# Теория проектирования судов

Длительная работа по созданию судна состоит из двух основных частей: разработки проекта судна и его постройки.

Разработка проекта начинается с определения желаемых эксплуатационно-экономических показателей судна (назначение, грузоподъемность, скорость, район плавания и т.п.). Установленные таким образом требования к будущему судну, называемые *характеристиками* оформляются в виде задания на разработку проекта. В процессе проектирования по условиям задания определяются его *элементы* (размеры и обводы корпуса, состав и расположение помещений, тип и мощность главных двигателей и т.п.). Все фазы проектирования судна, начиная от выявления потребности в нем и до оформления рабочей документации на его изготовление, базируются на научно-методическом аппарате *теории проектирования судов* (ТПС) – дисциплины, изучающей круг вопросов, связанных с разработкой заданий на проектирование судов и определением их элементов, в первую очередь размеров и формы корпуса.

В современном состоянии ТПС состоит из двух частей и рассматривает задачи двух иерархических уровней (табл. 1).

**Основные задачи теории проектирования судов**

*таблица 1*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Содержательная часть | Формально-математическая часть |
| Верхний *уровень* | Разработка способов оптимизации состава и пополнения флота (определение оптимальных характеристик судов, указываемых в задании на проектирование).  Установление общих требований к судам. | Разработка математических методов решения задач В-С.  Автоматизация процессов решения задач В-С. |
| Нижний уровень | Исследование взаимосвязи между элементами и характеристиками судов.  Разработка методов проектирования (определения оптимальных элементов проектируемого судна).  Разработка методов построения теоретического чертежа и схемы общего расположения судна. | Разработка математических методов решения задач Н-С.  Автоматизация решения задач Н-С. |

К первой, *содержательной*части ТПС, занимающейся исследованием физической стороны проектных задач, относятся следующие вопросы:

* выявление взаимосвязи элементов и характеристик с техническими, эксплуатационными и экономическими требованиями, предъявляемыми к судну;
* разработка методик проектирования;
* разработка методов построения теоретического чертежа и схемы общего расположения судна.

Вторая, *формально-математическая* часть ТПС, занимается поиском математических способов решения проектных задач, в частности автоматизацией проектных расчетов.

Задачи *верхнего* уровня или *внешняя* задача ТПС заключается в разработке вопросов, связанных с определением характеристик проектируемых судов, которые указываются в задании на проектирование, а также установлении общих требований, предъявляемых к проектируемым судам.

Задачи *нижнего* уровня или *внутренняя* задача ТПС заключается в определении элементов проектируемого судна.

Внутреннюю задачу содержательной части подразделяют еще на два уровня: верхний, связанный с определением *основных элементов* (главных размерений и коэффициентов полноты) и нижний, на котором решаются вопросы архитектурно-конструктивного оформления проекта, оборудования и общего расположения.

Поскольку результаты проектирования должны не просто удовлетворять требованиям задания, но удовлетворять наилучшим образом, под характеристиками и элементами следует понимать их оптимальные значения. Таким образом, можно сказать, что целью решения внешней задачи ТПС является оптимизация состава флота и разработка общих требований к судам, а внутренней задачи – оптимизация элементов судна.

ТПС тесно связана с другими судостроительными дисциплинами, в основном с теорией и строительной механикой корабля. Меньше – с технологией и экономикой судостроения и другими дисциплинами. В ТПС используется научный аппарат этих дисциплин, при рассмотрении вопросов, связанных с остойчивостью, качкой, ходкостью, прочностью проектируемого судна. Но в отличие от названных дисциплин этот аппарат используется исходя из других позиций. Это обусловлено двумя важнейшими особенностями ТПС:

Во-первых, вТПС решаются *не прямые задачи, а обратные*. Например, если в теории корабля при известных размерениях судна следует определить параметры остойчивости, то в ТПС задача ставится следующим образом – найти такие размерения судна, которые бы обеспечили заданные параметры остойчивости.

Во-вторых, в отличие от остальных дисциплин, рассматривающих свойства судна по отдельности, вне связи друг с другом, для ТПС характерен *комплексный подход* к показателям проектируемого судна. Следует учитывать, как изменение того или иного показателя скажется на прочих характеристиках судна. Так увеличение длины *L* благоприятно сказывается на ходкости, но отрицательно отражается на прочности судна. По этой причине не все рекомендации ТПС, совпадают с аналогичными рекомендациями других дисциплин.

**Стадии проектирования судна**

Процесс проектирования судна, согласно ГОСТ 2.103, разделяется на несколько стадий. Как уже указывалось, непосредственному проектированию судна, т.е. решению внутренней задачи ТПС, должно предшествовать решение задачи внешней, которая начинается с определения оптимального состава.

Сам процесс разработки проекта судна начинается с *заявки заказчика* – владельца будущего судна, содержащей исходные *основные технико-эксплуатационные требования* к судну (ОТЭТ). В числе этих требований обычно указывается: назначение, условия эксплуатации, а также количество судов, необходимых заказчику. Эта заявка поступает в проектную организацию, которая на ее основе разрабатывает *техническое задание* на проектирование судна.

В техническом задании на основе изучения предполагаемого характера эксплуатации судна, обобщения и анализа опыта и тенденций мирового судостроения развиваются и уточняются данные ОТЭТ. Применительно к транспортным судам в техническом задании обычно указывают: тип и назначение судна; грузоподъемность (пассажировместимость) и характер перевозимого груза; скорость хода; тип энергетической установки; район и дальность плавания; автономность; ограничения главных размерений; класс Регистра; международные конвенции, требованиям которых должно удовлетворять судно; требования к общему расположению и обитаемости; численность и состав экипажа; специальные требования, относящиеся к мореходным качествам, устройствам, системам, средствам связи и навигации, степени автоматизации и т.п.

Одно из важных условий к содержанию технического задания является отсутствие противоречий между отдельными требованиями.

Техническое задание согласовывается с заказчиком, и после его утверждения передается проектно-конструкторским организациям для разработки на его основе *технического предложения*, которое, по сути, является сокращенным проектом судна. К основным задачам, решаемым на данной стадии, относятся следующие: проверка выполнимости и совместимости требований задания, предварительное определение основных элементов и общего расположения судна, проверка возможности комплектации судна необходимым оборудованием, определение проектной стоимости и экономической эффективности его эксплуатации, сопоставление проектируемого судна с существующими судами. В состав материалов данной стадии включаются, кроме пояснительной записки и расчетов, эскизы теоретического чертежа и общего расположения судна.

Как правило, техническое предложение разрабатывается в нескольких вариантах несколькими проектными организациями. В результате конкурса выбираются лучшие из них, которые являются основой для дальнейшей разработки проекта.

На основе этих вариантов, прошедших экспертизу, согласование и утверждение, разрабатывается *эскизный проект*, в котором уточняются характеристики полученные на предыдущей стадии путем более детальных расчетов и чертежей. На этом этапе разрабатывается конструктивный мидель-шпангоут, выполняются расчеты по прочности судна и определению элементов корпусных конструкций, разрабатываются положения по технологии и организации постройки судна, определяется стоимость головного и серийного судов.

Эскизный проект должен содержать принципиальные проектные и конструктивные решения по всем элементам судна и обоснование выбора оптимального варианта, для последующей разработки. Так же как и техническое предложение, эскизный проект проходит экспертизу, согласование и утверждение. На следующей стадии проектирования разрабатывается *технический проект*, в котором окончательно определяются все элементы суда и его технические и эксплуатационно-экономические характеристики. Как правило, элементы судна и его технические характеристики, принятые в эскизном проекте существенно не меняются. На данной стадии решаются в основном конструктивные и технологические вопросы по корпусу, энергетической установке, оборудованию и расположению помещений. Технический проект проходит через экспертизу, согласование, одобрение органами надзора (Регистр, техническая инспекция, комитет по экологи и пр.) и утверждение. На основе материалов технического проекта комплектуется документация для заключения договора на постройку судна.

На основе технического проекта разрабатывается рабочая конструкторско-технологическая документация, позволяющая организовать технологический процесс обработки и сборки конструктивных составляющих судна, монтаж его оборудования и всю последовательность постройки судна.

#### Деление процесса проектирования на составляющие

#### таблица 2

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *Проект* | *Часть* | *Этап* | | *Стадия* |
| разработка проекта | проектная | внешнее проектирование | | ОТЭТ |
| техническое задание |
| внутреннее  проектирование | верхний  уровень | техническое предложение |
| эскизный проект |
| нижний  уровень | технический проект |
| технологическая | конструкторско-технологический | | конструкторско-технологическая  документация |

Относительная трудоемкость отдельных стадий следующая: техническое предложение и эскизный проект 5 – 10 % от объема работ, технический проект 10 – 15 %, рабочая документация 75 – 85 %. Как следует из этих цифр, на начальные стадии, посвященные определению основных элементов судна, приходится незначительный объем работ. Но от решений принятых именно на этих стадиях, зависят показатели эффективности будущего судна, так как вся последующая достаточно трудоемкая работа, по существу является детализацией этих решений.

Кроме нормативного существуют и другие подходы к делению процесса проектирования и группировке его стадий. Наиболее полным и соответствующим составу ТПС является следующее деление (табл. 2).

Весь процесс разработки проекта разделяется на проектирование и разработку рабочей документации. В свою очередь проектирование судна делится на внешний и внутренний этапы. В соответствии со спецификой решаемых вопросов этап внутреннего проектирования состоит из двух уровней, соответствующих уровням внутренней задачи ТПС.

**Развитие теории проектирования судов**

Вплоть до середины XVIII века суда строились без какого-либо предварительного проектирования, ориентируясь только на существующее судно (так называемый *прототип*), хорошо зарекомендовавший себя в процессе эксплуатации. Неудивительно, что до этого периода внешний вид и общее расположение судов менялись очень медленно.

Первые попытки предварительного определения элементов судна, были связаны с построением обводов судна. Возможность проектных расчетов были обусловлены развитием методов интегрального исчисления. Этот период становления ТПС связан с именами шведского адмирала Ф.-Г. Чапмена, английского кораблестроителя А.Дина, академика Эйлера и корабельного инженера М.М. Окунева.

Заметный толчок в развитии дали переход от деревянного к металлическому судостроению и замена парусных движителей механическими энергетическими установками. Отсутствие прототипов вынудило искать способы предварительного расчета элементов и характеристик судна. Именно к этому периоду относятся появление методов строительной механики, расчетов ходкости, остойчивости, непотопляемости и т.п. Большой вклад в развитие ТПС в этот период внесли русские кораблестроители С.О. Макаров, И.Г. Бубнов, К.П. Боклевский, А.А.Попов, американский исследователь У. Ховгаард, французского инженера Ж.-О. Норманн.

Первый опыт обобщения накопленных знаний был предпринят К.П. Боклевским, первым деканом кораблестроительного факультета Санкт-Петербургского политехнического института, опубликовавшим в 1905 г. материалы по курсу проектирования судов. В дальнейшем трудами В.Л. Поздюнина, Л.М. Ногида, В.В. Ашика, А.В. Бронникова ТПС превратилась в самостоятельную науку, базирующуюся на достижениях математики, физики, гидромеханики, теории корабля, строительной механики и т.д. Круг задач, решаемых современной ТПС, обозначен выше. За границей ТПС длительное время оставалась составной частью других судостроительных дисциплин – корабельной архитектуры и теории корабля.

Конкурсный подход к выбору предварительных проектов (технического предложения) заставил проектантов искать способы сокращения продолжительности проектирования. Одним из таких способов является создание базового проекта с определенным набором показателей, которые по желанию заказчика можно было бы легко изменить. Наличие такого проекта позволяет, в условиях ограниченного времени, провести более точные расчеты, что немаловажно в условиях конкуренции. Такой *исследовательский* подход к проектированию позволил накопить данные о связи элементов судна с его характеристиками. Большой помощью в создании баз данных таких проектов явилось появление *средств* *автоматизированного проектирования* (САПР).

В середине 70-х годов была сформулирована концепция CALS-технологий, основанная на требованиях к непрерывной информационной поддержке жизненного цикла изделия (Continuous Added Life cycle Support). Данные технологии, направленные на повышение эффективности производства, сейчас используются во всех отраслях науки и техники. Применительно к ТПС возможности использования CALS-технологий сводятся, например, к созданию *электронного паспорта* судна, где собраны все данные о его элементах и характеристиках и их изменении в процессе эксплуатации судна. Накопление таких данных способствует созданию более совершенных расчетных методик, основанных на статистических закономерностях, сокращению времени на проектирование, удешевлению процесса проектирования, строительства и ремонта судов.

В конце ХХ века, задачи ТПС расширились. Во-первых, плановое хозяйство СССР, предопределило появление внешней задачи ТПС и связанные с ней проблемы оптимизации состава целых флотов. Во-вторых, от создания судна как самостоятельной транспортной единицы, проектанты перешли к созданию транспортных систем, включающих наземный транспорт, порт и суда-перевозчики. Такое *комплексное* проектирование отражает современное состояние ТПС.

Пересчет элементов плавучести и остойчивости судна по прототипу

Определение ряда показателей мореходных качеств проектируемого судна путем пересчета с прототипа играет существенную роль в ТПС.

* позволяет рассчитать эти показатели, минуя расчеты по теоретическому чертежу, то есть еще до его построения;
* уменьшает трудоемкость, а следовательно продолжительность расчетов. Это дает возможность оценить мореходные качества судна, сравнить их c требуемыми по заданию на проектирование и отсечь заранее неприемлемые решения.
* Структура формул пересчета позволяет установить характер влияния элементов на показатели мореходных качеств проектируемого судна.

В то же время точность этого метода уступает точности прямых расчетов по теоретическому чертежу, поэтому достоверные результаты могут быть получены только при использовании близкого прототипа.

Для получения удовлетворительных результатов расчета необходимо выполнение условия геометрического подобия формы корпуса прототипа и проектируемого судна. В первую очередь, условие подобия предполагает равенство коэффициентов полноты, то есть:

*δ* = *δ*0; *α* = *α* 0; *β* = *β*0,

где индексом "0" обозначены величины, относящиеся к прототипу.

Различают *полное* и *частичное* подобие. При полном подобии сопоставляемых судов должно выполняться условие

*L*/*L*0 = *B*/*B*0 = *T*/*T*0 = *λ*,

где *λ* – модуль подобия. При частичном (аффинном) подобии

*L*/*L*0 = *l*; *B*/*B*0 = *b*; *T*/*T*0 = *t*; *l* ≠ *b* ≠ *t*.

Пересчет элементов плавучести и начальной остойчивости может быть осуществлен по двум способам – на основе структуры физических формул между характеристиками и элементами судна и путем замены в формулах теории корабля элементов проектируемого судна элементами прототипа с переходными модулями. Например для водоизмещения

*V* = *δLBT* = *δ lL*0 *bB*0 *tT*0 = *lbtδ L*0*B*0*T*0= *lbtV*0

или по зависимости теории корабля

.

Момент инерции площади ВЛ *Ix* можно представить как часть момента инерции прямоугольника *LB*,



или по формулам теории корабля

.

При ненулевых углах крена при выводе формул пересчета необходимо учитывать изменение углов и длин отрезков в зависимости от изменения размерений проекта по отношению к прототипу.



*Рис.**1. Изменение углов крена геометрически подобных судов*

*Рис.**2. Изменение длин отрезков геометрически подобных судов*

Рассмотрим, как соотносятся углы крена прототипа и проектируемого судна. Пусть действующая ватерлиния прототипа описывается прямой *А*0*В*0, расположенной под углом Θ0 к оси *y* (см. рис. 1). Тогда,

.

При изменении масштаба по оси *y* в *b* раз, а по оси *z* в *t* раз, точки *А*0 и *В*0 перейдут в точки *А* и *В*, с координатами *А* (0; *tzА*0) и *В* (*byВ*0; *tzВ*0). Тогда,

.

Аналогично можно найти, как соотносятся длины отрезков прототипа и проекта. Пусть *а*0 = *А*0*В*0 – длина какого-то отрезка прототипа, расположенного под углом Θ0 к оси *у* (см. рис. 2). Проекция отрезка на эту ось,

*А*0*С*0= *а*0*Соs*Θ0.

При изменении масштаба вдоль оси *у* в *b* раз отрезок трансформируется в *а'* = *А'В'*, расположенный под углом Θ*'*. При этом его проекция на ось *у*,

*А'С'* = *b*(*А*0*С*0) = *b а*0*Соs*Θ0.

Изменение масштаба по оси *z* в *t* раз переместит точки *А'*, *В'* и *С'*, соответственно в *А*, *В* и *С*. Отрезок *а* = *АВ*, расположенный под углом Θ к оси *у* будет связан с *а*0 следующими соотношениями:

*АС* = *А'С'* = *b*(*А*0*С*0) = *b а*0*Соs*Θ0,

Откуда

.

При Θ= 0 данное выражение совпадает с полученными ранее выражениями для *L*, *В* и *T*. Поперечный момент инерции проектируемого судна при Θ≠ 0 с учетом выражения полученного ранее для *Ix*.

,

а метацентрический радиус,

.

Для больших углов крена показателем остойчивости служит не метацентрическая высота, а плечо статической остойчивости *lcт*. Получим выражение для его определения. Из рис. 3 видно, что,



*Рис. 3. Определение lст*

.

Из треугольника *C*0*QP*,

.

*QR* = *FC*1. Из треугольника *C*1*FP*,

.

Из треугольника *C*0*GE*,

.

Окончательно получим,

*lст* = *уСos*Θ + *zcSin*Θ – *aSin*Θ.

С учетом масштабов длин, данное выражение можно переписать в виде,

*lст* = *bуc*0*Сos*Θ + *tzc*0*Sin*Θ – *ta*0*Sin*Θ.

Частными случаями полученной зависимости будут выражения:

при *l* ≠ 1, *b* = *t* = 1

Θ= Θ0 , *ρ* = *ρ*0, *lcт* = *lcт*0.

При *l* = *b* = *t* = **

Θ= Θ0 , *ρ* = * ρ*0, *lcт* = ** *lcт*0.

Таким образом, если известны значения плеч статической остойчивости прототипа, задача решается довольно просто.

При пересчете параметров непотопляемости, проектанта, в первую очередь, интересуют следующие параметры: приращение осадки носом Tн, приращение осадки носом Tк и угол дифферента **.

При условии при *l* ≠ 1, *b* = *t* = 1 и одинаковых относительных координатах поперечных переборок, длина (и объем) поврежденного отсека изменяется пропорционально *l*. Соответственно, масса влившейся в отсек воды *Р* = *lP*0, а координата ЦТ отсека *х* = *lx*0.

*х* = *lх*0

*P*0

*х*0

*P*

*Рис. 4. Соотношение затопленных отсеков подобных судов*

Тогда:

,

.

Аналогично *Tк* = *Tк*0.

Таким образом, при изменении длины судна, аварийная осадка не меняется, а дифферент уменьшается пропорционально *l*.

При *b* ≠ 1, *l* = *t* = 1 получаем *Tн* = *Tн*0,*Tк* = *Tк*0, ** = **0.

При *t* ≠ 1, *l* = *b* = 1 получаем Tн = *t* *Tн*0,*Tк* = *t* *Tк*0, ** = *t*0.

Показателем общей прочности являются максимальные нормальные напряжения *σ* возникающие в продольных связях корпуса под действием изгибающего момента *Мизг*.

,

где *W* – момент сопротивления корпуса.

,

где *I* – момент инерции площади эквивалентного бруса относительно нейтральной оси, *а* – численный коэффициент, *Н* – высота борта. Поскольку момент инерции равен площади поперечного сечения корпуса *S*, умноженный на квадрат радиуса инерции *r*, зависящего от высоты борта, то

.

Изгибающий момент возникает под воздействием сил, пропорциональных объему погруженной части корпуса, приложенном на плече, зависящим от длины корпуса. Следовательно

.

Тогда:

.

Таким образом, напряжения, возникающие в связях корпуса, пропорциональны длине и обратно пропорциональны высоте, а поскольку степень при модуле длины равняется двойке, увеличение длины судна приводит к интенсивному росту массы корпуса.

Относительно модуля *t* следует отметить, что полученная зависимость справедлива при условии *Т* = *tT*0 и *H* = *tH*0. Если изменяется только высота борта при неизменной осадке (*Т* = *T*0, *H* = *tH*0), то

.

В обратном случае (*Т* = *tT*0, *H* = *H*0) получим

.

При независимом изменении осадки и высоты борта (*Т* = *tT*0, *H* = *hH*0)

.

Нагрузка судна. Виды водоизмещения

Согласно ОСТ 5.0206-76 нагрузка судна делится на 17 разделов.

01 – **Корпус**, включающий массы корпусных конструкций, надстроек, рубок, дельных вещей, окраски, изоляции и оборудования помещений.

02– **Устройства судовые**, включая средства активного управления.

03 – **Системы**, к которым относятся трубопроводы, арматура, механизмы и приводы управления насосов, кондиционеров и холодильных машин.

04 - **Энергетическая установка** – главные и вспомогательные механизмы.

05 – **Электроэнергетическая система, внутрисудовая связь и управление**. Источники электроэнергии, кабельные трассы, телефонная связь, машинные и рулевые телеграфы, аппаратура радиотрансляции, авторулевые.

07 – **Вооружение** (штурманское). Навигационное оборудование такое как: средства радиосвязи, гидролокации и радиолокации, компасы, лаги и т.п., а также вертолеты, если они есть на судне.

09 – **Запасные части**, к механизмам, устройствам, системам и пр.

10 – **Постоянный балласт**, твердый или жидкий, постоянно присутствующий на судне.

11 – **Запас водоизмещения, остойчивости**. Фиктивная масса, вводимая в нагрузку, во избежание возможной перегрузки, вследствие ошибок в расчетах.

12 –**Постоянные жидкие грузы**. Неудалимые остатки жидкостей в трубопроводах и цистернах, а также заправочные жидкости в механизмах.

13 – **Снабжение, имущество**. Шкиперское, спасательное, медицинское и пр.

14 – **Экипаж, провизия, вода, расходные материалы и среды**. Помимо собственно масс экипажа с багажом, провизии и пресной воды сюда относят запасы песка, цемента, красок и т.п., а также топливо для катеров и вертолетов.

15 – **Груз перевозимый**, состоящий из коммерческого груза и массы пассажиров с багажом, запасами пресной вводы и провизии для них.

16 – **Запасы топлива, масла, воды**, необходимые для работы энергетической и электроэнергетической установок.

17 – **Переменные жидкие грузы**. Вода в цистернах успокоителей качки, в плавательных бассейнах, в цистернах сбора загрязненных вод и т.д.

18 – **Жидкий балласт**, принимаемый для регулирования посадки и остойчивости.

19 – **Грузы, снабжение, запасы дополнительные**, принимаемые в перегруз.

В свою очередь каждый раздел делится на группы. Например, 01 раздел:

0101 - Корпус металлический.

0102 - Подкрепления и фундаменты.

0103 - Дельные вещи.

0104 - Неметаллические части корпуса.

0105 - Покрытия, окраска.

0106 - Изоляция, зашивка.

0107 - Воздух в корпусе.

0108 - Оборудование помещений, постов.

Группы делятся на подгруппы. Например, группа 0101:

010101 - Обшивка наружная, настил второго дна.

010102 - Палубы и платформы корпуса.

010103 - Переборки корпуса (включая шахты и выгородки).

010104 - Надстройки, рубки, мачты.

010105 - Конструкции специальные.

010106 - Выступающие части.

Наконец, подгруппы делятся на статьи. Например для 010101:

01010101 - Обшивка наружная.

01010102 - Настил второго дна.

01010103 - Набор продольный, междудонный.

01010104 - Набор поперечный, междудонный.

01010105 - Набор бортов продольный.

01010106 - Набор бортов поперечный.

01010107 - Набор продольный в оконечностях.

01010108 - Набор поперечный в оконечностях.

01010109 – Бульбовые и корпусные обтекатели.

01010110 – Штевни, кронштейны, мортиры, клюзы и т.п.

01010111 – Пилоны воздушных винтов, стабилизаторы.

01010112 – Металлические части привальных брусьев.

01010113 – Кингстонные и ледовые ящики, патрубки.

01010114 – Скуловые кили.

Характерный состав нагрузки некоторых судов приведен в табл. 3.

Состав нагрузки различных судов таблица 3

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Назначение судна | **Разделы нагрузки, (% от *D*)** | | | | | | |  |
| **01** | | | | **02** | **03** | **04** | **05** |
|  | **Группы, (% от Р01)** | | |
| **0101** | **0101 - 0107** | **0108** |
| Пассажирское | ≈ 40 | ≈ 67 | ≈ 97 | ≈ 3 | ≈ 3,5 | ≈ 2,5 | ≈ 8,5 | ≈ 2,5 |
| Универсальное сухогрузное | 20 - 22 | 77 – 90 | 95 – 98 | 2 – 5 | 2,2 – 2,4 | 0,7 – 1,7 | 3,0 – 7,0 | 0,6 – 3,0 |
| Лесовоз | 23 - 25 |  |  |  | 2,7 – 2,8 | 0,9 – 0,9 | 2,9 – 3,8 | 1,3 – 1,5 |
| Контейнеровоз | ≈ 27 |  |  |  | ≈ 3 | ≈ 1 | ≈ 4,5 | ≈ 1,2 |
| Навалочное | 17 – 26 |  |  |  | 0,7 – 1,1 | 0,5 – 0,7 | 1,4 – 1,9 | ≈ 0,3 |
| Нефтеналивное | 12 – 24 | 97 – 98 | 98 – 99 | 1 – 2 | 0,7 – 1,2 | 0,7 – 2,0 | 0,9 – 4,0 | 0,1 – 0,6 |
| Промысловое | 34 – 47 |  |  |  | 3,4 – 12,4 | 0,8 - 2,5 | 4,7 – 11,1 | 1,2 – 2,1 |
| Буксир | 39 - 54 |  |  |  | 6,4 – 8,8 | 1,6 – 3,8 | 10,9 – 24,7 | 1,1 – 5,3 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Назначение судна | **Разделы нагрузки, (% от *D*)** | | | | | | | |
| **10** | **11** | **12** | **14** | **16** | **прочие**  **разделы** | **15 (ηг)** | **ηDW** |
| Пассажирское |  | ≈ 2 | ≈ 2,5 | ≈ 1,0 | ≈ 10 | ≈ 0,6 | ≈ 25 | ≈ 33 |
| Универсальное сухогрузное | ≈ 2,5 | 0,3 – 1,8 | 0,2 – 1,0 | 0,1 – 2,8 | 2,6 – 13,0 | 0,02 – 0,3 | 45 – 61 | 50 – 73 |
| Лесовоз | - | 0,9 – 1,4 | 0,7 – 0,9 | 0,2 – 0,8 | 6,0 – 8,0 | 0,05 – 0,15 | 57 – 60 | 65 – 68 |
| Контейнеровоз | до 15 | ≈ 0,5 | ≈ 0,9 | ≈ 0,2 | ≈ 6,5 | ≈ 0,2 | ≈ 55 | ≈ 62 |
| Навалочное | до 15 | 0,4 – 1,2 | 0,2 – 0,3 | 0,1 – 0,8 | 7,0 – 10,0 | 0,02 – 0,11 | 60 – 70 | 67 – 79 |
| Нефтеналивное | до 15 | 0,3 - 1,0 | 0,4 – 0,7 | 0,1 – 0,8 | 4,0 – 9,0 | 0,02 – 0,10 | 55 – 80 | 60 – 84 |
| Промысловое | - | 1,7 – 2,9 | 0,6 – 1,3 | 2,9 – 5,8 | 6,0 – 16,5 | 0,21 – 4,21 | 10 – 29 | 20 – 47 |
| Буксир | - | 1,6 – 4,0 | 0,9 – 1,2 | 1,3 – 4,0 | 9,0 – 26,5 | 0,81 – 2,71 | 0,00 | 11 – 30 |

Сумма разделов с 01 по 13 составляют водоизмещение порожнем (*Dпор*), сумма разделов с 14 по 18 – дедвейт (*DW*). Водоизмещение порожнем и дедвейт составляют полное водоизмещение (*D*). 19 раздел учитывается только для тех судов, которые не подпадают под соглашение о грузовой марке и для которых не регламентируется минимальная высота надводного борта.

Стандартный подход к делению нагрузки неудобен в проектных расчетах, поскольку удельное значение разделов отличается довольно сильно. Например, 01 раздел занимает 12 – 54 % от *D*, разделы 02, 03, 05 – от 1 до 10 %, а разделы 07, 09, 13 – десятые и сотые доли процентов. Для предварительных расчетов применяется *проектная разбивка* масс по разделам, отличающаяся меньшим количеством составляющих.

При подобном подходе нагрузка делится на 8 разделов:

Корпус *Рк* = *Р*01+*Р*10.

Оборудование, *Ро* = *Р*02+*Р*03+*Р*05+*Р*07+Р09+*Р*13.

Балласт *Рб* = *Р*12+*Р*17+*Р*18.

Механизмы, *Рм* = *Р*04.

Топливо, *Рт* = *Р*16.

Запас водоизмещения, *Рзв* = *Р*11.

Экипаж, *Рэ* = *Р*14.

Груз *Рг* = *Р*15.

**Определение массы корпуса**

01 раздел – самый "тяжелый" в нагрузке порожнего судна. Массу этого раздела можно определить одним из четырех способов:

В способах *первой группы* используются наиболее простые, а поэтому и наименее точные формулы вида,

*Рк* = *рк D* или *Рк* = *qк LBH*,

где *D*, *LBH* – *модули*, а *рк*, *qк* – *измерители*, определяемые по прототипу, отнесенные к соответствующим модулям.

Формулы *второй группы* учитывают такие особенности, как: тип судна, высота надводного борта, количество палуб, развитость надстроек и т.п. Результаты расчета по формулам второй группы оказываются более достоверными, чем в первом случае. Типовая формула второй группы для массы *голого корпуса* (суммы групп с 0101 по 0107)

,

где *А*1 = 1 – для судов с минимальным надводным бортом и 0,96 – для судов с избыточным надводным бортом. *А*2 = 1 – для однопалубных судов, 1,06 – для двухпалубных судов, 1,12 – для трехпалубных судов. *А*3 = 1 – для судов длиной более 70 м, для судов меньшей длины *А*3 = 2,9 : *L*0,25. Приведенная высота борта *Н'*, определяется по формуле

,

где *hн* и *lн* – соответственно высота и длина надстроек.

Формулы *третьей группы* выведены исходя из требований, предъявляемых к прочности судна. Выполнение этих требований обеспечивается, в первую очередь, продольными связями, входящими в эквивалентный брус. Следовательно, строго говоря, по формулам третьей группы, можно определить массу именно этих связей, но поскольку их масса составляет 80 – 90 % массы стали в составе корпуса, то формулы распространяются на все остальные связи, что приводит к незначительной погрешности, допустимой на начальных этапах проектирования.

Масса связей, участвующих в продольном изгибе, зависит от удельной массы стали *ρ*, площади поперечного сечения эквивалентного бруса *F* и длины судна *L*.

*Рпс* = *ρ L сF*,

где *с* – коэффициент уменьшения площади сечения эквивалентного бруса по длине судна.

Площадь поперечного сечения влияет на момент сопротивления эквивалентного бруса

*W* = *η H F*,

где *η* – коэффициент утилизации площади сечения эквивалентного бруса. В то же время минимальный момент сопротивления равен отношению изгибающего момента к допустимым напряжениям в связях корпуса

.

Изгибающий момент при постановке судна на волну

,

где *k* – коэффициент изгибающего момента.

Тогда:

,

.

По статистике, коэффициент *с* ≈ *δ*1/3, а *η* ≈ 0,05*L*1/2. Тогда

,

где  – измеритель массы продольных связей корпуса.

Учитывая, что *Рпс* = (0,8 – 0,9) *Р*01, можно определить массу всего раздела.

Способы *четвертой группы* основаны на постатейном пересчете масс отдельных конструкций. В этом случае общую массу корпуса разбивают на ряд составляющих (объединяя отдельные статьи, например, по функциональным признакам), для каждой из которых подбирают соответствующий модуль пересчета. Результаты, получаемые в результате расчета, по формулам четвертой групп наиболее точны, но в то же время трудоемкость расчетов гораздо больше, чем в предыдущих способах.

Разобьем массу раздела корпус на следующие составляющие:

* Продольные связи

.

* Поперечные переборки



где *nпер* – число переборок.

* Местные конструкции (платформы, выгородки, шахты и т.п.)



* Надстройки и рубки

,

где *Wнр* – объем надстроек и рубок.

* Оборудование помещений

.

* Прочие части раздела

.

Формулы первой группы используют для ориентировочных первоначальных расчетов. При сопоставлении вариантов технического предложения пользуются более точными формулами второй или третьей группы. Расчет массы корпуса выбранного варианта осуществляют по наиболее точным формулам четвертой группы.

**Определение массы механизмов**

При определении массы механизмов исходят из предположения, что данная масса зависит от мощности энергетической установки *N* (кВт).

*Рм* = *рмN*.

Измеритель *рм* принимает следующие значения: для СЭУ с малооборотными дизелями (МОД) – 0,09 - 0,11 т/кВт; для СЭУ со среднеоборотными дизелями (СОД) – 0,07 - 0,09 т/кВт. Более легкими являются паротурбинные СЭУ (ПТУ) – 0,06 - 0,08 т/кВт и газотурбинные (ГТУ) – 0,04 - 0,06 т/кВт. С увеличением мощности СЭУ значение *рм* снижается. Для установок с *N* до 2 МВт измеритель принимает максимальные значения, а при *N* > 10 МВт значение *рм* приближается к нижнему пределу.

Определение мощности на ранних стадиях весьма затруднительно. Используя данные прототипа можно применить формулу адмиралтейских коэфициентов.

,

где С – адмиралтейский коэффициент устанавливаемый по прототипу.

При перемещении СЭУ из середины судна в корму ее масса уменьшается на 5 – 6 % для МОД, на 7 – 8 % для СОД и на 9 – 12 % для ПТУ и ГТУ.

Обычно, уже на ранних стадиях определяется марка двигателя подлежащая к установке на судно, а, следовательно, и его масса *Ргд*. В этом случае величину *Рм* можно определить исходя из соотношения *Рм* и *Ргд*. Для МОД при *n* ≤ 100 об/мин *Ргд* = 50 - 55 %, при больших *n Ргд* = 40 - 45 %. Для СОД на долю дизель-редукторных агрегатов (ДРА) приходится приблизительно 40 % *Рм*, причем *Ргд* составляет 70 - 80 % массы ДРА. Для ГТУ *Ргд* составляет 25 - 50 % *Рм*. Для ПТУ масса главного турбозубчатого агрегата (ГТЗА) составляет 18 - 20 % *Рм*. Масса парогенераторов для ПТУ 24 - 27 %, паропроводов 3 - 4 % *Рм*. Масса трубопроводов для МОД и СОД – 15 - 20 %, для ПТУ и ГТУ – 11 - 12 % *Рм*. Масса вспомогательных механизмов для МОД и СОД – 16 - 20 %, для ПТУ и ГТУ – 3 - 5 % *Рм*. Масса гребных винтов и валопроводов для МОД и СОД – 6 - 8 %, для ПТУ и ГТУ – 16 - 18 % *Рм*.

**Определение массы топлива**

Общая масса раздела 16 складывается из массы собственно топлива *Ртп*, массы питательной воды для котлов *Рвд* и массы смазочного масла *Рмс*.

*Ртп* зависит от удельного расхода *q*, мощности *N* и времени работы *t* главных и вспомогательных механизмов.

*Ртп* = *kм Σ*(*qi Ni ti*)*гл*/*всп*,

где *kм* = 1,10 - 1,20 – коэффициент морского запаса. Поскольку на начальных стадиях проектирования неизвестен состав СЭУ, а следовательно неизвестны ни мощность, ни удельный расход, ни время работы вспомогательных механизмов, то расчет осуществляют введением в формулу *коэффициента внутреннего потребления kв* = 1,03 - 1,06 для СОД, МОД, ГТУ и 1,08 - 1,12 для ПТУ.

Таким образом

*Ртп* = *kм kв qNt*,

где *q* [т/кВт час] = (0,12 - 0,17)∙10-3 – для ПТУ и ГТУ, (0,15 - 0,20)∙10-3 – для СОД и МОД.

Масса питательной воды *Рвд* определяется из расчета пополнения утечек воды и пара и периодической смены грязной воды в котлах.

*Рвд* = *kма*1*Пк tк* + *а*2*Пк* + *а*3*NПТУ*,

где *а*1 = 0,06 - 0,08 – коэффициент утечек, *а*2 ≈ 2 – коэффициент смены воды, *а*3 = (3,0 - 3,5)∙10-3 [т/кВт] – коэффициент смены воды в паропроизводительном котле турбины (только для ПТУ), *tк* и *Пк* – время работы ипаропроизводительность вспомогательных и утилизационных котлов определяемая по прототипу пропорционально *D*.

*Рмс* зависит от типа СЭУ, мощности, продолжительности работы, утечек, угара, смены загрязненного масла и т.п. При детальном расчете определяется для каждого механизма в отдельности.

Обычно массы *Рвд* и *Рмс* определяют как надбавку к массе топлива, которая в среднем составляет *kт* = 6 - 12 % *Ртп*.

Ходовое время можно *t* выразить как отношение дальности плавания к экономической скорости хода. Таким образом

*Рт* = *Р*16 = *q kм kв kт NR* /*υs эк*.

**Определение массы оборудования**

Массу оборудования судна, при наличии близкого прототипа, можно определить, используя простейшие формулы, аналогичные формулам первой группы для корпуса.

 или 

Если по заданию на проектирование требуется введение новых элементов оборудования (например, подруливающих устройств, авиатехники и т.п.), то необходимо исправить нагрузку прототипа, введя туда соответствующие статьи за счет других разделов, определить новые значения измерителей и использовать их значения в расчетах по проекту.

**Определение массы балласта**

Массу балласта определяют исходя из требований к посадке и остойчивости судна прямым расчетом на поздних стадиях проектирования. Для предварительных расчетов пользуются данными подходящего прототипа, считая *Рб* пропорциональной водоизмещению судна.

**Определение массы экипажа**

Значение 14 раздела зависит от количества экипажа (*nэ*) и автономности и складывается из трех слагаемых: массы непосредственно людей с багажом, массы провизии и массы пресной воды.

*Рэ* = *Рлб* + *Рпр* + *Рв*,

где

*Рлб* = *рэ nэ*,

*Рпр* = *kм nэ* *Апр рпр*,

*Рв* = *kм nэ* *Ав рв*.

Таким образом

*Рэ* = *рэ nэ* + *kм nэ* (*Ав рв +* *Апр рпр*),

где *kм* – коэффициент морского запаса, *Апр* – автономность по запасам провизии, *Ав* – автономность по запасам пресной воды, которая принимается равной 5 суткам, в случае наличия на судне опреснительной установки. В противном случае *Ав* = *Апр*. Измеритель массы экипажа *рэ* = 100 – 200 кг/чел, провизии *рпр* = 3 – 5 кг/чел∙сут, воды *рпр* = 100 - 300 кг/чел∙сут.

**Обеспечение запаса водоизмещения и остойчивости**

При выполнении расчетов нагрузки вследствие приблизительного характера формул неизбежны неточности. Кроме этого в процессе постройки в нагрузку могут быть введены новые элементы. Возможны и отступления от номинальных толщин листов, размеров местных конструкций и т.п. Все это может привести к увеличению водоизмещения по сравнению с его расчетным значением. Чтобы избежать перегрузки судна в нагрузку вводится фиктивная масса запаса водоизмещения.

Величина этой массы зависит от стадии проектирования, размеров судна, наличия близкого прототипа. Определяется в долях от водоизмещения.

*Рз* = *Р*11 = *рз D*

На стадии технического предложения принимается *рз* = 2,0 - 3,0 %, на стадии эскизного проекта – *рз* = 1,5 - 2,0 %, на стадии технического проекта – *рз* = 1,0 - 1,5 %.

Отмеченная выше перегрузка относится, как правило, к высокорасположенным частям судна, что приводит к повышению ЦТ и, следовательно, к уменьшению *h*. Для избежания этого в проект вводится запас остойчивости Этот запас достигается путем искусственного повышения расчетного ЦТ на величину Δ*zg* = Δ*h*. Таким образом, в дальнейших расчетах

*zg* = *z’g* +Δ*zg*.

Подъем ЦТ может быть достигнут путем надлежащего размещения массы запаса водоизмещения по высоте. При наличии близкого прототипа Δ*zg* = 10 - 25 см, при его отсутствии Δ*zg* = 20 - 35 см.

Координата *zз* может быть найдена из уравнения статических моментов

*Dzg* = (*D* – *Рз*) *z’g* +*Pз zз*.

Тогда

*zз* = *z’g* +Δ*zg* / *рз*.

Вычисленная по этой формуле величина *zз* обычно близка к высоте борта. Поэтому считается, что масса запаса водоизмещения принимается на палубу. Положение ЦТ запаса водоизмещения по длине судна совмещают с положением с ЦТ водоизмещения порожнем.

#### Уравнения масс

Уравнение масс является аналитическим выражением равенства водоизмещения судна сумме всех масс, входящих в его нагрузку:

*D* = Σ *Pi* + *P*,

где *D* – водоизмещение судна, *Pi* – массы, зависящие от элементов и характеристик проектируемого судна (водоизмещения, главных размерений и их соотношений, коэффициентов теоретического чертежа, мощности главного двигателя и проч.), называемые *переменными*, *Р* – массы, не зависящие от элементов и характеристик этого судна и рассматриваемые поэтому как *постоянные* для любого варианта проектируемого судна, соответствующего одним и тем же исходным данным, т. е. одному и тому же заданию.

*К переменным* массам относятся, в большинстве случаев, массы корпуса *Pк*, оборудования *Pо*, механизмов *Pм*, топлива *Pт* и балласта *Pб*. К *условно* *постоянным* – масса перевозимого груза *Рг* и масса экипажа *Рэ*. Масса запаса водоизмещения судна *Рз*, в по характеру является переменной, зависящей от водоизмещения, но нередко рассматривается как условно постоянная величина.

Уравнение масс, может быть записано в ряде модификаций, для определения водоизмещения или главных размерений проектируемого судна по технико-эксплуатационным данным задания на проектирование.

Все модификации уравнения масс подразделяются на алгебраические и дифференциальные. Уравнения масс в *алгебраической* форме пригодны для определения искомых элементов судов как при наличии, так и при отсутствии близкого прототипа. Использование уравнений масс в *дифференциальной* форме возможно только при наличии подходящего судна-прототипа, в элементы которого вносятся исправления, отражающие различие технико-эксплуатационных характеристик прототипа и проектируемого судна – грузоподъемности, скорости, дальности плавания, автономности и т. д.

Отмеченные особенности алгебраических и дифференциальных уравнений масс могут быть записаны следующим образом.

Алгебраические уравнения:

(*D, L, B, T, H,* …) = *f*(*Pг, υs,* *r, A,* …)

Дифференциальные уравнения:

*D* = *D*0 + *dD*; *L* = *L*0 + *dL*; *В* = *В*0 + *dВ*; …

(*dD, dL, dB, dT, dH,* …) = *f*(*dPг, d υs,* *dr, dA,* …)

где *D, L, B, T, H,* …– искомые элементы проектируемого судна; *D*0; *L*0; *В*0; *Т*0; *Н*0; … – аналогичные величины судна-прототипа; *dD, dL, dB, dT, dH,* … приращения этих величин; *dPг, dυs,* *dr, dA,* … – различия между техни­ко-эксплуатационными характеристиками обоих судов.

Из сказанного следует, что уравнения масс, выраженные в алгебраи­ческой форме, более общие и универсальные по сравне­нию с дифференциальными.

**Уравнения масс, выраженное в функции главных размещений**

Если в общем уравнении масс выразить все переменные массы в функции главных размерений и коэффициентов теоретического чертежа, то это уравнение приводится к виду:

*γδLBT* = Σ *fi*(*δ*, *L, B, T, H*) + Σ *fj*(*N*) + *P*.

В отдельный член Σ *fj*(*N*) в этом уравнении выделены массы, зависящие от мощности главного двигателя *N* и длительности его работы в течению рейса, т. е. *Рм* и *Рт*. Поскольку мощность главного двигателя зависит от сопротивления движению судна, а оно, в свою очередь, от параметров корпуса, становится очевидной однородность всех переменных масс в последнем уравнении.

В рассматриваемом уравнении фигурирует несколько неизвестных – главные размерения и коэффициент полноты, поэтому для их однозначного определения необходимо задаться дополнительными зависимостями, чтобы выразить все неизвестные через какую-либо одну величину. В качестве таких зависимостей используют соотношения главных размерений, принимаемые на основе

* статистики,



* соотношения главных размерений прототипа,



* ограничения главных размерений, налагаемые условиями постройки и эксплуатации судна,

, 

* другие уравнения теории проектирования судов,

, 

Чаще всего все неизвестные величины выражают через длину проектируемого судна, руководствуясь следующими соображениями:

1. поскольку длина является наибольшим из всех главных размерений, остальные размерения получают делением *L,* что приводит к уменьшению погрешности результатов расчета. Известно, что при умножении приближенного числа *х* на точный сомножитель *k* абсолютная погрешность произведения Δ*х* окажется в *k* раз больше абсолютной погрешности приближенного сомножителя Δ*х,* т. е. при *Х =* *kх,* ΔХ = *k*Δ*х*. Переходя к главным размерениям и приняв, например, *k* = *L/В,* можем написать: *L* = *kВ,* откуда Δ*L* = *k*Δ*В* и Δ *В* = Δ*L*/*k*. Если в первом случае абсолютная погрешность возрастает в *k* раз, то во втором в *k* раз уменьшается. Очевидно, что аналогичные соотношения применительны и к другим главным размерениям.
2. знание *L* необходимо для определения чисел Рейнольдса *Re* и Фруда *Fr*, фигурирующих в расчетах сопротивления воды движению судна, а следовательно, и мощности главного двигателя.

В этом случае уравнение масс запишется так:

*f*(*L*) = Σ *fi*(*L*) + Σ *fj*(*N*) + *P*.

При решении этого уравнения возможны два пути определения члена Σ*fj*(*N*) – аналитически или с помощью графиков.

В первом случае используют приближенные формулы типа адмиралтейской: *N* = *D υs3/C* . Тогда уравнение приводится к виду

Σ *f*(*L*) + *P* = 0

не вызывающему затруднений при определении *L*.

Во втором случае расчет оказывается значительно более громоздким, но и более точным. Последовательность вычислений при этом обычно такова.

Задаются рядом значений длины судна *L,* перекрывающих область ожидаемых значений этой величины. Затем, применительно к выбранным *L* вычисляют *Re* и *Fr*, определяют все компоненты полного сопротивления движению судна *R,* используя при этом подходящие графики результатов серийных испытаний моделей судов, переходят от сопротивления к мощности главного двигателя *N*, определяют Σ*fj*(*N*) = *Рм* +*Рт*, а также остальные компоненты нагрузки проектируемого судна *fi*(*L*). Полученные результаты наносят на график, позволяющий найти корень уравнения (рис. 5).

(Σ*fi*(*L*) + Σ*fj*(*N*) + *P*)/ *f*(*L*)

*L*1

*L*2

*L*3

*L*4

*L*5

*L*6

*Lиск*

*L*

*Рис. 5. Решение уравнения графическим путем*

Второй путь определения Σ*fj*(*N*) целесообразен при разработке нескольких вариантов проектируемого судна, отличающихся соотношениями главных размерений и значениями коэффициентов теоретического чертежа, в первую очередь δ. В этом случае повышенная трудоемкость расчетов оправдывается более высокой степенью достоверности результатов, отражающих влияние исследуемых параметров на показатели и характеристики судна. Естественно, что для определения всех остальных составляющих нагрузки, т. е. величин *fi*(*L*), должны применяться расчетные зависимости, гарантирующие повышенную точность получаемых результатов.

На первоначальных этапах определения основных элементов судов вполне допустимо пойти по более простому пути использования аналитических зависимостей для определения *N* и подсчета соответствующих масс, а остальные разделы нагрузки определять укрупненно, без их детальной разбивки на отдельные составляющие.

**Уравнение масс, выраженное в функции водоизмещения**

Если переменные массы *Р* выразить в функции водоизмещения, исходное уравнение масс принимает вид:

*D* = Σ *fi*(*D*) + Σ *fj*(*N*) + *P*.

В данном случае нет нужды усложнять решение уравнения ради уточненного определения *N*, поскольку точность и достоверность результатов, получаемых при использовании уравнения, в данном виде будет, как правило, ниже, чем при использовании уравнения масс в функции главных размерений. Объясняется это тем, что выражение переменных масс, в первую очередь *Рк*, в зависимости от главных размерений лучше отражает влияние того или иного элемента на массу раздела, нежели в зависимости от водоизмещения судна. Следовательно, нет нужды в точном вычислении *N*, вполне допустимо определять ее по приближенным формулам. В результате уравнение преобразуется в простую зависимость:

Σ *f*(*D*) + *P* = 0.

Это наиболее употребительное уравнение из используемых на начальных этапах расчетов. Несмотря на отмеченные недостатки при наличии достоверных измерителей масс, полученных по близкому прототипу, решение данного уравнения приводит к достаточно точным результатам.

**Уравнение масс в форме коэффициентов утилизации водоизмещения**

Употребительны два коэффициента утилизации водоизмещения – по *чистой грузоподъемности* *ηг* и *по дедвейту* *ηDW*.

 и 

Коэффициенты утилизации водоизмещения используют для оценки качества судна, чем выше значение *ηi*, тем при прочих равных условиях более совершенно судно. Количественное значение коэффициентов лежат обычно в следующих пределах: *ηг* = 0,5 - 0,7, *ηDW* = 0,6 - 0,8, изменяясь в зависимости от типа судна, его размеров, скорости, дальности плавания и т.п.

Кроме этого коэффициенты используются для приближенной оценки водоизмещения на ранних этапах определения основных элементов судов.

При сопоставлении однотипных, близких по размерам судов с одинаковыми скоростями *υs* и дальностями плавания *r* можно пользоваться коэффициентом *ηг*, в противном случае, при различии *υs* или *r* - коэффициентом *ηDW*, так как сравнение коэффициентов утилизации водоизмещения по чистой грузоподъемности будет непоказательным.

Чтобы установить влияние перечисленных выше факторов на величину *ηг* и *ηDW*, поступим следующим образом

*DW* = *D* – (*Рк* + *Рм* + *Ро* + *Рз*),

Откуда

,

где  – по формуле адмиралтейских коэффициентов.

Из этого выражения следует, что коэффициент *ηDW* увеличивается при соответственном уменьшении относительной массы корпуса судна, удельной массы механизмов и оборудования и измерителя запаса водоизмещения. Как правило значения *рк*, *р*о, *р*м и *рз* уменьшаются с увеличением размеров судов, поэтому крупным судам, как правило, присущи более высокие значения *ηDW*, чем более мелким судам того же назначения и с той же скоростью. Понятно, что коэффициенты утилизации водоизмещения по дедвейту у тихоходных судов оказываются выше, чем у быстроходных. Влияние на *ηDW* отмеченных факторов показано на рис. 6.

*DW,*

*тыс. т*

*ηDW*

0,5

0,6

0,7

0,8

5

15

25

*υ*s = 8 уз

10 уз

12 уз

14 уз

16 уз

35

*Рис. 6. Соотношения между ηDW , DW и υ*s *для танкеров*

Очевидно также, что величина *ηDW,* характерная для судов различных типов и назначений, зависит в первую очередь от относительной массы корпуса судна *рк,* а также от его удельной мощности *N/D* (энерговооруженности) и удельной массы механизмов *рм*. Так, по этим причинам у рефрижераторных и пассажирских судов *ηDW* значительно меньше, чем у универсальных сухогрузных судов, а у газовозов и химовозов, – меньше, чем у танкеров.

Все сказанное выше о коэффициенте утилизации водоизмещения по дедвейту полностью применимо и к коэффициенту утилизации водоизмещения по чистой грузоподъемности. Однако последний зависит еще от дальности плавания и удельного расхода топлива. При равных значениях *ηDW* величина *ηг* окажется более высокой у судна с меньшими запасами топлива (с меньшей дальностью плавания) и более экономичной энергетической установкой.

Определение водоизмещения проектируемого судна с помощью коэффициентов утилизации *ηDW* и *ηг* – способ наиболее простой и быстрый, но в то же время и наименее точный, причем вероятная погрешность результата будет тем больше, чем ниже значение коэффициента утилизации. Во избежание грубых ошибок в расчетах не рекомендуется использовать этот способ определения водоизмещения применительно к судам с очень низкими значениями *ηDW* и *ηг* *–* пассажирским, промысловым, буксирным и т.п.

#### **Дифференциальные уравнения масс**

В отличие от алгебраических, дифференциальные уравнения масс не дают ответ на вопрос, какими должны быть элементы проектируемого судна согласно требованиям задания на проектирование. С помощью дифференциальных уравнений определяют, каким образом необходимо изменить элементы прототипа, чтобы выполнить требования, предъявляемые к проекту. Обычно, предполагают, что изменение независимых переменных и элементов судна – это достаточно малые величины, так как в противном случае замена конечных приращений дифференциалами будет приводить к большой погрешности.

Допустим, что какой-либо из разделов нагрузки выражается формулой

*Р* = *рХn*,

где *Х* – какой-то элемент судна, причем для прототипа *Р* = *Р*0, *Х* = *Х*0. Масса этого же раздела проектируемого судна составит *Р* = *рХn* = *Р*0 + *dP*, где *dP* – приращение массы этого раздела. Для нахождения *dP* продифференцируем исходную формулу.

*dР* = (*рХn*)*' dX* = *nрХn* - 1 *dX* = *ndX*.

C другой стороны для проектируемого судна масса раздела составит

*Р* = *р(Х*0 *+ dХ)n*.

Разложим это выражение в ряд Маклорена, сохранив первые три члена ряда

**.

Тогда

.

Два выражения, полученные для *dP*, отличаются на величину

*,*

которая характеризует абсолютную погрешность метода. Относительная погрешность ε/*Р*0 будет зависеть от соотношения *dХ*/*Х* и степени *n* и при различных значениях этих показателей будет иметь следующие значения.

При использовании дифференциальных уравнений считается, что погрешность не выходит из допустимых пределов, если изменения параметров проекта, по отношению к прототипу, не превосходит следующих значений: скорость хода – 4 - 5 %, главные размерения – 7 - 10 %, водоизмещение до 20 %.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *dХ*/*Х* | Относительная погрешность *ε*/*Р*0, % | | | | |
| *n* = 3,0 | *n* = 2,0 | *n* = 1,0 | *n* = 2/3 | *n* = 0,5 |
| 0,05  0,10  0,20 | 0,75  3,0  12,0 | 0,25  1,0  4,0 | 0  0  0 | 0,03  0,11  0,45 | 0,03  0,12  0,50 |

#### **Обобщенное дифференциальное уравнение масс**

Алгебраическое уравнение масс перепишем в виде

*Р* = *D* –Σ*Рi*(*δ*, *L*, *B*, *H*, *T*, υ*s*, *r*, *a*, *b*,…) = *D* – *F*,

где, как и прежде Σ*Рi* = *F* – массы зависимые от размерений, коэффициентов полноты, скорости, дальности плавания и прочих независимых переменных, *Р* – независимые массы. Дифференцируя это уравнение, получим

*dР* = *dD* – *dF*,

и раскроем *dD* и *dF* как полные дифференциалы по всем независимым переменным, т.е. по δ, *L*, *B*, *H*, *T*, υ*s*, *r*, *a*, *b*, *c*….

выражение для *dD* будет выглядеть следующим образом:

**.

Найдем частные производные.

**.

Подобным же образом можно вывести, что , , . Тогда

**.

Аналогично можно написать, что

**



Введем обозначение

,

то есть полный дифференциал функции *F* по всем переменным, исключая главные размерения и коэффициент полноты.

Окончательный вид уравнения масс в этом случае примет вид



.

Величины, стоящие в левой части уравнения, должны, очевидно, рассматриваться как заданные. Соответственно заранее необходимо определить полный дифференциал функции *F* по независимым переменным. Так же определяются и искомые частные производные по главным размерениям и коэффициенту полноты. Отношение водоизмещения к главным размерениям и коэффициенту полноты принимается по прототипу.

Для вычисления частных производных функции *F* надо найти частные производные каждого из разделов входящих в *F* по каждой из переменных *δ*, *L*, *B*, *H*, *T*. Например, пусть какой-нибудь из разделов выражается зависимостью

*Рi* = *pi* *δmLnBkHxTy*,

в которой степени могут быть целыми или дробными, положительными или отрицательными.

Частная производная *Рi* по коэффициенту полноты

**.

Величину этой частной производной можно вычислить по прототипу. Частная производная функции *F* определяется как сумма частных производных отдельных разделов.

**.

Очевидно, что частные производные по другим переменным будут определяться подобным же образом.

Поскольку в полученном уравнении фигурируют пять неизвестных, то для решения уравнения необходимо задаться дополнительными зависимостями, для выражения одного элемента через другой. Это могут быть либо уравнения теории корабля, либо ограничения размерений, либо соотношение размерений прототипа. Последний способ выражения главных размерений является наиболее употребительным. В этом случае

*,*

откуда

.

Аналогично выражаются и прочие приращения главных размерений. Коэффициент общей полноты задают исходя из статистических зависимостей, или принимают по прототипу. В первом случае *dδ* = *δ* – *δ*0, во втором *dδ* = 0.

**Дифференциальное уравнение масс Бубнова**

От обобщенного дифференциального уравнения масс уравнение Бубнова отличается тем, что второе слагаемое левой части [*dF*]0 = 0. Для учета изменения скорости хода, дальности плавания, измерителей и прочих независимых переменных И.Г.Бубнов предложил пересчитывать элементы проектируемого судна не относительно элементов прототипа, а относительно элементов какого-то судна, имеющего главные размерения и коэффициенты полноты прототипа, но независимые переменные, соответствующие проектируемому судну. Поскольку такое сочетание у реально существующих судов найти практически невозможно, необходимо изменить нагрузку прототипа, таким образом, чтобы оказались выполненными элементы технического задания проекта. Поскольку после введения изменений нагрузка прототипа не будет соответствовать водоизмещению прототипа, его необходимо компенсировать за счет независимых масс.

Общая формула определения масс разделов исправленного прототипа

.

Изменение масс независимых разделов осуществляется прямым расчетом. Для компенсации получившегося расхождения между нагрузкой и водоизмещением необходимо изменить массу перевозимого прототипом груза.

**Обобщенный коэффициент приращения водоизмещения**

Для вывода уравнения будем рассматривать приращение высоты борта как заданную величину. Преобразуем исходное уравнение *dP* = *dD* – *d*(Σ*Pi*) к виду

,

где  – полный дифференциал переменных масс по главным размерениям подводной части и коэффициенту полноты. Объедением приращение независимых масс и приращение масс разделов вызванное изменением независимых переменных.

.

Тогда обобщенное дифференциальное уравнение можно записать в виде

.

Если вести обозначение

,

где , то обобщенное уравнение можно записать, относительно неизвестного *dD*, в виде

*dD* = *η*Δ.

Зная численное значение коэффициента η можно определить приращение водоизмещения, соответствующее заданному приращению масс Δ. Но для этого необходимо исключить из уравнения неизвестные приращения элементов. Предположим, что заданное приращение Δ компенсируется за счет приращение только какого-то одного элемента. Пусть *dL* = *dB* = *dT* = 0, *d*δ≠ 0.

Тогда

.

Можно составить такие же выражения применительно к другим элементам судна. Аналогично формуле для обобщенного коэффициента запишем формулы для частных случаев

 для *dL* = *dB* = *dT* = 0, *dδ* ≠ 0.

 для *dδ* = *dB* = *dT* = 0, *dL* ≠ 0.

 для *dδ* = *dL* = *dT* = 0, *dB* ≠ 0.

 для *dδ* = *dL* = *dB* = 0, *dT* ≠ 0.

Полученные коэффициенты *ηδ*, *ηL*, *ηB*, *ηT* могут рассматриваться как частные коэффициенты приращения водоизмещения по соответствующим элементам. Для определения приращения водоизмещения в каждом из случаев, по аналогии с общей формулой, можно записать

,

,

,

.

Частные коэффициенты приращения водоизмещения могут быть вычислены для каждого конкретного судна, если известны его элементы и нагрузка.

С точки зрения экономии масс выгоднее всего увеличивать водоизмещение проектируемого судна за счет тех элементов, которым соответствуют минимальным значениям коэффициентов *ηi*. Минимальное водоизмещение будет у того судна, у которого *η*δ = *ηL* = *ηB* = *ηT*. Однако, это практически неосуществимо, поскольку кроме соотношения нагрузок по отдельным разделам, приходится учитывать требования к остойчивости, ходкости, вместимости и пр. Поэтому приходиться говорить не о минимальном, а о минимально возможном водоизмещении судна.

Независимое приращение масс Δ – есть сумма частных приращений.

Δ = Δ*δ* + Δ*L* + Δ*B* + Δ*T*.

Разделив полученное выражение на *D*, получим, после подстановки значений Δ*i*, следующую формулу

.

Из выражения *dD* = *η*Δ получим формулу для определения *η*.

.

Или

.

Пользуясь этой формулой, легко определить значение коэффициента *η* для любых частных случаев.

#### **Дифференциальное уравнение масс Нормана**

Если алгебраическое уравнение масс, выраженное в функции водоизмещения привести к виду

*Р* = *D* – Σ*Pi*(*D*, υ*s*, *r*, *a*, *b*,…),

в котором, как и раньше *а*, *b* – какие-то независимые переменные, то при дифференцировании, с учетом выведенных ранее формул, получим

,

где, как и раньше

.

Тогда искомое приращение водоизмещения

.

где – коэффициент Нормана, являющийся частным случаем обобщенного коэффициента приращения водоизмещения. Нахождение коэффициента Нормана, при наличии подходящего прототипа, не вызывает затруднений.

**Связь коэффициентов *ηн* и *ηг***

Коэффициенты *ηн* и *ηг* можно рассматривать как величины, характеризующие нагрузку судна. Преобразуем алгебраическое уравнение масс. Если исключить из рассмотрения массу экипажа, то независимые массы будут представлены только массой перевозимого груза, которую можно выразить через соответствующий коэффициент утилизации водоизмещения.

*D* = Σ*Pi*(*D*) + *P* = Σ*Pi*(*D*) + *Pг* = Σ*Pi*(*D*) + η*гD*.

Из полученной зависимости следует, что

.

Найдем частную производную переменных масс по водоизмещению.







.

Тогда коэффициент Нормана

.

После приведения подобных получим,

.

В полученной формуле четко прослеживается влияние *ηг* на *ηн*. Если же предположить, что степень при *D* в зависимостях для масс всех разделов равна единице, то выражение упрощается до вида

.

Эта простая зависимость будет давать несколько преувеличенное значение *ηн* при том же значении *ηг*.

#### Графическая интерпретация дифференциальных уравнений масс

Пусть алгебраическое уравнение масс судна-прототипа выражается функцией *D*0= Σ*Рi*(*D*) + *Р*0 и имеет решение соответствующее точке *А*0 (рис. 7). Для проектируемого судна функция *D* = Σ*Рi*(*D*) + *Р* решение будет соответствовать точке *А*. Точки *А*0 и *А* будут расположены на пересечении указанных кривых и прямой проходящей под углом 45о к оси абсцисс.

***Р***0(*D*)

***Р***(*D*)

***A***0

***F***

***A***

***E***

***K***

***Р***(*D*)

***D***

***Р***0

***Р***

***d***(Σ*Рi*)

***dD***

***dР***

**Σ***Рi*0(*D*0)

**Σ***Рi*(*D*0)

***D***0

***D***

***dD***

###### Рис. 7. Изменение водоизмещения проектируемого судна

Приращение водоизмещения

.

Приращение сумм масс в точке *А*0.

.

Для точки *А*

,

Откуда

.

Окончательно суммируя выведенные выше выражения, получим

,

Откуда

.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что приращение водоизмещения всегда больше, чем приращение масс отдельных разделов нагрузки. Например, при увеличении скорости хода (независимая переменная) будет возрастать мощность энергетической установки и как следствие вырастут массы механизмов и топлива. Это приведет к необходимости увеличить водоизмещение судна для сохранения значения массы перевозимого груза. Но увеличение водоизмещения приведет к росту сопротивления воды, что обусловит дальнейший рост мощности. Именно это вторичное увеличение значения водоизмещения определит опережение роста водоизмещения по сравнению с возрастанием массы какого-либо раздела. Это обстоятельство в дифференциальных уравнениях масс учитывают либо обобщенный коэффициент приращения водоизмещения, либо коэффициент Нормана. Графически (рис. 7) коэффициент Нормана будет определяться тангенсом угла наклона отрезка *А*0*Е* к горизонту.

**Вместимость**

Одной из главных задач, стоящих перед проектантом, является обеспечение объемов, необходимых для размещения экипажа, механизмов, постов управления судном, судовых запасов, балласта и пр. Применительно к транспортным судам выделяют, в первую очередь, объем помещений, необходимых для перевозки судном грузов и пассажиров. При этом различают два вида вместимости – *пассажировместимость* и *грузовместимость*. Под пассажировместимостью понимается количество пассажиров, перевозимых на судне, что определяется количеством пассажирских мест. Грузовместимость – это объем всех помещений судна, предназначенных для перевозки грузов.

Особым видом вместимости является *регистровая вместимость*.

В соответствии с характером грузов и особенностью их размещения различают грузовместимость по *сыпучему* и *штучному* грузу. Основой для их определения является *теоретическая* грузовместимость *Wт*, представляющая собой объем грузовых помещений, ограниченный внутренними поверхностями палубы, бортов (наружного или внутреннего) и двойного дна (рис.8 *а*).

*Wт*

*Wс*

*Wшт*

*а)*

*б)*

*в)*

*Рис. 8. Грузовместимость: а – теоретическая, б – по сыпучему грузу,*

*в – по штучному грузу*

Грузовместимость по сыпучему грузу (или *по зерну*) *Wс*, равна теоретической за вычетом объема набора и различных конструкций в пределах грузовых помещений (пиллерсы, трапы, трубопроводы и т.п.). Кроме того, вычитают объемы *льял* и деревянного настила двойного дна – *паёла* (рис. 8 *б*). Тогда,

*Wс* = *Wт* – Δ*Wс*,

где Δ*Wс* – вычет, составляющий для твиндеков 2,0 – 3,5 % *Wт*, для трюмов 3,0 – 5,5 % *Wт*. Большие значения характерны для меньших по размерам помещениям. Если настил двойного дна горизонтален, то отпадает вычет на объем льял, равный 1,5 – 2,0 % *Wт*. В среднем для сухогрузов Δ*Wс* = 2,0 – 3,0 % *Wт*.

При перевозке штучных грузов остаются незаполненными пространства между шпангоутами, бимсами, кницами и стойками переборок, поэтому вместимость по штучному грузу (или *киповая*) *Wшт* меньше вместимости по сыпучему грузу. Кроме этого необходимо учитывать объем занимаемый *рыбинсами* (рис. 8 *в*). На начальных этапах проектирования *Wшт* определяют путем введения вычетов к *Wс*,

*Wшт* = *Wс* – Δ*Wшт*,

где средние значения Δ*Wшт* для сухогрузов составляют 9,0 – 10,0 % *Wс*.

При определении грузовместимости рефрижераторных трюмов необходимо учитывать объем, занимаемый изоляцией и ее зашивкой, трубопроводами, змеевиками и т.п. Средние значения вычетов из теоретического объема рефрижераторных помещений составляет 25 – 35 % и зависит от размеров помещений, типа изоляции и системы охлаждения.

При определении полезной грузовместимости танков и цистерн судовых запасов *Wж* из теоретического объема делается вычет на телесность набора, наличие неудалимых остатков и недолив на температурное расширение жидкости.

*Wж* = *Wт* – Δ*Wж*,

где Δ*Wж* для грузовых танков составляют 5,0 – 6,0 % *Wт*, для цистерн судовых запасов 6,0 – 9,0 % *Wт*.

Для наиболее полного представления о величине (*кубатуре*) и распределении по судну всех компонентов его вместимости строят *эпюру емкости* судна. На оси абсцисс проставляются номера шпангоутов, а по оси ординат откладываются площади поперечных сечений корпуса при данной абсциссе, измеренной от основной плоскости до уровня настила двойного дна, палубы или платформы (рис. 9). Площадь, занимаемая помещением на эпюре численно равна объему этого помещения.

Эпюра емкости строится на основе строевой по шпангоутам. На ней отмечается положение поперечных переборок, палуб, платформ, выгородок, цистерн двойного дна и пр. Для судов, имеющих развитую систему цистерн двойного дна, их ординаты откладываются вниз от оси абсцисс.

Эпюры емкости крупных судов с большим количеством помещений дополняются продольным разрезом, планом палуб, поперечными сечениями и таблицами, в которых указывают положение, объем и координаты ЦТ данного помещения (табл. 4 и 5). Для удобства такие таблицы составляют отдельно для грузовых помещений и цистерн. Для прочих помещений (МО, кладовые, шахты, румпельное отделение и т.п.) такие таблицы не составляются.

*Грузовые помещения таблица 4*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  помещения | №№ шп. | Объем, м3 | | | Координаты ЦТ, м | | |
| *Wт* | *Wс* | *Wшт* | *х* | *у* | *z* |
| Трюм № 1  …  Твиндек № 3  …  Баковый твиндек  … | 16 – 42  …  121 – 133  …  16 – 42  … | 528  …  1375  …  311  … | 518  …  1350  …  305  … | 413  …  1149  …  243  … | 62,7  …  - 29,2  …  61,9  … | 0  …  0  …  0  … | 5,1  …  8,9  …  10,3  … |

*Цистерны таблица 5*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  помещения | №№ шпангоутов | Теоретический объем, м3 | Коэффициент заполнения, *kж* | Объем нетто, м3 | Вместимость,  т | Координаты ЦТ, м | | |
| *х* | *у* | *z* |
| Диптанк  …  Бортовая топливная цистерна  …  Цистерна мытьевой воды  … | 86 – 94  …  133 – 155  ЛБ  …  187 – 192  ПБ  … | 338  …  250  …  69,1  … | 0,98  …  0,98  …  0,97  … | 331  …  245  …  60,3  … | 340  …  207  …  60,3  … | 81,1  …  - 46,5  …  -101  … | 0  …  - 9,8  …  6,1  … | 4,4  …  1,1  …  9,4  … |



1

2

2

2

3

3

3

3

6

6

6

10

6

10

10

7

10

10

8

9

1

2

2

2

3

3

3

6

6

6

7

3

11

10

10

10

КВЛ

8

11

6

4

5

5

4

4

10

10

9

*Рис. 9. Продольный разрез и эпюра емкости судна*

*1 – форпик, 2 – грузовые твиндеки, 3 – грузовые трюмы, 4 – бак, 5 – ют, 6 – комингсы грузовых люков, 7 – диптанк, 8 – машинное отделение, 9 – туннель гребного вала с рецессом, 10 – двойное дно, 11 – ахтерпик.*

**Удельная грузовместимость**

*Удельной грузовместимостью μс* называется отношение суммарной грузовместимости *Wгр* суднак его грузоподъемности *Ргр*.

*μс* = *Wгр*/*Ргр*,

Количественное значение этой величины показывает, какой объем грузовых помещений судна может быть представлен для размещения там одной тонны груза. В соответствии с различными значениями *Wгр* различают удельную грузовместимость по сыпучему и штучному грузу.

Удельная грузовместимость судна должна соответствовать *удельной погрузочной кубатуре груза* *μг*, показывающей, какой объем помещений необходим для размещения 1 т груза. Значения *μг* колеблются в очень широких пределах. Некоторые из них представлены в табл. 6.

Поскольку на судах обычно одновременно перевозится несколько различных грузов, можно говорить о средней погрузочной кубатуре всех грузов на судне. Это осредненное значение указывается в задании на проектирование и чаще всего выбирается из дискретного ряда *μг* = 1,75; 1,90; 2,00; 2,20 м3/т. Если же судно предназначено для перевозки какого-то определенного вида груза, то при проектировании следует ориентироваться на удельную погрузочную кубатуру именно этого груза.

При проектировании необходимо стремиться к соотношению *μс* ≈ *μг*, поскольку при *μс* < *μг* судно будет эксплуатироваться с недогрузом, так как емкость грузовых помещений окажется недостаточной для размещения всей массы груза, а при *μс* > *μг* окажется недоиспользованным объем грузовых помещений после приема заданной массы груза. В обоих случаях экономическая эффективность судна снижается.

**Полная теоретическая вместимость**

Наряду с эпюрой вместимости о полном теоретическом объеме судна можно судить по строевой по ватерлинии, доведенной до верхней точки корпуса (рис. 10). Разбив полный подпалубный объем *W* на подводный (объемное водоизмещение) *V* и надводный *Wн*, с учетом объема надстроек и рубок *Wр* можем записать:

*W* = *V* + *Wн* + *Wр*.

Объем *Wн* можно разделить на три части

*Wр* = *W*1 + *W*2 + *W*3.

где *W*1 – объем между КВЛ и параллельной ей ВЛ, проведенной на уровне нижней точки палубы (ПВЛ) без учета развала бортов, *W*2 – объем, образованный развалом бортов в надводной части, *W*3 – объем, образованный седловатостью и погибью палубы. При этом

*Удельная погрузочная кубатура некоторых грузов*

*Рис. 10. Строевая по ВЛ доведенная до верхней точки седловатости*

*Рис. 11. Строевая по ВЛ в форме четырехугольника Морриша*

*V*

*W*1

*W2*

*W*3

*T*

*H*

*zc*

*ОП*

*КВЛ*

*ПВЛ*

*S* = *αLB*

*δLB*

*Sп*

*δ/α Т*

*H – Т*

*А*

*αLB*

*(α – δ)LB*

*(1 – δ/α)Т*

*С*

*D*

*E*

*F*

*T*

*W*1 = *S*(*H* – *T*),

,

*W*3 = *k*3 *zcSп*,

где *k*2 и *k*3 – коэффициенты полноты объемов *W*2 и *W*3, *S* – площадь КВЛ, *Sп* – площадь ПВЛ, *zc* – максимальная аппликата седловатости.

Рассматривая объем между КВЛ и ПВЛ, можно записать,

,

Где .

Некоторые авторы пытались выразить *k*2, считая, что строевая по ВЛ описывается каким-то аналитическим выражением. Если принять строевую в форме четырехугольника Морриша (рис. 4), то для треугольника *DEF* коэффициент *k*2 = 1/2. Но поскольку формы строевой в надводной и подводной частях могут довольно сильно отклоняться друг от друга к выбору этого коэффициента следует подходить с осторожностью.

Для определения площади ПВЛ рассмотрим треугольники *ACD* и *DEF* подобные друг другу. Так как

,

то после подстановки значений, получим

,

Откуда

.

Полный объем надводной части



,

Где

.

По данным исследований, для пассажирских судов, палуба которых имеет погибь и седловатость *kн* = 1,28 ± 0,07, без погиби и седловатости *kн* ≈ 1,22. Для судов иного назначения *kн*, как правило, не превосходит указанных значений.

Полный объем корпуса (без учета надстроек и рубок)



.

Анализируя данное выражение можно установить, что теоретическая вместимость основного корпуса:

1. растет пропорционально водоизмещению;
2. растет с увеличением отношения *hT* = *Н*/*Т*;
3. растет при увеличении величины *kн* оценивающей влияние развала бортов в надводной части, седловатости и погиби палубы;
4. уменьшается с увеличением коэффициента *χ* = *δ*/*α*.

Изменение *χ* и *kн*, а следовательно и их влияние ограничено при незначительном изменении формы обводов. Самым эффективным средством увеличения вместимости является увеличение высоты борта при неизменной осадке. В результате суда, требующие большой относительной вместимости *Wк*/*V*, должны иметь большое отношение *hT* и значительный развал бортов. Кроме этого вместимость может быть увеличена за счет объема надстроек и рубок *Wр*.



Или

.

Не следует забывать, что с ростом *hT* и *Wр*/*V* повышается аппликата ЦТ судна и ухудшается его остойчивость, вследствие чего может потребоваться увеличение *В*. Поэтому окончательно эти величины могут быть приняты после рассмотрения вопросов остойчивости проектируемого судна.

**Уравнение вместимости**

В.Л. Поздюнин предложил уравнение объемов, для обеспечения проектируемому судну необходимой вместимости

*W* = Σ *Wi*,

где *W* – теоретический объем судна с надстройками и рубками, определяемый его размерами и формой, Σ *Wi* – сумма требуемых теоретических объемов всех помещений судна. Для транспортных судов в эту сумму могут входить объемы: грузовых помещений *Wгр*, помещений экипажа *Wэк*, пассажирских помещений *Wпс*, помещений СЭУ *Wмх*, топливных цистерн *Wтп*, помещений электростанций *Wэл*, пустых отсеков, т.е. запасной объем – запас вместимости *Wзв*, постов управления и прочих служебных помещений *Wсл*, балластных цистерн *Wбл*.

Это деление является примерным, и в ряде случаев объемы могут быть сгруппированы иначе, например, в отдельное слагаемое могут быть выделены объемы помещений в надстройках и рубках, поскольку в отличие от стандарта нагрузки, нет стандарта регламентирующего деление судовых помещений по каким-либо признакам.

Назначаемые объемы зависят от требований к размещению груза, механизмов, топлива и т.п. Для транспортных судов

*W* = *Wгр* + *Wэк* + *Wпс* + *Wмх* + *Wтп* + *Wэл* + *Wзв* + *Wсл* + *Wбл*,

Здесь *Wгр* = *μгРгр* = *μгηгD* = *γμгηгV*; *Wэк* = *μэкnэк* и *Wпс* = *μпсnпс*, где *μэк* и *μпс* – удельный объем командных и пассажирских помещений, т.е. теоретический объем всех помещений для размещения и бытового обслуживания экипажа и пассажиров, приходящийся на одного человека, *nэк* и *nпс* – количество экипажа и пассажиров; *Wмх* = *μмхN*, где *μмх* – удельный объем помещений СЭУ. Принимая, например по формуле адмиралтейских коэффициентов *N* = *V*2/3*υ*3/*Cа*, получим

.

Аналогично объем топливных цистерн

.

где *γтп* – плотность топлива, *k*Δ – коэффициент заполнения топливных цистерн.

Объемы *Wэл*, *Wзв*, *Wсл* можно связать с размерами судна, считая их пропорциональными *V*: *Wэл* = *μэлV*, *Wзв* = *μзвV*, *Wсл* = *μслV*.

Объем, требуемый для балластировки судна, *Wбл* = *ηблV*/*k*Δ, где *ηбл* – коэффициент балластировки, определяющий, какую долю от *V* составляет объем чисто балластных цистерн, *k*Δ – коэффициент заполнения балластных цистерн.

Теперь можно записать уравнение вместимости в виде



.

Или

*W* = *W*(*V*) + *Wнз*,

где *W*(*V*) – объемы помещений, зависимых от *V*, *Wнз* – независимые объемы.

Тогда общее выражение уравнения вместимости будет иметь вид

.

В случае размещения экипажа и постов управления в в надстройках или рубках из левой части уравнения исключается *Wр*/*V*, а из правой величины *μсл* и *Wэк*. Тогда уравнение вместимости приобретает вид



.

Задавая значение *hT* = *Н*/*Т*, *α*/*δ*, *kв* можно получить уравнение из которого определяется *V*. Графическое решение уравнения представлено на рис. 12.

Величина *hT* имеет особо важное значение в процессе обеспечения вместимости, поэтому целесообразно рассмотреть ее определение при совместном решении уравнения нагрузки и уравнения вместимости. С помощью уравнения масс находится водоизмещение *D* = *γV*. Подставляя значение *V* в уравнение вместимости, получим

.

Откуда

.

###### *1*

###### *2*

###### W*, м3*

*V*, м3

###### Wиск

###### Vиск

###### Wнз

###### W*(*V*)*

Рис. 12. Графическое решение уравнения вместимости

*1 – прямая, соответствующая левой части уравнения*

*2 – кривая, соответствующая правой части уравнения*

Необходимо заметить, что от величины *Н*/*Т* зависит еще и запас плавучести судна, поэтому при проектировании судна необходимо выбирать *Н*/*Т* еще и по этому показателю.

**Коэффициент приращения *V* при изменении вместимости**

На рис. 13. изображены кривые требуемой вместимости в функции водоизмещения для прототипа [*W*0(*V*) и *Wнз*0] и и проекта [*W*1(*V*) и *Wнз*1].

Водоизмещению *V*0 на рис. 6 соответствует точка *А*0 пересечения прямой



с кривой *W*0(*V*) и *Wнз*0.

При *W*1(*V*0) и *Wнз*1 (точка *F*) образуется недостаток вместимости *A*0*F*.

Δ*W*1(*V*) + Δ*Wнз*1 = *W*1(*V*0) – *W*0(*V*0) + *Wнз*1 – *Wнз*0.

Для точки *А*1 можно записать

.

где – *дW*1(*V*)/*дV* тангенс угла *A*1*FE*. Произведение тангенса угла на величину Δ*V* дает нам длину отрезка *A*1*E*. Выразив из уравнения величину Δ*V* получим,

*W*0(*V*)

*W*1(*V*)

*A*0

*F*

*A*1

*E*

*K*

*W*, м3

*V*, м3

*Wнз*0

*Wнз*1

Δ*Wнз*

*W*0(*V*0)

*W*1(*V*0)

*V*0

*V*

Δ*V*

*W*1(*V*1)

*Рис. 13. Изменение водоизмещения при изменении вместимости*

.

где *ηс* – коэффициент приращения объемного водоизмещения при изменении требуемой вместимости,

.

Исследования показывают, что четвертый член знаменателя обычно меньше суммы второго и третьего, а следовательно, *ηс* < 1, в отличие от коэффициента Нормана *ηн*, который всегда больше единицы. Таким образом приращение полного объема корпуса будет опережать приращение водоизмещения, что может быть объяснено тем, что объем надводной части корпуса увеличивается быстрее чем в подводной.

В тех случаях, когда вместимость по разделам растет пропорционально только соответствующим массам (например грузовместимость пропорционально грузоподъемности), вместимость вполне обеспечивается при одновременном увеличении водоизмещения, соответствующем *ηн*. Но тем не менее при переходе от прототипа к проекту следует учесть изменения, вызываемые наличием обоих коэффициентов *ηн* и *ηс*, а также характеристик и требований касающихся масс и требуемых объемов. Такой учет необходим потому, что специальные требования по характеристикам вместимости (например, удельная грузовместимость или объем помещений, приходящийся на одного пассажира) могут меняться довольно значительно. В этом случае Δ*V* должно изменяться из за изменения *W*1(*V*0) + *Wнз*1, при этом приращение нагрузки может оказаться небольшим. Тогда целесообразнее менять *hT*, которое при определении *ηс* считалось постоянным. Изменение *hT*, как правило, влияет на отношение *В*/*Т*, что связано с обеспечением остойчивости.

**Уравнение вместимости для судов со средним расположением МО**

Приведенные выше исследования носят общий характер и могут применяться для определения вместимости различных типов судов. Но в то же время для судов отдельных архитектурно-конструктивных типов можно дать более конкретные решения. Так, Л.М. Ногид вывел специальное уравнение для сухогрузных судов, базирующееся на рассмотрении объема их грузовых помещений. Рассмотрим вначале уравнение для судов со средним расположением МО.

*L*

*Lм*

*м*

*B*

*H*

#### **МО**

*hдд*

Рис. 14. Схема судна со средним расположением МО

Объем, заключенный между верхней палубой и настилом двойного дна

*Wп* = *δпLB*(*H* – *hдд*),

где – *δп* коэффициент общей полноты теоретического объема *Wп*, отнесенный к *LB*(*H* – *hдд*), *hдд* – высота двойного дна.

К объему *Wп* могут быть добавлены объемы между комингсами люков, выступающими над верхней палубой.

Исключая из *Wп* объемы пиков, цистерн разного назначения (кроме цистерн между переборками МО), коридора гребного вала и т.п. и считая, что отношение исключенных объемов к *Wп* составляет (1 – *kп*), получим теоретический объем трюмной части и МО

*Wт* = *kпδпLB*(*H* – *hдд*).

Объем заключенный между переборками МО

*Wм* = *δмLмB*(*H* – *hдд*).

Тогда объем грузовых трюмов



или с учетом двойных бортов (рис. 16)

,

где *Вб* – средняя ширина междубортного пространства.

По полученным зависимостям можно найти удельную грузовместимость судна *μс* = *Wгр*/*Ргр* или переходя от теоретической к вместимости по сыпучему или штучному грузу *μгр* = *k*Δ*Wгр*/*Ргр*, где *k*Δ – коэффициент вычета, равный 0,97 – 0,98 для сыпучего груза и 0,87 – 0,89 для штучного груза.

.

С учетом выражения для *Wгр* получим

.

Сравнивая уравнения для *Wгр* и *μс* можно сделать следующие выводы:

1. абсолютная грузовместимость растет пропорционально *В*, но ширина практически не оказывает влияния на удельную грузовместимость (при *Вб* = 0, ширина судна в уравнении для *μс* не фигурирует);
2. длина судна *L*, от которой *Wгр* зависит довольно значительно, на *μс* влияет сравнительно мало;
3. поскольку коэффициент общей полноты *δ* связан с коэффициентом *δп*, для определения его влияния сделаем следующие преобразования (учитывая, что по статистике *δп* ≈ *δ* + 0,1, а *δм* ≈ *β* ≈ 1)

.

По данным А.В. Бронникова, для грузовых судов *Lм*/*L* ≥ 0,12, а *kп* всегда меньше единицы. Из-за этого, при увеличении *δ* грузовместимость растет, хотя и незначительно, поскольку второй член последнего выражения мал по сравнению с *kп*;

1. С увеличением коэффициента *ηг* уменьшается *μс*, так как, чем больше значение *ηг*, тем меньше при данной грузоподъемности водоизмещение *D*, а следовательно, и внутренний объем судна;
2. Увеличение *Н* и отношения *hТ* = *Н*/*Т* вызывает прямо почти пропорциональный рост абсолютной и удельной грузовместимости.

Для определения отношения *hT*, соответствующего заданной удельной грузовместимости, преобразуем выражение, полученное для *μгр*

.

Подставляя в данное выражение значения *δ*, а также принятые по прототипу или по статистическим данным *δп*/*δ*, *Lм*/*L*, *kп* и *hдд*/*Т*, можно найти *hT*. Чтобы оценить порядок величины *hT*, упростим выражение. Принимая, что по статистике *δ*/[*kпδп* – *δм*(*Lм*/*L*)] ≈ 1,29, а *γ* = 1,025 т/м3, получим

.

Данное выражение позволяет грубо оценить значение *hT*, при котором обеспечивается заданная грузовместимость судна.

При перевозке части груза на палубе при определении *hT* необходимо учитывать только тот объем, который должен находиться в трюмах и твиндеках, т.е. *nРг*, где *n* – доля трюмного груза.

1,0

1,5

*hТ* = 2,0

*μг*

*ηг*

0,5

0,6

0,7

0,8

0

1

2

3

Рис. 15. Взаимосвязь μг, ηг иhT

Следует заметить, что по данным Л.М. Ногида и Н.Е. Путова отношение высоты двойного дна к осадке *hдд*/*Т* составляет для сухогрузных судов в среднем 0,16, но для таких судов, как рудовозы значение *hдд*/*Т* может быть существенно превосходить указанную величину.

При перевозке относительно тяжелых грузов (*μг* < 1) вместимость судна (при определенном из уравнения нагрузки водоизмещением) обеспечивается уже при нулевом надводном борте, то есть при *hT* = 1 (рис. 15). Составлять уравнение нагрузки в этом случае не требуется, а высоту

борта необходимо определять по требованиям предъявляемым к другим характеристикам судна (например, по Правилам о грузовой марке).

**Вместимость судов с кормовым расположением МО**

При расположении МО в кормовой части судна более сложным является вопрос об определении значений *Lм* и *δм*. Однако, можно предположить, что объем помещений МО, приходящийся на один киловатт мощности *μм* = *Wм*/*N*, остается постоянным независимо от расположения МО. Тогда

*Wм* = *δм срLм срB*(*H* – *hдд*) ≈ *δм кLм кB*(*H* – *hдд*),

где индексы "*ср*" и "*к*" обозначают соответственно среднее и кормовое расположение МО. Из этой зависимости следует, что

*δм срLм ср* ≈ *δм кLм к*,

что дает право использовать формулы выведенные для судов со средним МО.

*L*

*Lм*

*B*

*H*

#### **МО**

*Bб*

*hдд*

*Lт*

Рис. 16. Схема судна с кормовым расположением МО

Полезная грузовместимость судна, с учетом двойных бортов (рис. 16)

*Wг* = *k*Δ*δтLт*(*В* – 2*Вб*)(*H* – *hдд*),

где *δт* – коэффициент полноты теоретического объема трюмной части, *Lт* – длина трюмной части. С учетом того, что *μг* = *Wг*/*Pг* = *Wг*/*ηгγδLBT*, получим

,

где *ηдл* = *Lт*/*L* – коэффициент утилизации (использования) длины судна.

Анализ формулы приводит к тем же выводам, что и в случае расположения МО в средней части судна.

Теперь можно найти отношение *hT*, удовлетворяющее заданной удельной погрузочной кубатуре груза, при определенном водоизмещении.

.

Принимая, что по статистике *δт* ≈ 1,15*δ*, а *γ* = 1,025 т/м3, получим

.

#### **Вместимость наливных судов**

В отличие от сухогрузов, наливные суда в своей танковой части, кроме грузовых танков имеют балластные и отстойные цистерны (рис. 17). Таким образом, общий объем танковой части будет складываться из трех объемов

*Wт* = *Wг* + *Wбл* + *Wо*.

где *Wг* = *Pг*/*γг* = (*ηг*/*γг*)*D* – объем грузовых танков, *Wбл* = (*ηбл*/*γ*)*D* – объем балластных цистерн, *ηбл* – коэффициент балластировки, *Wо* = *сWг* – объем отстойных танков, *с* – доля вместимости отстойных цистерн, которая по правилам должна составлять не менее 3 % от *Wг*.

*L*

*B*

*H*

#### **МО**

*Bб*

*hдд*

*Lт*

*Wг*

*Wо*

*Wб*

*Wо*

#### **насосное отделение**

*Рис. 17. Схема наливного судна*

Таким образом

,

Однако теоретический объем танковой части, определяемой ее геометрией

*Wт* = *k*Δ*δтLт*(*В* – 2*Вб*)(*H* – *hдд*),

где *k*Δ ≈ 0,95 – коэффициент вычета на телесность набора и недолив жидкости.

Сопоставляя два выражения для *Wт*, получаем

.

Для танкеров, у которых балластные и отстойные цистерны размещаются в отсеках двойного дна и двойных бортов, т.е. *с* = 0, *ηбл* = 0 и с учетом того, что *δт* ≈ 1,15*δ*, *γ* = 1,025 т/м3, получим

.

**Регистровая вместимость судна**

Вместимость судна служит основанием для расчета, касающихся стоимости фрахтования судна, взимания налогов и сборов, оценки продажной стоимости. Таким образом, вместимость судна, определенная по этим правилам или *регистровая* вместимость, является одной из основных эксплуатационных характеристик судна. В 1982 г. в силу вступили правила Международной конвенцией по обмеру судов 1969 г., в которых регламентируется порядок определения вместимости различных судов.

Единицей измерения регистровой вместимости ранее явлись *регистровые тонны*, 1 рег.т. = 100 фут3 = 2,83 м3, сейчас это безразмерная величина.

Различают *валовую* регистровую вместимость (*gross tonnage*), характеризующую общий объем корпуса и надстроек и *чистую* регистровую вместимость (*net tonnage*), характеризующую объем грузовых и пассажирских помещений.

Валовая регистровая вместимость определяется по формуле

*GT* = *k*1*W*,

где *k*1 = 0,2 + 0,02 *lg**W*, *W* – общая техническая вместимость всех закрытых помещений судна. К закрытым помещениям кроме корпуса и надстроек относятся и кожухи дымовых труб, грузовые, светлые и сходные люки.

Чистую регистровую вместимость определяют по выражению

,

где *k*2 = 0,2 + 0,02 *lg**W г*, *Wг* – общий теоретический объем грузовых помещений, *k*3 = 1,25∙(1 + *GT*·10-4), *п*1 – количество пассажиров размещаемых в каютах с числом коек не более восьми, *п*2 – количество прочих пассажиров.

При определении величины *NT* осадка грузового судна берется по *грузовую марку* (не лесную), а для пассажирских судов по осадке соответствующей самой высокой ВЛ деления судна на отсеки.

Кроме этого при вычислении *NT* действуют следующие ограничения:

1. при (*п*1 + *п*2) < 13, второе слагаемое принимается равным нулю;
2. при , отношение *Н*/*Т* должно считаться равным не менее 1,33;
3. первое слагаемое должно приниматься не меньше 0,25*GT*;
4. величина *NT* должна приниматься не меньше 0,30*GT*.

На начальных этапах разработки проекта регистровую вместимость можно определить по следующим приблизительным зависимостям:

- для пассажирских судов *GT* ≈ *D*;

- для танкеров и балкеров *GT* ≈ 0,65*DW*;

- для универсальных сухогрузов *GT* ≈ 0,70*DW*;

- для рефрижераторов и контейнеровозов *GT* ≈ *DW*;

Для всех судов можно считать, что *NT* ≈ 0,55*GT*.

**Обеспечение остойчивости при проектировании**

На начальных этапах проектирования вопросы, связанные с остойчивостью судна относятся к наиболее важным, поскольку эксплуатационные характеристики проекта будут зависеть от показателей остойчивости. Но из-за неопределенности требований предъявляемых к остойчивости судов и необходимости выражения этих требований через какие-то показатели, которые можно установить на начальных этапах проектирования приходится сталкиваться с рядом трудностей. Следует отметить, что выражение требований через какой-то один показатель не отражает всех аспектов проблемы, связанных с остойчивостью. Кроме этого выражение требований происходит не прямо, а косвенно.

Из-за указанных обстоятельств возникает неопределенность при выборе элементов проектируемого судна. Нередко результаты начальных этапов проектирования приходится корректировать на более поздних этапах, когда появляется возможность провести прямые расчеты остойчивости судна по теоретическому чертежу.

Таким образом, для избежания ошибок на ранних стадиях проектирования необходимо как можно более обоснованно выбрать критерий остойчивости и определить предъявляемые к этому критерию требования – их состав и количественные значения.

Наиболее полное представление об остойчивости судна дает его *диаграмма статической остойчивости*. Но для ее построения необходимо иметь теоретический чертеж, который не может быть получен до установления главных размерений. Из-за этого на ранних стадиях проектирования, то есть при определении основных элементов судна необходимо использовать такой показатель остойчивости, который может быть выражен через искомые величины, то есть через главные размерения и коэффициенты полноты. Таким требованиям отвечает *начальная метацентрическая высота* *h*. Но поскольку метацентрическая высота зависит от абсолютных размеров судна, достаточно трудно установить ее рациональное значение как критерия остойчивости. Поэтому в ТПС в качестве универсального показателя остойчивости принимают не абсолютную, а *относительную* *метацентрическую высоту* – отношение начальной метацентрической высоты к ширине судна:

.

Преимущество использования этого критерия остойчивости выражается в его стабильности для различных типов судов. При этом считается, что при равенстве относительных метацентрических высот такие показатели, как угол крена, амплитуда качки, вертикальные ускорения у различных судов будут равными.

Например, из теории корабля известна формула для определения периода бортовой качки судна,

,

где *Ix* + Δ*Ix* – момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси с учетом присоединенной массы воды, *тмс*2. Определить значение данной величины на ранних стадиях проектирования представляется затруднительным. В то же время момент инерции связан с водоизмещением зависимостью

,

где *rx* – радиус инерции (*м*). Данную величину обычно выражают в долях ширины судна, *rx* = *kB*. Тогда после подстановки получим

,

так называемую, *капитанскую* формулу, где *с* = 2π*kg*-1/2. Для большинства судов коэффициент *с* лежит в пределах 0,72 – 0,82. Из структуры формулы видно влияние *ħ* на период бортовой качки.

Амплитуда качки Θmax в условиях резонанса связана с углом волнового склона α*волн* и безразмерным коэффициентом сопротивления качке *μ* следующей зависимостью,

.

Для транспортных судов коэффициент *μ* зависит от величины .

,

где *k* – практический коэффициент. Следовательно,

.

Угол крена при качке в любой момент времени *t* при совпадении периодов волны и собственных колебаний (явление резонанса) описывается формулой:

,

угловая скорость при этом,

,

угловые ускорения

.

Максимальная величина углового ускорения

.

Максимальные линейные ускорения при бортовой качке будут возникать в точках наиболее удаленных от ДП, то есть у борта. Тогда,

.

Если выразить период собственных колебаний *τ*θ через капитанскую формулу, то получим,

.

Таким образом, при равных значениях  и α*волн* можно ожидать, что вертикальные ускорения у сопоставляемых судов будут равными.

Кроме того относительная метацентрическая высота пригодна и для суждения о способности судна противостоять кренящим моментам, создаваемым силой *р* приложенной на плече *l*. При этом угол крена будет равным,

.

Следовательно, если известно значение предельно допустимого угла крена Θ*пред*, нетрудно найти необходимое значение относительной метацентрической высоты:

.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод о возможности использования относительной метацентрической высоты в качестве основного критерия остойчивости проектируемого судна.

**Нормирование верхнего и нижнего пределов остойчивости**

Выбор значения относительной метацентрической высоты зависит от исходных требований к проектируемому судну, содержащихся в задании на проектирование. При этом руководствуются следующими соображениями.

1. Остойчивость должна быть достаточной, чтобы противостоять кренящим моментам, действующим на судно в процессе его эксплуатации. Крен судна может вызвать ветер и волнение, скопление пассажиров на одном борту, смещение грузов в трюме, неравномерное расходование судовых запасов из цистерн левого и правого борта и прочие причины. Определение элементов судна исходя из необходимости противостоять наиболее тяжелой комбинации кренящих моментов, привело бы к завышенным требованиям к остойчивости. Поэтому при назначении величины *ħ* ориентируются не на наихудшую, а на наиболее вероятную комбинацию внешних сил действующих на судно.

2. Верхняя граница остойчивости определяется из условия обеспечения плавности качки при плавании на взволнованном море. Порывистая качка с большими амплитудами и малыми периодами приводит к высоким значениям ускорений, вследствие чего возрастает вероятность смещения груза, ухудшения состояния членов экипажа, повреждению судовых конструкций. Считается, что допустимое значение ускорений не должно превышать 10 % ускорения свободного падения. Зависимость периода качки от относительной метацентрической высоты представлена на рис. 18.



0

10

20

30

 = 0,25

*В*, *м*

10

20

30

*τθ*, *с*

0,20

0,15

0,13

0,11

0,01

0,02

0,03

0,05

0,07

0,09

40

*Рис. 18. Зависимость τθ от*  *и ширины судна*

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод о том, что при назначении величины  необходимо стремиться обеспечить достаточную, но не чрезмерную остойчивость судна.

**Требования Регистра к остойчивости судов**

Требования Регистра к остойчивости судов изложены в IV части Правил и делятся на общие, распространяющиеся на все суда, и дополнительные, применительно к судам конкретных типов.

Общие требования сводятся к следующим.

Основное условие достаточной остойчивости сводится к требованию способности судна одновременно противостоять действию динамически приложенного давления ветра и бортовой качки. Проверка данного условия сводится к вычислению *критерия погоды* *К*, представляющего собой отношение опрокидывающего момента к моменту кренящему.

.

Кренящий момент определяется воздействием динамически приложенного давления ветра на надводную часть судна, считая, что ветер дует перпендикулярно ДП:

,

где *рв* – давление ветра *кг/м2*, *Sп* – площадь парусности, *м2*, *zп* – возвышение центра парусности над плоскостью действующей ВЛ, *м*.

Численные значения *рв* изменяются для судов неограниченного района плавания от 72 до 124 *кг*/*м*2 в зависимости от величины *zп* (считается, что давление ветра нарастает по мере уменьшения тормозящего действия поверхности воды). Для I ограниченного района плавания *рв* снижается до 0,567 значения этого же параметра неограниченного района плавания. Для II ограниченного района плавания *рв* учитывается с коэффициентом 0,275. В этих же правилах содержаться указания по учету несплошных конструкций (лееров, вант, ферм и т.п.), конструкций круглого сечения (мачт, труб и т.п.), палубных контейнеров и мелких предметов.

Опрокидывающий момент, представляющий собой максимальный восстанавливающий момент, определяется по диаграмме динамической или статической остойчивости. Влияние качки учитывается предположением, что в момент приложения ветровой нагрузки судно накренено на наветренный борт. Угол крена принимается равным амплитуде качки, определяемый по Правилам, в зависимости от элементов судна.

При определении *Моп* по *диаграмме динамической остойчивости* учет накренения от качки учитывается тем, что диаграмма продолжается в область отрицательных углов крена (рис. 19). В этой области откладывается амплитуда качки Θmax, и в точку *О*1 пересечения диаграммы с вертикальной прямой, соответствующей Θmax переносится начало координат. Затем из *О*1 проводится касательная к диаграмме, по оси абсцисс откладывается один радиан (точка *А*). Из *А* проводится вертикаль до пересечения с касательной. Отрезок *АВ* соответствует максимальному восстанавливающему моменту.

Правила предписывают принимать во внимание величину угла заливания Θ*зал*, то есть такого угла, при котором происходит заливание водой внутренних помещений судна через отверстия в борту, палубе и надстройках считающихся открытыми согласно Правил Регистра. Диаграмма остойчивости считается действительной только до угла заливания, что приводит к уменьшению значения опрокидывающего момента до величины *АВ’* = *Мзал* (рис. 19).

После определения кренящего и опрокидывающего моментов рассчитывают значение критерия погоды, который должен быть не меньше единицы. Если это требование выполняется, переходят к проверке выполнения других требований:

57,3о

Θmax

*O*1

*O*

*B*

*A*

*Моп*

Θ

*Мзал*

*B*’

*М*

Θ*зал*

## Рис. 19. Определение опрокидывающего момента

Максимальное плечо диаграммы статической остойчивости должно быть не менее 0,25 м для судов длиной *L* ≤ 80 м и не менее 0,20 м для судов длиной *L* ≥ 105 м. Для промежуточных длин применяется линейная интерполяция. Угол крена соответствующий максимальному значению плеча статической остойчивости должен быть не менее 30о. Угол заката диаграммы должен быть не менее 60о (рис. 20);

*lmax*

*l*

Θ*max*

Θ*зак*

30о

60о

*Рис. 20. Нормируемые параметры диаграммы статической*

*остойчивости*

* Начальная метацентрическая высота при всех вариантах нагрузки должна быть положительной.

При определении параметров остойчивости судна необходимо учитывать влияние на остойчивость свободных поверхностей жидкости в цистернах, а также возможность обледенения. Проверка остойчивости по критерию погоды должна осуществляться для наихудшего варианта нагрузки.

Дополнительные требования к остойчивости дифференцированы по типам судов. По отношению к сухогрузным судам и танкерам оговорены следующие варианты нагрузки для которых необходимо проверка остойчивости:

* судно в полном грузу, с полными запасами и без балласта;
* судно, как в первом варианте, но с 10 % запасов и, если необходимо с жидким балластом;
* судно без груза, с полными запасами и, если необходимо с жидким балластом;
* судно, как в третьем варианте, но с 10 % запасов и, если необходимо с жидким балластом;

Для судов перевозящих палубный груз Регистр, как минимум, требует проверку остойчивости еще для двух вариантов нагрузки:

* судно с заполненными однородным грузом трюмами и твиндеками, с грузом на палубе и полными запасами при осадке по грузовую марку и если необходимо с жидким балластом;
* судно, как в предыдущем варианте, но с 10 % запасов и, если необходимо с жидким балластом;

Особые требования предъявляются к остойчивости судов перевозящих лесной палубный груз – начальная метацентрическая высота таких судов должна быть не менее 0,10 м, с учетом возможности намокания и обледенения палубного груза.

При частичном заполнении трюмов тяжелыми грузами (руда, слитки металла и т.п.) при осадке по грузовую марку необходимо проверять остойчивость по *критерию ускорений*. Расчетные вертикальные ускорения *аz* должны быть не должны превышать 0,3 ускорение свободного падения.

Для буксиров проверяется остойчивость при рывке буксирного троса. У пассажирских судов проверяется угол крена от скопления пассажиров на одном борту (Θ*пас* ≤ 10о) и угол крена от совместного действия кренящих моментов на циркуляции и скопления пассажиров на одном борту (Θ*ц* ≤ 12о). У контейнеровозов – угол крена, возникающий под действием ветра и на циркуляции. В обоих случаях он не должен превышать 15о. Начальная метацентрическая высота при перевозке контейнеров должна быть не менее 0,20 м.

**Рекомендации по назначению** 

Для большинства сухогрузных судов при проектировании рекомендуется удерживать относительную метацентрическую высоту в пределах  = 0,03 – 0,04. Считается, что при этих значениях  обеспечивается безопасность плавания, благоприятные параметры качки и выполнение требований Регистра к остойчивости. Указанные пределы характерны для судна в полном грузу. По мере расходования топлива из низкорасположенных цистерн двойного дна ЦТ судна будет подниматься. При этом метацентрическая высота постепенно уменьшается и к концу рейса может опуститься до значения  = 0,01 – 0,02.

При  ≤ 0,02 инерционные силы при качке весьма незначительны, но в то же время, остойчивость судна будет недостаточной. Крен на циркуляции на полном ходу может достигать 15 – 18о, что заставляет снижать скорость или уменьшать угол перекладки руля.

При  = 0,07 – 0,09 качка судна будет довольно порывистой, силы инерции возрастают до 15 – 20 % массы груза. Наконец при  > 0,11 возникающие ускорения достигают 50 % массы груза, что может привести к обрыву найтовов, удерживающих груз. Условия работы экипажа становятся практически невыносимыми.

Рекомендованные выше значения относительной метацентрической высотыотносятся к достаточно крупным судам. Для более мелких судов характерны повышенные значения . Это связано с тем, что восстанавливающий момент пропорционален водоизмещению, а кренящий (например от действия ветра) пропорционален водоизмещению в степени меньшей единицы. Таким образом при уменьшении размеров судна изменение восстанавливающего момента будет большим, чем кренящего. Поэтому для небольших судов считается необходимым поддерживать более высокие значения . Для таких типов судов, как ледоколы, танкеры, рудовозы и лесовозы характерные значения  отличаются от сухогрузных судов.

При проектировании ледоколов стремятся увеличить ширину, для обеспечения проводки во льдах судов значительно крупнее ледокола. Поэтому соотношение *В*/*Т* и  для ледоколов значительно больше транспортных судов. При  ≤ 0,15 качка ледоколов на свободной воде становится очень резкой.

Танкеры, как правило, значительно крупнее сухогрузов, поэтому при проектировании приходится сталкиваться с проблемой ограничения их осадки. В результате отношение *В*/*Т* достигает значения 3,3 и относительная метацентрическая высота (без поправки на влияние свободной поверхности жидкости) достигает следующих значений:

DW, т 10 000 25 000 100 000

 0,07 0,11 0,13

При этом качка танкеров не отличаются порывистостью – ее смягчает демпфирующее действие жидкого груза.

Повышенная остойчивость судов перевозящих тяжелые навалочные грузы объясняется тем, что при заданной массе общий объем груза оказывается меньше объема трюма. Груз сконцентрированный в нижней части трюма снижает общего ЦТ судна. Если суда не приспособлены для более высокого расположения груза (увеличенная высота двойного дна, укороченные твиндеки и т.п.), значения  достигают 0,15 – 0,20.

На остойчивость лесовозов существенное влияние оказывает груз, размещенный на верхней палубе. Это влияние сказывается двояко: повышается ЦТ судна, что приводит к уменьшению начальной остойчивости, но в то же время положительная плавучесть палубного груза позволяет рассматривать его как продолжение корпуса судна, обуславливающего увеличение плеч остойчивости формы на больших углах крена. В результате этого диаграмма статической остойчивости приобретает на начальном участке S-образную форму, но отличается увеличенной максимальной ординатой и смещением в сторону больших углов максимума и заката диаграммы (рис. 21). Площадь диаграммы при этом, как правило, увеличивается, что позволяет эксплуатировать лесовозы, несмотря на очень маленькие значения начальной метацентрической высоты.

Θmax

Θ'max

Θmax

Θ'max

Θз

Θ'з

Θ

*l*max

*l*’max

*l*

*Рис. 21 Влияние лесного палубного груза на остойчивость*

**Уравнение остойчивости в алгебраической форме**

Вывод уравнения остойчивости базируется на известной формуле теории корабля:

*h* = *r* + *zc* – *zg*.

В данном уравнении метацентрический радиус *r*, аппликату ЦВ *zc* и возвышение ЦТ *zg* связывают с основными элементами судна, используя для этого приближенные формулы.

Например, для *r*

,

для *zc*

,

для *zg*

.

Подставив эти выражения в исходную формулу и поделив на *В* получим алгебраическое уравнение остойчивости в безразмерной форме:

,

или в сокращенном виде

.

Анализируя данное выражение можно прийти к следующим выводам:

1. Длина судна *L* и отношение *L*/*B* не влияет на , а на абсолютную остойчивость оказывают очень слабое влияние. При Δ(*L*/*B*) = 10 % приращение *h* составит не более 2 %.
2. Увеличение отношения *Н*/*Т* приводит к уменьшению . Однако поскольку *Н*/*Т* выбирают исходя из требований к вместимости, непотопляемости и надводному борту регулировать остойчивость с помощью данной величины затруднительно.
3. Коэффициенты *α* и *δ* оказывают прямое влияние на остойчивость. Но, так как эти коэффициенты влияют на другие мореходные характеристики (прежде всего ходкость) и пределы их изменения невелики, регулировать значение  при помощи этих коэффициентов можно лишь в весьма ограниченном диапазоне.
4. Основное влияние на остойчивость оказывает отношение *В*/*Т*. Поскольку эта величина мало сказывается на других характеристиках судна, то регулируя это отношение можно добиваться желаемых параметров остойчивости.

В свою очередь величина  может быть выбрана по общим рекомендациям приведенным выше или конкретизирована с учетом требований предъявляемых к судну. Например, если у проектируемого судна в задании оговорены предельные значения периода бортовой качки – *τθ*, угла крена от скопления пассажиров на одном борту – Θпасс, угла крена на циркуляции – Θцирк и аварийного угла крена при несимметричном затоплении отсеков – Θав, то можно получить граничные значения отношения *В*/*Т*.

,

.

Пространство между граничными значениями (*В*/*Т*)min и (*В*/*Т*)max представляет собой область допустимых, с точки зрения остойчивости, значений *В*/*Т*.

**Анализ степени влияния элементов судна на его остойчивость**

Уравнение остойчивости в алгебраической форме дает возможность судить о характере влияния элементов проектируемого судна на показатели его остойчивости. Но в ряде случаев, когда возникает необходимость изменить значение *h* на определенную величину путем изменения основных элементов, этой возможности оказывается недостаточно. Оценить степень влияния главных размерений и коэффициентов полноты в этом случае можно с помощью *уравнения остойчивости в дифференциальной форме*..

Исходным является формула:

*h* = *r* + *zc* – *zg*.

Продифференцировав это выражение получим приращение *h*.

*dh* = *dr* + *dzc* – *dzg*.

Если предположить, что изменение аппликаты ЦТ обусловлено причинами только эксплуатационного характера, то можно записать

*dh* = *dm* = *dr* + *dzc*,

где *dm* – приращение метацентра. Пользуясь, как и ранее, для выражения *r* и *zc* приближенными формулами получим



,



.

Приведя подобные члены, получим уравнение метацентра в дифференциальной форме:

.

Анализируя это уравнение можно найти соотношение между приращениями элементов судна и метацентрической высоты. Это удобно сделать, рассматривая эти соотношения раздельно, при следующих исходных условиях:

1. *dB* ≠ 0, *dα* = *dδ* = *dT* = 0.

Тогда:

.

При умеренных значениях *В*/*Т* = 2,2 – 2,6, характерных для сухогрузных судов, увеличение ширины на 1 м приводит к увеличению метацентрической высоты примерно на 0,33 – 0,39 м. При *В*/*Т* = 2,8 – 3,1, свойственных танкерам, пассажирским судам и паромам на каждый метр уширения приходится 0,45 – 0,60 м возрастания *h*.

1. *dТ*≠ 0, *dα* = *dδ* = *dВ* = 0.

Тогда:

,

откуда следует, что приращение может быть как положительным, так и отрицательным. Знак приращения будет определяться соотношением между *r* и *zc* (рис. 22). Пересечению кривых *r* и *zc* соответствуют значения *В*/*Т* = 2,2 – 2,6. Следовательно, для относительно узких судов увеличение осадки будет сопровождаться снижением метацентра, а для относительно широких – последствия будут обратными.

*r*, *zc*

*В*/*Т*

*zc*

*r*

2,6 – 2,8

Δ*m* < 0

Δ*m* > 0

*Рис. 22. Влияние изменения отношения В*/*Т на знак приращения* Δ*m*

1. *dα* ≠ 0, *dδ* = *dТ* = *dВ* = 0.

Тогда:

.

Изменение коэффициента *α* аналогичны по характеру с последствиями изменения *В*, но отличаются большей интенсивностью. Объясняется это тем, что приращение *α* (положительное или отрицательное) оказывает влияние не только на *r*, но и на *zc*.

1. *dδ* ≠ 0, *dα* = *dТ* = *dВ* = 0.

Тогда:

.

Отрицательный знак приращения *m* в этом случае обусловлен характером влияния *δ* на *r* и *zc* – с ростом *δ* обе эти величины уменьшаются. Таким образом, увеличение полноты проектируемого судна сопровождается уменьшением его остойчивости.

Длина судна не фигурирует в исходном, поскольку ее изменение не сказывается на значениях *r* и *zc*, а следовательно, и на *m*. Это позволяет сохранять неизменным водоизмещение судна при изменениях *δ*, *α*, *Т* и *В*, производимых для корректировки остойчивости исходя из условия

*dδ*/*δ* + *dα*/*α* + *dВ*/*В* + *dТ*/*Т* = 0.

Однако при выводе и анализе уравнения метацентра в дифференциальной форме не ставилось условие о неизменности водоизмещения, поэтому все выводы из уравнения остаются справедливыми и при несоблюдении последнего равенства, когда

*dδ*/*δ* + *dα*/*α* + *dВ*/*В* + *dТ*/*Т* = *dD*/*D*.

то есть при *dD*/*D* ≠ 0.