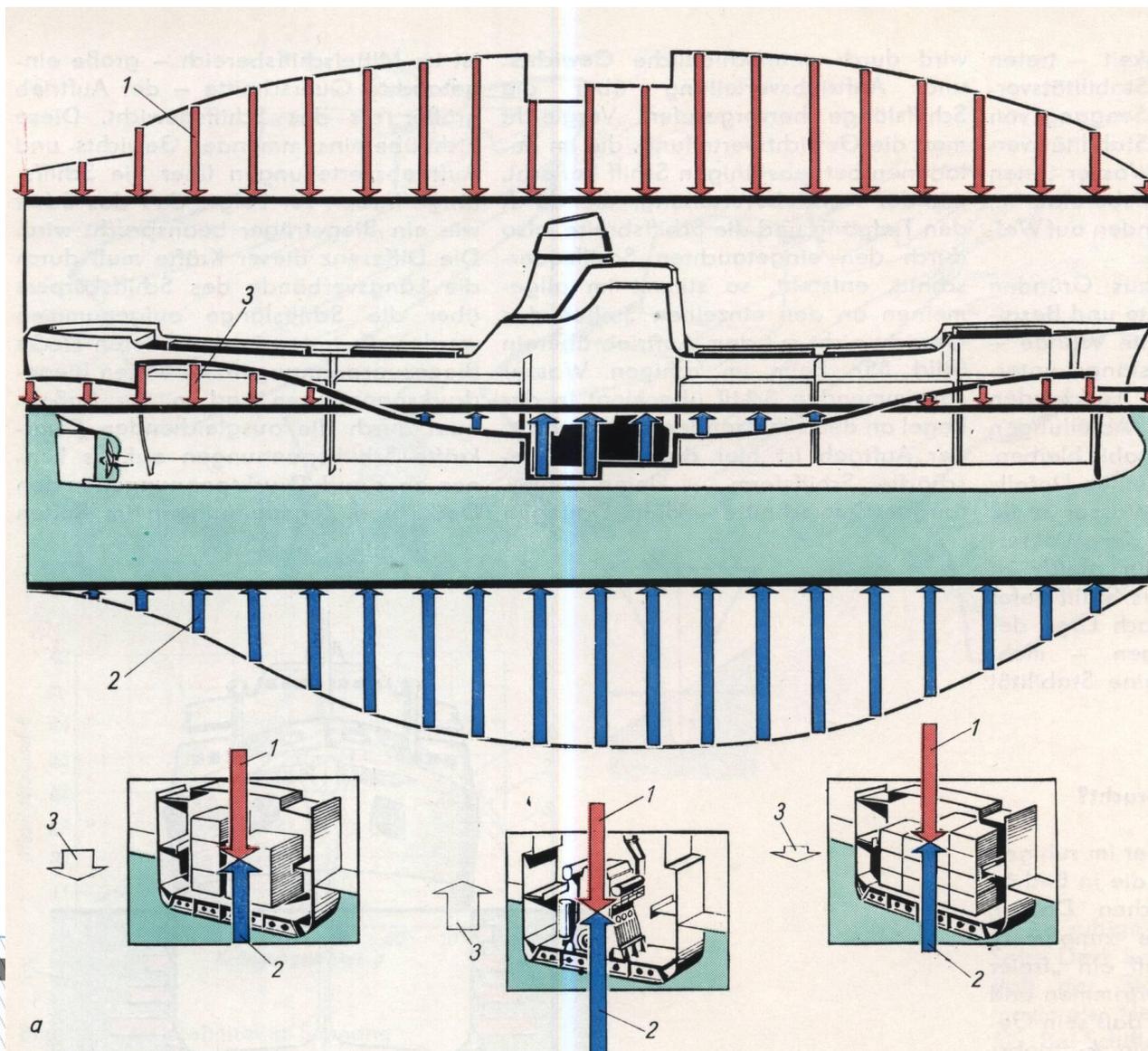
Судно в зависимости от соотношения сил тяжести и поддержания по его длине может изгибаться выпуклостью вниз или вверх. В первом случае имеет место прогиб корпуса, во втором — перегиб. Для одного и того же судна характер изгиба будет зависеть от состояния его нагрузки. Так, для грузовых судов с расположением МО в средней части при плавании в балласте будет иметь место прогиб корпуса. Это объясняется тем, что в районе МКО наблюдается избыток сил тяжести, а в районах пустых трюмов — сил поддержания. Для тех же судов при плавании в полном грузу (при максимальной осадке) картина меняется на противоположную — при неизменной в районе МКО силе тяжести силы поддержания существенно возрастают, создается значительный их избыток, корпус изгибается выпуклостью вверх.

Для сухогрузного судна с МО в средней части при движении в полном грузу максимальный изгибающий момент соответствует состоянию судна с частично израсходованными запасами.

У танкеров с кормовым расположением МКО на тихой воде обычно наблюдается прогиб — сказывается избыток веса от полностью заполненных грузовых танков, расположенных в средней части судна. При плавании в балласте корпус, как правило, имеет перегиб, несмотря на то, что основной балласт, вес которого может составлять около половины грузоподъёмности, располагается в средней части судна.

Таким образом, и величина и знак (прогиб или перегиб) изгибающего момента в значительной степени определяется состоянием нагрузки судна. Поэтому расчёты должны проводиться для всех встречающихся в эксплуатации вариантов загрузки судна с тем, чтобы найти максимальные значения усилий от общего изгиба на тихой воде.

Практика показывает, что для большинства морских транспортных судов традиционных обводов максимальные значения изгибающего момента имеют место в районе миделя независимо от состояния нагрузки.



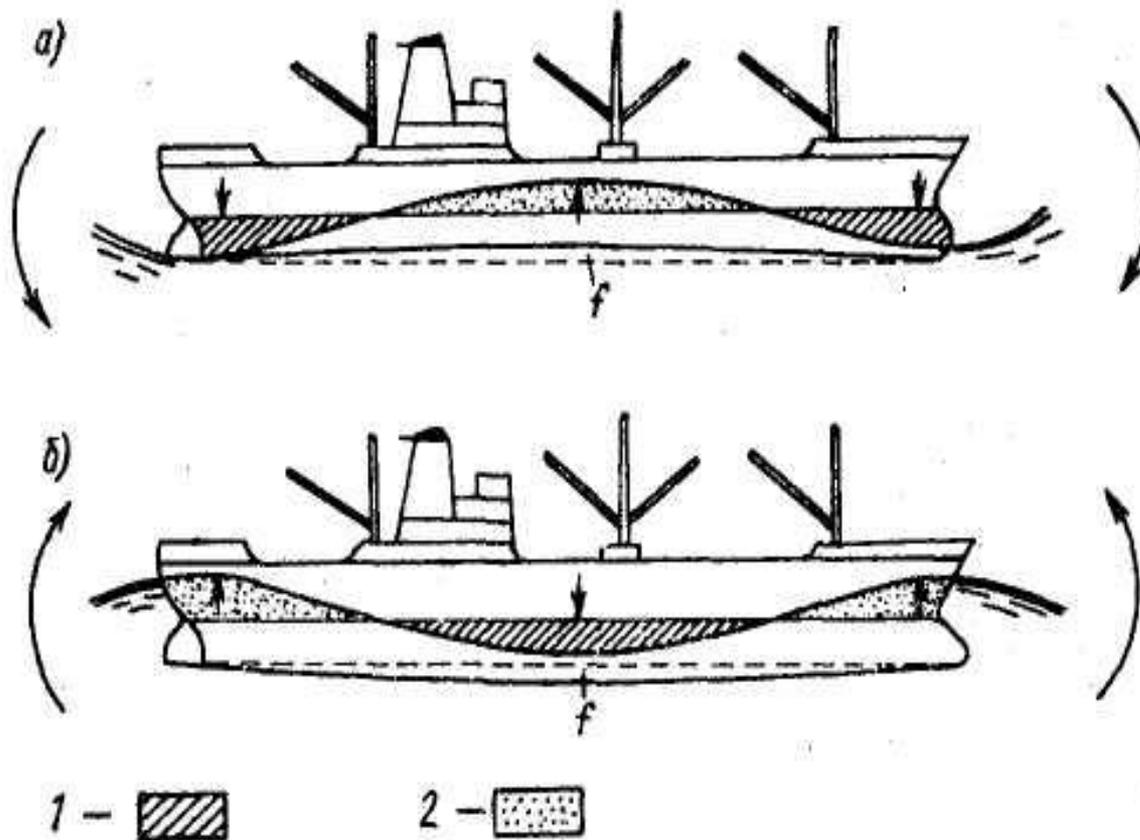
**Распределение нагрузки на корпус судна по его длине:
 а – распределение сил поддержания,
 веса и нагрузки. 1 – сила веса; 2 – сила поддержания; 3 – разница
 (нагрузка).**

Волновой изгибающий момент. Волнение моря приводит к тому, что свободная поверхность воды перестает быть горизонтальной, соответственно изменяется форма действующей ватерлинии судна, происходит перераспределение сил поддержания по сравнению с таковым на тихой воде. Действующий при этом на корпус изгибающий момент обычно представляют в виде суммы моментов на тихой воде M_{me} и дополнительного волнового M_e

$$M = M_{me} + M_e.$$

Когда вершина волны находится посередине длины судна и силы поддержания сосредотачиваются в его средней части, а в оконечностях образуется избыток сил веса (тяжести) и судно изгибается средней частью вверх, получается так называемый **перегиб** судна.

В следующий момент судно средней частью попадает на подошву волны, силы поддержания здесь уменьшаются, но образуется избыток сил веса (тяжести) — судно изгибается серединой вниз — получается **прогиб** судна. Иметь перегиб или прогиб — все зависит от взаимного распределения по длине судна сил веса (тяжести) и сил поддержания. Возникающие при общем продольном изгибе корпуса напряжения (т. е. отношение равнодействующей внутренних сил к площади поперечного сечения) достигают наибольших значений в крайних связях корпуса — в наружной обшивке днища и в настиле верхней палубы. Поэтому при проектировании и изготовлении этих связей корпуса им уделяется особое внимание.



Изгиб судна на волнении:

а – на вершине волны; **б** – на подошве волны.

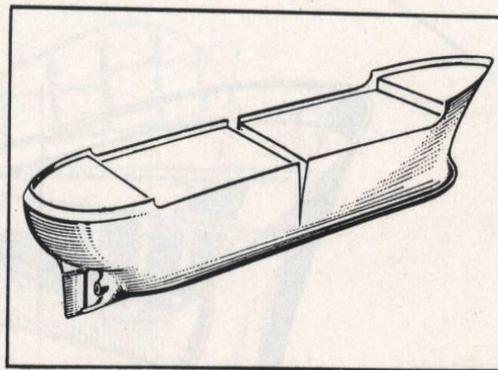
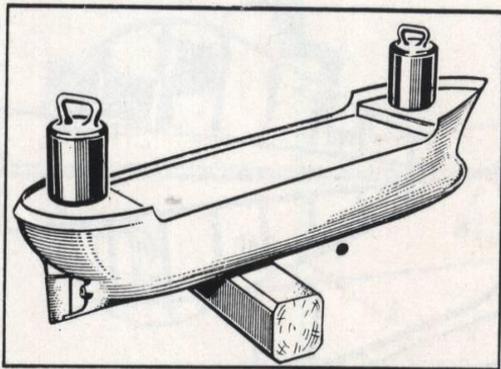
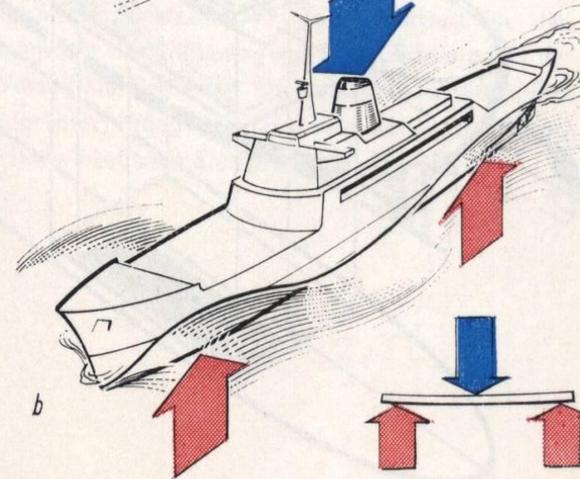
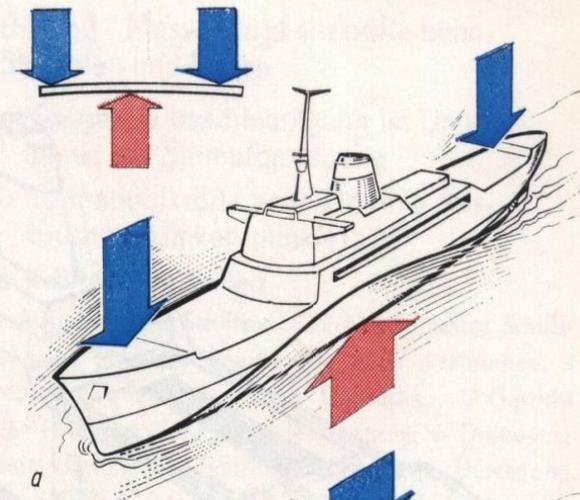
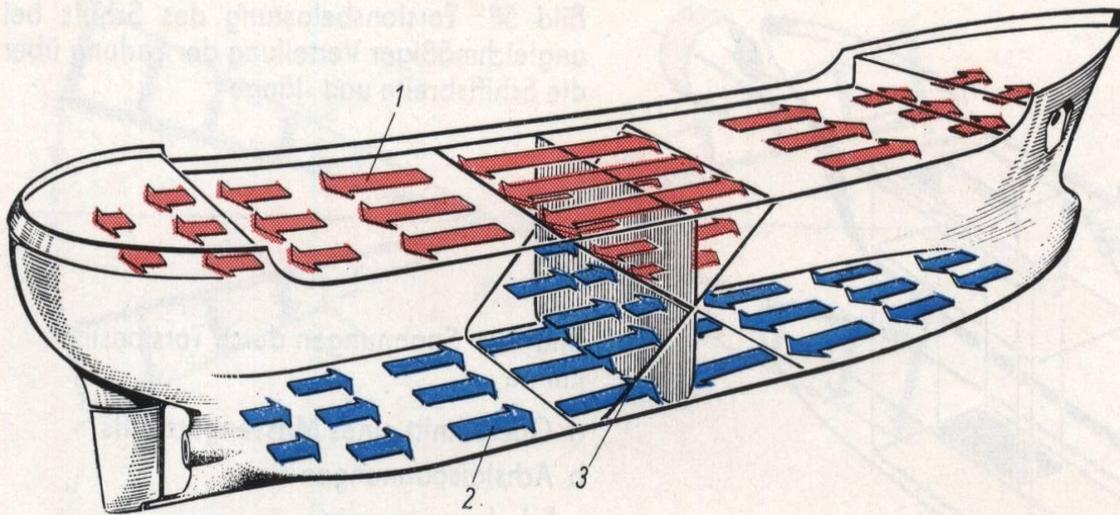
1- вышедший из воды объём; 2 – вошедший в воду объём;

f – стрелка прогиба корпуса от действующих на него сил.

Помимо сил, вызывающих общий продольный изгиб, на судно действуют местные поперечные нагрузки, главным образом давление забортной воды. Чем глубже в воде находится конструкция, тем больше действующее на нее давление воды. Кроме того, на корпус действуют такие динамически переменные и ударные силы, как силы инерции при качке, удары волн и пр. Конструкция корпуса судна должна обеспечивать его прочность как при общем изгибе, так и при действии различного рода местных нагрузок.

Общую прочность корпуса обеспечивают все продольные конструктивные связи, непрерывные на значительной длине (более 15% длины судна).

Местную прочность корпуса, главным образом при воздействии давления забортной воды и находящегося внутри корпуса груза и жидкого топлива, обеспечивают пластины днища, бортов, поперечных и продольных переборок, а также палуб (испытывающих давление палубного груза или давление вкатывающейся на палубу судна воды).



**Нагрузка на судно на волнении:
a – судно на вершине волны; *b* – судно на подошве волны**

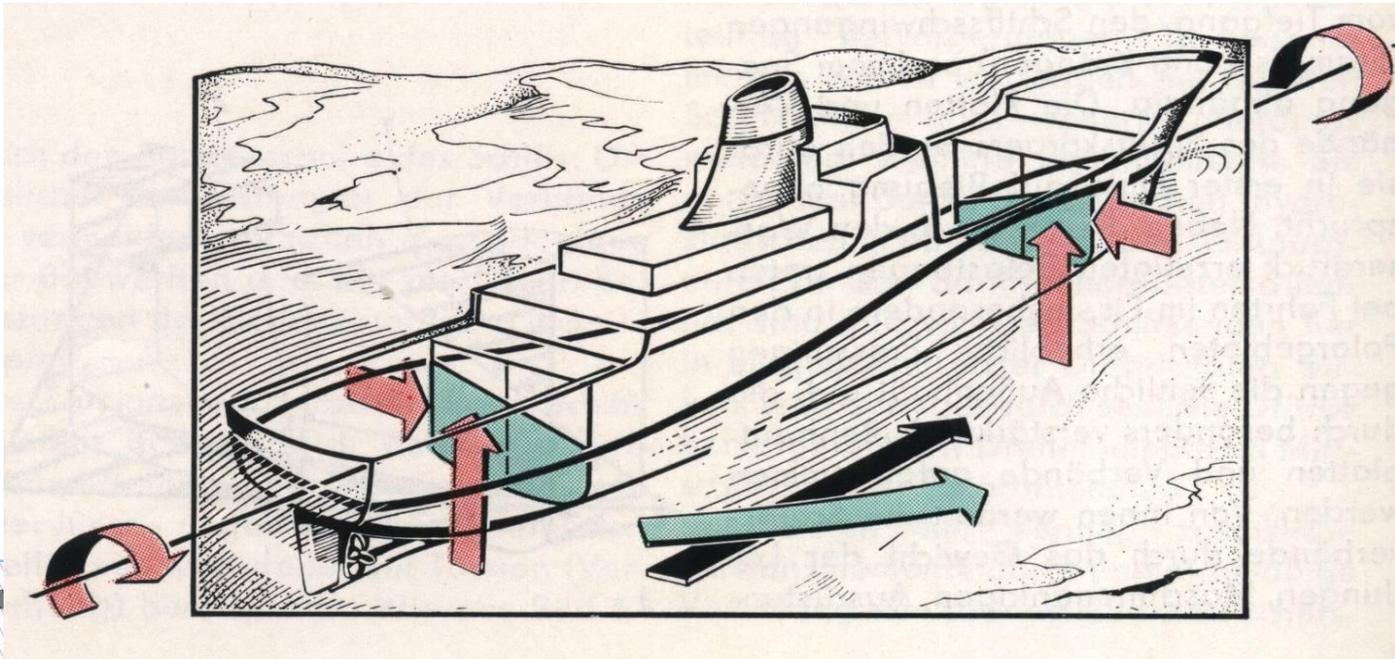
В реальных условиях подобное положение будет иметь место при движении на попутном волнении, когда скорость судна равна скорости распространения волн. Этот режим (при $\lambda = L$) неблагоприятен как с точки зрения прочности (максимальные изгибающие моменты), так и с точки зрения устойчивости и управляемости.

При постановке судна на вершину волны можно отметить подвсплытие корпуса за счёт того, что обводы в средней, вошедшей в воду, части полнее, чем в оконечностях, которые из воды вышли. При постановке на подошву волны наблюдается противоположная картина.

Таким образом, вертикальные перемещения судна на волнении в значительной степени определяются полнотой его обводов и в первую очередь коэффициентом полноты ватерлинии α .

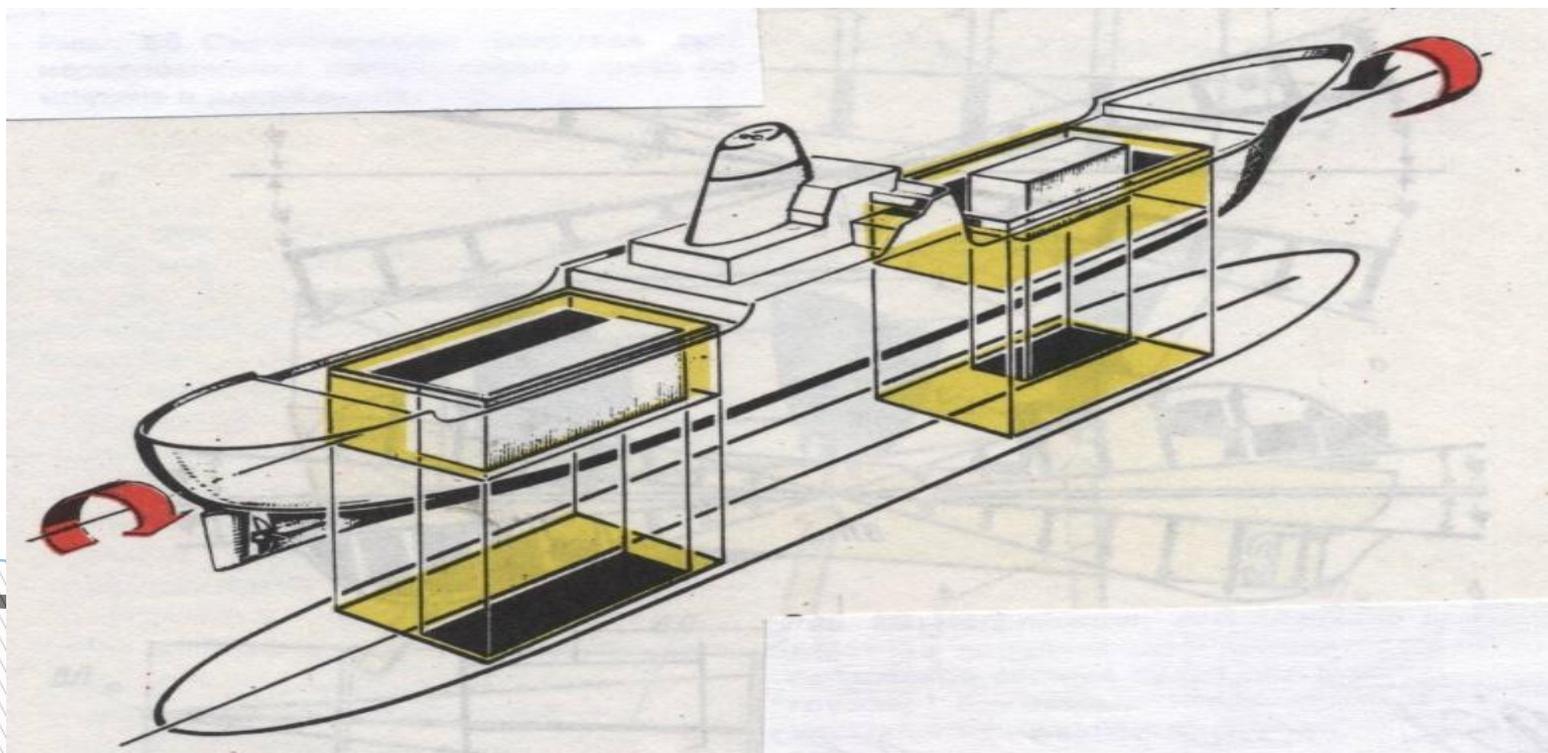
Максимальное значение волнового изгибающего момента при статической постановке на волну наблюдается в миделевом сечении корпуса

Скручивающая нагрузка возникает главным образом вследствие перераспределения выталкивающей силы, действующей на идущее под углом к волне судно. У оконечностей судна, входящих в гребни волн, увеличенная выталкивающая сила действует как в кормовой, так и в носовой оконечностях, причём на противоположных бортах. Поэтому наряду с изгибающими моментами возникают также крутящие моменты, которые достигают максимума в средней части судна.



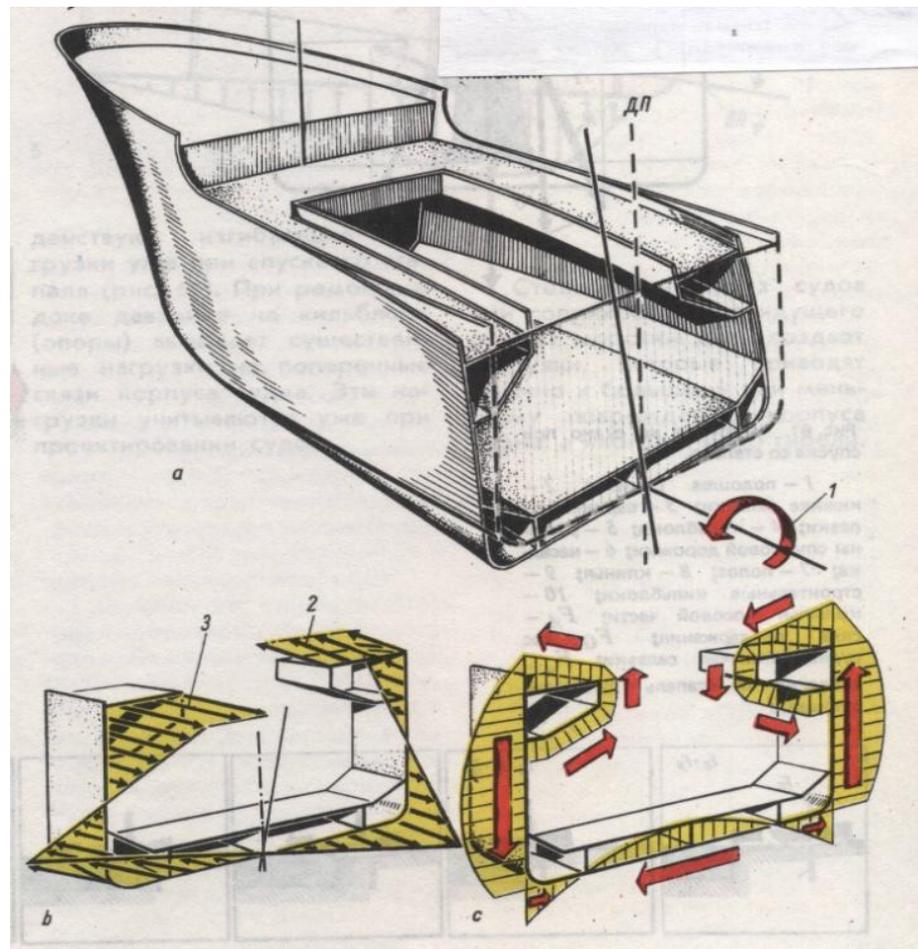
Скручивающая нагрузка на судно при косом курсе относительно волн

Наряду с этими крутящими моментами, вызванными распределением выталкивающей силы, снаружи на корпус судна действуют и другие, значительно меньшие, вращающие моменты. Они возникают вследствие бортовых гидростатических давлений. Так как глубины погружения по бортам судна различны, вращающие моменты, вызванные бортовыми давлениями, в средней части судна также являются наибольшими. Изнутри вследствие неравномерного распределения груза по ширине и по длине судна могут возникнуть дополнительные крутящие моменты, которые накладываются на действующие снаружи моменты, не вызывая наклона судна.



Скручивающая нагрузка при неравномерном распределении груза по ширине и длине судна

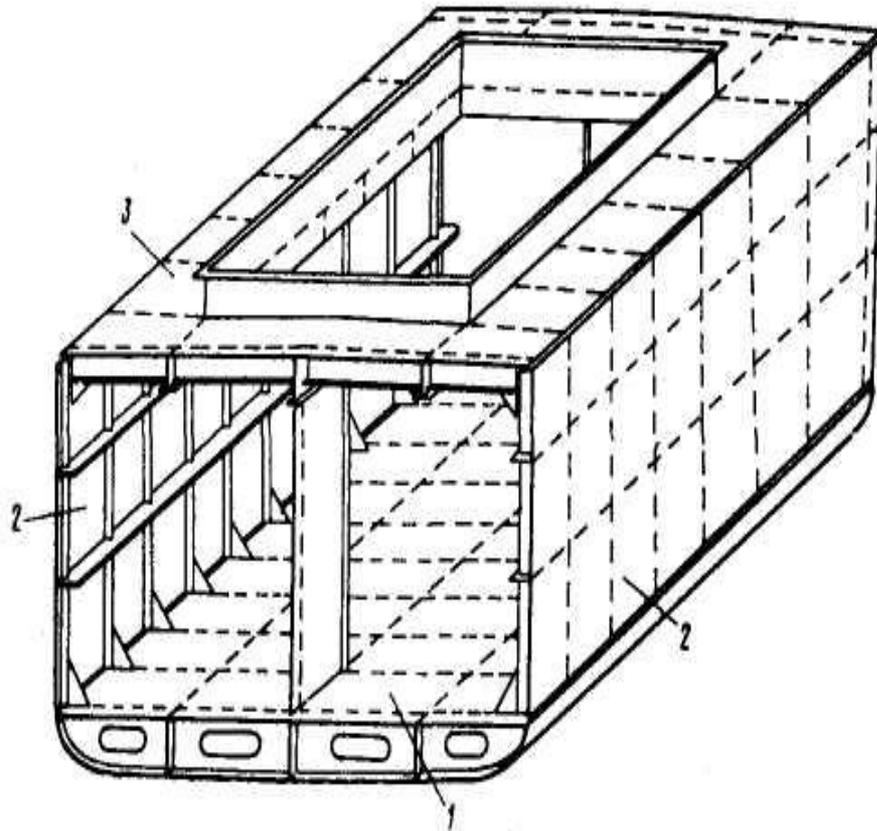
Крутящие моменты создают в судовых конструктивных связях напряжения сдвига (напряжения кручения), а в палубном настиле рядом с люками и между ними — дополнительные напряжения на растяжение, сжатие и изгиб. Значительны крутящие моменты у крупных судов с большой шириной люков и у судов с большим «раскрытием» палубы, таких как контейнерные суда. Здесь скручивание судна очень важно учитывать при укладке контейнеров плотными штабелями, которые во время погрузки и разгрузки, а также при движении судна не должны заклиниваться.



- Напряжения, возникающие при действии скручивающих моментов:**
- a** – поперечное сечение судна для массовых грузов;
 - b** – осевые напряжения; **c** – касательные напряжения.
 - 1** – скручивающий момент; **2** – напряжения сжатия;
 - 3** – напряжения растяжения

Системы набора. Шпация

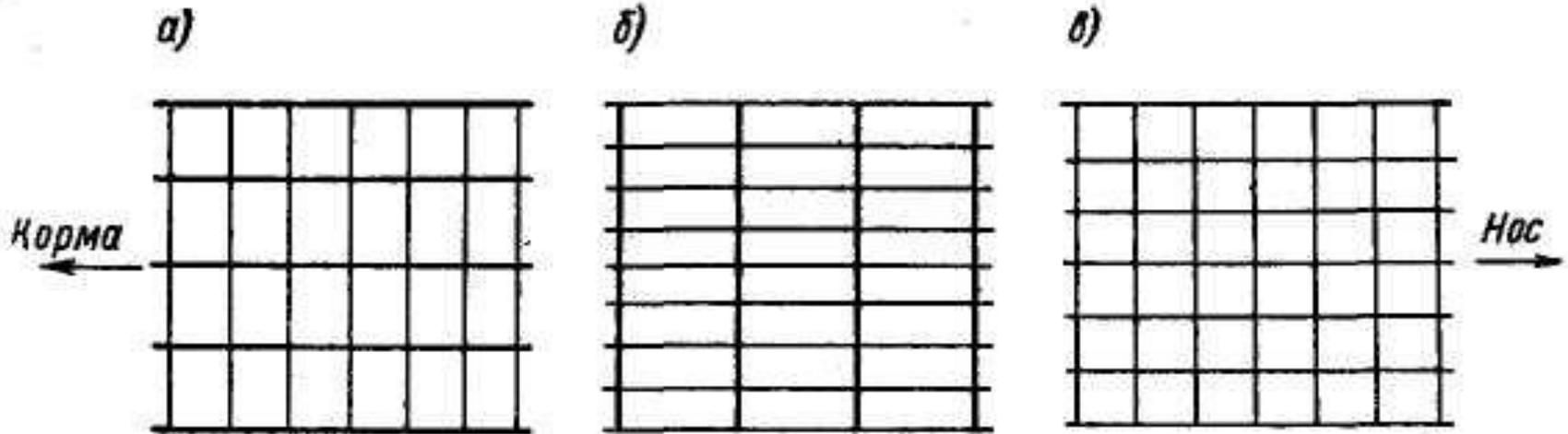
Корпус судна представляет собой оболочку, состоящую из горизонтальных и вертикальных пластин, подкрепленных балками. Совокупность пластины с подкрепляющими ее балками называют **перекрытием**. Различают днищевое, бортовое и палубное перекрытия. Для каждого перекрытия судового корпуса опорным контуром служат другие смежные перекрытия. Подкрепляющие каждое перекрытие балки идут в двух взаимно перпендикулярных направлениях: продольном и поперечном. Обычно несколько более жестких балок, идущих в одном направлении, поддерживают большее количество менее жестких балок другого направления. Первые называют **перекрестными связями**, а вторые — **балками главного направления**.



**Основные перекрытия корпуса судна.
1 – днищевое; 2 – бортовое; 3 – палубное.**

Система набора

Поперечная система набора



Система набора: а – поперечная; б – продольная; в – смешанная.

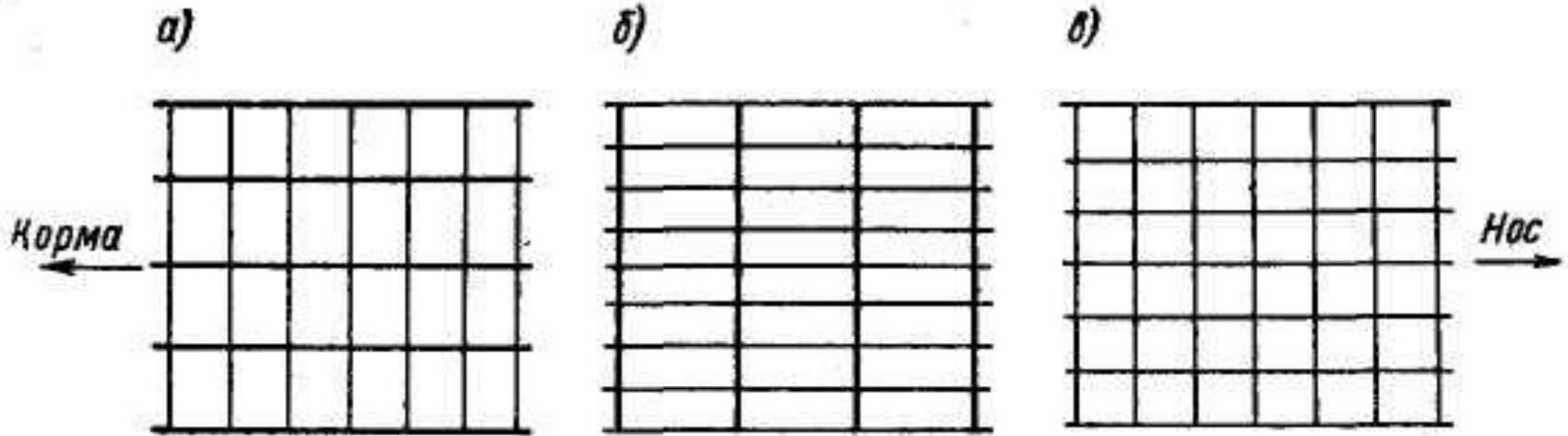
В зависимости от ориентации балок главного направления различают поперечную или продольную системы набора судовых перекрытий.

При поперечной системе набора (рис.а) балки главного направления идут поперек судна — от борта к борту на днищевых и палубных перекрытиях или от днища к палубе — на бортовых перекрытиях. В этом случае длинная сторона пластин перекрытия, ограниченных набором, расположена поперек судна. Общая продольная прочность обеспечивается наружной обшивкой, настилами палуб и конструкцией вертикального килля.

Поперечную систему набора всех судовых перекрытий применяют, как правило, на небольших судах с относительно малым отношением длины судна к высоте борта (L/H).

При увеличении размеров судна и отношения длины корпуса к высоте борта становится все труднее обеспечить продольную прочность и жесткость корпуса, так как толщина наружной обшивки возрастает и масса корпуса увеличивается. Поперечная система набора верхней палубы и днища становится невыгодной.

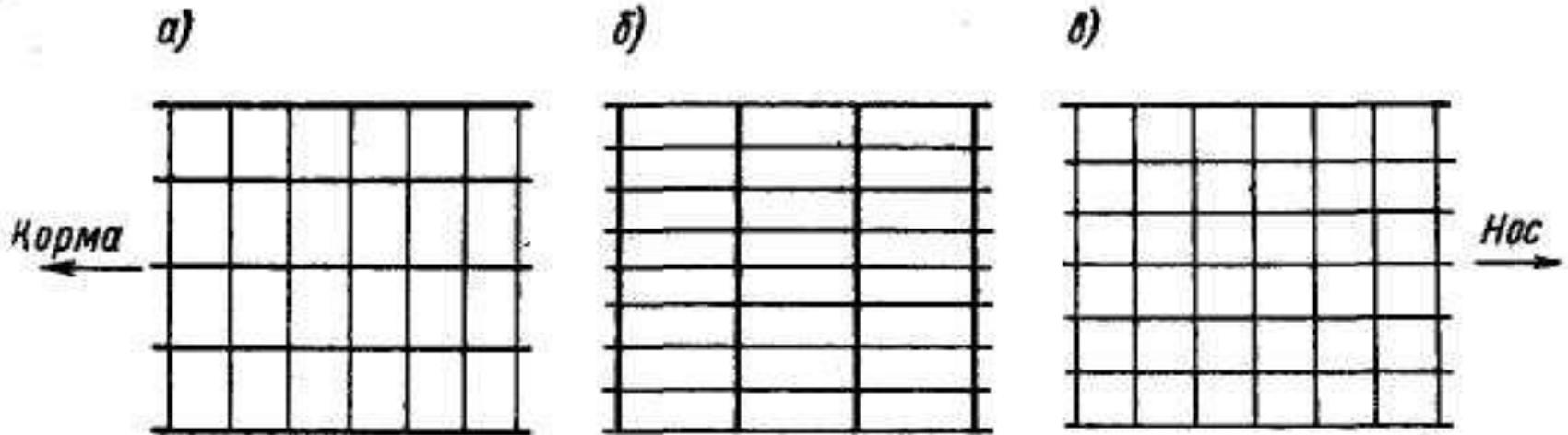
Продольная система набора



Система набора: а – поперечная; б – продольная; в – смешанная.

При продольной системе набора (рис. б) балки главного направления располагают вдоль судна, а перекрестные связи в виде рам — поперек. В этом случае длинная сторона пластин перекрытия направлена вдоль судна. Благодаря большому количеству продольных ребер жесткости удается с меньшими затратами металла обеспечить устойчивость перекрытий в продольном направлении, что дает выигрыш в массе корпуса. Продольную систему набора применяют для днищевых, палубных и, иногда, бортовых перекрытий на крупных, а также на быстроходных морских судах (танкерах, пассажирских, больших сухогрузных судах, быстроходных контейнеровозах, больших промысловых плавучих базах и т. п.).

Смешанная система набора



Система набора: *а* – поперечная; *б* – продольная; *в* – смешанная.

Кроме чисто поперечной и продольной встречается смешанная («клетчатая») система набора.

При смешанной системе (рис.в) набор состоит из сетки продольных и поперечных балок, расставленных на примерно одинаковых расстояниях друг от друга, в связи с чем нельзя выделить из них балки главного направления и перекрестные - связи (конфигурация пластин, ограниченных набором, приближается к квадрату). Однако, как правило, при этой системе преобладают поперечные связи.

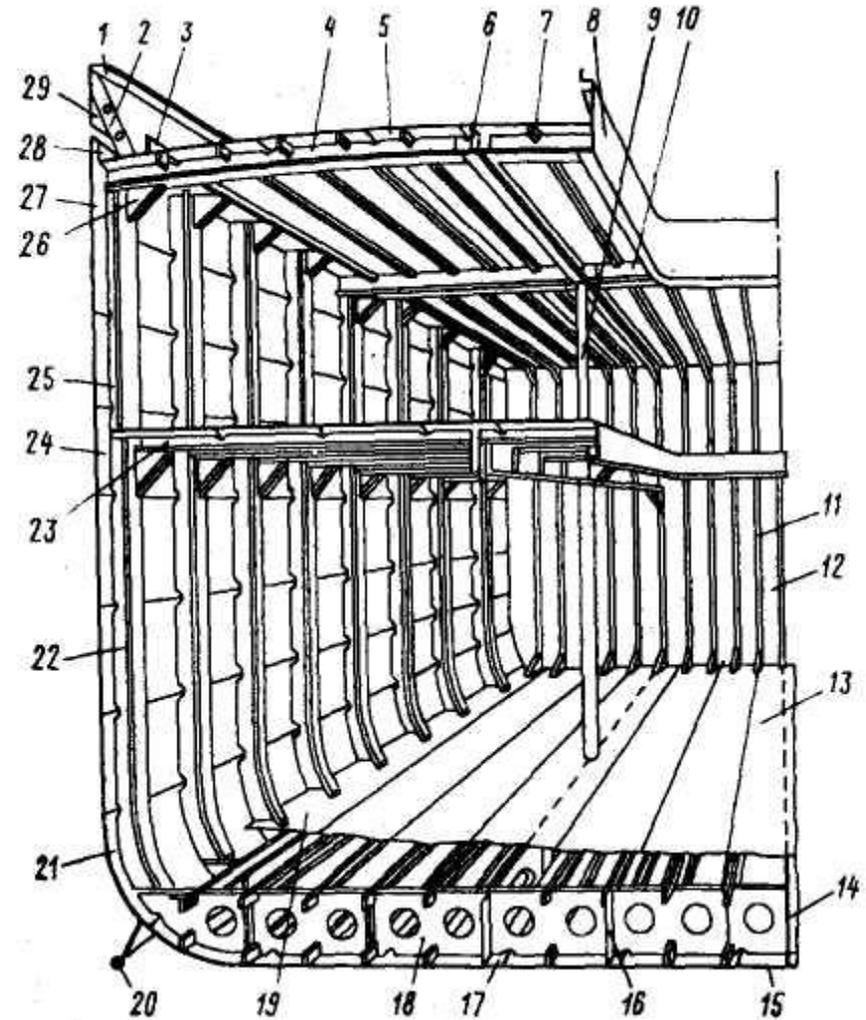
Балки поперечного набора устанавливаются на определенном расстоянии одну от другой, называемом **шпангоутным расстоянием**.

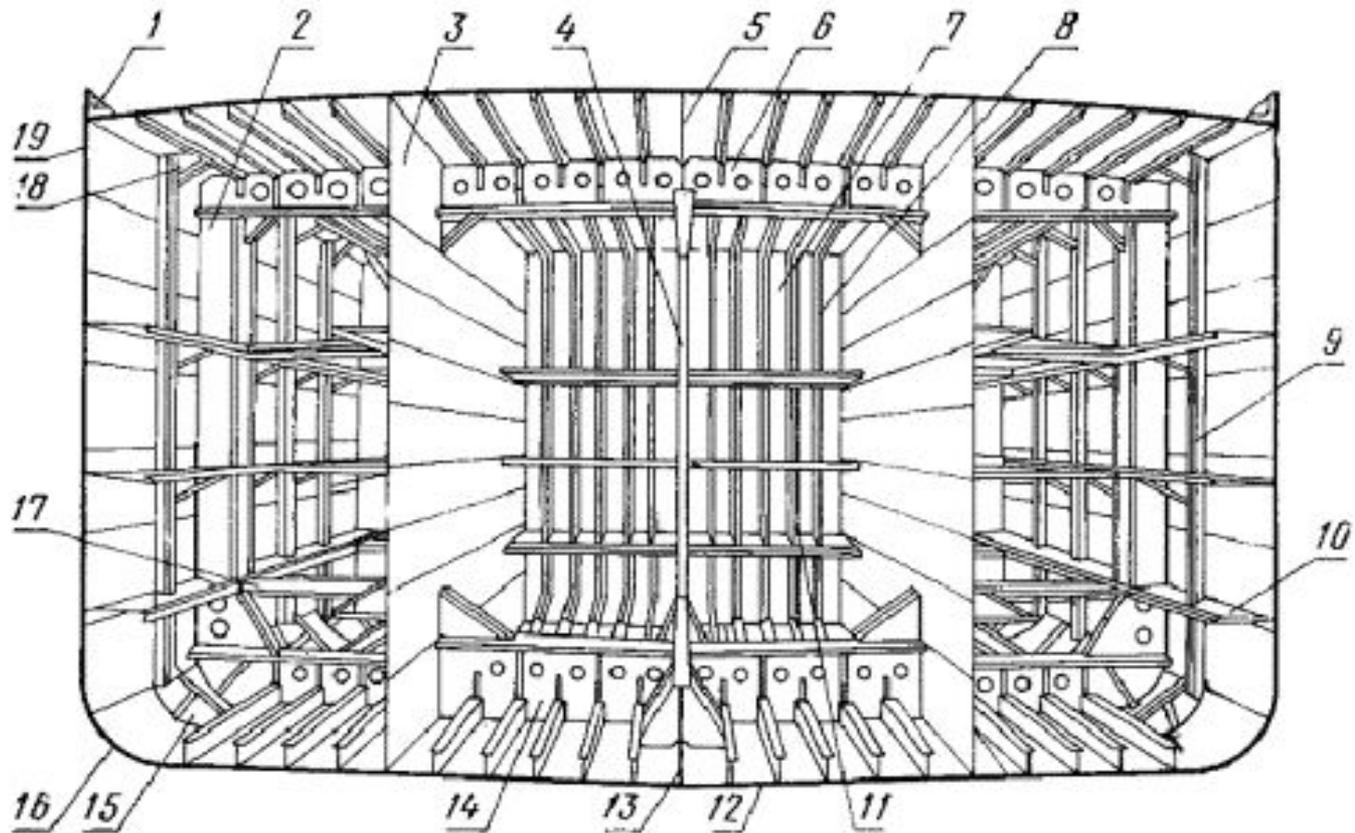
Промежуток между этими балками называют **шпацией**.

Шпангоуты, на которых установлены балки поперечного набора, называют **практическими шпангоутами**, в отличие от теоретических, или просто **шпангоутами**.

Поперечный разрез сухогрузного судна.

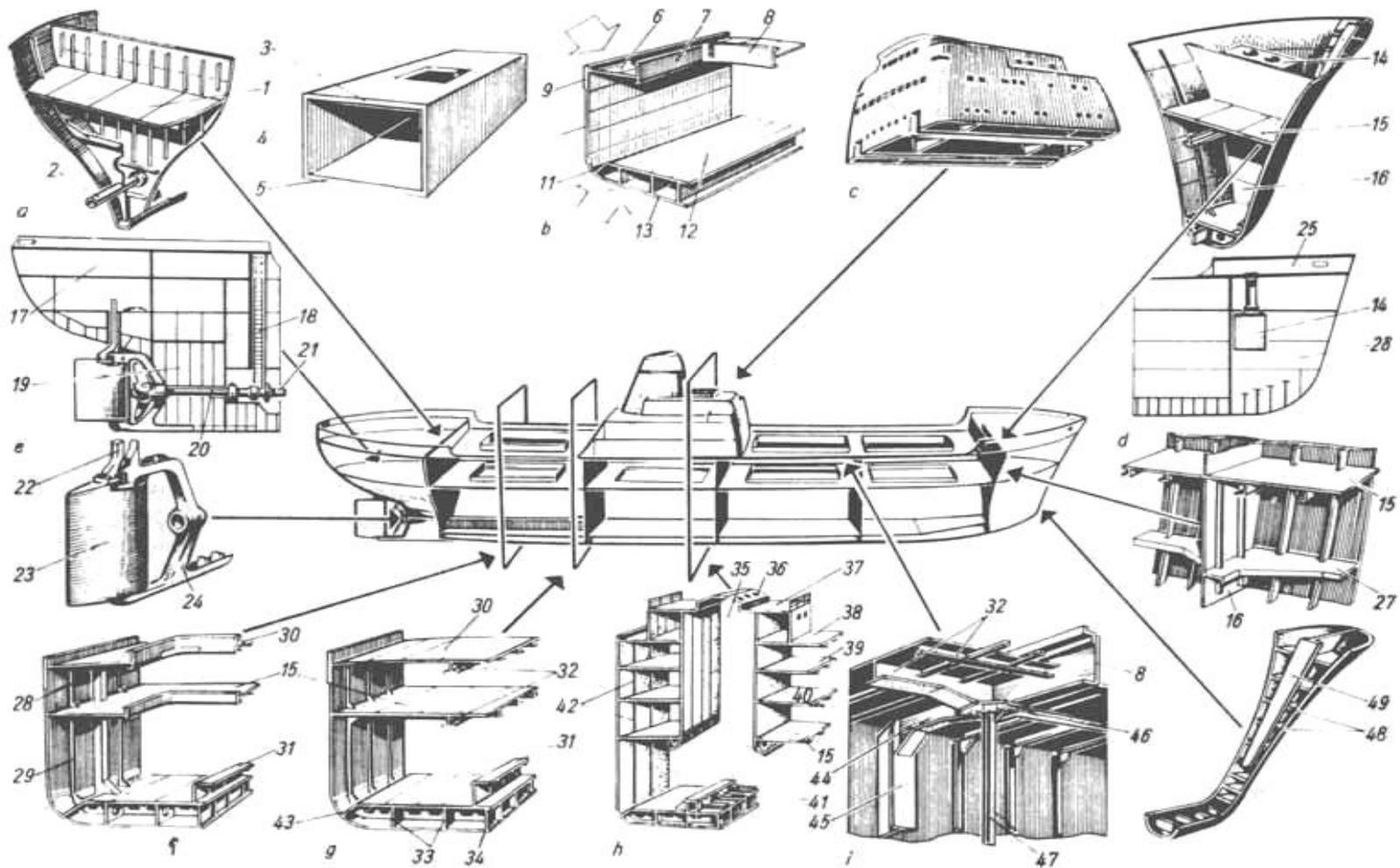
1 - планширь судна; 2 - стойка фальшборта; 3 - полоса ватервейса судна; 4 - рамный бимс; 5 - настил палубы судна; 6 - карлингс; 7 - продольная подпалубная балка судна; 8 - комингс люка судна; 9 - пиллерс судна; 10 - концевой бимс; 11 - стойка переборки судна; 12 - непроницаемая переборка корпуса судна; 13 - настил второго дна судна; 14 - вертикальный киль судна; 15 - горизонтальный киль судна; 16 - днищевой стрингер судна; 17 - наружная днищевая обшивка судна; 18 - флор; 19 - крайний междудонный лист судна; 20 - скуловой киль судна; 21 - скуловой пояс наружной обшивки судна; 22 - трюмный шпангоут судна; 23 - бимс; 24 - бортовая наружная обшивка судна; 25 - твиндечный шпангоут судна; 26 - бимсовая кница; 27 - ширстрек; 28 - стрингерный угольник судна; 29 - фальшборт.





Поперечный разрез нефтеналивного судна

1 - стрингерный угольник судна; 2 - рамный шпангоут судна; 3 - продольная переборка корпуса судна; 4 - доковая стойка переборки судна; 5 - карлингс; 6 - рамный бимс; 7 - поперечная переборка корпуса судна; 8 - стойка переборки судна; 9 - шпангоут судна; 10 - бортовой стрингер судна; 11 - горизонтальная рама переборки судна; 12 - горизонтальный киль судна; 13 - вертикальный киль судна; 14 - флор; 15 - скуловая кница судна; 16 - скуловой пояс наружной обшивки судна; 17 - распорка корпуса судна; 18 - продольная подпалубная балка судна; 19 - ширстрек.



Конструктивные элементы и связи корпуса судна:

а - ахтерпиковая переборка, б - коробчатая балка, с - надстройка, d - носовая оконечность, е - кормовая оконечность, f - район грузового люка, g - район между грузовыми люками, h - район машинного отделения, i - главная палуба в районе угла грузового люка 1 — палуба ахтерпиковой цистерны; 2 — дейдвудная труба; 3 — верхний пояс обшивки; 4 — стенка; 5 — нижний пояс обшивки; 6 — настил палубы; 7 — продольный комингс люка; 8 — поперечный комингс люка; 9 — ширстрек; 11 — скуловой пояс; 12 — настил второго дна; 13 — днищевая обшивка; 14 — цепной ящик; 15 — твиндек; 16 — таранная переборка; 17 — ют; 18 — аварийный выход; 19 — ахтерпик; 20 — гребной вал; 21 — дейдвудная труба; 22 — ахтерштевень; 23 — перо руля; 24 — баллер руля; 25 — бак; 26 — форпик; 27 — бортовой стрингер; 28 — твиндечный шпангоут; 29 — трюмный шпангоут; 30 — верхняя (главная) палуба; 31 — туннель гребного вала; 32 — карлингсы; 33 — днищевые стрингеры; 34 — вертикальный киль; 35 — машинная шахта; 36 — верхний световой люк; 37 — навигационный мостик; 38 — шлюпочная палуба; 39 — палуба средней надстройки; 40 — верхняя (главная) палуба; 41 — фундамент главного двигателя; 42 — шпангоут надстройки; 43 — крайний междудонный лист; 44 — рамный бимс; 45 — рамный шпангоут; 46 — ромбоидальный лист-накладка; 47 — пиллерс; 48 — носовые брештуки; 49 — продольное ребро.

И так:

Прочностью судна называется способность его корпуса не разрушаться и не изменять своей формы под действием постоянных и временных сил. Различают общую и местную прочность судна.

Общей продольной прочностью корпуса судна называется его способность выдерживать действие внешних сил, приложенных по длине.

Общая прочность судна обеспечивается водонепроницаемой оболочкой, которой служит обшивка и верхняя палуба, настил других палуб, продольные переборки с подкрепляющими их конструкциями и всеми конструктивными связями, имеющими длину больше высоты борта.

Местной прочностью корпуса называется способность его отдельных конструкций противостоять дополнительному воздействию сил: главным образом давлению забортной воды и сосредоточенным нагрузкам.

Для обеспечения местной прочности отдельных конструкций предусматривают их специальное местное подкрепление.



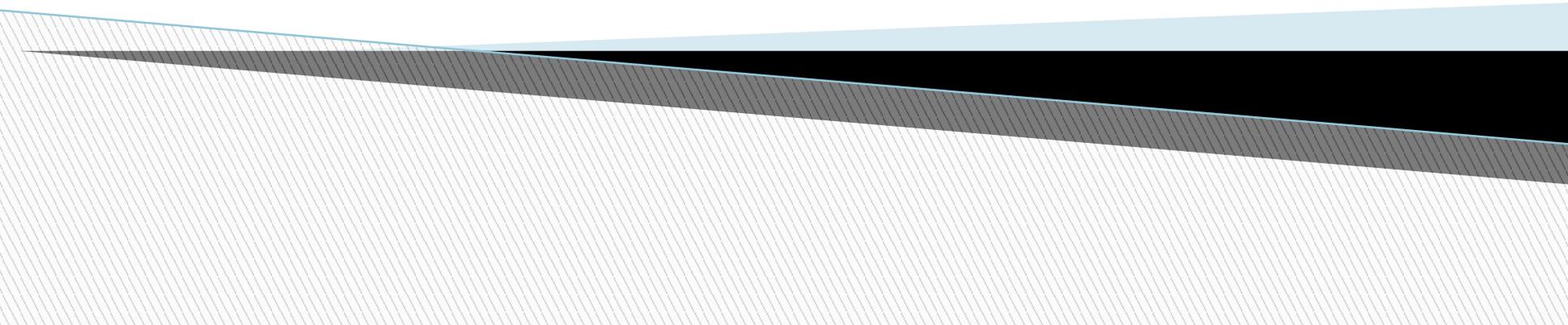
105 метровый 6535 тоннажный танкер Doola 3 взорвался возле острова Jawol, Южная Корея . Танкер разорвало взрывом одной из порожних цистерн. Взрыв разломил судно пополам





Гигантский контейнеровоз MOL Comfort разломился на две части в Аравийском море

Понятие прочности является одной из составляющих более широкого по содержанию понятия надёжности корпуса судна (технического средства). Под надёжностью сооружения понимают его способность выполнять заданные функции в заданных условиях эксплуатации в течение заданного срока службы с требуемой степенью гарантии. В отличие от прочности надёжность определяется не только возможностью разрушения, но и рядом других характеристик, например, нарушением плотности (водотечностью), нарушением штатной работы оборудования из-за деформаций корпуса или вибрации конструкций.



Прочность и надёжность корпуса обеспечивается совокупностью различных мероприятий расчётно-конструкторского, технологического, эксплуатационного характера, а также модельными и натурными испытаниями конструкций. Условно все такие мероприятия принято относить к одному из четырёх направлений (проблем) строительной механики корабля (СМК):

1) проблема внешних воздействий — какие внешние силовые воздействия и в каких условиях испытывает корпус и его конструкции (численного значения, повторяемость, время действия и т. д.); кроме этого изучаются внешние воздействия, могущие повлиять на свойства и работоспособность материала корпуса (температура, агрессивная среда и др.);

2) проблема внутренних усилий — какое напряженно-деформированное состояние возникнет в корпусе и его элементах при воздействии на них известных (заданных) внешних сил;

3) проблема опасных состояний — при каких напряженно-деформированных состояниях (НДС) или комбинациях внешних нагрузок возможно разрушение конструкций;

4) проблема нормативов, запасов и гарантий прочности — какие запасы требуется ввести в расчётные значения внешних и внутренних усилий, чтобы корпус мог надёжно исполнять свои функции; какие контрольные операции и специальные мероприятия нужны для гарантии требуемого уровня прочности и надёжности корпуса.