

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

И.В. Якута, Б.С. Гуральник

ТЕОРИЯ И УСТРОЙСТВО СУДНА

Учебно-методическое пособие
по выполнению
лабораторных работ для курсантов и студентов
высших учебных заведений по специальности
26.05.05 «Судовождение»
всех форм обучения

Калининград
Издательство БГАРФ

2021

БГАРФ

УДК 629.5.011(75)

Якута, И.В. Теория и устройство судна: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ для курсантов и студентов высших учебных заведений по специальности 26.05.05 «Судовождение» всех форм обучения / И.В. Якута, Б.С. Гуральник. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2021. – 116 с.

В учебно-методическом пособии рассматриваются основные положения разделов «Плавучесть» и «Остойчивость» по курсу «Теория и устройство судна», дополняющие материалы имеющихся учебников современными сведениями и описанием процедуры контроля остойчивости, позволяющие выполнить более качественно лабораторные работы и использовать эти сведения в практической деятельности судоводителя.

Учебно-методическое пособие составлено на основании учебного плана подготовки в БГАРФ по специальности 26.05.05 «Судовождение».

Рис. 30, табл. 23, библи. – 13 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота.

Рецензенты: Зеленин Ф.Л., канд. техн. наук,
зам. директора СРЗ «Преголь»;
Устич Л.М., канд. пед. наук, доцент
кафедры безопасности мореплавания БГАРФ

УДК 629.5.011(75)

© БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2021

БГАРФ

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Порядок работы в лаборатории гидромеханики и непотоплаемости	6
Инструкция по охране труда при проведении лабораторных занятий	8
Раздел I. Общие сведения	11
1.1. Описание лабораторного оборудования	11
1.2. Техническая документация для расчетов при выполнении лабораторных работ	13
1.3. Формулы геометрического и статического подобия для пересчета результатов модельного эксперимента на натурное судно	19
Раздел II. Основные теоретические положения и методические указания, необходимые для выполнения лабораторных работ	24
Лабораторная работа № 1 Определение запаса плавучести и построение грузового размера.....	24
Лабораторная работа № 2 Определение метацентрической высоты судна методом кренования	41
Лабораторная работа № 3 Влияние на посадку и остойчивость судна приёма (снятия) малого груза	61
Лабораторная работа № 4 Влияние на посадку и остойчивость судна приёма (снятия) большого груза.....	70
Лабораторная работа № 5 Влияние на посадку и остойчивость судна перемещения груза.....	77
Лабораторная работа № 6 Влияние подвешенных грузов на посадку и остойчивость судна	88
Лабораторная работа № 7 Влияние жидкого груза со свободной поверхностью на посадку и остойчивость судна	96
Лабораторная работа № 8 Определение поперечной метацентрической высоты по периоду собственных бортовых колебаний судна	104
Список использованных источников	113
Приложение. Пример оформления протокола лабораторной работы	114

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с действующим учебным планом курсанты и студенты, обучающиеся по специальности 26.05.05 «Судовождение» при изучении дисциплины «Теория и устройство судна» должны выполнить цикл лабораторных работ.

Тематика лабораторных работ согласуется с рабочей программой курса. Для курсантов и студентов, обучающихся по специальности 26.05.05 «Судовождение», профилирующими в дисциплине «Теория и устройство судна» являются разделы «Плавуемость», «Остойчивость» и «Непотопляемость».

Целью освоения дисциплины «Теория и устройство судна» является формирование у обучающихся компетентности в соответствии с разделами А-II/1 (уровень эксплуатации) и А-II/2 (уровень управления) Кодекса ПДНВ с учетом содержания модельных курсов ИМО 7.01. "Master and Chief Mate", 7.03. "Officer in Charge of a Navigational Watch", способности уверенно ориентироваться в вопросах устройства современных транспортных и рыболовных судов и в соответствующей терминологии, в таких вопросах теории судна как плавуемость, остойчивость, непотопляемость; выполнять расчёты, связанные с обеспечением безопасности мореплавания.

Компетентности, формируемые в процессе изучения дисциплины «Теория и устройство судна» (в соответствии с Кодексом ПДНВ):

КК-13 – Поддержание судна в мореходном состоянии.

КК-36 – Контроль за посадкой, остойчивостью и напряжениями в корпусе.

<i>Компетентность вахтенных помощников капитана, капитанов и старших помощников капитана судов валовой вместимостью 500 и более (таблицы А-II/1 и А-II/2)</i>	
<i>Сфера компетентности</i>	<i>Знание, понимание и профессиональные навыки</i>
<i>Таблица А-II/1 ПДНВ (для вахтенных помощников капитана). Функция – управление операциями судна и забота о людях на судне на уровне эксплуатации</i>	
<i>Поддержание судна в мореходном состоянии (уровень эксплуатации)</i>	<i>Остойчивость судна Рабочее знание и применение информация об остойчивости, посадке и напряжениях, диаграмм и устройств для расчета напряжений в корпусе</i>

	<p>Понимание основных действий, которые должны предприниматься в случае частичной потери плавучести в неповрежденном состоянии.</p> <p>Понимание основ водонепроницаемости</p>
	<p><i>Конструкция судна</i></p> <p>Общее знание основных конструктивных элементов судна и правильных названия их различных частей</p>
<p><i>Таблица А-II/2 ПДНВ (для капитанов и старших помощников капитана). Функция – управление операциями судна и забота о людях на судне на уровне управления</i></p>	
<p>Контроль за посадкой, остойчивостью и напряжениями в корпусе (уровень управления)</p>	<p>Понимание основных принципов устройства судна, теорий и факторов, влияющих на посадку и остойчивость, а также мер, необходимых для обеспечения безопасной посадки и остойчивости.</p> <p>Знание влияния повреждения и последующего затопления какого-либо отсека на посадку и остойчивость судна, а также контрмер, подлежащих принятию.</p> <p>Знание рекомендаций ИМО, касающихся остойчивости судна</p>

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить устройство основных типов транспортных и промышленных судов;
- овладеть терминологией по устройству судна и по конструкции корпуса и уметь свободно пользоваться основной частью профессиональной терминологии, достаточной для работы со специальной литературой, проектной и производственно-технической документацией по эксплуатации судов и их технических средств;
- изучить обязанности вахтенного помощника капитана, связанные с работой на судне и требования, предъявляемые к техническому состоянию корпуса, судовых устройств, систем и технических средств судовождения;
- изучить и уметь применять все расчетные методики, используемые в практической деятельности судоводителя;
- понимать необходимость и целесообразность определённых действий в случаях различных аварийных ситуаций;
- овладеть материалами по теории судна в объеме программы;

- приобрести навыки применения информации об остойчивости, посадке и прочности судна;
- изучить физические основы мореходных качеств судов и их достаточной прочности в эксплуатационных условиях;
- приобрести навыки использования положений теории судна для управления факторами, обеспечивающими желательную посадку, остойчивость судов, непотопляемость, ходкость, управляемость.

Учебно-методическое пособие содержит два раздела. В первом разделе описывается лабораторное оборудование, включающее бассейны с водой, модели среднего рыболовного траулера, различные типы грузов, приводится техническая документация СРТМ, необходимая для выполнения лабораторных работ.

Вся техническая документация выполнена применительно к натурному судну, поэтому процедура выполнения лабораторных работ предусматривает пересчёт статико-геометрических характеристик с модели на натуру. При оформлении отчётов по лабораторным работам следует руководствоваться правилами приближенных вычислений и рекомендациями по обработке результатов измерений.

Второй раздел содержит методические указания к конкретным лабораторным работам и теоретический материал, необходимый при защите лабораторных работ. Типовые работы выполняются для закрепления знаний обязательного учебного материала.

Для каждой лабораторной работы принята самостоятельная нумерация формул и таблиц. Методические указания к лабораторным работам содержат списки литературы, необходимой для углубленного изучения соответствующей темы.

Порядок работы в лаборатории гидромеханики и непотопляемости

1. Безопасность

Приступая к занятиям в лаборатории кафедры безопасности мореплавания (ауд.102, УК-2), курсант (студент) обязан изучить инструкцию по технике безопасности (приведена ниже) и расписаться в специальном журнале о получении инструктажа. При выполнении работ все требования инструкции должны выполняться неукоснительно.

2. Расписание

2.1. В течение семестра каждый курсант (студент – во время сессии) должен выполнить восемь обязательных лабораторных работ.

2.2. Занятия в лаборатории в течение семестра (во время сессий) проводятся строго по расписанию. Работа курсантов (студентов) в часы, не предусмотренные расписанием, допустима только в присутствии преподавателя группы.

2.3. Курсанты, пропустившие занятия по расписанию, к работе в лаборатории допускаются только при наличии справки-допуска из деканата.

2.4. Лабораторные работы, как правило, должны быть сданы не позднее ближайшей предусмотренной графиком недели сдачи.

2.5. Работа, не сданная в течение месяца после её выполнения, аннулируется и заменяется другой по выбору преподавателя.

2.6. При наличии двух несданных работ к выполнению следующей курсант не допускается.

2.7. Если курсант пропустил занятия по уважительной причине (и имеет соответствующий допуск из деканата) или не успел закончить работу по независящим от него причинам, то преподаватель может разрешить ему прийти на дополнительные занятия, предусмотренные в расписании.

2.8. Курсант, не выполнивший работу по неуважительной причине, выполняет её в дополнительное время.

2.9. Занятия в лаборатории заканчиваются строго по расписанию.

3. Выполнение работ

3.1. На занятия в лабораторию курсант (студент) обязан являться подготовленным к выполнению работы:

а) знать основные теоретические положения, относящиеся к данной работе;

б) ясно понимать задание и методику выполнения работы;

в) знать правила обращения с измерительными приборами, применяемыми в данной работе;

г) заранее подготовить отчет по лабораторной работе: указать номер и название работы, выписать основные формулы, необходимые для расчётов, с пояснением каждой физической величины, чётко отметить цель каждого действия и привести таблицы для записи экспериментальных данных.

3.2. За подготовку к работе преподаватель ставит оценку в журнал и допускает курсанта (студента) к выполнению работы.

3.3. Курсант (студент) должен относиться бережно к деревянным моделям судов, ни в коем случае не допустить опрокидывания и за-

топления модели. Если модель затонула, курсант (студент) обязан в свободное время высушить ее, и лабораторные работы не проводятся до тех пор, пока модель не высохнет полностью и не будет стоять на ровный киль.

3.4. Вода в лотках должна быть чистой, не допускается мыть руки, тряпки и бросать мусор и т. п.

3.5. Рекомендуются в процессе работы показывать преподавателю результаты выполнения отдельных пунктов задания.

3.6. Своё рабочее время курсант (студент) должен планировать таким образом, чтобы сразу после выполнения работы провести приближённые расчёты.

4. Отчётность

4.1. Все пропуски и опоздания на занятия отмечаются в лабораторном журнале преподавателем, ведущим занятия.

4.2. После выполнения работы преподаватель подписывает результаты в бланке отчета курсанта (студента) и отмечает выполнение работы в лабораторном журнале: номер работы обводится кружком, если работа выполнена полностью, и незамкнутой кривой, если работа недоделана.

4.3. Отчёт о проделанной работе оформляется по установленному образцу. Все отчеты подшиваются в общую папку. Графики строятся на миллиметровой бумаге и прикладываются к отчету.

4.4. После сдачи работы преподаватель выставляет за неё в журнал отметку о сдаче и ставит подпись на листе бланка отчетов.

4.5. По окончании недель сдачи преподаватель отмечает в журнале общее количество выполненных и сданных работ у каждого курсанта.

Инструкция по охране труда при проведении лабораторных занятий

1. Общие требования безопасности

1.1. При проведении лабораторных занятий курсанты (студенты) должны соблюдать правила поведения, расписание учебных занятий, установленные режимы труда и отдыха.

1.2. При проведении занятий возможно воздействие на курсантов (студентов) следующих опасных и вредных факторов:

– нарушения осанки, искривления позвоночника, развитие близорукости при неправильном сидении за рабочими столами;

– нарушения остроты зрения при недостаточной освещенности в кабинете;

– поражение электрическим током при неисправном электрооборудовании кабинета;

– опасность поскользнуться и упасть на мокром полу вследствие вылива воды из бассейнов.

1.3. При проведении занятий соблюдать правила пожарной безопасности, знать места расположения первичных средств пожаротушения.

1.4. При несчастном случае пострадавший или очевидец несчастного случая обязан немедленно сообщить преподавателю, который сообщает об этом администрации академии.

1.5. В процессе занятий курсанты должны соблюдать правила личной гигиены, содержать в чистоте свое рабочее место.

1.6. Курсанты (студенты), допустившие невыполнение или нарушение инструкции по охране труда, привлекаются к ответственности, и со всеми курсантами (студентами) проводится внеплановый инструктаж по охране труда.

2. Требования безопасности перед началом занятий

2.1. Включить полностью освещение в кабинете, убедиться в исправной работе светильников. Наименьшая освещенность в кабинете должна быть не менее 300 лк (20 Вт/кв. м) при люминесцентных лампах и не менее 150 лк (48 Вт/кв. м) при лампах накаливания.

2.2. Убедиться в исправности электрооборудования кабинета: светильники должны быть надежно подвешены к потолку и иметь светорассеивающую арматуру; коммутационные коробки должны быть закрыты крышками; корпуса и крышки выключателей и розеток не должны иметь трещин и сколов, а также оголенных контактов.

2.3. Убедиться в правильной расстановке мебели в кабинете: расстояние между наружной стеной кабинета и первым столом должно быть не менее 0,5-0,7 м, расстояние между внутренней стеной кабинета и столами должно быть не менее 0,5-0,7 м, расстояние между задней стеной кабинета и столами должно быть 0,7 м, расстояние от классной доски до первых столов должно быть 2,4-2,7 м, расстояние от доски до последних столов должно быть не более 8,6 м, удаление мест занятий от окон не должно превышать 6,0 м.

2.4. Проверить санитарное состояние кабинета, убедиться в целостности стекол в окнах и провести сквозное проветривание кабинета.

2.5. Убедиться в том, что температура воздуха в кабинете находится в пределах 18-20°C.

3. Требования безопасности во время занятий

3.1. Курсантам (студентам) с пониженной остротой зрения места отводятся за первыми столами.

3.2. С целью обеспечения надлежащей естественной освещенности в кабинете не расставлять на подоконниках цветы.

3.3 Все используемые в кабинете демонстрационные электрические приборы должны быть исправны и иметь заземление или зануление.

3.4. При открывании окон рамы фиксировать в открытом положении крючками. При открывании фрамуг обязательно должны быть ограничители.

3.5. Во избежание падения из окна, а также ранений стеклом, не вставать на подоконник.

4. Требования безопасности в аварийных ситуациях

4.1. При плохом самочувствии сообщить об этом преподавателю.

4.2. При возникновении пожара немедленно эвакуировать курсантов из здания, сообщить о пожаре администрации академии и приступить к тушению очага возгорания с помощью первичных средств пожаротушения.

4.3. При прорыве системы отопления удалить курсантов из кабинета, перекрыть задвижки в тепловом узле здания и вызвать слесаря-сантехника.

4.4. При получении травмы оказать первую помощь пострадавшему, сообщить об этом администрации академии, при необходимости доставить пострадавшего в медпункт.

5. Требования безопасности по окончании занятий

5.1. Используемые в опыте грузы снять с моделей и положить в специальные ящики в сейфе.

5.2. Модели судов вынуть из бассейнов и поставить сушить на специальные оснащенные места.

5.3. Бассейны с водой закрыть крышками.

5.4. Проветрить кабинет.

5.5. Закрыть окна, фрамуги и выключить свет.

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Описание лабораторного оборудования

Установка для проведения лабораторных работ состоит из бассейна с водой и моделей судна. В качестве модели используется модель среднего рыболовного траулера «Маяк» проекта 502 Г, изготовленная с соблюдением геометрического подобия в масштабе 1:50.

На модели (рис. 1.1) укреплен мачта 1. Вдоль мачты могут перемещаться поперечная 2 и продольная 3 штанги, с помощью которых меняется аппликата центра тяжести модели. Грузы 4, перемещаемые по штангам, используются для создания крена и дифферента модели. Осадка, крен и дифферент модели измеряются с помощью мерных линеек 5, установленных по обоим бортам модели в районе носового и кормового перпендикуляров и миделя. Линейки соединены рейкой 6.

Основные элементы рыболовного траулера и его модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные элементы траулера и его модели

№ п/п	Наименование	СРТМ пр. 502 Г	Модель
1	Длина наибольшая, м	54,2	1,084
2	Длина по КВЛ, м	50,4	1,008
3	Ширина по ватерлинии, м	9,3	0,186
4	Высота борта, м	4,7	0,094
5	Водоизмещение, т	625	0,005

Водоизмещение траулера приведено для пресной воды при осадке 2,8 м, водоизмещение модели дано с оснасткой и твердым балластом для осадки 0,056 м.

Практически во всех лабораторных работах (кроме лабораторной работы № 1) выполняется опыт кренования для опытного определения метацентрической высоты модели.

Масса грузов 4, которые используются при выполнении опыта кренования, равна:

- $m = 0,043$ кг для модели в первом бассейне с водой;
- $m = 0,049$ кг для модели во втором бассейне.

Расстояние между мерными линейками (см. рис. 1.1; длина рейки б), используемое при определении угла крена, в опыте кренования равно $a = 0,2$ м.

В лабораторной работе № 7 влияние жидкого груза на устойчивость исследуется с помощью специального отсека. Схема установки отсека на модель и его конструкция видны на рис. 1.2. Отсек изготовлен из органического стекла и разделен горизонтальной переборкой 1 на большую и малую полости.

Положение горизонтальной переборки подобрано таким образом, что при заполнении малой полости жидкость не будет иметь свободной поверхности. При переворачивании отсека жидкость через зазор в горизонтальной переборке перетекает в большую полость. В этом случае получаем отсек с жидким грузом со свободной поверхностью. В большой полости имеется вертикальная переборка 2. Устанавливая отсек 2 таким образом, что вертикальная переборка ориентирована вдоль или поперек судна, можно смоделировать отсек с одной продольной разделяющей переборкой или без разделяющей переборки.

1.2. Техническая документация для расчетов при выполнении лабораторных работ

В каждой лабораторной работе предусматривается сравнение результатов опыта и теоретических расчетов. По ходу теоретических расчетов определяются элементы плавучести и начальной устойчивости с помощью следующих судовых документов:

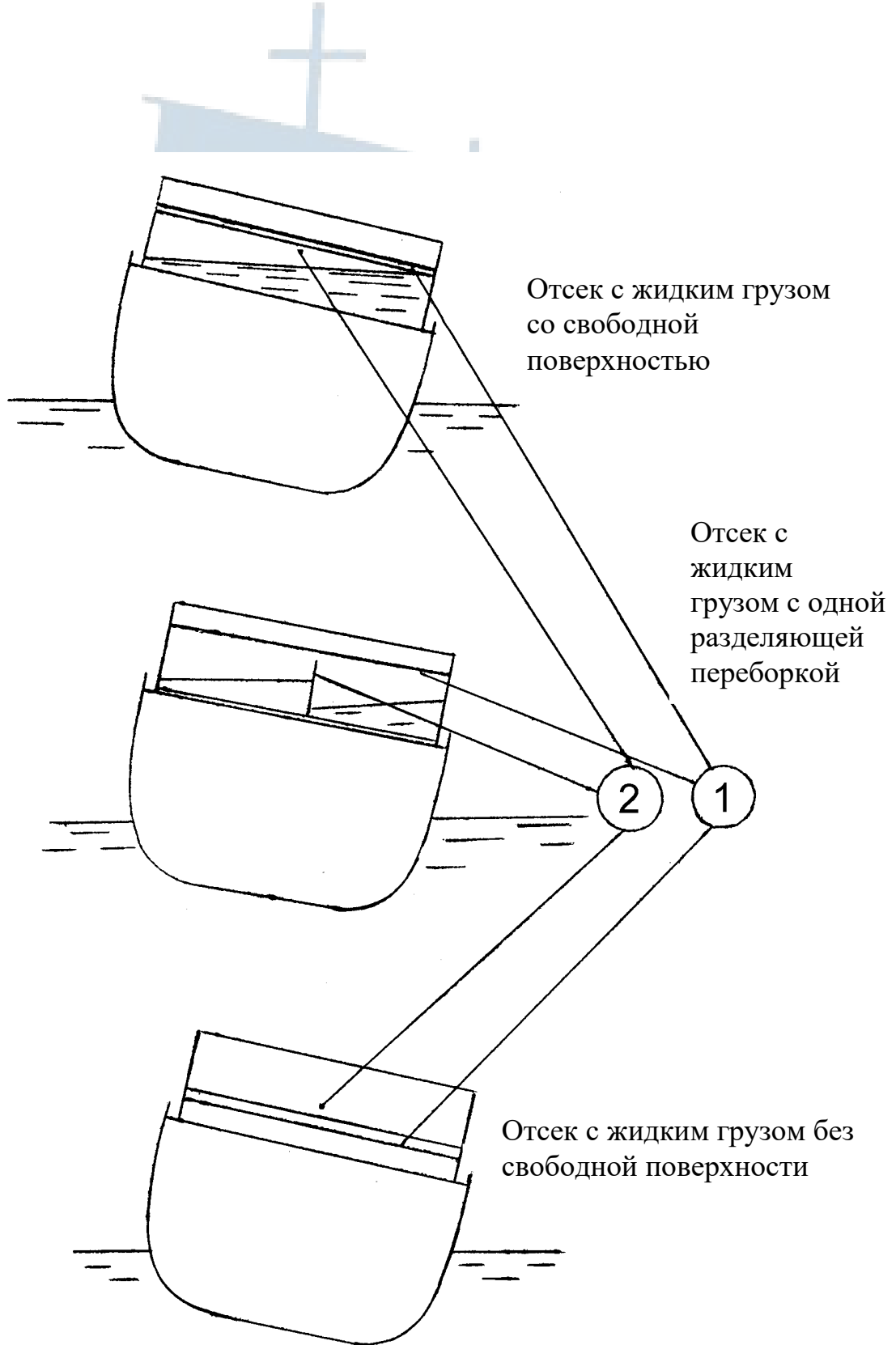
- кривых элементов теоретического чертежа (КЭТЧ) (рис. 1.3);
- диаграммы посадок (рис. 1.4);
- диаграммы начальной устойчивости (рис. 1.5).

Исходя из условия равновесия $\Delta = \gamma V$ ($M = \rho V$), водоизмещение судна можно определить, с одной стороны, суммированием массы порожнего судна M_0 и известных масс переменных грузов m_i :

$$M = M_0 + \sum_{i=1}^n m_i ,$$

а с другой стороны, вычислением по известным осадкам конечностей объема подводной части судна V .

В соответствии с указанными возможностями на практике решают две задачи:



1 – горизонтальная переборка
2 – вертикальная переборка

Рис.1.2. Схема установки отсека на модель и его конструкция

– прямая задача – по заданной посадке судна определяется его водоизмещение;

– обратная задача – по заданному водоизмещению и схеме размещения грузов отыскивается осадка судна.

Для решения обеих задач проектировщики передают на судно документы, по которым устанавливается связь между водоизмещением и посадкой судна. Различают два случая:

1. *Судно сидит на ровном киле.*

Водоизмещение определяют в зависимости от осадки судна T по грузовому размеру – кривым $V(T)$ или $M(T)$, которые входят в состав кривых элементов теоретического чертежа (рис. 1.3). Например, отложив на оси ординат отрезок, соответствующий значению $T = 3,0$ м, и проведя горизонтальную прямую до пересечения с кривой $M(T)$ (кривая 8), снимаем на оси абсцисс отсчет $k = 36$ см и с учетом масштаба кривой $M(T)$ (1 см – 20 т) находим $M = 36 \cdot 20 = 720$ т.

Отыскание осадки судна по заданному водоизмещению производится в обратном порядке. Если нам задано массовое водоизмещение $M = 800$ т, то необходимо найти k с учетом масштаба кривой $M(T)$ $k = 800:20 = 40$ см. Найти это значение на оси абсцисс, подняться до пересечения с кривой $M(T)$, из этой точки провести горизонтальную прямую к оси ординат и снять получившуюся осадку $T = 3,25$ м.

2. *Судно сидит с дифферентом.*

В этом случае посадка судна определяется не только водоизмещением, но и схемой размещения грузов, т. е. положением центра тяжести судна. При небольшом дифференте (до 1°) его влиянием пренебрегают и пользуются для решения прямой и обратной задачи грузовым размером $M(T)$. При углах дифферента более $1-1,5^\circ$ зависимости $V(T)$ и $M(T)$, построенные в предположении посадки судна на ровный киль, дают значительную ошибку.

В последнем случае водоизмещение и осадки оконечностей судна определяются по диаграммам посадок, одна из разновидностей которых показана на рис. 1.4. Диаграмма содержит кривые равных значений осадок носом T_n и кормой T_k , построенные в координатах $M - x_g$. Абсцисса центра тяжести судна x_g , определяющая дифферент судна при заданном водоизмещении, вычисляется по формуле:

$$x_g = \frac{M_o x_{g_o} + \sum_{i=1}^n m_i x_i}{M_o + \sum_{i=1}^n m_i},$$

где M_o , x_{go} – водоизмещение и абсцисса центра тяжести судна порожнем;

m_i , x_i – масса и абсцисса центра тяжести переменных грузов, принятых на судно.

Для нахождения водоизмещения ищут точку пересечения кривых с заданными значениями T_n и T_k и проектируют ее на ось ординат. Например, для осадок $T_n = 2,5$ м, $T_k = 4,1$ м (точка А) находим $M = 820$ т (на оси ординат) и $x_g = -1,5$ м (на оси абсцисс).

Если заданы водоизмещение судна M и схема размещения грузов (x_g), то величины M и x_g откладывают на соответствующих координатных осях, через получение точки проводят горизонтальную и вертикальную прямые линии, в пересечении которых читают значения T_n и T_k . Например, в пересечении горизонтальной прямой на уровне $M = 950$ т и вертикальной прямой при абсциссе $x_g = 0,55$ м получаем точку В, через которую проходят кривые $T_n = 3,85$ м и $T_k = 3,55$ м.

Отметим, любая горизонтальная прямая $M = \text{const}$ является в поле диаграммы посадок геометрическим методом точек, указывающих различные пары значений осадок T_n и T_k при неизменном водоизмещении судна. В частности, одна пара совпадающих значений T_n и T_k определяют посадку судна на ровный киль.

Например, на горизонтальной прямой $M = 635$ т замечаем, что посадка без дифферента ($T_n = T_k = 2,8$ м) выполняется при $x_g = 0,55$ м (точка С).

Кривые элементов теоретического чертежа (рис. 1.3) используются также для нахождения элементов поперечной и продольной остойчивости судна, сидящего на ровный киль.

Чтобы вычислить поперечную h и продольную H метацентрическую высоту по формулам:

$$h = z_c + r - z_g, \quad H = z_c + R - z_g,$$

требуется знать, помимо аппликаты центра тяжести судна z_g , аппликату центра величины z_c , поперечный r и продольный R метацентрические радиусы (рис. 1.3).

Найдем z_c , r и R при осадке $T = 2,8$ м. Проводим горизонтальную прямую на уровне 2,8 м до пересечения с кривыми $z_c(T)$, $r(T)$, $R(T)$, снимаем отсчеты на оси абсцисс 17; 14,3; 12,4 см соответственно и с учетом масштабов кривых получаем:

$$z_c = 17 \cdot 0,1 = 1,7 \text{ м}; \quad r = 14,3 \cdot 0,2 = 2,86 \text{ м}; \quad R = 12,4 \cdot 6 = 74,4 \text{ м}.$$

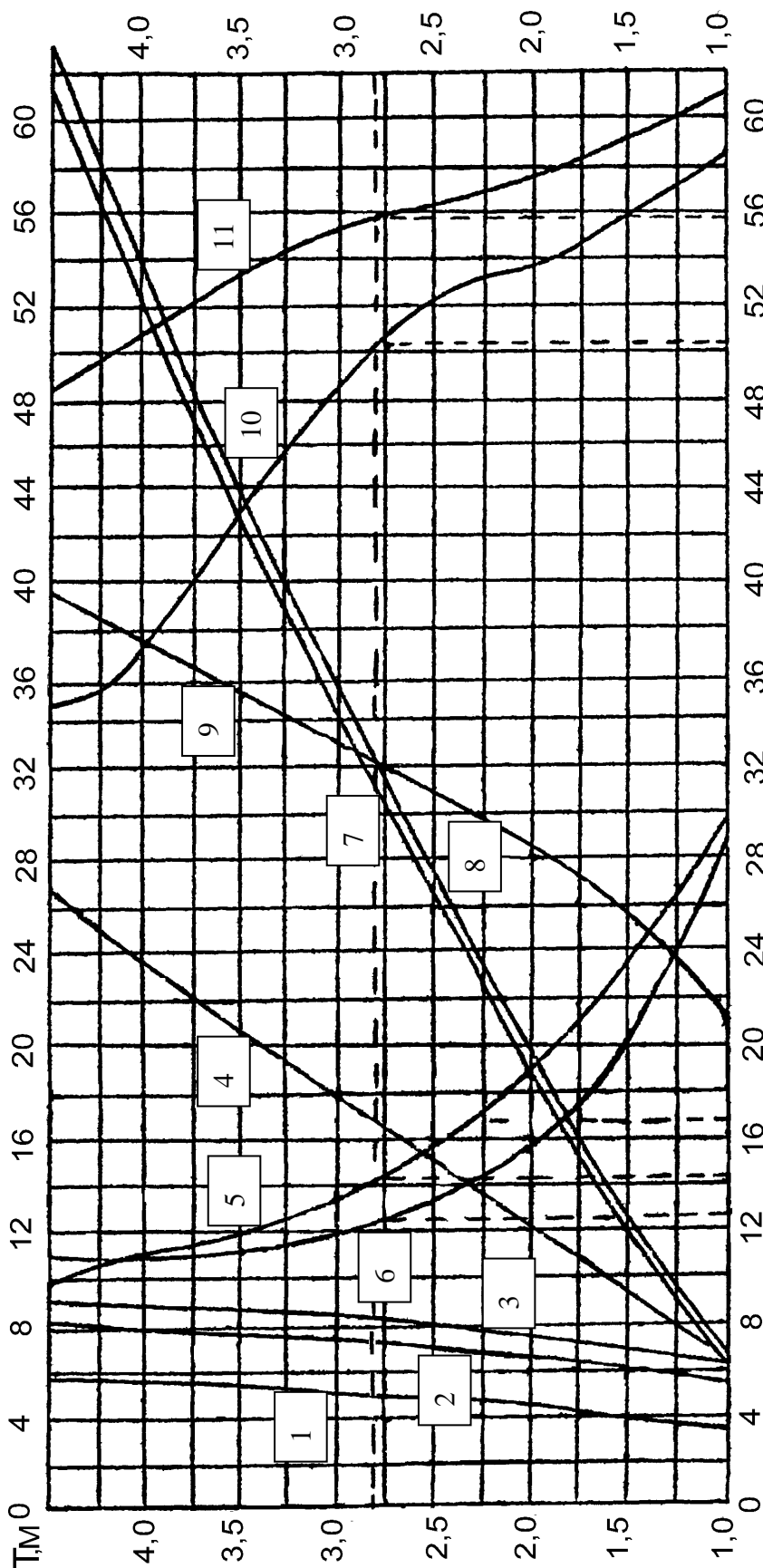


Рис. 1.3. Кривые элементов теоретического чертежа СРТС «Маяк»:

- 1 – коэффициент общей полноты δ (в 1 см – 0,1); 2 – коэффициент полноты ватерлинии α (в 1 см – 0,1);
 3 – коэффициент полноты площади мидель-шпангоута β (в 1 см – 0,1); 4 – аппликата центра величины z_c
 (в 1 см – 0,1 м); 5 – поперечный метacentрический радиус r (в 1 см – 0,2 м); 6 – продольный метacentрический
 радиус R (в 1 см – 6 м); 7 – объемное водозмещение V (в 1 см – 20 м³); 8 – массовое водозмещение M (в 1 см – 20 т);
 9 – площадь ватерлинии S (в 1 см – 10 м²); 10 – абсцисса центра тяжести площади ватерлинии x_f (в 1 см – 0,1 м);
 11 – абсцисса центра величины x_c (в 1 см – 0,1 м)

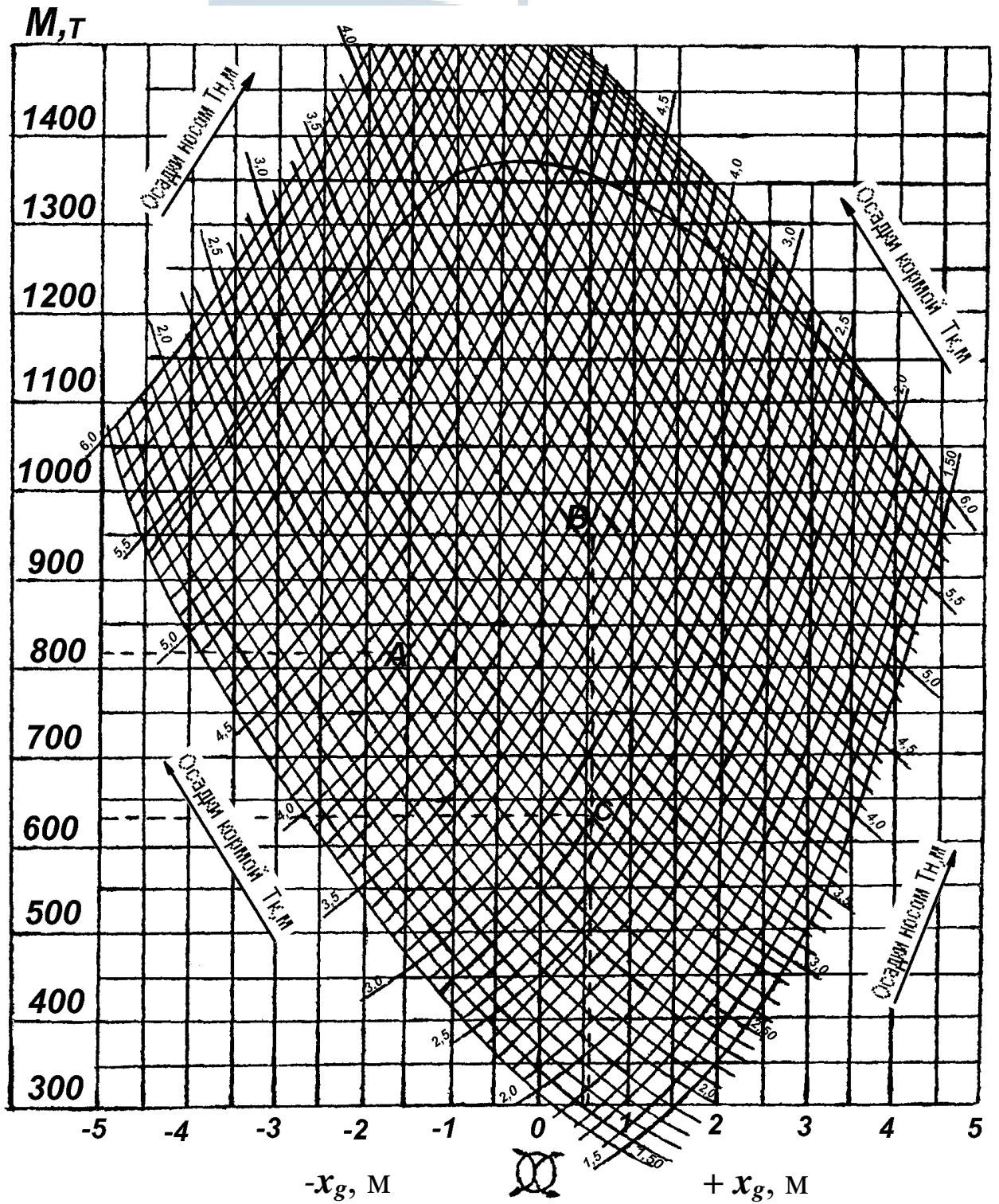


Рис. 1.4. Диаграмма посадок

В расчетах приращений осадок оконечностей судна требуется знать абсциссу центра тяжести площади ватерлинии x_F :

$$\delta T_n = \left(\frac{L}{2} - x_F\right) \operatorname{tg} \psi; \quad \delta T_k = \left(\frac{L}{2} + x_F\right) \operatorname{tg} \psi,$$

где L – длина судна;

ψ – угол дифферента.

Аналогично предыдущему описанию, находят x_F , с той лишь разницей, что начало отсчета на оси абсцисс ($x_F = 0$) смещено на 50 см вправо и обозначено знаком \bowtie . Для осадки $T = 2,8$ м, $x_F = 0,05$ м.

Если судно плавает с дифферентом, то аппликата центра величины z_c и метацентрический радиус r отличаются от соответствующих значений при посадке на ровный киль с тем же водоизмещением. В том случае аппликата поперечного метацентра $z_m = z_c + r$ зависит как от водоизмещения судна M , так и от положения центра тяжести – абсциссы x_g .

Для вычисления поперечной метацентрической высоты судна с учётом дифферента используют диаграммы Фирсова-Гундобина, начальной остойчивости (рис. 1.5), интерполяционные кривые и другую документацию.

Диаграмма начальной остойчивости позволяет при рассчитанных значениях водоизмещении M и абсцисс центра тяжести x_g получить сразу значение аппликат поперечного метацентра z_m .

1.3. Формулы геометрического и статического подобия для пересчета результатов модельного эксперимента на натурное судно

Два физических явления называются подобными, если численные значения всех величин одного явления (размеры, силы, скорости, промежутки времени и т. д.) могут быть получены из соответствующих величин другого путем умножения их на постоянные безразмерные множители, называемые масштабами подобия.

Для механического подобия модель и натуральный объект, прежде всего, должны быть подобны геометрически:

$$\frac{L_n}{L_m} = C_l; \quad \theta_m = \theta_n,$$

то есть все длины L соответствующих линий модели и природы находятся в одинаковом отношении C_l , а все углы θ между соответствующими

щими линиями на модели и в натуре равны (здесь C_l – масштаб геометрического подобия).

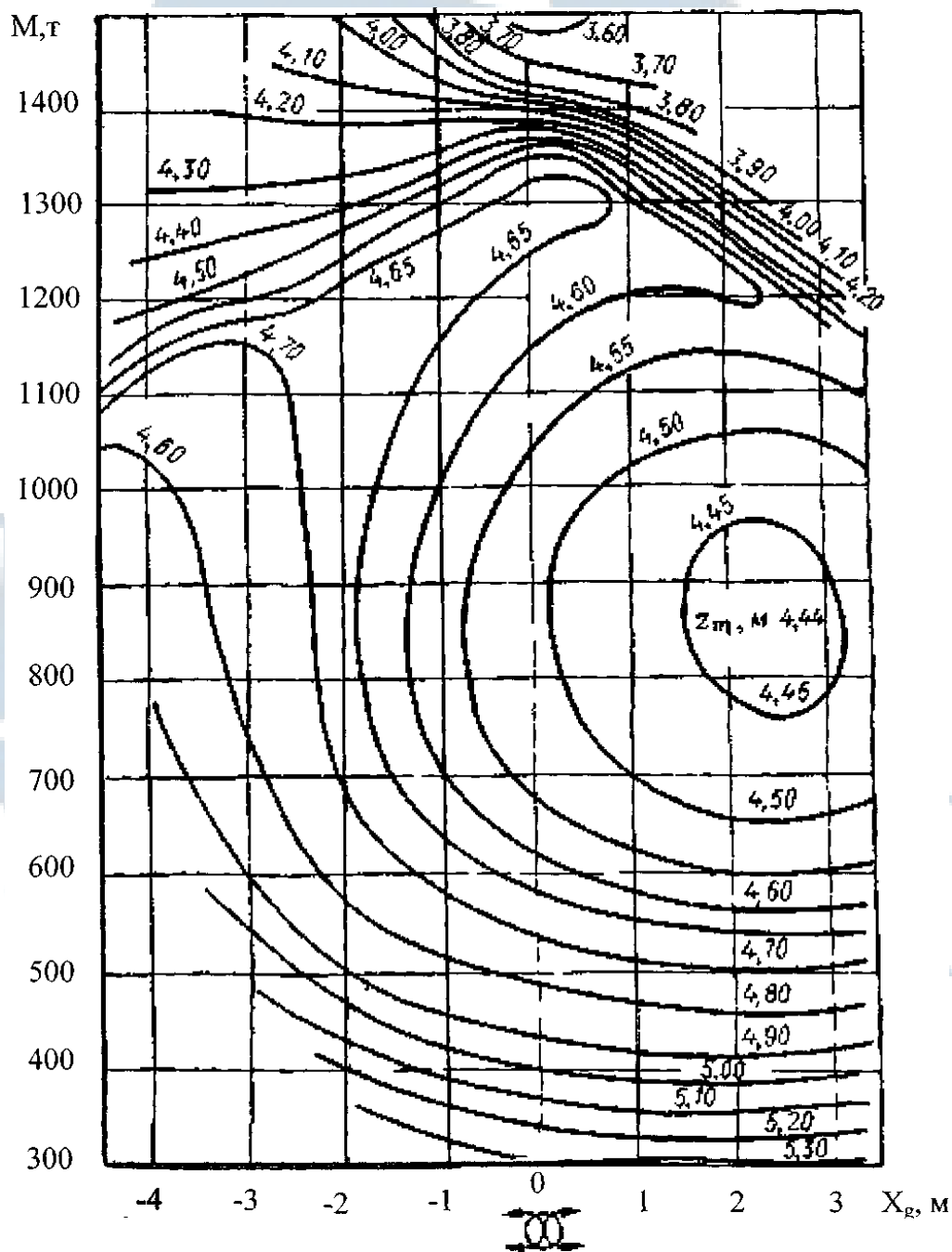


Рис. 1.5. Диаграмма начальной остойчивости СРТМ «Маяк»

Для отношений площадей S модели и натуре справедливо равенство

$$\frac{S_H}{S_M} = \frac{L_H^2}{L_M^2} = C_l^2,$$

а для отношений объемов V – равенство

$$\frac{V_H}{V_M} = \frac{L_H^3}{L_M^3} = C_l^3.$$

Предполагая тела однородными и обозначив плотности сходственных масс натуре и модели через ρ_H и ρ_M , получим отношение масс M :

$$C_m = \frac{M_H}{M_M} = \frac{\rho_H V_H}{\rho_M V_M}.$$

Если плотность тела в системе модели и натуре одинакова (например, плотность массы воды, находящейся в покое), то $C_m = C_l^3$.

Когда внешние силы, приложенные к геометрически подобным модели и натуре, одинаково ориентированы относительно осей координат, а отношения их постоянны, задача сводится к рассмотрению условий статического подобия:

$$\frac{L_H}{L_M} = C_l; \quad \theta_H = \theta_M; \quad \frac{P_H}{P_M} = C_p,$$

где C_p – масштаб подобия сил P , приложенных к телу, находящемуся в равновесии.

В частном случае, когда тело плавает на поверхности жидкости и находится в равновесии под действием сил веса Δ и плавучести γW , масштабы статического подобия оказываются зависимыми

$$\begin{aligned} \Delta_H &= \gamma_H \cdot V_H; & \Delta_M &= \gamma_M \cdot V_M; \\ C_p &= \frac{\Delta_H}{\Delta_M} = \frac{\gamma_H}{\gamma_M}; & \frac{V_H}{V_M} &= \frac{\gamma_H}{\gamma_M} \cdot C_l^3. \end{aligned}$$

Здесь $\gamma = \rho \cdot g$ – удельный вес жидкости.

Если в системе модели и натуре используется одинаковая жидкость ($\rho_M = \rho_H$), условие статического подобия упрощается: $C_p = C_l^3$.

Все лабораторные работы выполняются в условиях статического подобия. Приведем примеры пересчета с модели на натуре (и наоборот) наиболее важных величин, используемых в опытах.

По кривым элементов теоретического чертежа (рис. 1.3) при осадке $T_n = 2,8$ м определены величины: $x_{сн} = 0,55$ м; $z_{сн} = 1,7$ м, $x_{fn} = 0,05$ м; $S_n = 320$ м²; $V_n = 620$ м³; $r_n = 2,86$ м; $R_n = 60,2$ м, $\alpha_n = 0,7$. Найти соответствующие величины в системе модели.

Масштаб геометрического подобия модели СРТМ пр. 502 Г $C_l = 0,02$ (1:50).

Тогда

$$x_{см} = C_l \cdot x_{сн}; \quad x_{см} = 0,02 \cdot 0,55 = 0,011 \text{ м или } x_{см} = 0,55:50 = 0,011 \text{ м.}$$

$$z_{см} = C_l \cdot z_{сн}; \quad z_{см} = 1,7 \cdot 0,02 = 0,034 \text{ м или } z_{см} = 1,7:50 = 0,034 \text{ м.}$$

$$x_{fm} = C_l \cdot x_{fn}; \quad x_{fm} = 0,02 \cdot 0,05 = 0,001 \text{ м; или } x_{fm} = 0,05:50 = 0,001 \text{ м.}$$

$$S_m = C_l^2 \cdot S_n; \quad S_m = 0,02^2 \cdot 320 = 0,128 \text{ м}^2 \text{ или } S_m = 320:50^2 = 0,128 \text{ м}^2.$$

$$V_m = C_l^3 \cdot V_n; \quad V_m = 0,02^3 \cdot 620 = 0,005 \text{ м}^3 \text{ или } V_m = 620:50^3 = 0,005 \text{ м}^3.$$

$$r_m = C_l \cdot r_n; \quad r_m = 0,02 \cdot 2,86 = 0,057 \text{ м или } r_m = 2,86:50 = 0,057 \text{ м.}$$

$$R_m = C_l \cdot R_n; \quad R_m = 0,02 \cdot 60,2 = 1,20 \text{ м или } R_m = 60,2:50 = 1,20 \text{ м.}$$

$\alpha_m = \alpha_n = 0,7$ (соответствующие безразмерные коэффициенты теоретического чертежа в системе природы и модели равны между собой).

Модель СРТМ пр. 502 Г имеет массу $M_m = 5$ кг, для кренования модели используется груз массой $m_m = 0,03$ кг. Найти соответствующие массы в системе природы. Предположим, что модель и натурное судно плавают в пресной воде ($\rho_m = \rho_n$).

$$\text{Тогда} \quad M_n = M_m / C_m = M_m / C_l; \quad M_n = \frac{0,005}{0,02^3} = 625 \text{ т;}$$

$$m_n = \frac{m_m}{C_l^3}; \quad m_n = \frac{0,00003}{0,02^3} = 3,75 \text{ т.}$$

Водоизмещение СРТМ на глубокой воде $M_n = 800$ т. После обмера по маркам углубления оказалось, что корпус судна обсох на мели и его массовое водоизмещение составляет $M_{1n} = 750$ т. Определить силу реакции грунта в системе природы и модели.

При посадке на мель потеряна часть водоизмещения

$$\delta M_n = M_n - M_{1n},$$

$$\delta M_n = 800 - 750 = 50 \text{ т.}$$

Реакция грунта равна потерянной силе плавучести

$$P_n = \delta M_n \cdot g,$$

$$P_n = 50 \cdot 9,81 = 490 \text{ кН.}$$

Если посадка на мель воспроизводится на модели, то реакция грунта составляет

$$P_m = C_p \cdot P_H = C_l^3 \cdot P_H;$$

$$P_m = 0,02^3 \cdot 490 = 0,00392 \text{ кН} = 3,92 \text{ Н}.$$

Водоизмещение судна $M_H = 800$ т, метацентрическая высота $h_H = 0,5$ м. Определить восстанавливающий момент модели при угле крена $\theta_H = \theta_m = 5^\circ$.

Восстанавливающий момент судна при малых углах крена:

$$M_\epsilon = \Delta \cdot h \cdot \sin \theta = M \cdot g \cdot h \cdot \sin \theta.$$

Масштаб подобия восстанавливающего момента

$$C_{\epsilon_m} = \frac{M_{\epsilon_m}}{M_{\epsilon_H}} = \frac{\Delta_m}{\Delta_H} \cdot \frac{h_m}{h_H} = C_l^3 \cdot C_l = C_l^4;$$

$$M_{\epsilon_m} = C_l^4 \cdot M_{\epsilon_H} = C_l^4 \cdot M_H \cdot g \cdot h_H \cdot \sin \theta;$$

$$M_{\epsilon_m} = 0,02^4 \cdot 800 \cdot 9,81 \cdot 0,5 \cdot \sin 5^\circ = 0,00005472 \text{ кН} \cdot \text{м} = 0,05472 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

РАЗДЕЛ II. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа № 1.

Определение запаса плавучести и построение грузового размера

Цель работы: изучение основных положений Международной Конвенции о грузовой марке. Определение высоты надводного борта с целью назначения судну минимально допустимого запаса плавучести.

Основные теоретические положения

Плавучесть – одно из важнейших мореходных качеств судна, которое определяет возможность его эксплуатации и отличает от других видов транспортных средств.

Плавучестью называют способность судна плавать с заданным погружением, неся на себе все положенные по роду службы грузы [1; 2; 3].

На судно, плавающее на спокойной воде, действуют распределенные силы веса и силы давления воды (рис. 2.1.1). Равнодействующая сил веса Δ называется *силой веса судна*. Она приложена в центре тяжести (ЦТ) судна и направлена по вертикали вниз. Центр тяжести судна G – геометрическая точка, неизменно связанная с судном, через которую проходит равнодействующая сил веса, действующих на составляющие водоизмещения судна при любом положении последнего в пространстве. Положение ЦТ судна в однородном поле тяжести совпадает с положением его центра масс, характеризующим распределение масс судна [1].

Равнодействующая сил давления воды γV – *сила поддержания или сила плавучести* – приложена в центре величины (ЦВ) судна C и направлена по вертикали вверх (γ – удельный вес воды).

Центр величины геометрически представляет собой центр тяжести объема подводной части судна. Силу плавучести считают приложенной в ЦВ судна, поскольку ее линия действия всегда проходит через эту точку.

Посадкой называется положение судна по отношению к поверхности воды. Она определяется тремя параметрами: средней осадкой T , углом крена θ , углом дифферента ψ .

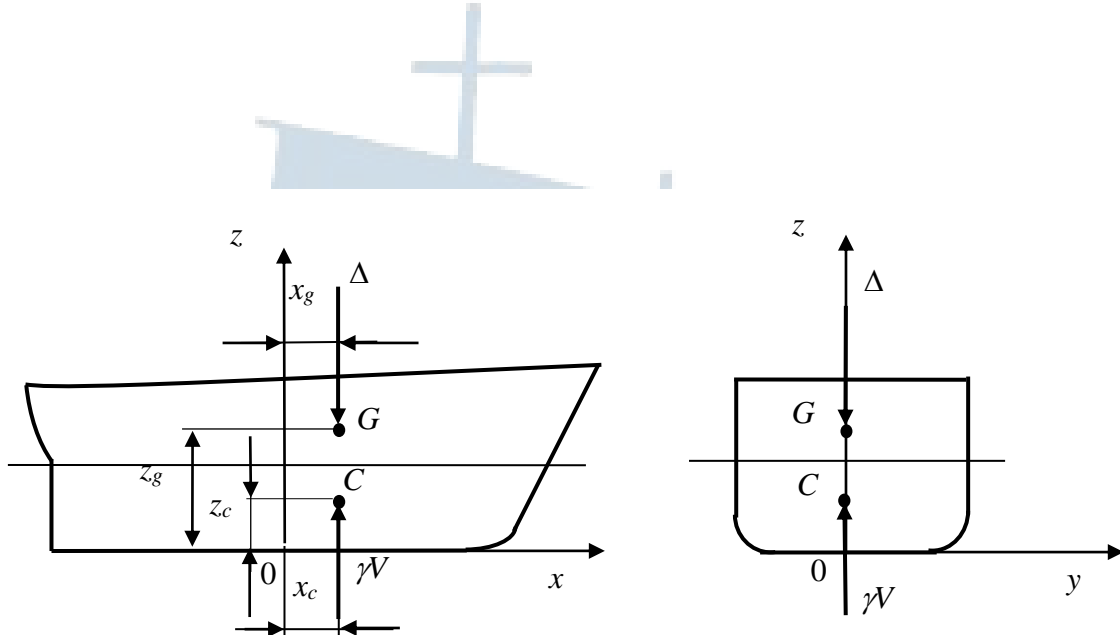


Рис. 2.1.1. Силы веса и плавучести, действующие на судно

Судно под действием силы веса и силы плавучести будет находиться в равновесии, если эти силы равны по модулю и точки их приложения расположены на одной вертикали.

Вывод уравнений равновесия судна основан на теореме механики о равновесии твердого тела. Так как силы, действующие на судно, параллельны, число уравнений равновесия должно быть равно трем [1; 2].

Условие равновесия:

$$1. \quad \Delta = \gamma V \quad \text{или} \quad M = \rho V;$$

$$2. \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{x_c - x_g}{z_g - z_c};$$

$$3. \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{y_c - y_g}{z_g - z_c},$$

где x_c , y_c и z_c – координаты ЦВ судна;

x_g , y_g и z_g – координаты ЦТ судна.

Первое уравнение выражает равенство силы тяжести и силы поддержания, остальные два уравнения равновесия показывают, что центр тяжести и центр величины судна располагаются на одной вертикали.

Если в уравнениях принять $\theta = 0$ и $\psi = 0$, то получим условия равновесия судна, плавающего без крена (прямо) и дифферента (на ровный киль); при $\theta = 0$ и $\psi \neq 0$ уравнения будут соответствовать случаю посадки судна прямо, но с дифферентом.

Водоизмещение и осадки судна в судовых условиях можно определить следующим образом [1; 2].

Если судно плавает без дифферента, то в этом случае водоизмещение судна может быть определено по кривой водоизмещения – *грузовому размеру* – $V(T)$ или $M(T)$. По грузовому размеру можно, зная осадку, определить водоизмещение и решить обратную задачу – по водоизмещению найти осадку судна.

Связь между водоизмещением и осадкой может быть представлена также в виде номограммы, называемой *грузовой шкалой*, которая широко применяется на судах. На ее вертикальных шкалах откладываются водоизмещение в пресной и морской воде, дедвейт, осадка, высота надводного борта и другие параметры. Зная одну из перечисленных величин и отметив ее на соответствующей шкале, снимают с остальных шкал искомые параметры [1; 4; 12; 13].

При сравнительно большом дифференте (обычно более $1,0-1,5^\circ$) зависимости $V(T)$ или $M(T)$ дают существенную ошибку, поэтому для определения водоизмещения ими пользоваться нельзя.

Достаточную точность определения водоизмещения судна с дифферентом обеспечивает так называемый масштаб Бонжана. Ординаты кривых масштаба Бонжана дают погруженные площади шпангоутов, которые вычисляются по формуле и откладываются от теоретических шпангоутов по горизонтали. Чтобы определить водоизмещение судна, на масштаб Бонжана по известной осадке носом и кормой наносят ватерлинию судна, по горизонтали от точек пересечения ватерлинии с теоретическими шпангоутами снимают погруженные площади шпангоутов, подставляют их значение в формулы, получают объемное водоизмещение и абсциссу центра величины судна, плавающего с дифферентом.

Расчет параметров судна по масштабу Бонжана связан с проведением сравнительно громоздких вычислений, поэтому на практике для определения водоизмещения и абсциссы центра величины судна при дифференте пользуются диаграммами осадок носом и кормой (диаграмма Г.А. Фирсова, диаграмма КТИРПиХ). Диаграммы позволяют найти водоизмещение судна при любой его посадке, в том числе и на ровный киль. Диаграммы осадок носом и кормой позволяют решить обратную задачу: по M и x_c или x_g найти T_n и T_k [1].

Любое судно для обеспечения безопасности мореплавания должно иметь избыток водоизмещения – *запас плавучести*. Под запасом плавучести понимают объем водонепроницаемого корпуса выше

ватерлинии или то дополнительное количество груза, которое судно может принять до момента потери способности держаться на воде.

Запас плавучести морских судов определяется высотой надводного борта – пока он сохраняется, судно плавает на воде.

Необходимый запас плавучести судна обеспечивается назначением ему минимальной высоты надводного борта, достаточной для безопасного плавания в определенных районах и в определенное время года.

Методика расчета минимального надводного борта (минимального запаса плавучести) изложена в «Правилах о грузовой марке морских судов» Регистра РФ [6], разработанных на основе Международной конвенции о грузовой марке. В апреле 1966 года в Лондоне состоялась вторая Международная конференция о грузовой марке, на которой принята Международная конвенция о грузовой марке, ратифицированная в СССР в 1968 году. Основным её принципом является обеспечение безопасности мореплавания при заливании открытых палуб.

В Правилах изложена методика назначения минимального надводного борта в зависимости от длины судна, коэффициента общей полноты, расчетной длины надстроек, седловатости палубы, погиби бимсов и других параметров.

Необходимым условием для возможности использования этой методики является удовлетворение содержащихся в Правилах требований к прочности и остойчивости судна и действий его личного состава в море (закрытий отверстий в корпусе, ограждений и др.).

Требования Правил [6] распространяются на следующие суда:

- суда, совершающие международные рейсы, за исключением:
- судов длиной менее 24 м;
- прогулочных яхт, не занимающихся перевозками;
- рыболовных судов;
- суда длиной 24 м и более, не совершающие международных рейсов (за исключением прогулочных яхт), не занимающихся перевозками, и рыболовные суда;
- все типы плавучих буровых установок;
- суда длиной менее 24 м (за исключением прогулочных яхт), не занимающихся перевозками.

С точки зрения проницаемости внешнего контура и конструктивной непрерывности открытых палуб все суда подразделяются на суда типа А (в основном танкеры) и типа В [6].

Согласно Конвенции, назначение грузовой марки состоит в обеспечении безопасности мореплавания за счет назначения судну

минимально допустимого запаса плавучести, выраженного через высоту надводного борта. Период освидетельствования судов по поводу грузовой марки один раз в 5 лет.

Запас плавучести определяется величиной водонепроницаемого надводного объема и для морских судов в % от объемного водоизмещения судна составляет:

- 10-15 % – танкеры;
- 25-30 % – грузовые транспортные суда;
- 80-100 % – пассажирские суда.

Правила делят суда на совершающие международные рейсы, не совершающие международных рейсов и рыболовные. Под международными рейсами понимаются морские рейсы из страны, на которую распространяются Международная конвенция о грузовой марке, в порт, расположенный за пределами этой страны. Судам, совершающим международные рейсы, выдается Международное свидетельство о грузовой марке судна неограниченного или ограниченного I, II или III районов плавания.

Назначенный судну надводный борт фиксируется нанесением на обоих бортах *палубной линии*, показывающей положение палубы надводного борта, относительно которой он рассчитывался, *знака грузовой марки* (диск Плимсоля) и *грузовых марок*, отмечающих наибольшие осадки, до которых судно может быть загружено в различных условиях плавания.

При назначении надводного борта предполагается, что нанесенные на борта судна грузовые марки, соответствующие сезону, зоне или району, в котором судно может оказаться, не должны быть погружены в воду на протяжении всего времени, когда судно выходит в море, находится в плавании и приходит в порт. Исключение допускается лишь в некоторых случаях [6].

Палубная линия представляет собой горизонтальную линию длиной 300 и шириной 25 мм. Она наносится посередине длины судна с каждого борта таким образом, чтобы ее верхняя кромка проходила через точку, в которой продолженная наружу верхняя поверхность палубы надводного борта пересекает наружную поверхность бортовой обшивки судна.

От верхней кромки палубной линии вертикально вниз откладывают высоту назначенного судну надводного борта и наносят горизонтальную линию длиной 450 мм.

Из середины верхней кромки этой линии как из центра описывают круг наружным диаметром 300 мм.

Этот круг с пересекающей его горизонтальной линией называют знаком грузовой марки.

Если на палубе надводного борта посередине длины судна имеется деревянный настил, верхняя кромка палубной линии должна проходить через точку пересечения продолженной наружу верхней поверхности фактического настила палубы с наружной поверхностью бортовой обшивки судна (рис. 2.1.2, а).

На судах, имеющих закругленное соединение палубы с бортом, верхняя кромка палубной линии может проходить через точку *a*, и расстояние от нее до точки *b* – пересечения продолженной верхней поверхности палубы надводного борта с наружной поверхностью бортовой обшивки – отмечается в Свидетельстве о грузовой марке (рис. 2.1.2, б).

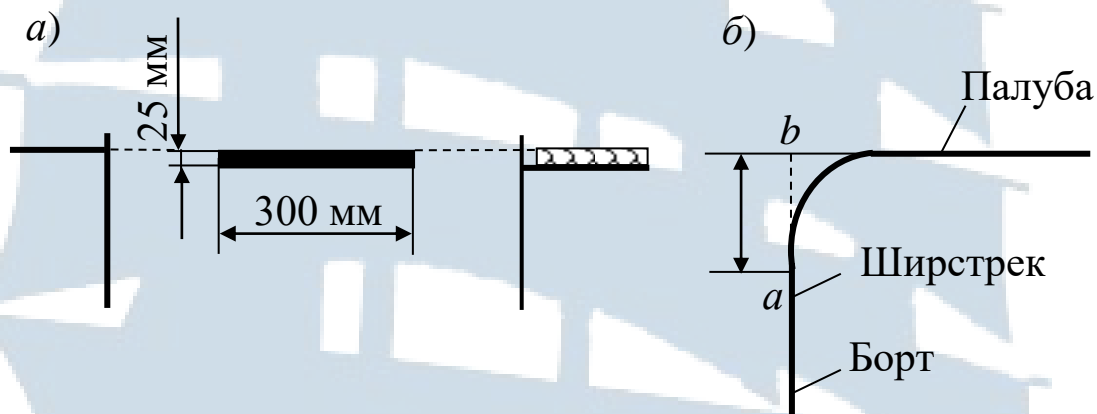


Рис. 2.1.2. Палубная линия

Знак грузовой марки на судах, совершающих международные рейсы, представляет собой кольцо с наружным диаметром 300 и шириной 25 мм, которое пересекается горизонтальной линией 450 и шириной 25 мм таким образом, что верхняя кромка этой горизонтальной линии проходит через центр кольца.

Центр кольца помещается на середине длины судна на расстоянии, равном назначенному летнему надводному борту (минимальному), измеренному по вертикали вниз от верхней кромки палубной линии (рис. 2.1.3, а).

Надводный борт – расстояние, измеренное по вертикали у борта на середине длины судна от верхней кромки палубной линии до верхней кромки соответствующей грузовой марки.

Знак грузовой марки судов длиной более 24 м, не совершающих международных рейсов, а также рыболовных судов разделяется до-

полнительно вертикальной линией, проходящей через центр кольца (рис. 2.1.3, б).

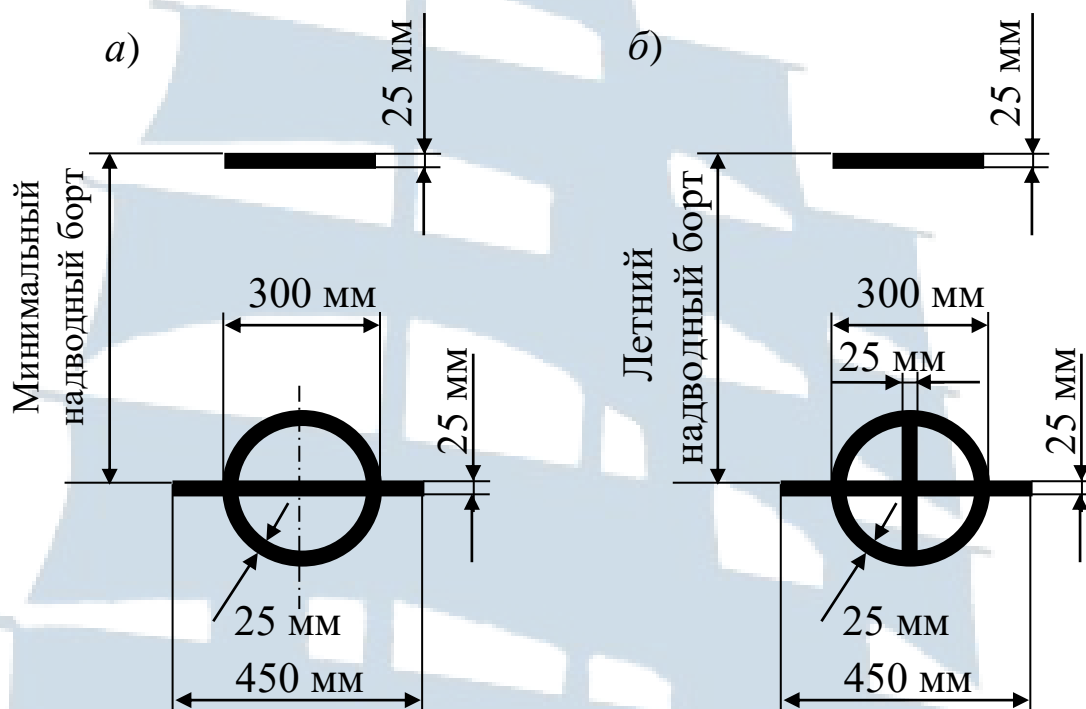


Рис. 2.1.3. Знак грузовой марки

Марки, которые отмечают положение грузовых ватерлиний при его загрузке в различных зонах, районах и в сезонные периоды плаваний, представляют собой горизонтальные линии длиной 230 мм и шириной 25 мм, нанесенные в нос (если другое не оговорено особо) и перпендикулярно к вертикальной линии шириной 25 мм, проведенной на расстоянии 540 мм в нос от центра кольца грузовой марки (рис. 2.1.4).

Применяются следующие грузовые марки [6]:

- летняя грузовая марка, определяемая верхней кромкой линии, проходящей через центр кольца, а также верхней кромкой линии, обозначенной буквой *L* (или *S*) при выдаче Международного свидетельства о грузовой марке обозначение марок в тексте Свидетельства и на бортах судна должно быть выполнено буквами латинского алфавита;
- зимняя грузовая марка, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквой *W*;
- зимняя грузовая марка для Северной Атлантики, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквами *WNA*;

– тропическая грузовая марка, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквой **T** (**T**);

– грузовая марка для пресной воды летом, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквой **П** (**F**) и нанесенная в корму от вертикальной линии;

– тропическая грузовая марка для пресной воды, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквами **ТП** (**TF**) и нанесенная в корму от вертикальной линии.

Расстояние между грузовой маркой для пресной воды летом и летней грузовой маркой представляет собой допускаемое увеличение осадки судна в пресной воде и для других грузовых марок **З** (**W**) и **ЗСА** (**WNA**).

Минимальный летний надводный борт определяется по таблицам.

Минимальный тропический надводный борт получается вычетом из летнего надводного борта $1/48$ летней осадки, измеренной от верха горизонтального киля до центра кольца знака грузовой марки.

Минимальный зимний надводный борт получается прибавлением к летнему надводному борту $1/48$ летней осадки, измеренной от верха горизонтального киля до центра кольца знака грузовой марки.

Минимальный зимний надводный борт в Северной Атлантике для судов длиной не более 100 м, которые выходят в любую часть района Северной Атлантики, находят путём прибавления 50 мм к зимнему надводному борту.

Для судов длиной более 100 м зимним надводным бортом для Северной Атлантики должен быть зимний надводный борт.

Минимальный надводный борт в пресной воде с плотностью, равной единице, получается путём вычета из минимального надводного борта в соленой воде величины (см), определенной по формуле:

$$\Delta/40T,$$

где Δ – водоизмещение судна в соленой воде по летнюю грузовую ватерлинию, т;

T – число тонн на 1 см осадки в соленой воде по летнюю грузовую ватерлинию.

Лесной палубный груз может рассматриваться как придающий судну определенную дополнительную плавучесть и более высокую степень защиты от действия моря. По этой причине судам, перевозящим лесной палубный груз, может быть разрешено уменьшение надводного борта. Однако для того, чтобы применить такой специальный надводный борт, судно должно удовлетворять определенным условиям.

Если грузовому судну назначается лесной надводный борт, в дополнение к обычным грузовым маркам наносятся лесные грузовые марки. Эти марки отмечают положение грузовых ватерлиний судна при его загрузке в различных зонах, районах и в сезонные периоды плаваний и представляют собой горизонтальные линии длиной 230 мм и шириной 25 мм, нанесенные в корму (если другое не оговорено особо) и перпендикулярно к вертикальной линии шириной 25 мм, проведенной на расстоянии 540 мм в корму от центра кольца грузовой марки (рис. 2.1.4).

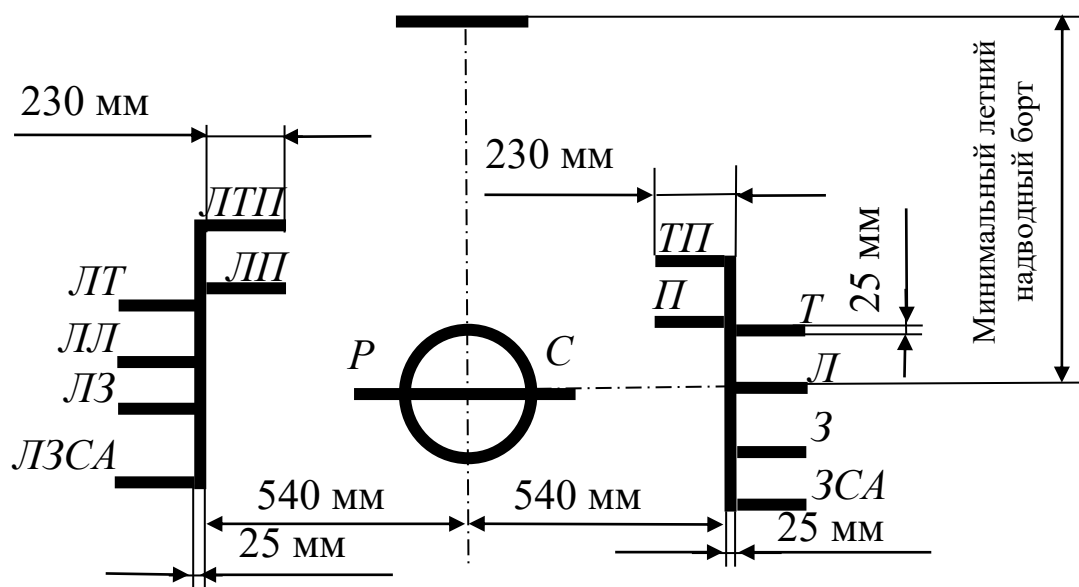


Рис. 2.1.4. Марки на судах с минимальным надводным бортом и минимальным лесным надводным бортом

Применяются следующие лесные грузовые марки (рис. 2.1.5) [6]:

- лесная летняя грузовая марка, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквами *ЛЛ* (*LS*);
- лесная зимняя грузовая марка, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквами *ЛЗ* (*LW*);
- лесная зимняя грузовая марка для Северной Атлантики, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквами *ЛЗСА* (*LWNA*);
- лесная тропическая грузовая марка, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквами *ЛТ* (*LT*);
- лесная грузовая марка для пресной воды летом, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквами *ЛП* (*LF*) и нанесенная в нос от вертикальной линии.

Расстояние между грузовой маркой для пресной воды летом и летней грузовой маркой представляет собой допускаемое увеличение

осадки судна в пресной воде и для других лесных грузовых марок ЛЗ (LW) и ЛЗСА (LWNA);

– лесная тропическая грузовая марка для пресной воды, определяемая верхней кромкой линии, обозначенной буквами ЛТП (LTF) и нанесенная в нос от вертикальной линии.

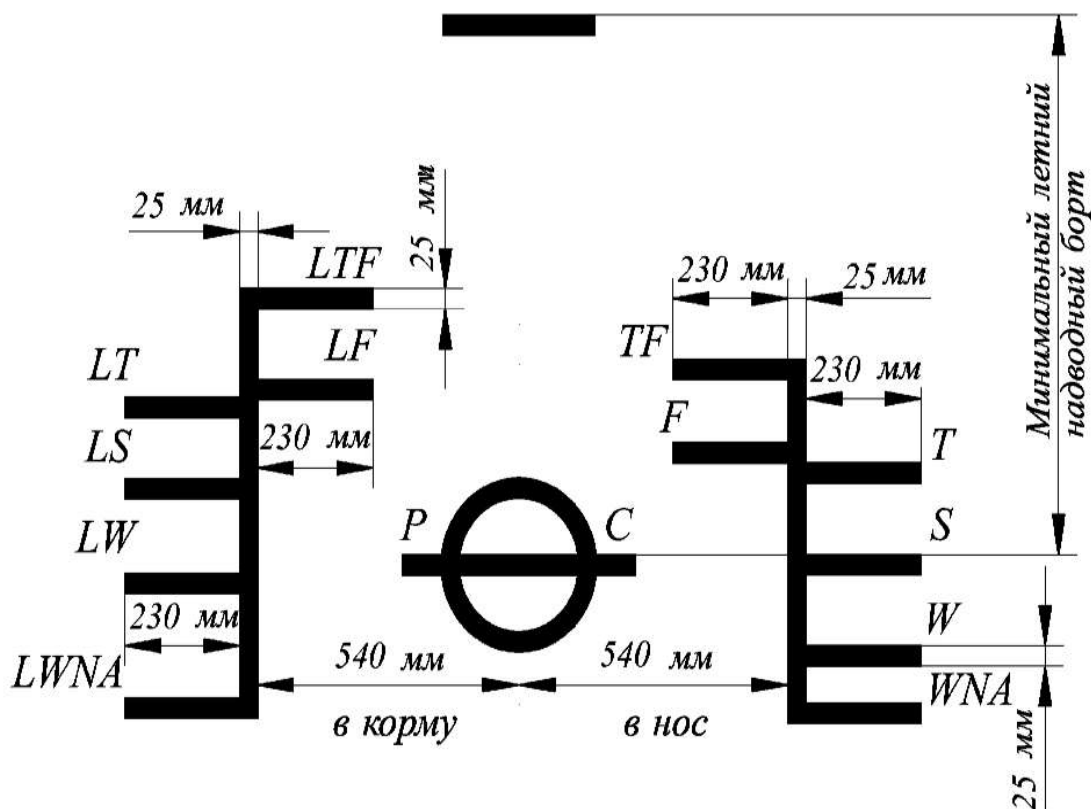


Рис. 2.1.5. Лесные грузовые марки

Минимальный лесной летний надводный борт должен вычисляться в соответствии с таблицами с учетом поправок (рис.2.1.6).

Минимальный лесной зимний надводный борт должен быть получен прибавлением к минимальному лесному летнему надводному борту $1/36$ лесной летней осадки.

Минимальный лесной зимний надводный борт для Северной Атлантики должен совпадать с зимним надводным бортом для Северной Атлантики.

Минимальный лесной тропический надводный борт должен быть получен вычетом из лесного летнего надводного борта $1/48$ лесной летней осадки.

Минимальный лесной надводный борт в пресной воде должен вычисляться в соответствии с приведенной выше формулой.

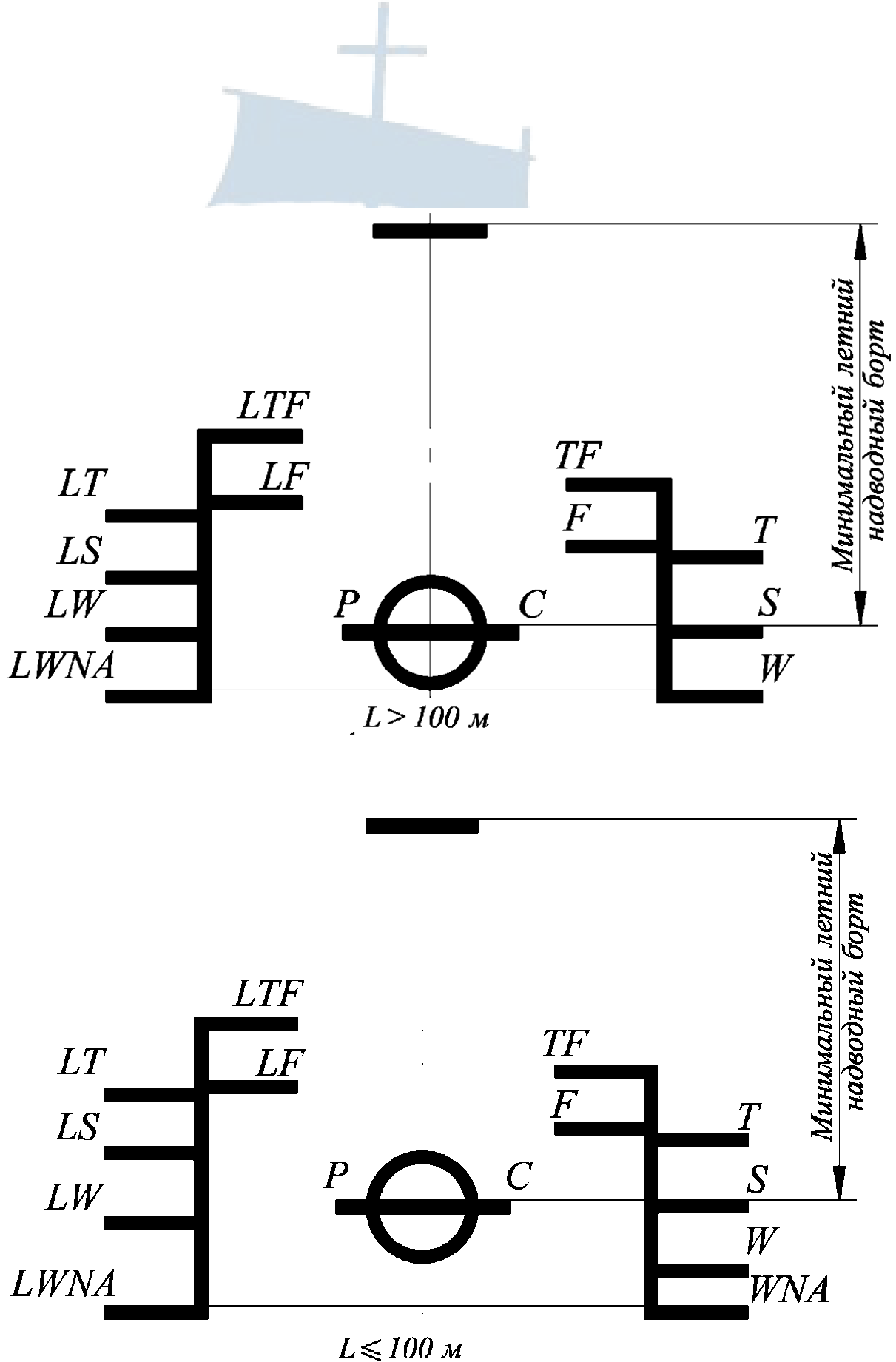


Рис. 2.1.6. Грузовые марки для судов, совершающих международные рейсы, которым назначается лесной надводный борт

Грузовые марки судов длиной 24 м и более, не совершающих международные рейсы, и рыболовных судов показаны на рис. 2.1.7.

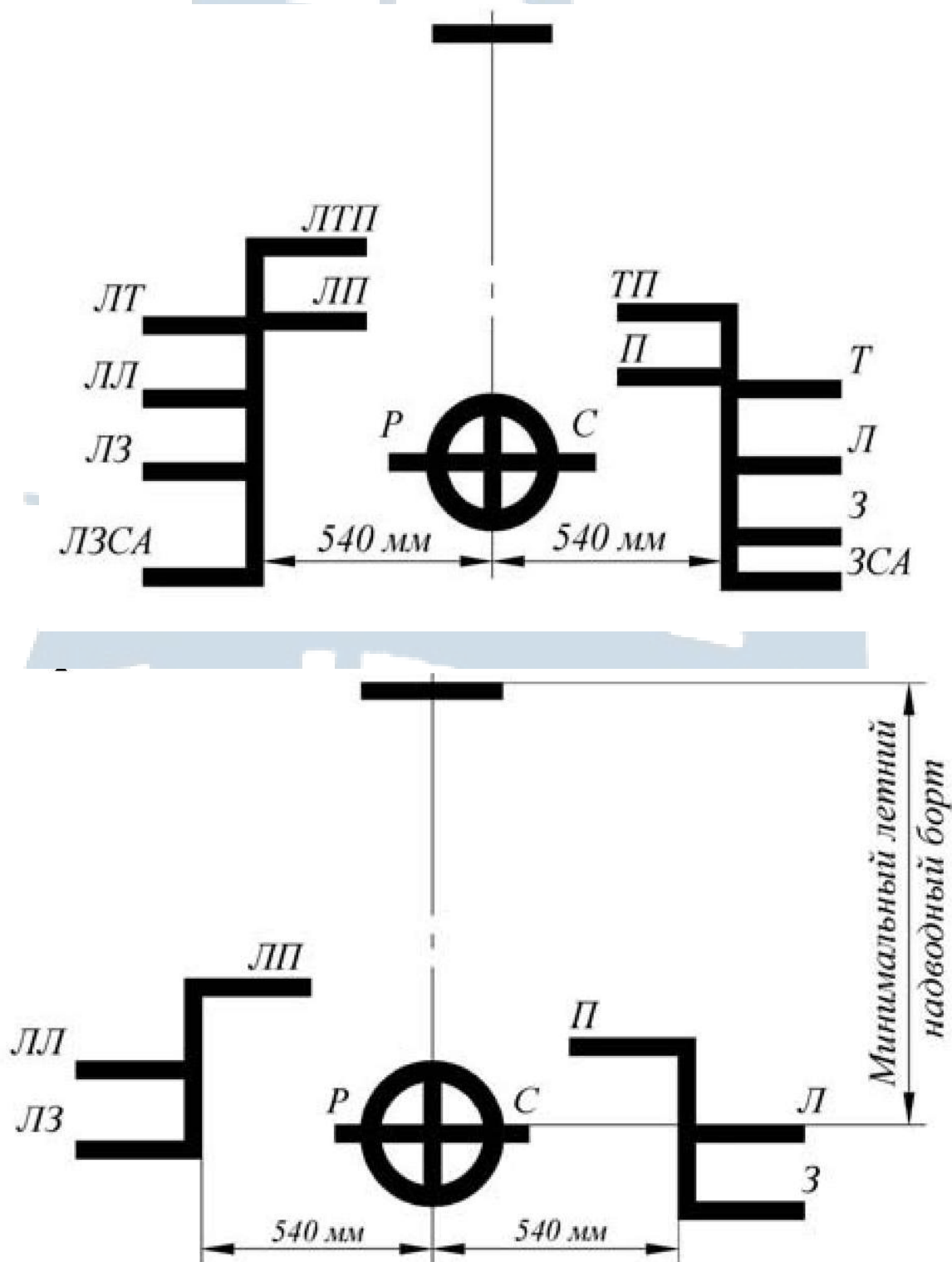


Рис. 2.1.7. Грузовая марка судов ограниченных районов плавания с минимальным надводным бортом

На судне, которому по каким-либо причинам назначается избыточный (по отношению к минимальному) надводный борт, грузовая марка должна наноситься следующим образом (рис. 2.1.8, 2.1.9):

- знак грузовой марки должен располагаться вниз от палубной линии на расстоянии, равном назначенному избыточному надводному борту;
- вместе со знаком грузовой марки должны наноситься грузовая марка для пресной воды летом, а также зимняя грузовая марка или зимняя грузовая марка для Северной Атлантики;
- поправка на пресную воду во всех случаях определяется исходя из осадки, соответствующей назначенному избыточному надводному борту;
- за исключением грузовой марки для пресной воды, никакие другие марки не должны наноситься выше горизонтальной линии знака грузовой марки.

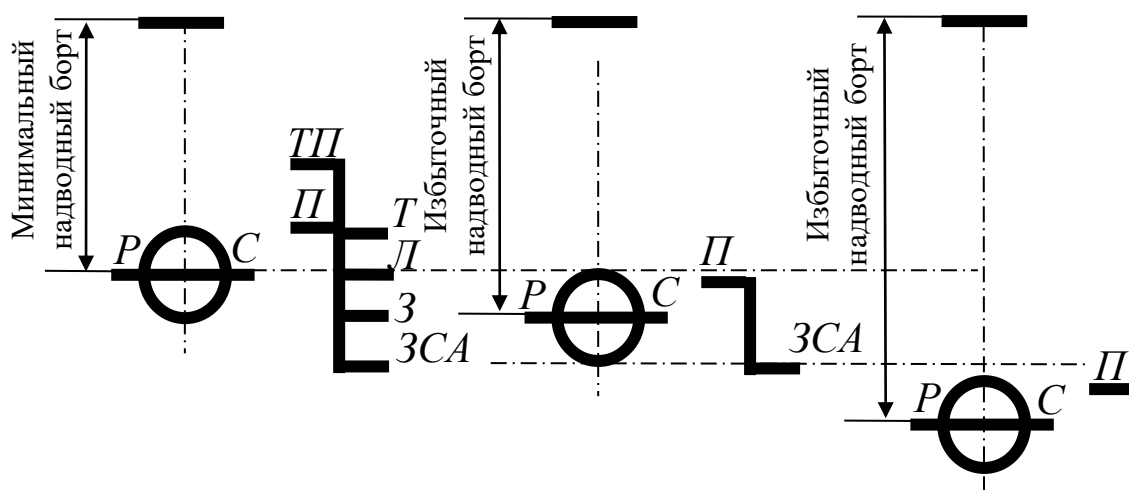


Рис. 2.1.8. Грузовые марки на судах с постоянным избыточным надводным бортом

На парусное судно вместе со знаком грузовой марки наносятся только марка для пресной воды летом и зимняя грузовая марка для Северной Атлантики (рис. 2.1.10).

Такие суда в летней и зимней зонах, районах и в сезонные периоды в соленой морской воде могут загружаться по верхнюю кромку горизонтальной линии, пересекающей центр кольца знака грузовой марки.

Если судну, совершающему международные рейсы, или судну неограниченного района плавания выдается свидетельство о грузовой марке судна ограниченного района плавания I, то на его борту наносится двойная грузовая марка.

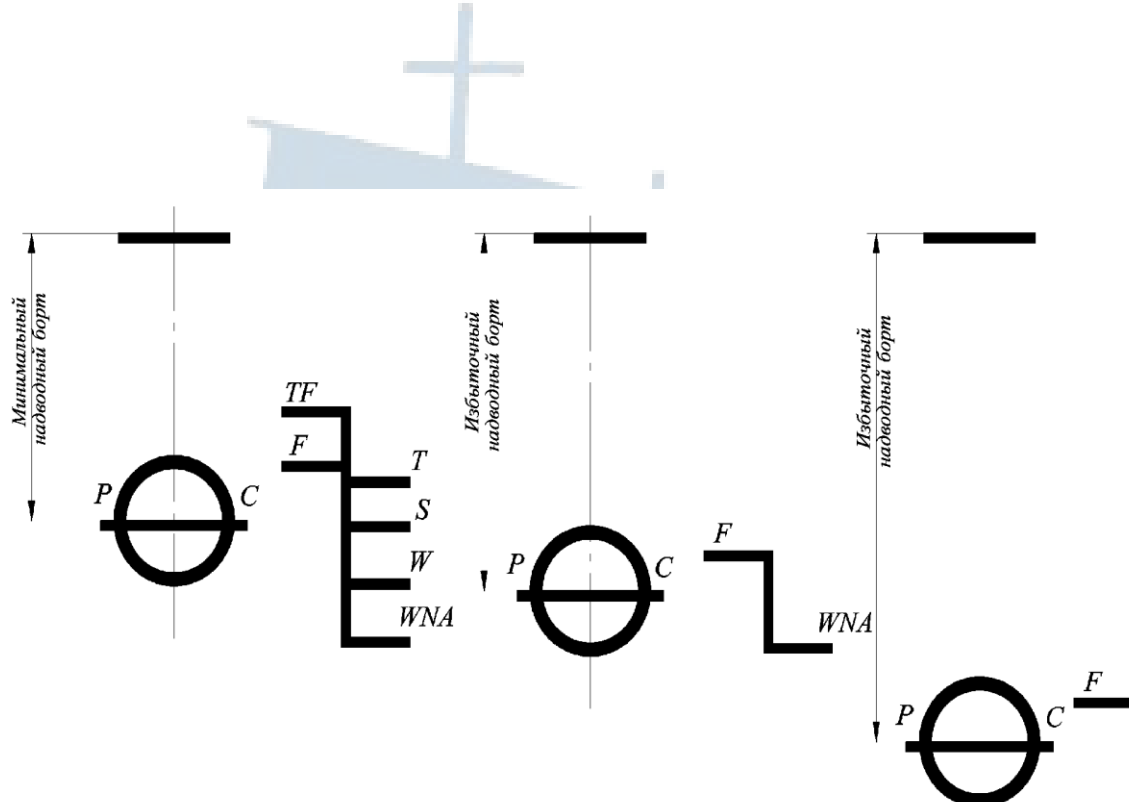


Рис.2.1.9. Грузовые марки на судах с постоянным избыточным надводным бортом

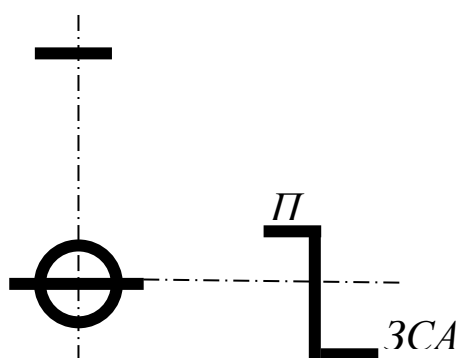


Рис. 2.1.10. Грузовая марка парусного судна

Она наносится также на бортах судов ограниченных районов плавания I или II, если им выдано дополнительное свидетельство о грузовой марке судна III района плавания. Дополнительные грузовые марки наносятся на расстоянии 1 200 мм в нос (для лесных марок – в корму) от центра кольца знака основной грузовой марки (рис. 2.1.11).

Буквы, обозначающие грузовые марки, внешние свободные концы которых направлены в сторону от кольца, должны располагаться против этих концов так, чтобы нижние кромки букв находились на уровне верхних кромок линий марок. Буквы, обозначающие грузовые марки, свободные концы которых направлены в сторону кольца, рекомендуется, если позволяет расстояние между марками, располагать над линиями марок у их свободных концов. Высота букв, обозначающих марки, должна быть не менее 50 мм.

Методика проведения лабораторной работы

1. Выставить модель на ровный киль и прямо. Прямое положение модели обеспечено при одинаковых показаниях на линейках правого и левого борта. Измерить осадки в носу и в корме и записать в табл. 2.1.1.

2. Взять несколько грузов, взвесить их на весах. Укладываем поочередно грузы в модель до тех пор, пока вода не достигнет кромки верхней палубы модели. Записать при каждой укладке массу принятого груза m_i и осадки в носу и корме z_n и z_k в левую часть таблицы 2.1.1

3. После этого произвести обратную процедуру. Поочередно убрать с модели принятый груз массой m_i до полного разгрузки модели судна. Записать m_i и осадки в носу и корме z_n и z_k в правую часть табл. 2.1.1.

4. Результаты размеров z_{ni} и z_{ki} записать в табл. 2.1.1. По результатам опыта построить грузовой размер и определить величину надводного борта.

Обработка результатов измерений

В работе водоизмещение модели судна порожнем M_0 берется для одной модели 5 кг, для второй 7 кг. Водоизмещение модели судна в грузу $M_{гр}$ есть водоизмещение модели судна порожнем плюс масса всех принятых грузов – $M_0 + \sum m_i$.

Результаты измерений заносятся в табл. 2.1.1.

Таблица 2.1.1

Определение параметров грузового размера

нагружение						разгрузка					
$z_{кпб},$ СМ	$z_{клб},$ СМ	$z_{нпб},$ СМ	$z_{нлб},$ СМ	$z_{ср},$ СМ	$m_{igr},$ КГ	$z_{кпб},$ СМ	$z_{клб},$ СМ	$z_{нпб},$ СМ	$z_{нлб},$ СМ	$z_{ср},$ СМ	$m_{igr},$ КГ

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Дайте определение мореходному качеству «плавучесть судна».
2. Что такое грузовой размер?
3. Что такое запас плавучести?
4. Когда была принята Международная Конвенция о грузовой марке?
5. Назначение грузовой марки?
6. На какие типы судов разделены в Конвенции все суда?
7. Чем характеризуется запас плавучести?
8. Какие вы знаете грузовые марки?
9. Период освидетельствования судов по поводу грузовой марки?

Литература

1. Якута И.В. Теория и устройство судна. Раздел «Теория судна». Часть 1: учебное пособие по самостоятельному изучению дисциплины «Теория и устройство судна» для студентов специальности 26.05.05 «Судовождение» [Текст]. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020.
2. Правила о грузовой марке морских судов [Электронный ресурс]. – [Российский Морской Регистр Судоходства, 2021]. – Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook>.
3. Жинкин, В.Б. Теория и устройство корабля [Текст]: учебник / В.Б. Жинкин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с. (или 4-е изд., испр. и доп. – 2010. – 408 с.).
4. Мореходные качества рыболовных судов. Теория и задачи [Текст]: учеб. пособие / В.Д. Кулагин, А.Г. Валишин, Т.В. Кордас, И.В. Якута – Калининград: Изд-во БГАРФ, – 2005.
5. Кулагин, В.Д. Теория и устройство промысловых судов [Текст]: учебник / В.Д. Кулагин. – 2-е изд., перераб. и доп.– Л.: Судостроение, 1986. – 392 с.

Лабораторная работа № 2. Определение метацентрической высоты судна методом кренования

Цель работы: изучение одного из измерительных методов определения метацентрической высоты – метода кренования и приобретение некоторых навыков по определению метацентрической высоты судна.

Основные теоретические положения

Остойчивостью называют такое свойство судна, благодаря которому оно при воздействии внешних причин (ветер, волны и др.) и внутренних процессов (смещение грузов, перемещение жидких запасов, наличие свободных поверхностей жидкости в отсеках и т. д.) не переворачивается [1-4]. Это одно из важнейших мореходных качеств судна, которое, наряду с плавучестью, ходкостью, качкой, управляемостью и прочностью, определяет возможность эксплуатации судна.

Остойчивость – это способность судна противостоять внешним природным морским факторам (ветер, волнение, обледенение) в сочетании с «внутренними» причинами, вызванными действиями экипажа, которые стремятся вывести его из положения равновесия [2; 4].

Остойчивость судна делится на *статическую* и *динамическую*. Под статической остойчивостью понимают способность судна противостоять статическим усилиям; под динамической остойчивостью – способность судна противостоять динамическим усилиям, при действии которых уже нельзя пренебрегать ускорениями судна.

Различают *начальную остойчивость* судна и *стойчивость при больших углах наклона*. Вследствие ряда допущений зависимости, описывающие начальную остойчивость, получаются более простыми, чем при больших углах наклона. Эти зависимости справедливы только для бесконечно малых углов наклона. Однако с некоторой сравнительно небольшой погрешностью их можно применить для расчета наклонов до углов 10-12°.

В остойчивости принято методически выделять поперечную и продольную остойчивость как самостоятельные разделы дисциплины. Теория продольной остойчивости позволяет рассчитать и оценить дифферент судна и его посадку на тихой воде, что очень важно для экипажа при решении проблем, связанных с загрузкой судна, обеспечением прочности, определением количества груза, безопасной его посадкой, заливаемостью и т. п.

У судна, выведенного наклонением из положения равновесия, изменяется форма его подводного объема, соответственно и центр величины по пространственной траектории смещается в сторону крена. В исходном положении судно сидело прямо, ЦВ находился в ДП в точке C , в наклоненном положении он сместился в точку C_θ (рис. 2.2.1).

Проекция траектории центра величины на плоскость наклонения называется *кривой центров величины* CC_θ .

Она обладает рядом интересных и важных свойств [2] (рис. 2.2.2):

- эта кривая обращена всегда выпуклостью вниз и не имеет точек перегиба, разрыва, это – плавная кривая;
- касательная к любой точке кривой параллельна соответствующей ватерлинии;
- в каждой точке эта кривая имеет свою кривизну;
- центр кривизны кривой C называется *метацентром* (точка M). Метацентр – это не одна, а бесконечное множество точек – кривая M ;
- центр кривизны при $\theta = 0^\circ$ называется *начальным метацентром* (точка M_0);
- радиус кривизны кривой C называется *метацентрическим радиусом*.

Он может быть рассчитан по формуле:

$$r = \frac{I_x}{V},$$

где I_x – момент инерции площади действующей ватерлинии при данном угле крена относительно центральной продольной оси;

V – объемное водоизмещение судна.

Метацентрический радиус при поперечном наклонении (крене) называется *малым (поперечным)*, а при продольном наклонении – *большим (продольным)*. Метацентрический радиус при $\theta = 0^\circ$ называется *начальным метацентрическим радиусом* (r_0);

– равнодействующая силы поддержания всегда проходит через точки C и M ;

– с точки зрения математики кривая M является эволютой (оберткой) кривой C , а кривая C – эвольвентой (разверткой) кривой M ;

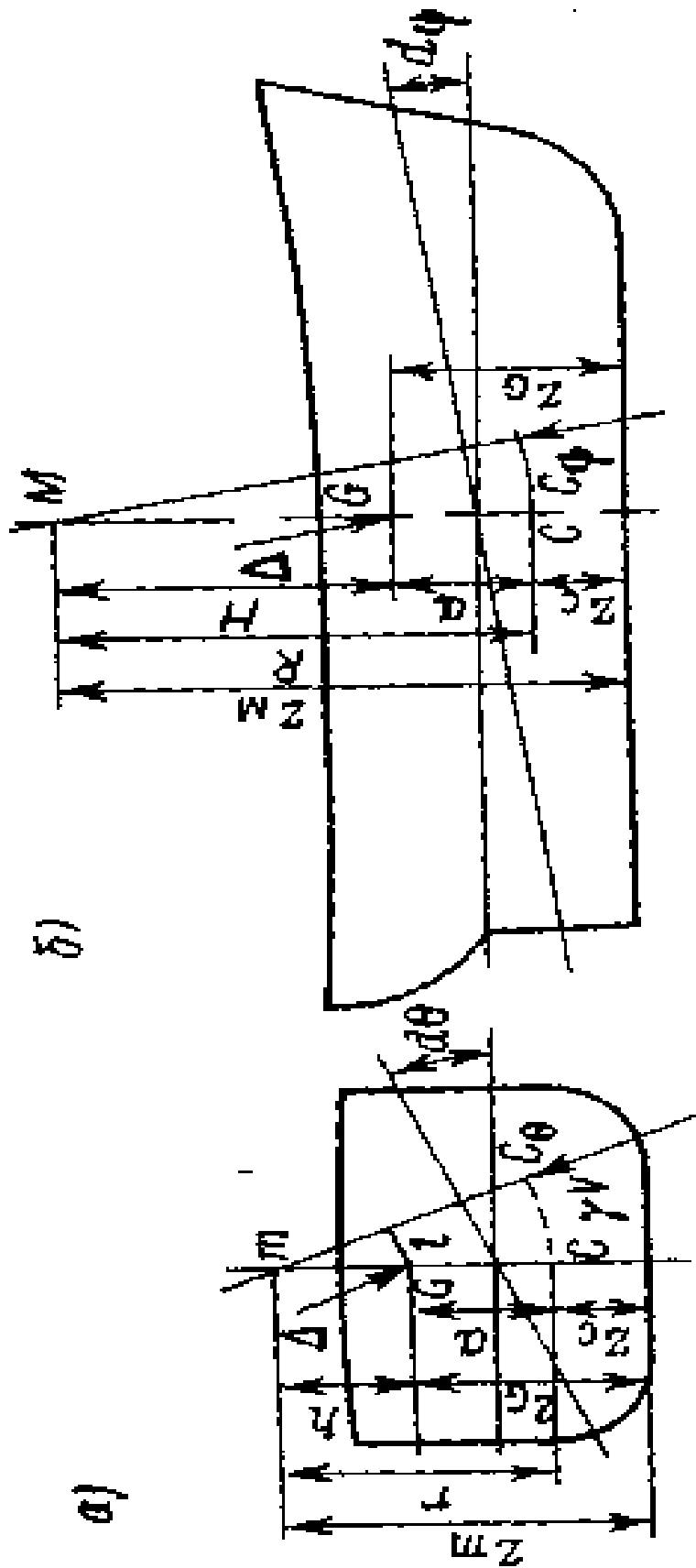


Рис. 2.2.1. Метациентрические высоты:
 а – поперечное наклонение, б – продольное наклонение

Расстояние от метацентров до центра величины называется *поперечным метацентрическим радиусом r* и *продольным метацентрическим радиусом R* .

Возвышение метацентров над центром тяжести судна называется *поперечной метацентрической высотой h* и *продольной метацентрической высотой H* .

Произведение водоизмещения на метацентрическую высоту называется *коэффициентом остойчивости*:

$M \cdot h$ – коэффициент поперечной остойчивости;

$M \cdot H$ – коэффициент продольной остойчивости.

При наклонении судна сила веса Δ и сила поддержания γV образуют пару сил, стремящуюся вернуть судно в прямое положение (рис. 2.2.3). Момент, создаваемый силами тяжести и поддержания, называется *восстанавливающим моментом* [1-4].

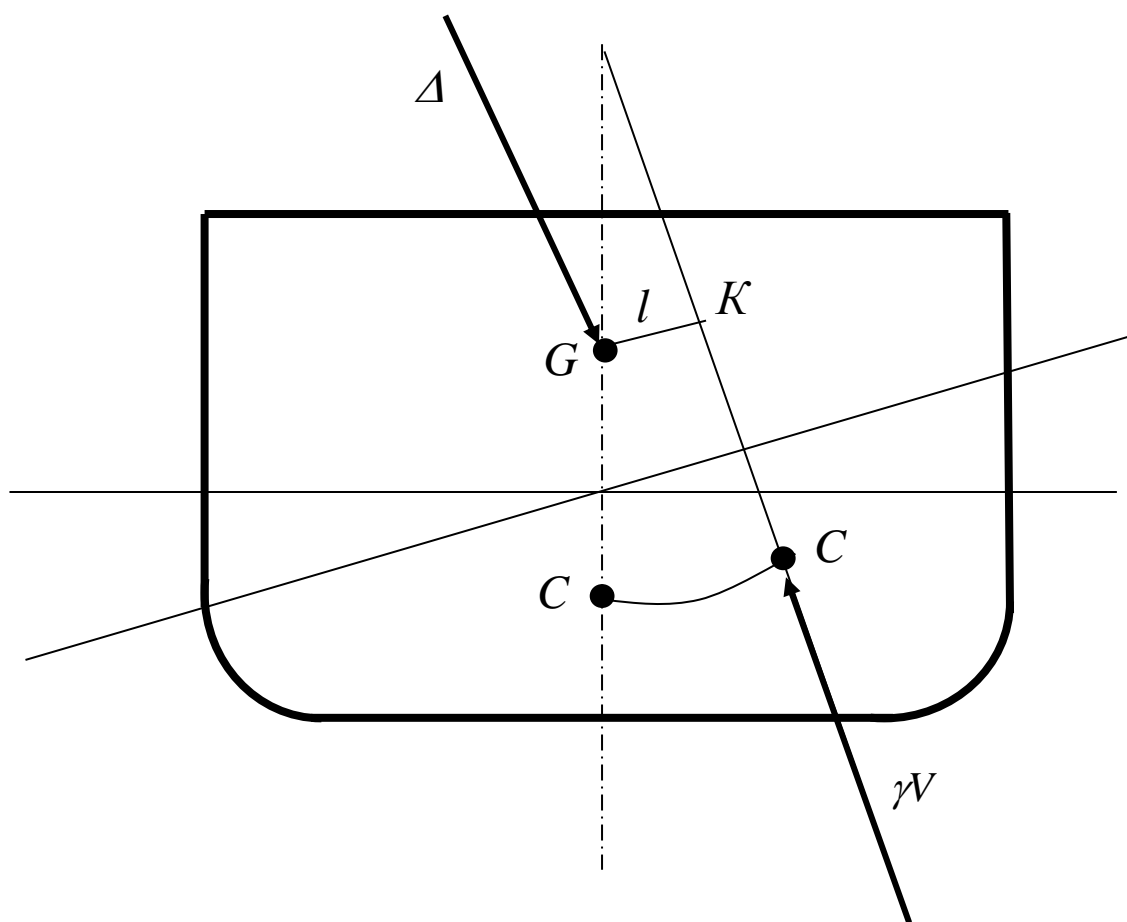


Рис. 2.2.3. Восстанавливающий момент

Величина восстанавливающего момента может быть вычислена (для любой пары сил) как произведение одной (любой из двух) силы на расстояние между ними



$$M_B(\theta) = \Delta \cdot GK = \Delta l(\theta).$$

Расстояние между линиями действия силы тяжести и силы поддержания называется *плечом статической остойчивости* l .

Плечо статической остойчивости может служить показателем остойчивости судна. При $l > 0$, $M_B > 0$ судно остойчиво, при $l \leq 0$, $M_B \leq 0$ судно не остойчиво.

Как следует из рисунка 2.2.1, $l = h \cdot \sin \theta$, или, переходя к конечным, но малым углам $l = h \cdot \sin \theta$, откуда восстанавливающий момент

$$M_B = \Delta h \sin \theta$$

Аналогичным путём может быть получена формула для определения восстанавливающего момента при продольных наклонениях:

$$M_B = \Delta H \sin \psi$$

Эти две формулы называются **метацентрическими формулами остойчивости** [12; 13].

Метацентрические формулы остойчивости показывают, что метацентрические высоты являются критериями начальной остойчивости судна. Действительно, при $h > 0$ и $M_B > 0$ судно остойчиво, при $h \leq 0$ и $M_B \leq 0$ судно не остойчиво.

Таким образом, для суждения о начальной остойчивости судна необходимо научиться вычислять метацентрические высоты. В соответствии с рис. 2.2.1 легко получить следующие зависимости для определения метацентрических высот:

$$h_0 = z_m - z_g; \quad h_0 = r + z_c - z_g; \quad h_0 = r - a; \quad h_0 = z_m - a - z_c;$$

$$H = z_M - z_g; \quad H = R + z_c - z_g; \quad H = R - a,$$

где z_m и z_M – возвышение поперечного и продольного метацентров над основной плоскостью;

a – возвышение центра тяжести над центром величины.

Плечо восстанавливающего момента l и сам момент M_B имеют геометрическую интерпретацию в виде **диаграммы статической остойчивости (ДСО)**.

ДСО – это графическая зависимость плеча восстанавливающего момента $l(\theta)$ или самого момента $M_B(\theta)$ от угла крена θ (рис. 2.2.4).

Судно одинаково остойчиво при наклонениях на правый и левый борт, поэтому ДСО имеет две ветви. При этом принято следую-

щее правило знаков: угол крена на правый борт и соответствующее ему плечо статической остойчивости положительны, при крене на левый борт эти величины меняют направление и вместе с ним знак. Естественно, что при наклонении на любой борт, восстанавливающий момент стремится вернуть судно в положение равновесия – начало координат, где $\theta = 0$.

Точка А соответствует углу $\theta = \theta_{max}$, при котором плечо приобретает свое максимальное значение. В точке В это плечо обращается в ноль, ДСО пересекает ось абсцисс, угол крена при этом $\theta = \theta_{зак}$ называется углом заката ДСО.

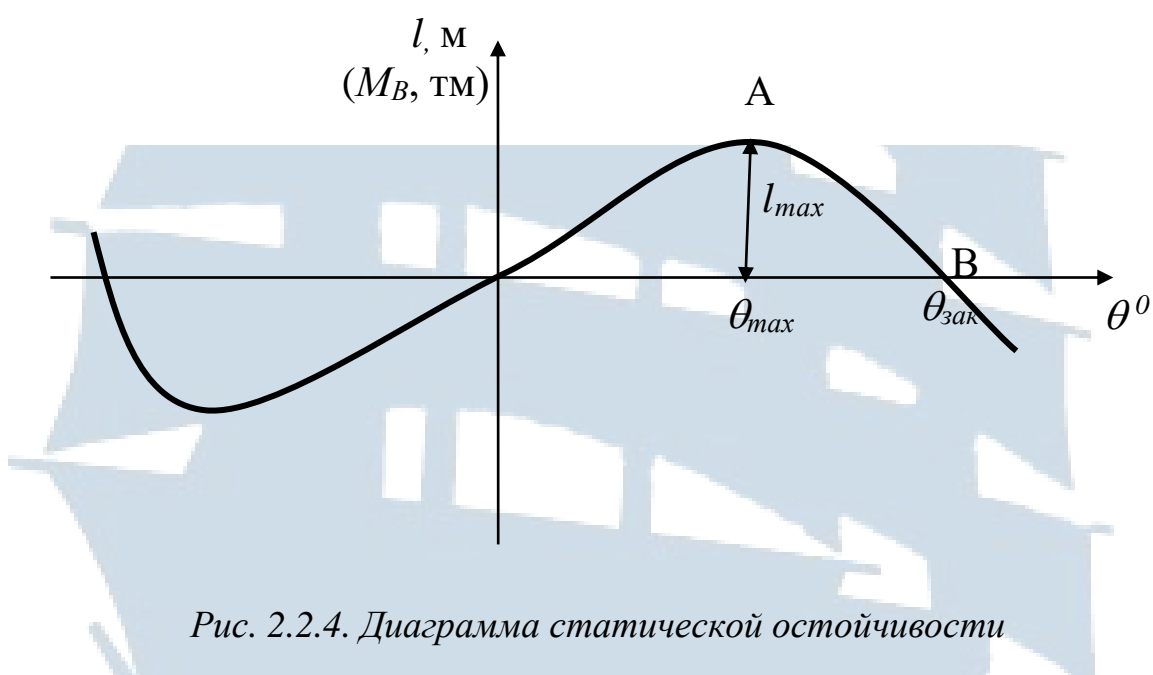


Рис. 2.2.4. Диаграмма статической остойчивости

Свойства ДСО:

- ДСО зависит только от взаимного расположения центра тяжести судна G и начального поперечного метацентра m ;
- вид ДСО определяется только положением центра тяжести (или значением метацентрической высоты) и водоизмещением и учитывает наличие жидких грузов и запасов с помощью специальных поправок;
- форма корпуса конкретного судна проявляется в ДСО через плечо $l(\theta)$, которое отражает смещение центра величины C при наклонении судна в сторону входящего в воду борта, жестко связанное с формой обводов корпуса;
- метацентрическая высота h_0 , вычисленная с учетом влияния жидких грузов и запасов, проявляется на ДСО как тангенс угла

наклона касательной к диаграмме статической остойчивости в начале координат.

– никакие действия не могут изменить вида ДСО, кроме изменения величин исходных параметров h_0 и Δ , поскольку ДСО отражает в каком-то смысле неизменную форму корпуса посредством величины $l(\theta)$;

– метацентрическая высота h_0 фактически определяет вид и протяженность ДСО до $\theta = \theta_{зак}$. Угол заката определяет такое значение угла крена, при котором сила веса совпадает с направлением действия силы поддержания и $l(\theta_{зак}) = 0$. Заключение об опрокидывании судна при крене $\theta = \theta_{зак}$ не будет верным, поскольку оно начинается гораздо раньше, вскоре после преодоления максимальной точки ДСО [2; 13].

В основе отечественного подхода к нормированию характеристик остойчивости [2; 7] была выбрана следующая методика:

– выполнение перед началом погрузки судна контрольного расчета остойчивости в предстоящем рейсе для двух состояний его загрузки – на момент начала рейса со 100 % запасов и на момент окончания рейса с неизменным количеством груза, но с остатком запасов в размере 10 % от исходного их количества.

Если киль судна был заложен до 1 июля 2002 года, то при расчете параметров остойчивости необходимо использовать «старые» нормы. Большинство контролируемых характеристик остойчивости относится к ДСО для этих двух случаев загрузки судна в планируемом рейсе. Среди них:

– начальная поперечная метацентрическая высота, исправленная на влияние свободных поверхностей запасов и жидких грузов, должна быть $h_0^{иср} \geq 0$;

– максимальное плечо ДСО должно быть $l_{max} \geq 0,25$ м для судов $L < 80$ м и $l_{max} \geq 0,20$ м для судов $L > 105$ м. Для промежуточных значений длины судна применима линейная интерполяция;

– угол максимума ДСО должен быть $\theta_{max} \geq 30^\circ$;

– угол заката ДСО должен быть $\theta_{зак} \geq 60^\circ$;

– отношение минимального опрокидывающего момента $M_{опр}^{min}$ к динамическому кренящему моменту от шквалистого ветра $M_{кр.дин}$, получившее название «критерий погоды», должно быть больше единицы

$$K = M_{опр}^{min} / M_{кр.дин} \geq 1,0.$$

Критерий погоды для морских судов определяется применительно к ситуации, когда судно, лишенное хода и управления, находится на волнении и в зоне действия шквалистого ветра в положении лагом к волне [2; 7]. Характеристики ветра, волнения и бортовой качки устанавливаются РМРС конкретно для каждого судна в зависимости от разрешенного района плавания. Находясь лагом к волнению и ветру, судно испытывает бортовую качку с условной амплитудой θ_r (симметрично на правый и левый борт). В момент наибольшего крена судна на левый борт на угол θ_r внезапно воздействует шквал со стороны левого борта. Под влиянием качки судно переваливается на правый борт, а шквал способствует его дальнейшему крену. В этой ситуации необходимо определить минимальный опрокидывающий момент $M_{опр}^{min}$. Амплитуда бортовой качки вычисляется по формулам.

Предельный (максимальный) кренящий динамический момент, действие которого судно сможет удержать, обладая данной остойчивостью и ДСО, называется опрокидывающим моментом $M_{опр}$.

Его значение находят на ДСО способом последовательных приближений при помощи постепенного увеличения величины кренящего момента. Момент расчета наступает тогда, когда для площади графика кренящего момента $M_{кр}$ уже не найдется равной по величине площади графика ДСО. Если наибольший кренящий момент является постоянным, то $M_{опр}$ будет соответствовать ординате горизонтальной линии, проведенной так, чтобы заштрихованные площади были одинаковыми (рис. 2.2.5, а) [13].

Продлеваем ДСО в область отрицательных углов крена, откладываем амплитуду θ_r . Первая площадь будет ограничена θ_r , ДСО и искомым $M_{опр}$, вторая площадь ограничена ДСО и искомым $M_{опр}$.

Для нахождения плеча опрокидывающего момента по ДДО, из левой части ДДО (точка а) необходимо провести касательную к ее правой части. Эта касательная есть график работы, совершаемой кренящим ветровым моментом. Тангенс угла наклона графика (прямой касательной линии) к горизонту численно равен в масштабе чертежа минимальному опрокидывающему моменту.

Необходимую величину тангенса угла можно получить, если от вершины угла отложить по горизонтали отрезок длиной $57,3^\circ$ (1 рад) и измерить вертикальный катет образовавшегося треугольника (между горизонтальной линией и касательной в масштабе вертикальной оси) (рис. 2.2.5, б).

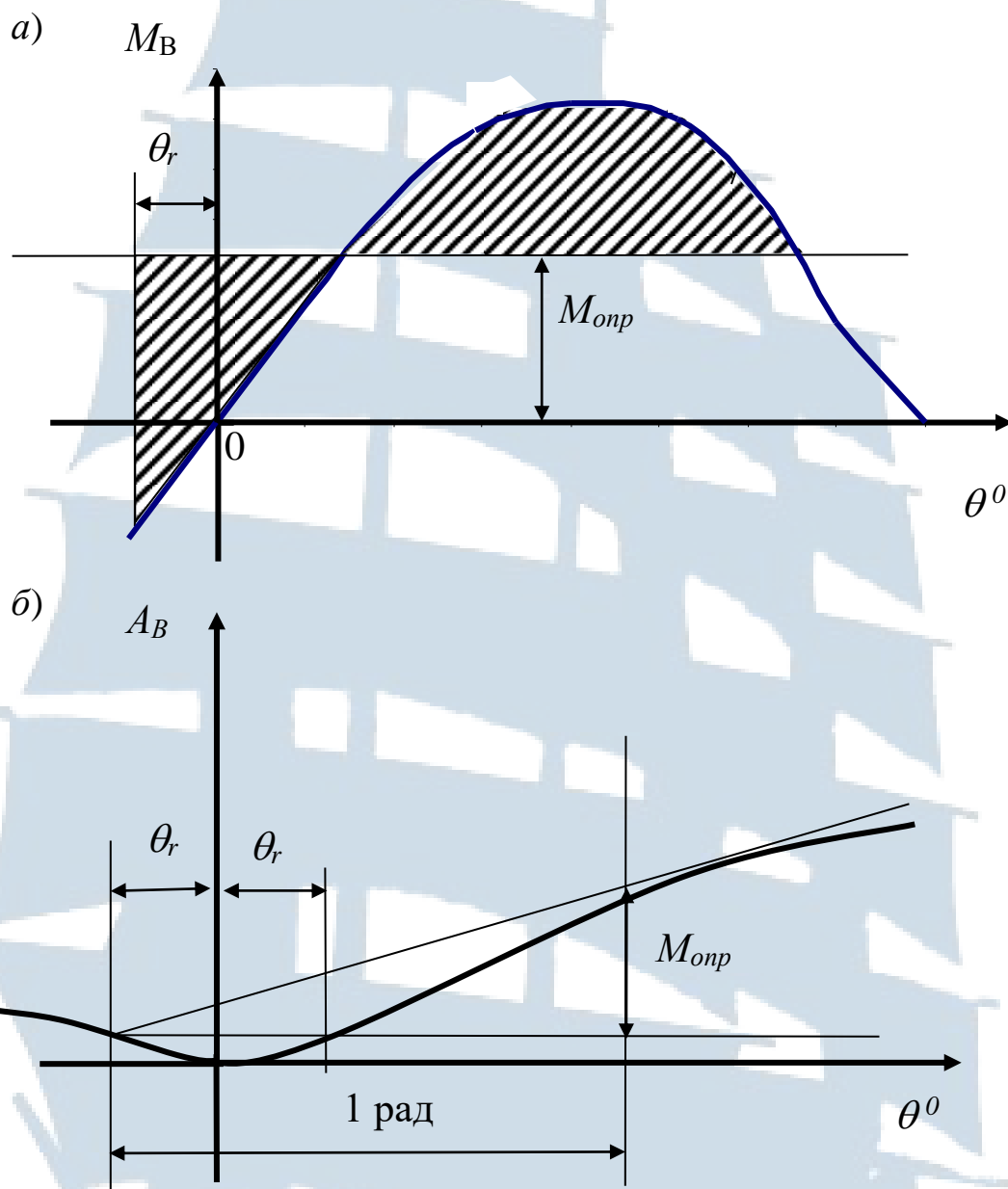


Рис. 2.2.5. Определение опрокидывающего момента

Все эти требования соответствуют судам, построенным до 1 июля 2002 года. В 1993 г. был принят Кодекс ИМО по остойчивости судов [11], нормативы которого изложены в IV части «Остойчивость» «Правил классификации и постройки морских судов» РМРС [7].

Альтернативный характер требований ИМО допускает их использование наряду с нормами РМРС по усмотрению судоходной компании. Подход, реализуемый ИМО в данном вопросе, существенно отличается от отечественного практически по всем пунктам требований к остойчивости, являясь принципиально иным как по нормативам, так и по их выбору и методике оценки критерия погоды [11].

Начальная метацентрическая высота, исправленная на влияние свободных поверхностей, должна быть при всех вариантах нагрузки не менее 0,15 м, кроме:

- промысловых судов: $h \geq 0,05$ м или 0,003 ширины судна, смотря по тому, что больше; $h \geq 0,35$ м для судов длиной менее 20 м;
- лесовозов – $h \geq 0,10$ м, это сделано для того, чтобы судно не испытывало резкой качки, которая может привести к потере палубного груза из-за чрезмерных ускорений;
- контейнеровозов – $h \geq 0,20$ м, ветровой угол крена не должен превышать 15° ;
- судов для перевозки сыпучих грузов – $h \geq 0,30$ м;
- пассажирских – при скоплении всех пассажиров судна на одном борту угол крена не должен превышать половины угла заливания (когда погружаются иллюминаторы) или угла, при котором палуба надводного борта входит в воду или скула из нее выходит, в любом случае крен не должен превышать 10° [2; 7; 11].

Максимальное плечо статической остойчивости $l_{max} \geq 0,20$ м.

Угол максимума ДСО $\theta_{max} \geq 30^\circ$.

Угол заката ДСО $\theta_{зак} \geq 60^\circ$.

Те же величины для ДСО, построенной с учетом обледенения судна должны составлять $\theta_{max} \geq 25^\circ$ и $\theta_{зак} \geq 55^\circ$, для судов ограниченного района плавания $l_{max} \geq 0,20$ м.

Требования к параметрам ДДО [2; 7; 11] (рис. 2.2.6):

- площадь части ДСО в пределах углов крена $\theta = 0^\circ \div 30^\circ$:
 $S(0^\circ \div 30^\circ) \geq 0,055$ м·рад, т. е. $l_d^{30} \geq 0,055$ м·рад (рис. 2.2.6, а);
- площадь части ДСО в пределах углов крена $\theta = 30^\circ \div 40^\circ$:
 $S(30^\circ \div 40^\circ) \geq 0,030$ м·рад, т. е. $l_d^{40} \geq 0,030$ м·рад (рис. 2.2.6, б);
- площадь части ДСО в пределах углов крена $\theta = 0^\circ \div 40^\circ$:
 $S(0^\circ \div 40^\circ) \geq 0,090$ м·рад, т. е. $l_d^{40-30} \geq 0,090$ м·рад (рис. 2.2.6, в).

Критерий погоды. Здесь отличия подхода ИМО от отечественного проявляются в наибольшей степени в следующем:

- рассматривается совместное действие постоянного ветра и шквалистого порыва ветра;
- бортовая качка имеет несимметричный характер и отсчитывается от угла статического крена в результате действия постоянного кренящего момента от постоянного ветра;

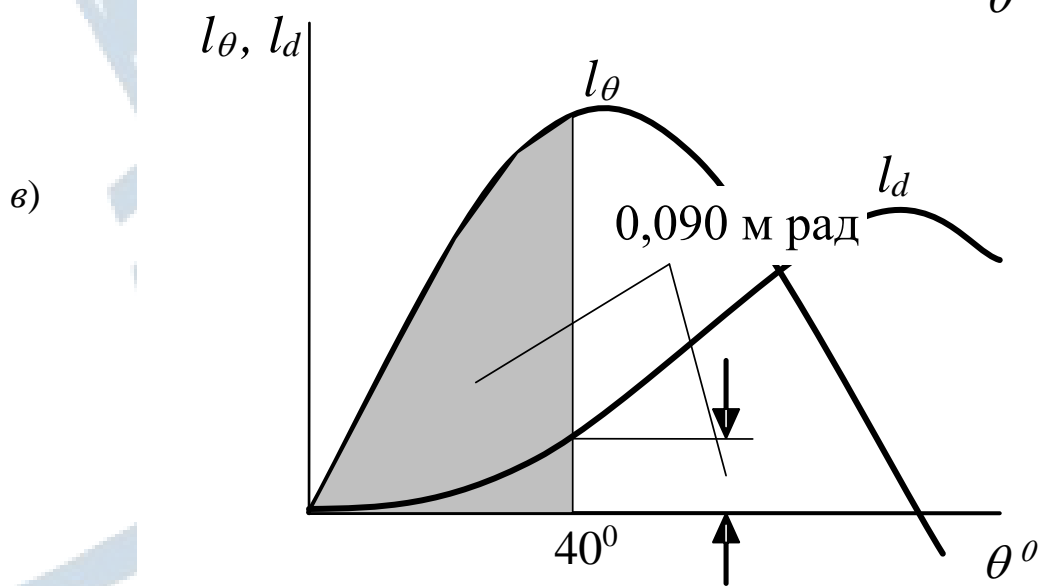
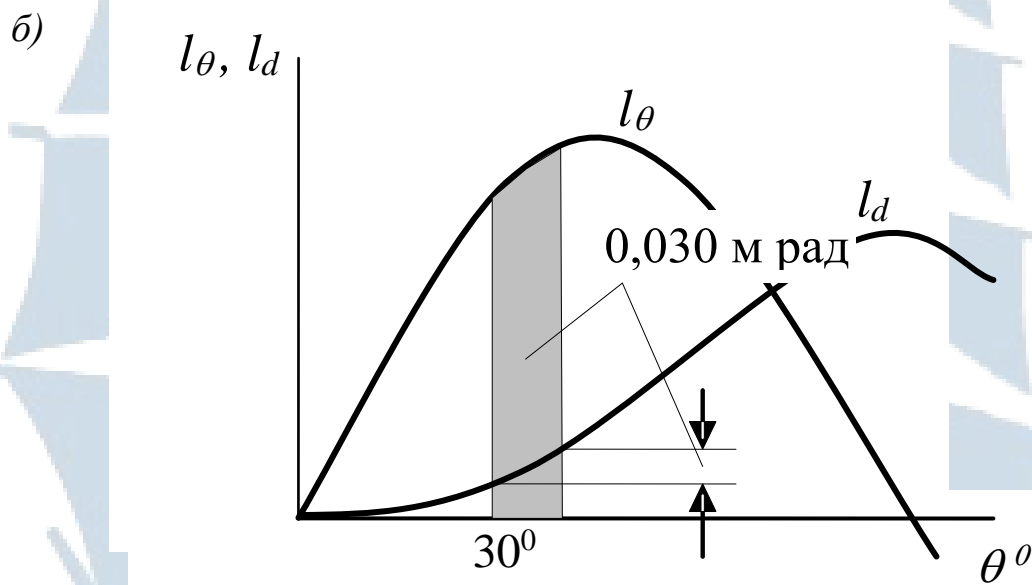
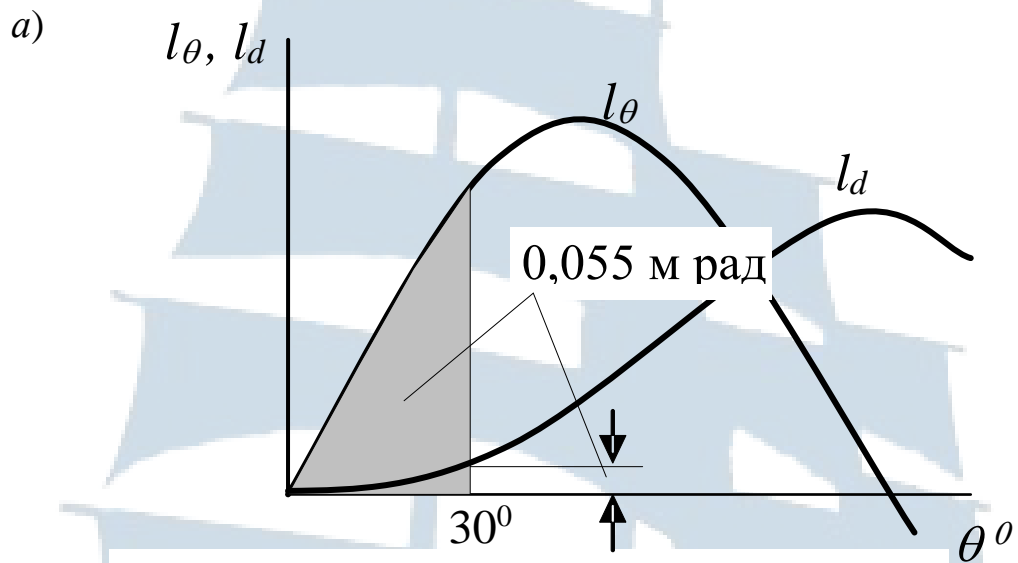


Рис. 2.2.6. Контроль площади ДСО

- давление постоянного ветра принимается одинаковым для всех судов $p_v = 504 \text{ Па}$;
- давление ветра в шквале не участвует в расчете, а просто плечо кренящего момента от шквала принимается в 1,5 раза больше кренящего плеча от статического ветра;
- площадь b участка ДСО должна быть больше площади a участка ДСО между углом крена θ_l при отсчете на левый борт от угла статического крена θ_0 постоянного ветра [7].

В начале считается, что судно находится под воздействием постоянного ветра, направленного перпендикулярно диаметральной плоскости, которому соответствует плечо ветрового кренящего момента l_{wl} (рис. 2.2.7).

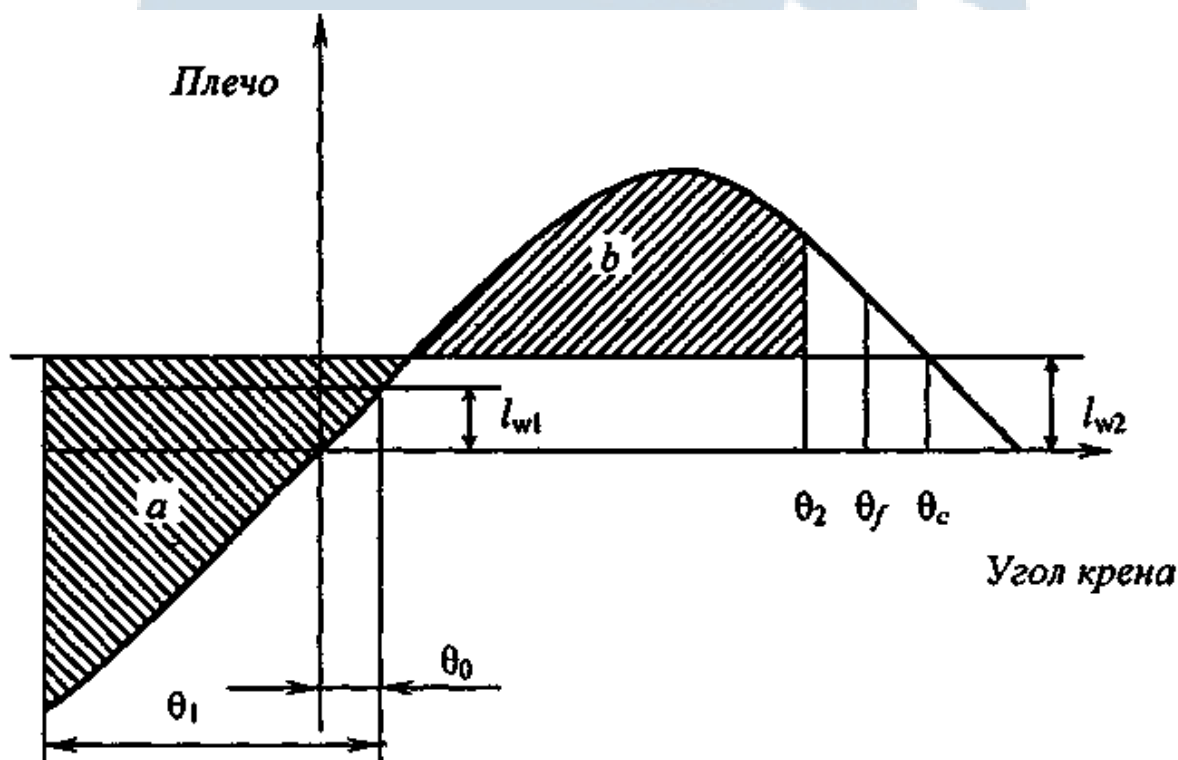


Рис. 2.2.7. Определение площадей a и b

Под статическим действием этого ветра судно кренится на подветренный борт до угла θ_0 . От этого статического угла крена θ_0 , вызванного постоянным ветром и соответствующего первой точке пересечения горизонтальной прямой l_{wl} и кривой восстанавливающих плеч l_θ , судно под воздействием волн кренится на наветренный борт на угол, равный амплитуде бортовой качки θ_l .

В этот момент на накрененное судно динамически действует порыв ветра, которому соответствует плечо кренящего момента l_{w2} .

Вычисляются и сравниваются площади « a » и « b ».

Площадь « a » ограничена кривой восстанавливающих плеч, прямой l_{w2} и углом крена, равным $\theta_0 - \theta_1$.

Площадь « b » ограничена кривой восстанавливающих плеч, прямой, соответствующей прямой l_{w2} и углом крена, равным $\theta_2 = 50^\circ$.

Статический угол крена от действия постоянного ветра θ_0 не должен превышать 16° , либо угла, равного 0,8 угла входа в воду кромки открытой палубы, в зависимости от того, какой из них меньше [5].

Критерий погоды находится как отношение площадей:

$$K = b/a \geq 1.$$

Практические методы нахождения метацентрической высоты делятся на две группы – *расчетные* и *экспериментальные*.

Расчетные базируются на использовании ранее представленных формул. Необходимые параметры подводного объема z_c , z_m , r определяют с помощью КЭТЧ, положение ЦТ судна и его водоизмещение находят путем скрупулезного контроля за приемом и расходом груза. Достоинство – возможность прогнозирования остойчивости для любого состояния загрузки, недостаток – необходимость постоянного учета изменений нагрузки судна.

Экспериментальные методы могут быть прямыми, служащими для непосредственного определения h (кренование) и косвенными, когда h находят на основании известной ее связи с другими параметрами, которые измеряют в процессе опыта.

Метод кренования основан на использовании метацентрической формулы остойчивости. Замеряется крен судна под действием известного статического кренящего момента $M_{кр}$, а затем рассчитывается искомая $h = M_{кр}/\Delta\theta$.

Кренование – это наиболее надежный метод, однако его использование для текущего контроля остойчивости возможно только для сравнительно небольших судов.

Опыту кренования с последующим расчетом положения центра тяжести судна и его остойчивости подвергаются вновь строящиеся суда, суда после капитального ремонта, переоборудования или укладки балласта. Кренование судна производится по возможности в состоянии нагрузки порожнем и с полным снабжением. Порядок опыта кренования и обработка его результатов оговаривается Правилами Морского Регистра судоходства РФ.

Поперечная метацентрическая высота судна, характеризующая начальную остойчивость судна, определяется из опыта кренования с помощью формулы:

$$h_0 = \frac{m \cdot l}{M_0 \cdot \theta}, \quad (2.1)$$

где M_0 – масса порожнего судна (массовое водоизмещение), вычисляемая по масштабу Бонжана, а при отсутствии дифферента – по чертежу гидростатических кривых (кривые элементов теоретического чертежа);

θ – измеренный в процессе опыта малый угол крена от поперечного переноса груза массой m на расстояние l рад; кренящие моменты от переноса груза должны быть такими, чтобы $\theta^0 \leq 1^\circ - 3^\circ$.

Для определения из опыта кренования положения центра тяжести судна используется зависимость

$$z_{go} = r_o + z_{co} - h_o = z_{mo} - h_o, \quad (2.2)$$

где r_o – поперечный метацентрический радиус судна, вычисляемый по теоретическому чертежу, а при отсутствии дифферента – по чертежу гидростатических кривых;

z_{co} – аппликата центра величины судна, вычисляемая по интегральным кривым статических моментов площадей шпангоутов относительно основной плоскости, а при отсутствии дифферента – по чертежу гидростатических кривых;

h_o – поперечная метацентрическая высота, найденная из опыта кренования;

z_{mo} – аппликата поперечного метацентра.

Для судна, плавающего с дифферентом, M_0 и z_{mo} можно также найти по диаграммам Фирсова-Гундобина (рис. 1.5).

Полученное по данным опыта кренования значение z_{go} (также, как и M_0) сообщается в «Информации об остойчивости для капитана». Величины M_0 и z_{go} используются в эксплуатационных условиях для расчета фактических водоизмещения и положения центра тяжести судна z_g :

$$M = M_0 + \sum m_i, \quad (2.3)$$

$$z_g = \frac{M_0 z_{go} + \sum m_i z_i}{M}, \quad (2.4)$$

где M_0 , z_{go} – водоизмещение и аппликата центра тяжести судна порожнем;

m_i , z_i – масса и аппликата центра тяжести переменных грузов, принятых на судно.

Методика проведения лабораторной работы

1. Метацентрическая высота модели должна определяться для судна, сидящего на ровной киль. Поэтому необходимо выставить модель на ровный киль и прямо. Прямое положение модели обеспечено при одинаковых показаниях на линейках правого и левого бортов.

Измерить осадки в носу и в корме, по правому и левому борту. Показания на линейках 5 правого и левого бортов записать. Определить среднюю осадку в носу и корме.

Данные занести в таблицу «Расчет посадки и массы модели» (табл. 2.2.1). Грузы 4 массой $m = 0,043$ кг каждый для первой модели и $0,049$ кг – для второй модели, должны находиться у мачты.

2. Пересчитать средние осадки в носу и корме на натуре, по диаграмме посадок (рис. 1.4) определить водоизмещение M и абсциссу центра тяжести x_g натурального судна.

3. По кривым элементов теоретического чертежа (рис. 1.3) определить положение метacentра z_m натурального судна.

Занести данные в таблицу.

Произвести пересчет полученных величин на модель, занести в таблицу значения m , x_g , z_m .

4. Один из грузов 4 переместить по поперечине 2 к соответствующему борту на расстояние $l = 0,05 \div 0,15$ м. Записать l_i и отсчеты на линейках 5 правого и левого бортов $z_{нб}$ и $z_{лб}$.

5. Затем вернуть груз 4 к мачте. После успокоения модели переместить другой груз 4 на противоположный борт на расстояние $l = 0,05 \div 0,15$ м. Записать l_i и отсчеты на линейках 5 правого и левого бортов $z_{нб}$ и $z_{лб}$.

6. Повторить наклонения модели, как указано в пунктах 3 и 4, трижды на каждый борт.

7. Результаты размеров $z_{нбi}$ и $z_{лбi}$ записать в табл. 2.2.2. В протоколе кренования записать значение массы переносимого груза m_i и плеча его переноса l_i . Необходимо помнить, что крен на правый борт имеет знак «плюс», на левый – знак «минус».

Таблица 2.2.1

Расчет посадки и массы модели ($m = 1/50$)

Модель				Натура		
Осадка (см)		Масса (кг)	x_g (см)	Осадка (м)	Масса (т)	x_g (м)
Нос ПБ ЛБ	ср	$m =$		$T_n =$	$M =$	
Корма ПБ ЛБ	ср		z_m (см)	$T_k =$		z_m (м)
Ми- дель				$T_{cp} =$		

8. Выполнить расчет средней метацентрической высоты (табл. 2.2.3).

9. Используя данные табл. 2.2.2 и 2.2.3, произвести обработку результатов измерений, рассчитать погрешности вычислений и доверительный интервал изменения метацентрической высоты.

10. По результатам опыта кренования определить значение начальной метацентрической высоты h_o .

Таблица 2.2.2

Вычисление углов крена

№ опыта	Показания $z_{лбi}$, см	Показания $z_{пбi}$, см	Разность показаний $ z_{пбi} - z_{лбi} $, см	Угол крена $\theta_i = \frac{ z_{пбi} - z_{лбi} }{a}$, рад
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Сделать вывод о том, удовлетворяет ли полученное значение h_o требованиям ИМО и Правил Морского Регистра судоходства.

В конце работы построить график зависимости кренящего момента $M_{кр}$ от угла крена θ .

Вычисление средней метацентрической высоты

№ опыта	Масса груза, m_i , кг	Плечо переноса груза l_i , м	Момент перемещаемого груза $m_i l_i$, кг·м	Угол крена θ_i , рад	Метацентрическая высота $h_i = \frac{m_i l_i}{M_0 \theta_0}$, м	Погрешность опыта $\varepsilon_i = h_i - h$, м	ε_i^2
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1							
2							
3							
4							
5							
6							
					Σ_{VI}		Σ_{VIII}

Обработка результатов измерений

В табл. 2.2.1 или в протоколе кренования вычисляется угол крена для каждого наклонения модели по формуле:

$$\theta_i = \frac{|z_{n\delta i} - z_{л\delta i}|}{a},$$

где $z_{n\delta i}$, $z_{л\delta i}$ – показания на мерных линейках 5 в i -м опыте;
 a – длина рейки 6.

Значения угла θ_i записываются в V столбец табл. 2.2.3. В VI столбце подсчитывается метацентрическая высота отдельного опыта. После нахождения суммы VI столбца вычисляется средняя метацентрическая высота в условиях опыта

$$\bar{h} = \frac{1}{6} \sum_{vi}.$$

Затем определяется погрешность отдельного опыта

$$\varepsilon_i = h_i - h,$$

подсчитывается ε_i^2 и вычисляется ошибка среднего арифметического h по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{viii}}{n(n-1)}},$$

где Σ_{VIII} – сумма VIII столбца табл. 2.2.2;

n – число накрений судна.

Доверительный интервал изменения метацентрической высоты находится по формуле:

$$\delta \bar{h} = \pm t_{\alpha n} \cdot \sigma,$$

где $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности α и числа измерений n .

При $n = 6$ коэффициент Стьюдента имеют следующие значения:

α	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
n	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0

Расчетное значение метацентрической высоты принимается равным

$$h_o = h - \delta \bar{h}.$$

Перевести полученное в опыте значение метацентрической высоты на натуру.

Аппликата центра тяжести натурального судна в условиях опыта определяется по формуле:

$$z_{go} = r_o + z_{co} - h_o,$$

где r_o и z_{co} находятся по КЭТЧ.

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Дайте определение мореходному качеству «стойчивость судна».
2. Объясните понятие «начальная стойчивость судна».
3. Что такое метацентрическая высота?
4. Почему метацентрическая высота является мерой начальной стойчивости судна?
5. Что такое центр величины судна?
6. Что такое метациентр судна?
7. Запишите соотношение, связывающее аппликату центра величины, метацентрический радиус, аппликату центра тяжести и метацентрическую высоту.
8. Как определяется аппликата центра величины и метацентрический радиус в судовых условиях?
9. Что необходимо знать для определения аппликаты центра тяжести судна при заданной схеме его загрузки?
10. Каково назначение опыта кренования судна?

11. Запишите зависимость, связывающую массу перемещаемого груза, плечо переноса, водоизмещение судна, метацентрическую высоту и угол крена. До каких углов крена можно пользоваться этой зависимостью?

Литература

1. Якута И.В. Теория и устройство судна. Раздел «Теория судна». Часть 1: учеб. пособие по самостоятельному изучению дисциплины «Теория и устройство судна» для студентов специальности 26.05.05. «Судовождение» [Текст]. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020.

2. Жинкин, В.Б. Теория и устройство корабля [Текст]: учебник / В.Б. Жинкин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с. (или 4-е изд., испр. и доп. – 2010. – 408 с.).

3. Мореходные качества рыболовных судов. Теория и задачи [Текст]: учеб. пособие / В.Д. Кулагин, А.Г. Валишин, Т.В. Кордас, И.В. Якута – Калининград: Изд-во БГАРФ, – 2005.

4. Кулагин, В.Д. Теория и устройство промысловых судов [Текст]: учебник / В.Д. Кулагин. – 2-е изд., перераб. и доп.– Л.: Судостроение, 1986.– 392 с.

5. Маков, Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? (Диалоги с капитаном) [Текст] / Ю.Л. Маков. – СПб.: Судостроение, 2005. – 320 с.

6. Правила классификации и постройки морских судов [Электронный ресурс]. – ч. IV. Остойчивость. [Российский Морской Регистр Судоходства, 2021]. – Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/>.

7. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОСНС 2008 года) (резолюция MSC.267(85) с поправками) – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. – 242 с.

Лабораторная работа № 3. Влияние на посадку и остойчивость судна приёма (снятия) малого груза

Цель работы: изучение влияния на посадку и остойчивость судна типичной грузовой операции – приёма или снятия малого груза, закрепление теоретического материала.

Основные теоретические положения

В теории судна *под малыми* понимают *грузы*, при приёме или расходовании которых борта судна в районе переменной ватерлинии можно считать вертикальными, так как не изменяется площадь действующей ватерлинии.

Масса малого груза, как правило, не превышает 10-12 % водоизмещения судна [1; 13].

При приёме или снятии малого груза меняются остойчивость и посадка судна. Решение задачи в общем случае является затруднительным. Поэтому приём малого груза условно разделяют на две операции. Вначале полагают, что груз принят на заданный уровень так, чтобы крен и дифферент судна не изменились. Затем груз перемещают в горизонтальной плоскости (на заданном уровне) в заданную точку. Просуммировав результаты этих операций, получают параметры судна после приёма груза в заданную точку.

При приёме груза массой m (весом p) изменяются плечи статической остойчивости, метацентрической высоты, посадка и водоизмещение судна [1; 4; 13].

Объёмное водоизмещение и массу судна до приёма груза обозначим V и M , после приёма – $V + v$ и $M + m$.

Первая операция. Найдём точку, в которую должен быть принят груз, чтобы не происходило наклонов судна. В этом случае принятый груз массой m вызовет только погружение судна на величину δT (рис. 2.3.1, *a*). В соответствии с законом Архимеда $p = \gamma \cdot v$. Дополнительный объём v можно считать цилиндром с основанием S и высотой δT .

Поскольку центр тяжести цилиндра лежит на половине его высоты и на одной вертикали с центром тяжести основания, точка приложения дополнительной силы поддержания γv располагается посередине δT над центром тяжести площади действующей ватерлинии. Если центр тяжести груза расположен не над центром тяжести пло-

щади ватерлинии, появляются кренящий и дифференцирующие моменты, равные (рис. 2.3.1, б, в):

$$M_{кр} = py \cos \theta, \quad M_{д} = p(x - x_F) \cos \psi.$$

Приём груза не будет вызывать наклонов судна только тогда, когда $x = x_F$ и $y = 0$, т. е. когда центр тяжести груза и центр тяжести ватерлинии располагаются на одной вертикали.

Прием груза на одну вертикаль с центром тяжести площади ватерлинии приводит к изменению средней осадки и остойчивости судна [1; 12].

Изменение средней осадки найдём по формуле:

$$\delta T = \frac{p}{\gamma \cdot S} = \frac{m}{\rho \cdot S} = \frac{m}{100 \cdot q}, \quad (3.1)$$

где p – вес принятого груза;

m – масса принятого груза;

S – площадь действующей ватерлинии, определяется по кривым элементам теоретического чертежа в зависимости от средней осадки судна;

γ, ρ – удельный вес и плотность забортной воды;

q – число тонн на 1 см осадки, определяется по кривым элементов теоретического чертежа в зависимости от средней осадки или рассчитывается по формуле:

$$q = 0,01 \rho S.$$

Изменение метацентрической высоты определяется по формуле:

$$\delta h = \delta r + \delta z_c - \delta z_g, \quad (3.2)$$

где $\delta r, \delta z_c, \delta z_g$ – приращение метацентрического радиуса и аппликат центра величины и центра тяжести судна.

Учитывая, что в районе переменной ватерлинии при приеме малого груза борта судна можно считать вертикальными, приращение метацентрического радиуса будет

$$\delta r = \frac{I_x}{V+v} - \frac{I_x}{v} = -\frac{v}{V+v} \cdot \frac{I_x}{V} = -\frac{m}{M+m} r. \quad (3.3)$$

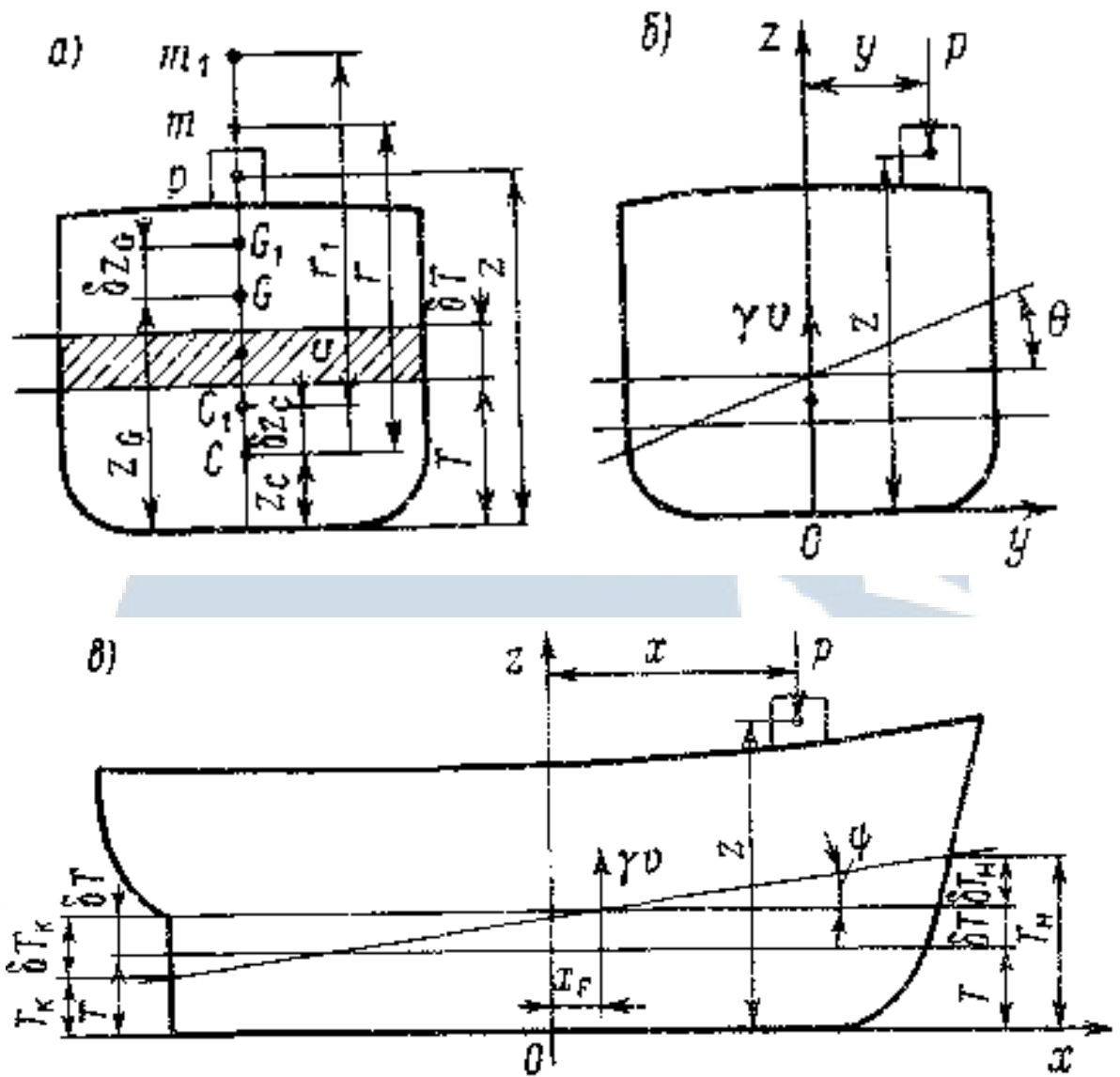


Рис. 2.3.1. Прием малого груза [13]:
 а – без изменения крена и дифферента;
 б – поперечное перемещение;
 в – продольное перемещение

Приращение аппликаты центра величины судна δz_c можно найти из уравнения статических моментов объёмов относительно какой - либо горизонтальной плоскости сравнения. В нашем случае за плоскость сравнения целесообразно принять плоскость, проходящую через точку С – центр величины судна до приёма груза.

Тогда уравнение моментов объёмов примет вид:

$$(V + v)\delta z_c = V \cdot 0 + v(T + \frac{\delta T}{2} - z_c),$$

откуда

$$\delta z_c = \frac{v}{V+v} \left(T + \frac{\delta T}{2} - z_c \right) = \frac{m}{M+m} \left(T + \frac{\delta T}{2} - z_c \right). \quad (3.4)$$

Составив уравнение моментов масс относительно горизонтальной плоскости, проходящей через центр тяжести судна до приема груза, получим:

$$(M+m)\delta z_g = M \cdot 0 + m(z - z_g),$$

откуда

$$\delta z_g = \frac{m}{M+m} (z - z_g). \quad (3.5)$$

Подставив (3.3), (3.4), и (3.5) в выражение (3.2), получаем

$$\delta h = \frac{m}{M+m} \left(-r + T + \frac{\delta T}{2} - z_c - z + z_g \right) = \frac{m}{M+m} \left(T + \frac{\delta T}{2} - z - h \right).$$

Окончательно

$$\delta h = \frac{m}{M+m} \left(T + \frac{\delta T}{2} - z - h \right). \quad (3.6)$$

Таким же путем можно получить формулу приращения продольной метацентрической высоты:

$$\delta H = \frac{m}{M+m} \left(T + \frac{\delta T}{2} - z - H \right). \quad (3.7)$$

$$\text{При } z = T + \frac{\delta T}{2} - h \quad \delta h = 0,$$

$$\text{при } z > T + \frac{\delta T}{2} - h \quad \delta h < 0,$$

$$\text{при } z < T + \frac{\delta T}{2} - h \quad \delta h > 0.$$

Уравнение $z = T + \frac{\delta T}{2} - h$, является уравнением горизонтальной плоскости, называемой в теории судна *предельной плоскостью*.

Из приведённых выше соотношений следует, что приём груза в предельную плоскость не изменяет начальной остойчивости судна, приём груза выше предельной плоскости уменьшает начальную остойчивость, приём груза ниже предельной плоскости увеличивает её.

Поскольку предельная плоскость проходит несколько выше или ниже ватерлинии, размещение на палубе улова и сетей всегда связано со снижением остойчивости судна [13].

$$\text{Так как } H \gg T + \frac{\delta T}{2} - z, \text{ то } \delta H \approx -\frac{m}{M+m} H,$$

откуда $(M+m)H_1 \approx MH$ или $(\Delta+p)H_1 \approx \Delta H$.

Следовательно, коэффициент продольной остойчивости при приёме малого груза не меняет своего значения [1; 13].

Вторая операция. В результате выполнения первой операции малый груз оказался в точке с координатами x_F , 0 и z . Перемещение груза в заданную точку с координатами x , y и z приведёт к изменению крена и дифферента судна, которые можно определить по формулам поперечного и продольного перемещения, заменив в них l_y на y , l_x на $x-x_F$:

$$\theta^0 = 57,3 \frac{my}{M_1 h_1} = 57,3 \frac{my}{(M+m)(h+\delta h)}. \quad (3.8)$$

$$d = \frac{m(x-x_F)}{MH} L_{III} \quad \text{или} \quad d = \frac{p(x-x_F)}{m_D}. \quad (3.9)$$

Приращение осадок носом и кормой вычисляется по формулам:

$$\delta T_n = \left(\frac{L_{III}}{2} - x_F \right) \frac{d}{L_{III}} = \left(\frac{L_{III}}{2} - x_F \right) \frac{m(x-x_F)}{MH};$$

$$\delta T_k = \left(\frac{L_{III}}{2} + x_F \right) \frac{d}{L_{III}} = \left(\frac{L_{III}}{2} + x_F \right) \frac{m(x-x_F)}{MH}. \quad (3.10)$$

Осадки носом и кормой после приёма груза будут:

$$T_n = T + \delta T + \left(\frac{L_{III}}{2} - x_F \right) \frac{d}{L_{III}};$$

$$T_k = T + \delta T - \left(\frac{L_{III}}{2} + x_F \right) \frac{d}{L_{III}}. \quad (3.11)$$

Если происходит не приём, а снятие малого груза, то во всех полученных формулах перед m необходимо ставить минус [1].

Если угол крена получился больше $10^\circ \div 12^\circ$, то для его определения необходимо использовать диаграмму статической остойчивости.

Методика проведения лабораторной работы

1. Исходное состояние модели (перед приёмом малого груза) принять таким, как в лабораторной работе № 2.

Модель имеет: M_0 , $T_{н0}$, $T_{к0}$, T_0 (из 2 лабораторной работы). Метacentрическую высоту в исходном состоянии h_0 взять из опыта кренования модели без учёта абсолютной погрешности опыта, т. е. принять её равной \bar{h}_0 .

2. Груз массой $m_{гр} = 0,49$ кг для первой модели и $m_{гр} = 0,50$ кг – для второй модели, поместить в точку с координатами $x = -0,20$ м, $y = 0,025$ м и $z = 0,15$ м.

Замерить по мерным линейкам осадки оконечностей T_n и T_k и снять показания на линейках $z_{нб}$ и $z_{лб}$ (на миделе).

Масса модели после приёма груза: $M = M_0 + m_{гр}$.

3. Груз переместить в точку с координатами $x = -0,20$ м, $y = 0$ м и $z = 0,15$ м, т. е. поместить его в диаметрально плоскость модели и произвести кренование модели. Для опытного определения h выполнить шесть наклонов модели.

4. Измеренные параметры посадки судна после приема груза заносятся в табл. 2.3.1.

5. Результаты размеров $z_{нбi}$ и $z_{лбi}$ после кренования модели записываются в табл. 2.3.2.

Таблица 2.3.1

Вычисление приращения параметров посадки судна после приема груза

Определяемая величина	Параметры посадки после приема груза		Изменение параметров посадки, вызванное приемом груза	
	Обозначение или формула	Численное значение	Обозначение или формула	Численное значение
I	II	III	IV	V
Осадка носом	T_n		$\delta T_n = T_n - T_{н0}$	
Осадка кормой	T_k		$\delta T_k = T_k - T_{к0}$	
Средняя осадка	$T = (T_n + T_k) / 2$		$\delta T = T - T_0$	
Показания отвеса ПБ	$z_{нбi}$		-	
Показания отвеса ЛБ	$z_{лбi}$		-	
Угол крена	$\theta_i = 57,3 \frac{ z_{нбi} - z_{лбi} }{a}$		θ°	

Таблица 2.3.2

**Вычисление приращения поперечной
метацентрической высоты после приема груза**

№ опы та	$z_{пбi},$ см	$z_{лбi},$ см	$ z_{пбi} - z_{лбi} ,$ см	$\theta_i = \frac{ z_{пбi} - z_{лбi} }{a},$ рад	$m_i,$ кг	$l_i,$ м	$m_i l_i,$ кг·м	$h_i = \frac{m_i l_i}{M \theta_i},$ м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
3								
4								
5								
6								
								Σ_{IX}
$h = \frac{1}{6} \sum_{ix} =$ м; $\delta h = h - h_0 =$ м								

По результатам опыта определить значение метацентрической высоты h .

Сделать вывод о том, удовлетворяет ли полученное значение h требованиям ИМО и Правил Морского Регистра судоходства.

В конце работы построить график зависимости кренящего момента $M_{кр}$ от угла крена θ .

Расчётная часть

В табл. 2.3.1 по измеренным $T_n, T_k, z_{пб}, z_{лб}$ рассчитываются $\delta T_n, \delta T_k, \delta T$ и θ^0 .

В табл. 2.3.2 по замеренным $z_{пбi}, z_{лбi}, m_i$ и l_i определяется значение метацентрической высоты при приеме малого груза.

Затем определяется приращение поперечной метацентрической высоты δh .

По формулам, приведенным выше, рассчитываются δT (3.1), δh (3.6), θ^0 (3.8), δT_n и δT_k (3.10).

Полученные теоретические значения приращений параметров посадки и остойчивости модели от приёма груза сравниваются с опытными.

При определении приращений осадок носом и кормой в формулах следует продольную метацентрическую высоту H заменить на продольный метацентрический радиус R , так как

$$R \gg z_{g0} - z_{c0} \text{ и } H \approx R,$$

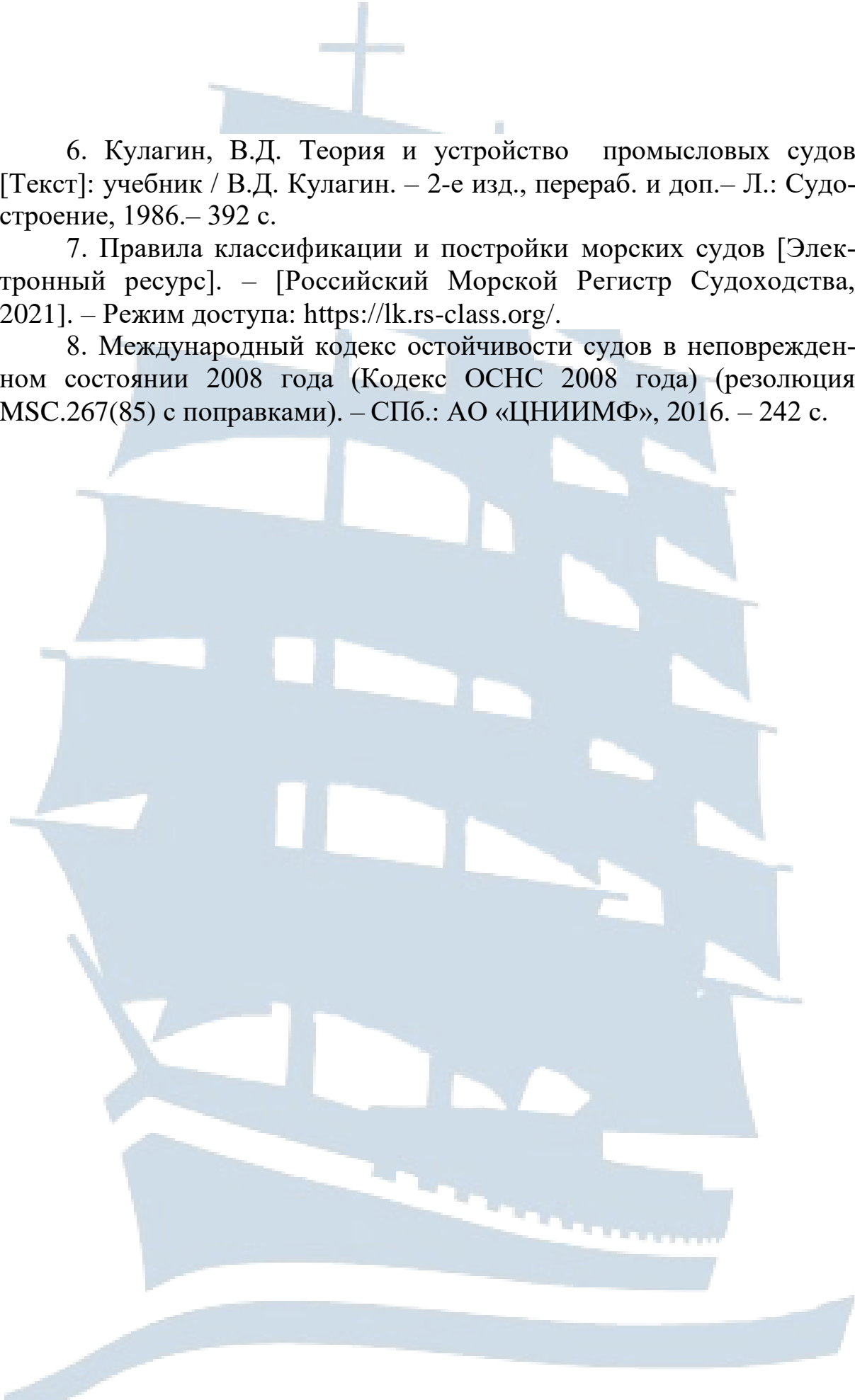
где R^H – метацентрический радиус судна, который находится по кривым элементов теоретического чертежа для средней осадки судна T^H .

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Какой груз в теории судна принято называть малым?
2. Запишите формулу для приращения средней осадки, метацентрических высот, угла крена и дифферента при снятии малого груза.
3. Запишите формулы для определения осадок оконечностей при приёме малого груза.
4. Что такое предельная плоскость?
5. Почему ухудшается остойчивость при обледенении?
6. Как изменяется остойчивость судна после заполнения (осушения) балластных цистерн двойного дна?
7. Покажите, что коэффициент продольной остойчивости не изменяется при приёме или снятии малого груза.
8. Как изменяется коэффициент поперечной остойчивости при приёме (снятии) малого груза выше (ниже) предельной плоскости?

Литература

1. Якута И.В. Теория и устройство судна. Раздел «Теория судна». Часть 1: учеб. пособие по самостоятельному изучению дисциплины «Теория и устройство судна» для студентов специальности 26.05.05. «Судовождение» [Текст]. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020.
2. Жинкин, В.Б. Теория и устройство корабля [Текст]: учебник / В.Б. Жинкин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с. (или 4-е изд., испр. и доп. – 2010. – 408 с.).
3. Мореходные качества рыболовных судов. Теория и задачи [Текст]: учеб. пособие / В.Д. Кулагин, А.Г. Валишин, Т.В. Кордас, И.В. Якута. – Калининград: Изд-во БГАРФ, – 2005.
4. Статика корабля [Текст]: учеб. пособие / Р.В. Борисов [и др.] – СПб.: Судостроение, 2005. – 256 с.
5. Маков, Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? (Диалоги с капитаном) [Текст] / Ю.Л. Маков. – СПб.: Судостроение, 2005. – 320 с.



6. Кулагин, В.Д. Теория и устройство промысловых судов [Текст]: учебник / В.Д. Кулагин. – 2-е изд., перераб. и доп.– Л.: Судостроение, 1986.– 392 с.

7. Правила классификации и постройки морских судов [Электронный ресурс]. – [Российский Морской Регистр Судостроения, 2021]. – Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/>.

8. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОЧС 2008 года) (резолюция MSC.267(85) с поправками). – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. – 242 с.

Лабораторная работа № 4. Влияние на посадку и остойчивость судна приёма (снятия) большого груза

Цель работы: изучение влияния приёма и снятия большого груза на посадку и остойчивость судна.

Основные теоретические положения

После приёма груза объёмное водоизмещение судна получает приращение, равное объёму корпуса, заключённому между конечной (после приёма груза) и начальной (до приёма груза) ватерлиниями [13].

Площадь ватерлинии при переходе от осадки T_0 к осадке T_1 изменяется значительно и поэтому формулы для малого груза дают большие погрешности. Для определения остойчивости и посадки судна **при приёме или снятии большого груза** пользуются кривыми элементов теоретического чертежа (КЭТЧ), диаграммами посадок, интерполяционными кривыми. Для СРТМ «Маяк» используем диаграмму Фирсова-Гундобина.

КЭТЧ позволяют определить среднюю осадку и метацентрическую высоту судна после приема большого груза m [1; 13].

Для этого необходимо найти новое водоизмещение судна $M_1 = M + m$, отложить его по горизонтальной оси кривых элементов теоретического чертежа в масштабе грузового размера (рис. 2.4.1) и из полученной точки восстановить перпендикуляр до пересечения с грузовой кривой (кривая M). Через точку пересечения проводится горизонтальная линия. Пересечение горизонтальной линии с осью ординат дает новую среднюю осадку судна T_1 .

Тогда изменение средней осадки при приеме или снятии большого груза определяется по формуле:

$$\delta T = T_1 - T,$$

где T_1 – средняя осадка после приема (снятия) большого груза;

T – средняя осадка судна до грузовой операции.

Расстояния от оси ординат до кривых r и z_c , измеренные на уровне T_1 , представляют собой в масштабе новые значения метацентрического радиуса r_1 и аппликаты центра величины z_{c1} .

Подсчитав аппликату центра тяжести судна после приема груза:

$$z_{g1} = (Mz_g + mz) / M_1, \quad (4.1)$$

Абсцисса центра тяжести судна находится по формуле:

$$x_{gl} = (Mx_g + mx)/M_1, \quad (4.3)$$

где x – абсцисса центра тяжести принимаемого груза;

x_g – абсцисса центра тяжести судна в начальном состоянии.

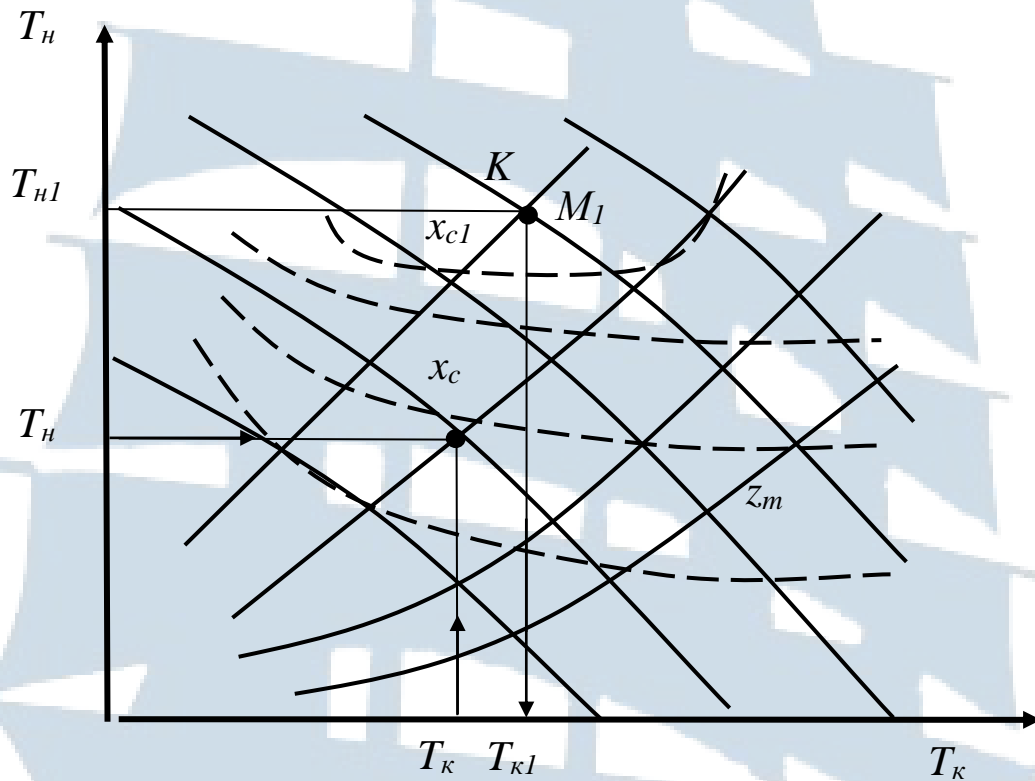


Рис. 2.4.2. Определение посадки и остойчивости судна при приеме большого груза по диаграмме Фирсова-Гундобина

Определив M_1 и x_{c1} , на диаграмме Фирсова-Гундобина находят точку пересечения соответствующих кривых (точка K). Спроецировав точку K на координатные оси, получают осадку судна носом T_{n1} и кормой T_{k1} после приема груза.

Тогда изменение осадок носом, кормой и средней осадки определяется как:

$$\delta T_n = T_{n1} - T_n;$$

$$\delta T_k = T_{k1} - T_k;$$

$$\delta T = \frac{\delta T_n + \delta T_k}{2}.$$

Метацентрическая высота после приема груза определяется по формуле:

$$h_1 = z_{m1} - z_{g1}, \quad (4.4)$$

где z_{m1} – аппликата поперечного метацентра, снимаемая с кривой, проходящей через точку K .

Методика проведения лабораторной работы

1. Исследовать расчётным путём влияние приёма большого груза на характеристики остойчивости и посадку судна.

1.1. Исходное состояние модели принять таким, как в лабораторной работе № 2, M_0 , $T_{н0}$, $T_{к0}$, T_0 .

Груз массой $m_{gp}^H = 250$ т принят в точку с координатами в масштабе натурального судна $x^H = -6,5$ м, $y^H = 0$, $z^H = 4,25$ м.

1.2. Пользуясь кривыми элементов теоретического чертежа, зная водоизмещение судна с принятым грузом $M_1 = M_0 + m_{gp}$, по кривой грузового размера определить осадку судна T_1 , а затем величины r_1 и z_{c1} .

Возвышение центра тяжести судна с принятым грузом определяется по формуле:

$$z_{g1}^H = \frac{M_0^H \cdot z_{g0}^H + m_{gp}^H \cdot z^H}{M_0^H + m_{gp}^H},$$

где z_{g0} – аппликата центра тяжести порожней модели (берем из лабораторной работы № 2, без учета погрешности).

Определить метацентрическую высоту судна с принятым грузом по формуле:

$$h_1^H = r_1 + z_{c1} - z_{g1}^H.$$

1.3. Найти метацентрическую высоту судна с принятым грузом h_2^H с учётом дифферента, используя диаграмму начальной остойчивости (рис. 1.5)

$$h_2^H = z_m - z_{g1}^H,$$

где z_m – аппликата центра тяжести судна, которая определяется по диаграмме (рис. 1.5) как точка пересечения M_1 и x_{g1} .

Значение x_{g1} для нахождения z_m рассчитать по формуле:

$$x_{g1}^H = \frac{M_0^H x_{g0}^H + m_{gp}^H x^H}{M_0^H + m_{gp}^H},$$

где x_{g0} – абсцисса центра тяжести судна порожнем, берем из 2 лабораторной работы.

1.4. Пользуясь диаграммой посадок (рис. 1.4), найти осадки судна на носом (T_n^H) и кормой (T_k^H) после приёма большого груза.

2. Исследовать экспериментально влияние приёма большого груза на остойчивость и посадку модели судна.

2.1. Проверить соответствие посадки модели исходным данным, установить поперечную штангу на уровне $z_{nu} = 0,14$ м, а продольную штангу – на уровне $z_{np.u} = 0,24$ м.

2.2. Принять на модель груз массой m_{gp} в точку с координатами x_l, y_l, z_l .

Массу и координаты принятого груза в масштабе модели определить по формулам:

$$m_{gp} = C_l^3 \cdot m^H;$$

$$x = C_l \cdot x^H;$$

$$y = C_l \cdot y^H;$$

$$z = C_l \cdot z^H.$$

Выполнить опыт кренования модели и найти опытное значение метацентрической высоты h^M .

Результаты замеров $z_{n\delta i}$ и $z_{l\delta i}$ при креновании модели записать в табл. 2.4.1.

Измерить посадки оконечностей модели T_n^M и T_k^M .

2.3. Характеристики посадки и начальной остойчивости модели пересчитать на натуральное судно.

3. Заполнить отчётный бланк лабораторной работы и сравнить полученные опытные значения с рассчитанными теоретическим путём (табл. 2.4.2).

Таблица 2.4.1

Определение поперечной метацентрической высоты после приема большого груза

№ опыта	$z_{n\delta i}$, см	$z_{l\delta i}$, см	$z_{n\delta i} - z_{l\delta i}$, см	$\theta_i = \frac{ z_{n\delta i} - z_{l\delta i} }{a}$, рад	m_i , кг	l_i , м	$m_i l_i$, кг·м	$h_i = \frac{m_i \cdot l_i}{(M_0 + m_{gp})\theta_i}$, м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Отчетный бланк лабораторной работы

Ожидаемые характеристики посадки и остойчивости				Опытные характеристики посадки и остойчивости (в переводе на натуру)			Погрешности x 100 %				
h_1^H	h_2^H	T_H^H	T_K^H	h^M	T_H^M	T_K^M	$\frac{h_1^H - h_2^H}{h_1^H}$	$\frac{h_1^H - h^M}{h_1^H}$	$\frac{h_2^H - h^M}{h_2^H}$	$\frac{T_H^H - T_H^M}{T_H^H}$	$\frac{T_K^H - T_K^M}{T_K^H}$
М	М	М	М	М	М	М					

Сделать вывод о том, удовлетворяет ли полученное значение h требованиям ИМО и Правил Морского Регистра судоходства.

В конце работы построить график зависимости кренящего момента $M_{кр}$ от угла крена θ .

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Назовите характерные для промысловых судов грузовые операции, связанные с приёмом (снятием) большого груза.
2. Как определяются характеристики остойчивости судна при приёме (снятии) большого груза?
3. Почему при приёме большого груза нельзя пользоваться формулами приёма малого груза?
4. Как сказывается на характеристиках поперечной остойчивости дифферент судна?

Литература

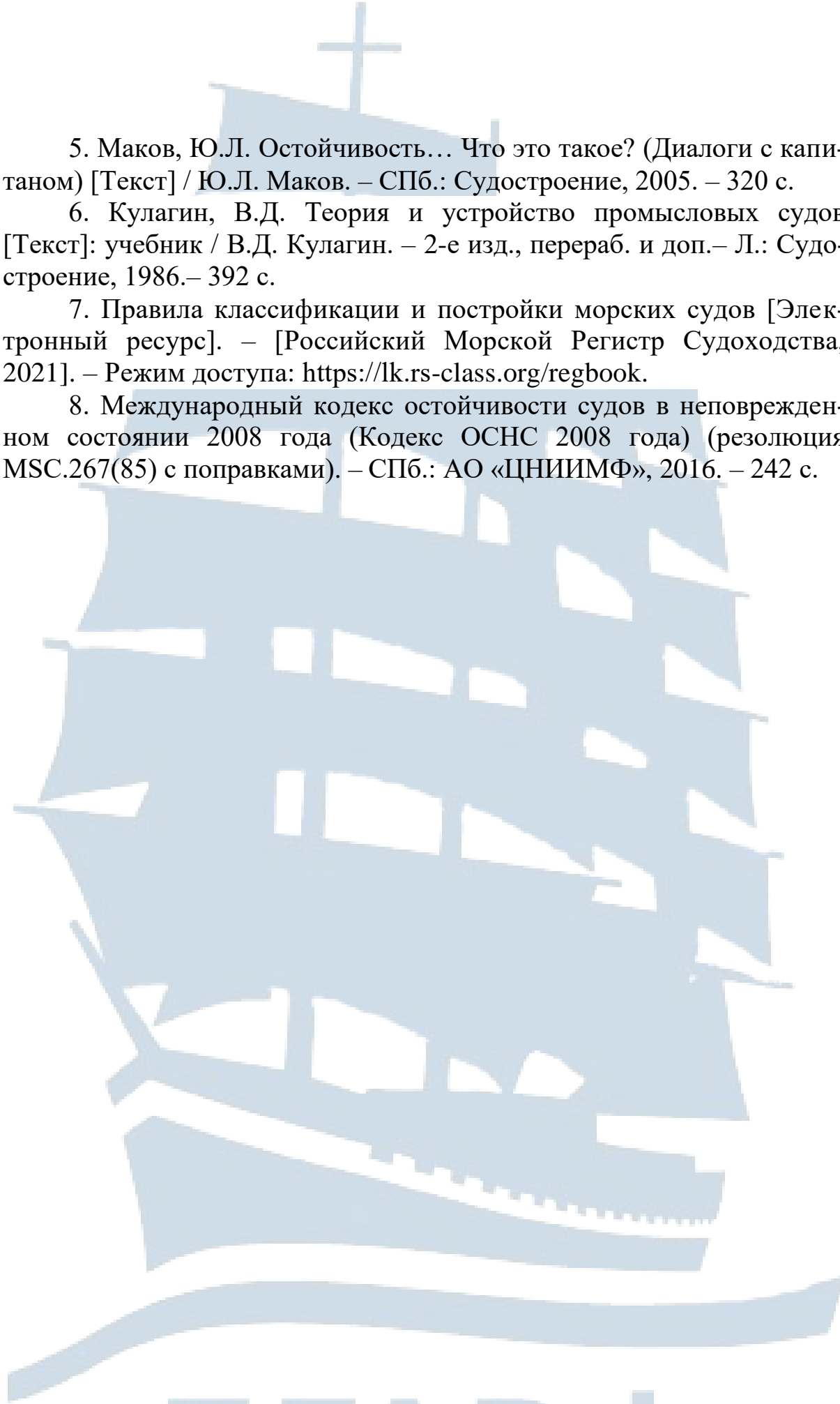
1. Якута И.В. Теория и устройство судна. Раздел «Теория судна». Часть 1: учеб. пособие по самостоятельному изучению дисциплины «Теория и устройство судна» для студентов специальности 26.05.05. «Судовождение» [Текст]. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020.
2. Жинкин, В.Б. Теория и устройство корабля [Текст]: учебник / В.Б. Жинкин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с. (или 4-е изд., испр. и доп. – 2010. – 408 с.).
3. Мореходные качества рыболовных судов. Теория и задачи [Текст]: учеб. пособие / В.Д. Кулагин, А.Г. Валишин, Т.В. Кордас, И.В. Якута. – Калининград: Изд-во БГАРФ, – 2005.
4. Статика корабля [Текст]: учебное пособие / Р.В. Борисов [и др.] – СПб.: Судостроение, 2005. – 256 с.

5. Маков, Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? (Диалоги с капитаном) [Текст] / Ю.Л. Маков. – СПб.: Судостроение, 2005. – 320 с.

6. Кулагин, В.Д. Теория и устройство промысловых судов [Текст]: учебник / В.Д. Кулагин. – 2-е изд., перераб. и доп.– Л.: Судостроение, 1986.– 392 с.

7. Правила классификации и постройки морских судов [Электронный ресурс]. – [Российский Морской Регистр Судостроения, 2021]. – Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook>.

8. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОСНС 2008 года) (резолюция MSC.267(85) с поправками). – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. – 242 с.



Лабораторная работа № 5. Влияние на посадку и остойчивость судна перемещения груза

Цель работы: изучение влияния на остойчивость и посадку судна типичной грузовой операции – перераспределения грузов на судне и закрепление теоретического материала.

Основные теоретические положения

Экипажу судна довольно часто приходится сталкиваться с операциями перемещения грузов на судне. Перемещение грузов (перекачка балласта, доставка продукции из обрабатывающего цеха в трюм и т. п.) вызывает изменение посадки и начальной остойчивости судна [1; 13].

Грузовой операцией будем называть любое перемещение груза, его прием, снятие или расходование.

Вертикальный перенос груза. Эта грузовая операция не влечет за собой изменения посадки судна, поскольку не сопровождается появлением моментов, поворачивающих судно относительно осей ox и oy . Однако при этом изменится начальная остойчивость, так как перемещение груза массой m вдоль оси oz приводит к изменению метацентрических высот и плеч статической остойчивости [1; 13].

При вертикальном перемещении груза весом p (массой m) из положения 1 в положение 2 (рис. 2.5.1, *a*) центр массы судна смещается также по вертикали на расстояние

$$\delta z_g = \frac{p}{\Delta}(z_2 - z_1) = \frac{p}{\Delta} l_z = \frac{m}{M} l_z. \quad (5.1)$$

Так как элементы объемного водоизмещения – метацентрический радиус и аппликата ЦВ остаются неизменными, следовательно, приращение метацентрических высот составит:

$$\delta h = \delta H = -\delta z_g = -\frac{m}{M} l_z. \quad (5.2)$$

Тогда новые метацентрические высоты будут

$$h_1 = h + \delta h, \quad H_1 = H + \delta H. \quad (5.3)$$

Учитывая, что $H \gg \delta H$, при расчетах дифферента принимают $H_1 \approx H$. Из формул видно, что подъем груза ухудшает остойчивость судна, а опускание улучшает её.

Поперечный перенос груза в горизонтальной плоскости. При такой грузовой операции положение ЦТ судна по высоте не изменяется, сохраняются неизменными метацентрические высоты h и H . Поперечное горизонтальное перемещение груза вызывает изменение крена судна [3].

При поперечном горизонтальном перемещении груза весом p (массой m) из точки 1 в точку 2 (рис. 2.5.1, б) возникает кренящий момент:

$$M_{кр} = p(y_2 - y_1) \cos \theta = pl_y \cos \theta. \quad (5.4)$$

Используя метацентрическую формулу устойчивости

$$M_{\epsilon} = \Delta h \sin \theta$$

и соотношение $M_B = M_{кр}$, получаем $\Delta h \sin \theta = pl_y \cos \theta$, откуда

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{pl_y}{\Delta h}.$$

При малых углах крена, при которых используется метацентрическая формула устойчивости, $\operatorname{tg} \theta \approx \theta$.

Поэтому

$$\theta = \frac{pl_y}{\Delta h} = \frac{ml_y}{Mh},$$

$$\theta^{\circ} = 57,3 \frac{pl_y}{\Delta h} = 57,3 \frac{ml_y}{Mh}. \quad (5.5)$$

Продольное горизонтальное перемещение груза приводит к изменению дифферента судна. При продольном горизонтальном перемещении груза весом p (массой m) из точки 1 в точку 2 (рис. 2.5.1, в) на расстояние l_x :

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{pl_x}{\Delta H}, \quad (5.6)$$

где l_x – расстояние переноса груза вдоль судна, $l_x = (x_2 - x_1)$.

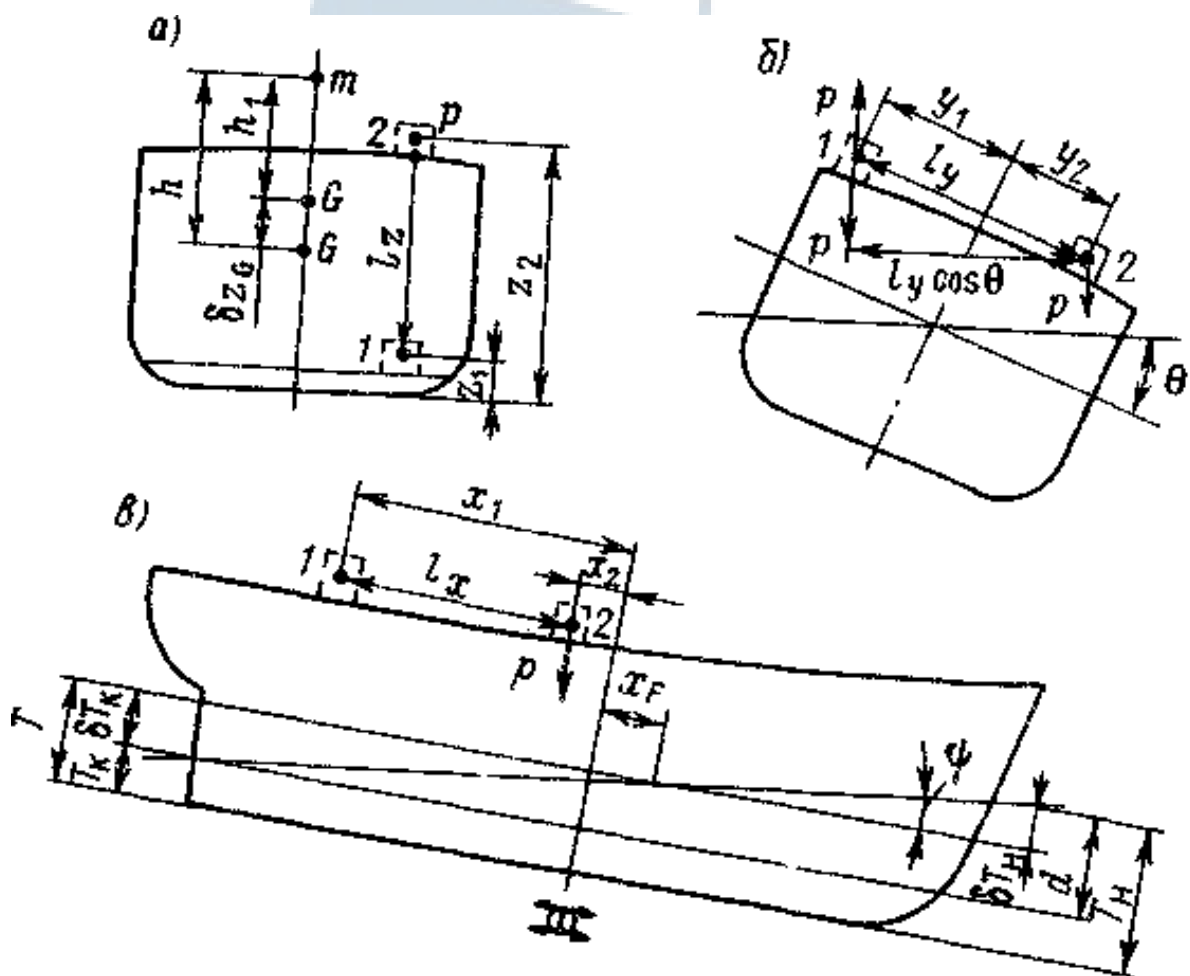


Рис. 2.5.1. Перемещение грузов:
 а – вертикальное; б – поперечное; в – продольное

На практике продольные наклонения судна чаще оценивают величиной дифферента. При перемещении груза вдоль судна изменение дифферента будет

$$d = \frac{pl_x}{\Delta H} L_{\text{ПП}} = \frac{ml_x}{MH} L_{\text{ПП}}. \quad (5.7)$$

Для удобства расчета дифферента вводится понятие о моменте m_d , дифферентующем судно на 1см [1]. Значение этого момента можно получить из формулы (5.7), в которую следует подставить

$$d = 0,01 \text{ м, } pl_x = m_d \text{ и } H \approx R:$$

$$0,01 = \frac{m_d L_{\text{ПП}}}{\Delta R} \quad \text{откуда} \quad m_d = \frac{\Delta R}{100 L_{\text{ПП}}}.$$

Все величины, входящие в формулу для m_D , зависят только от осадки судна, что позволяет заранее подсчитать зависимость от осадки судна момента, дифференцирующего на 1 см. Кривая $m_D(T)$ входит в состав кривых элементов теоретического чертежа или грузовую шкалу. Определение дифферента с использованием момента, дифференцирующего на 1 см, производят по формуле:

$$d = pl_x/m_D.$$

Поскольку ось продольных наклонений проходит на расстоянии x_F от миделя, изменения осадок носом и кормой находятся по формулам:

$$\delta T_H = \left(\frac{L_{ПП}}{2} - x_F\right) \operatorname{tg} \psi = \left(\frac{L_{ПП}}{2} - x_F\right) \frac{d}{L_{ПП}}, \quad (5.8)$$

$$\delta T_K = \left(\frac{L_{ПП}}{2} + x_F\right) \operatorname{tg} \psi = \left(\frac{L_{ПП}}{2} + x_F\right) \frac{d}{L_{ПП}}. \quad (5.9)$$

Тогда новые осадки носом и кормой будут:

$$T_H = T + \left(\frac{L_{ПП}}{2} - x_F\right) \frac{d}{L_{ПП}}, \quad (5.10)$$

$$T_K = T - \left(\frac{L_{ПП}}{2} + x_F\right) \frac{d}{L_{ПП}}. \quad (5.11)$$

Произвольное перемещение груза может быть представлено геометрической суммой трёх перемещений: вертикального l_z , поперечного горизонтального l_y и продольного горизонтального l_x .

В теории поперечной остойчивости рассматриваются наклоны судна, происходящие в плоскости миделя, причем внешний, так называемый кренящий момент, также действует в плоскости миделя. На практике такой кренящий момент может возникнуть, например, от действия постоянного по силе ветра, направление которого совпадает с поперечной плоскостью судна – плоскостью миделя [1; 2].

В литературе по теории судна принято совмещать на рисунке сразу два положения судна – прямое и наклонное. Накрененному положению соответствует новое положение ватерлинии относительно судна в виде постоянного погруженного объема, однако форма подводной части наклоненного судна в данном случае не обладает симметрией: правый борт погружен больше левого. Все ватерлинии, соответствующие одному значению водоизмещения (при постоянном

весе судна), принято называть *равнообъемными*. При изучении остойчивости рассматривают так называемые равнообъемные наклонения, при которых водоизмещение судна остается постоянным, а меняется лишь форма подводной части судна.

Равнообъемные наклонения характеризуются плоскостью и осью наклонения. Ось наклонения – это прямая, относительно которой судно наклоняется; плоскость наклонения перпендикулярна к оси наклонения [13].

Проанализируем равнообъемное наклонение судна в поперечной плоскости на бесконечно малый угол $\delta\theta$ (рис. 2.5.2).

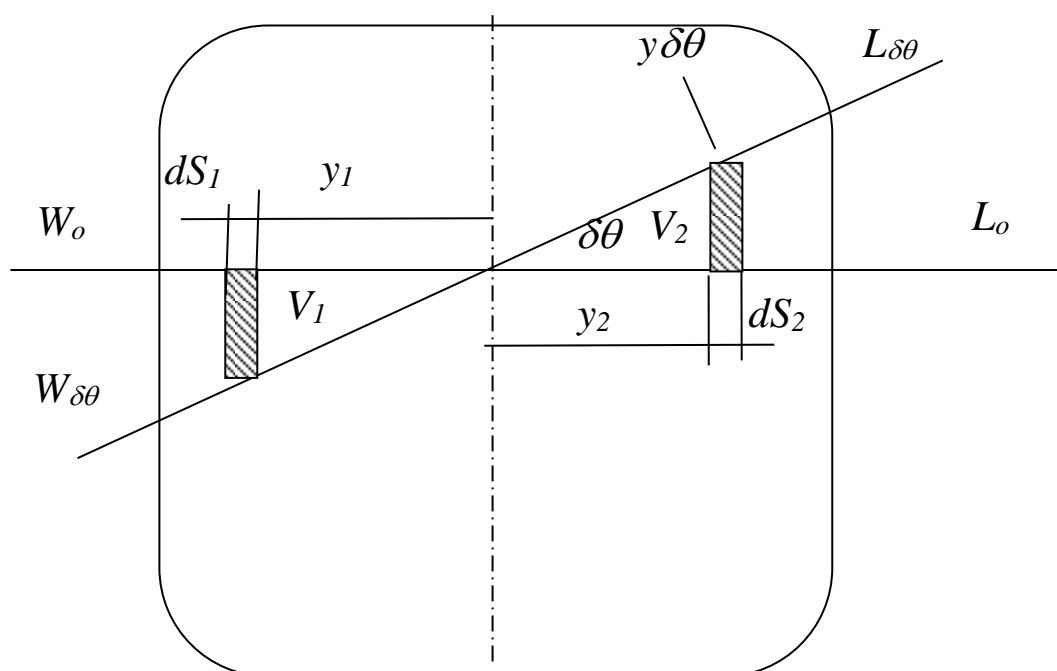


Рис. 2.5.2. Равнообъемные наклонения

Так как наклонение равнообъемное, то объемы вошедшего в воду и вышедшего из нее клиньев одинаковы:

$$V_1 = V_2 \quad (5.12)$$

В свою очередь, объемы V_1 и V_2 , можно записать

$$V_1 = \int_{S_1} dV_1 = \int_{S_1} y_1 \delta\theta dS_1 = \delta\theta \int_{S_1} y_1 dS_1, \quad (5.13)$$

$$V_2 = \int_{S_2} dV_2 = \delta\theta \int_{S_2} y_2 dS_2, \quad (5.14)$$

где $\delta V_i = dS_i y_i \delta\theta$ – объем элементарной призмы с основанием dS_i и высотой $y_i \delta\theta$;

$\delta\theta$ – угол наклона;

dS_i и y_i – элементарная площадка и ее отстояние от оси наклона соответственно.

Сопоставляя (5.12), (5.13) и (5.14), находим

$$\int_{S_1} y_1 dS_1 = \int_{S_2} y_2 dS_2. \quad (5.15)$$

Интегралы – статические моменты площадей S_1 и S_2 относительно оси поворота, т. е. $M_{S1} = M_{S2}$.

Откуда следует, что эта ось центральная, т. е. проходит через центр тяжести площади ватерлинии.

Теорема Эйлера формулируется так: ось равнообъемных наклонов при бесконечно малых углах наклона проходит через центр тяжести площади действующей ватерлинии.

Таким образом, при крене ось равнообъемных наклонов совпадает с диаметральной плоскостью судна, при дифференте она в общем случае не лежит в плоскости мидель-шпангоута, а располагается от него на расстоянии, равном абсциссе центра тяжести площади ватерлинии [1; 12].

Абсцисса центра тяжести площади ватерлинии определяется формулой

$$x_F = \frac{2}{S} \int_{-0,5L_{\text{гп}}}^{0,5L_{\text{гп}}} xy dx \approx \frac{2(\delta L)^2}{S} \left[10(y_0 - y_{20}) + 9(y_1 - y_{19}) + \dots + 0 \cdot y_{10} - \frac{10(y_0 - y_{20})}{2} \right].$$

Величина x_F является функцией осадки судна T . Зависимость $x_F(T)$ изображается на чертеже кривых элементов теоретического чертежа.

При наклонении судна в произвольной плоскости ось равнообъемных наклонов также будет проходить через центр тяжести F площади ватерлинии.

Следствие из теоремы Эйлера. Если повернуть плавающее судно на бесконечно малый угол относительно оси, проходящей через центр тяжести площади ватерлинии, то объем погруженной части судна не изменится.

Теорема справедлива для малых углов до $5-7^\circ$ наклонов относительно любой оси, т. е. и для дифферента. Для полностью погруженных судов теорема Эйлера справедлива вообще для любых углов наклона [1; 12].

Методика проведения лабораторной работы

1. Перемещаемый груз массой $m_{gp} = 0,337$ кг для первой модели и $m_{gp} = 0,40$ кг для второй модели должен находиться в носовом трюме.

Координаты центра тяжести груза составляют: $x = 0,17$ м; $y = 0$; $z = 0,025$ м.

В исходном положении груза модель не должна иметь крена. Для принятой начальной нагрузки модели замеряются по мерным линейкам 5 осадки оконечностей $T_{но}$ и $T_{ко}$.

Выполняется опыт кренования модели и определяется опытное значение метацентрической высоты h_o как среднеарифметическое из трех наклонений модели.

2. Затем груз m_{gp} перемещают из носового трюма на палубу юта.

Координаты центра тяжести груза после перемещения $x = -0,4$ м; $y = 0,025$ м; $z = 0,15$ м.

Для принятой конечной нагрузки модели замеряются по мерным линейкам 5 осадки оконечностей модели T_n и T_k и снимаются показания на линейках $z_{лб}$ и $z_{лб}$.

3. Груз перемещают по палубе юта поперек модели в диаметрально плоскость, т. е. в точку с координатами $x = -0,4$ м; $y = 0$; $z = 0,15$ м и производят кренование модели для опытного определения метацентрической высоты h .

После размещения груза в ДП модель не должна иметь крена. Для опытного определения h выполняется три наклонения модели.

Замеренные параметры посадки судна до и после перемещения груза заносятся в табл. 2.5.1.

Таблица 2.5.1

Вычисление изменения параметров посадки судна от перемещения груза

Определяемая величина	До перемещения груза		После перемещения груза		Изменение параметров посадки	
	Обозначение или формула	Численное значение	Обозначение или формула	Численное значение	Обозначение или формула	Численное значение
I	II	III	IV	V	VI	VII
Осадка носом	$T_{но}$		T_n		$\delta T_n = T_n - T_{но}$	
Осадка кормой	$T_{ко}$		T_k		$\delta T_k = T_k - T_{ко}$	
Средняя осадка	$T_0 = \frac{T_{но} + T_{ко}}{2}$		$T_0 = \frac{T_n + T_k}{2}$		$\delta T = T - T_0$	

Окончание табл. 2.5.1

I	II	III	IV	V	VI	VII
Показания отвеса ПБ	$z_{пбо}$		$z_{пб}$		-	
Показания отвеса ЛБ	$z_{лбо}$		$z_{лб}$		-	
Угол крена		$\theta = 0$	$\theta^\circ = 57,3 \frac{ z_{пб} - z_{лб} }{a}$		θ°	

4. Результаты замеров $z_{пб}$ и $z_{лб}$ при креновании модели до и после перемещения груза записываются в табл. 2.5.2.

Сделать вывод о том, удовлетворяет ли полученное значение h_o требованиям ИМО и Правил Морского Регистра судоходства.

В конце работы построить график зависимости кренящего момента $M_{кр}$ от угла крена θ .

Расчетная часть

В табл. 2.5.1 по измеренным $T_{но}$, T_n , $T_{ко}$, T_k , $z_{пбо}$, $z_{пб}$, $z_{лбо}$, и $z_{лб}$ рассчитываются изменения осадки носом δT_n и кормой δT_k , средней осадки δT и угол крена θ° , вызванные перемещением груза.

В табл. 2.5.2 по замеренным $z_{пбi}$, $z_{лбi}$, m_i и l_i производится расчет приращения поперечной метацентрической высоты.

Водоизмещение модели в условиях опыта составляет:

$$M = M_o + m.$$

Таблица 2.5.2

Вычисление приращения поперечной метацентрической высоты от перемещения груза

Состояние нагрузки модели	№ опыта	$z_{пбi}$, см	$z_{лбi}$, см	$ z_{пбi} - z_{лбi} $, см	θ , рад	m_i , кг	l_i , м	$m_i l_i$, кг·м	$h_i = \frac{m_i l_i}{M_i \theta_i}$, м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
До перемещения груза	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
	Σ								Σ_{0X}

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
После переме- щения груза	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
	Σ								Σ _X

Рассчитывается угол крена по формуле

$$\theta^{\circ} = 57,3 \frac{m_{zp} \cdot l_y}{M \cdot h}$$

и сравнивается с углом крена, полученным опытным путем.

В формулу подставляется метацентрическая высота из табл. 2.5.2.

Изменения осадок носом и кормой находятся по формулам:

$$\delta T_n \approx \left(\frac{L}{2} - x_F \right) \frac{m_{zp} \cdot l_x}{M \cdot R_o};$$

$$\delta T_k \approx \left(\frac{L}{2} + x_F \right) \frac{m_{zp} \cdot l_x}{M \cdot R_o}.$$

Для определения абсциссы центра тяжести площади ватерлинии x_F , продольного метацентрического радиуса R_o модели необходимо найти среднюю осадку судна T_o^H , войти с ней в кривые элементов теоретического чертежа и снять в соответствующих кривых x_F^H и R_o^H . Тогда для модели получим, что $x_F = x_F^H \cdot C_l$; $R_o = R_o^H \cdot C_l$.

Найденные по формулам значения δT_n и δT_k следует сравнить с полученными в ходе проведения опытов.

Средняя метацентрическая высота до перемещения груза находится по формуле:

$$\bar{h}_0 = \frac{1}{6} \sum_{0X}.$$

Средняя метацентрическая высота после перемещения груза находится по формуле:

$$\bar{h} = \frac{1}{6} \sum x.$$

Приращение поперечной метацентрической высоты находится по формуле:

$$\delta \bar{h} = \bar{h} - \bar{h}_0.$$

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Назовите характерные для промысловых судов грузовые операции, связанные с перемещением грузов по судну.
2. Почему при вертикальном перемещении груза изменяется поперечная и продольная остойчивость судна?
3. Какое перемещение груза приводит к увеличению остойчивости судна?
4. Запишите формулу для определения метацентрических высот после вертикального перемещения груза.
5. Запишите формулу для определения угла крена при горизонтальном поперечном перемещении груза.
6. Сформулируйте теорему Эйлера.
7. Запишите формулы для определения дифферента при приращении осадок оконечностей при горизонтальном продольном перемещении груза.
8. В каком случае приращения осадок оконечностей после горизонтального продольного перемещения груза будут одинаковыми по абсолютной величине?

Литература

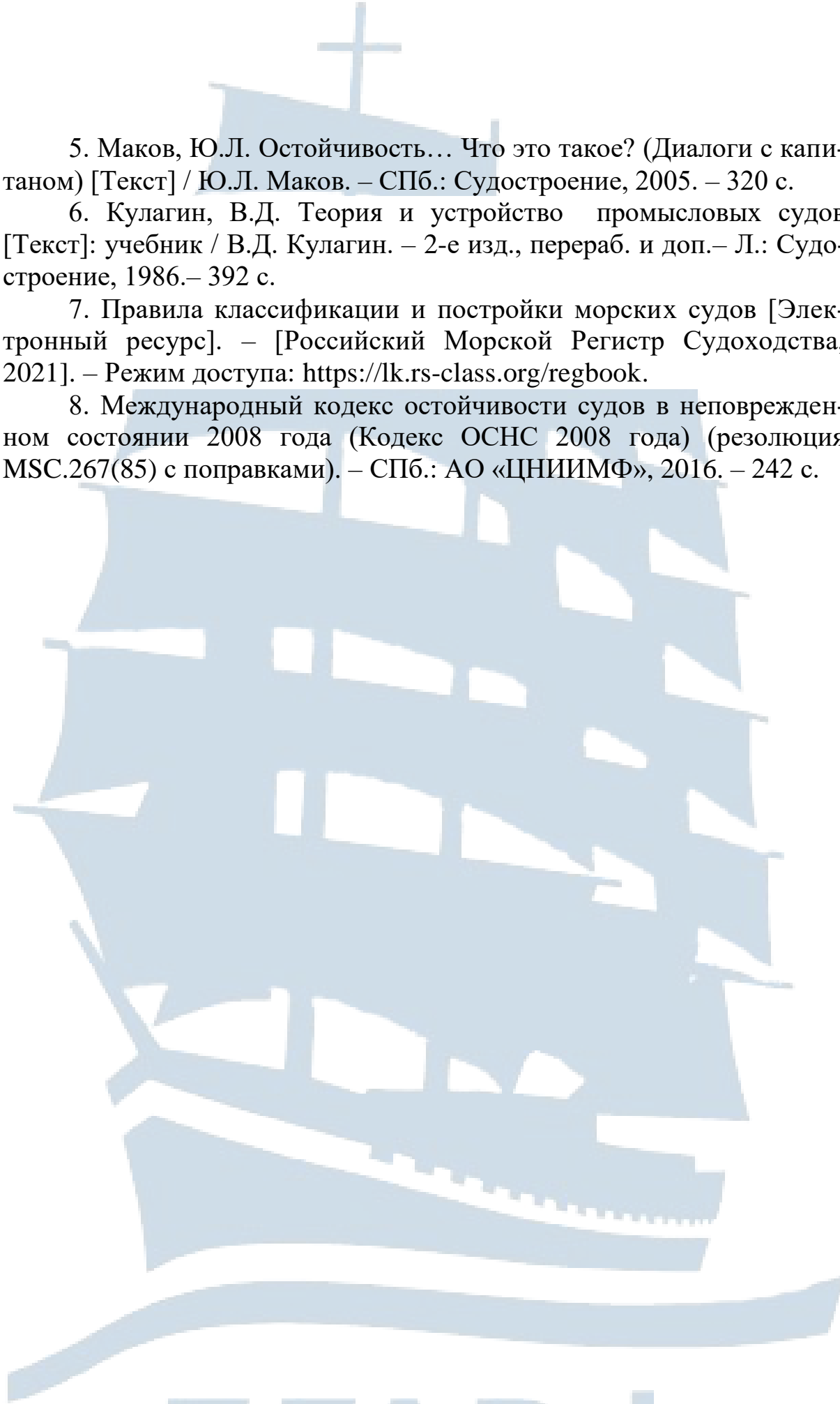
1. Якута И.В. Теория и устройство судна. Раздел «Теория судна». Часть 1: учеб. пособие по самостоятельному изучению дисциплины «Теория и устройство судна» для студентов специальности 26.05.05. «Судовождение» [Текст]. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020.
2. Жинкин, В.Б. Теория и устройство корабля [Текст]: учебник / В.Б. Жинкин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с. (или 4-е изд., испр. и доп. – 2010. – 408 с.).
3. Мореходные качества рыболовных судов. Теория и задачи [Текст]: учеб. пособие / В.Д. Кулагин, А.Г. Валишин, Т.В. Кордас, И.В. Якута. – Калининград: Изд-во БГАРФ, – 2005.
4. Статика корабля [Текст]: учеб. пособие / Р.В. Борисов [и др.] – СПб.: Судостроение, 2005. – 256 с.

5. Маков, Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? (Диалоги с капитаном) [Текст] / Ю.Л. Маков. – СПб.: Судостроение, 2005. – 320 с.

6. Кулагин, В.Д. Теория и устройство промысловых судов [Текст]: учебник / В.Д. Кулагин. – 2-е изд., перераб. и доп.– Л.: Судостроение, 1986.– 392 с.

7. Правила классификации и постройки морских судов [Электронный ресурс]. – [Российский Морской Регистр Судостроения, 2021]. – Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook>.

8. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОСНС 2008 года) (резолюция MSC.267(85) с поправками). – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. – 242 с.



Лабораторная работа № 6. Влияние подвешенных грузов на посадку и остойчивость судна

Цель работы: отработка путём экспериментов с моделью вопросов, связанных с изменением поперечной метацентрической высоты судна при подвешивании грузов на тех или других судовых устройствах.

В рамках работы следует опытным путём определить метацентрическую высоту модели в следующих случаях:

- а) груз закреплён на палубе модели;
- б) груз подвешен к продольной траверсе, имитирующей грузовое устройство;
- в) груз закреплён в точке подвеса на продольной траверсе.

Полученное опытным путём приращение метацентрической высоты следует сравнить с результатами расчёта.

Основные теоретические положения

Операции, связанные с подъёмом груза из трюма на палубу (или наоборот), приёмом улова, выборкой сетей с помощью грузовых стрел и тому подобное, приводят к появлению на судне так называемых подвешенных грузов.

При наличии подвешенного груза создаётся дополнительный кренящий момент (или уменьшается восстанавливающий):

$$M_{кр} = pl \sin \theta = pl \theta. \quad (6.1)$$

При наклонении судна нить подвеса груза всегда перпендикулярна соответствующей ватерлинии, а центр тяжести груза будет перемещаться по дуге окружности с центром в точке подвеса А (рис. 2.6.1, а) [1; 13].

Если подвешенный груз заменить грузом, закреплённым в точке подвеса, то нетрудно видеть, что такой груз будет оказывать на судно такое же воздействие, как и подвешенный груз. Следовательно, с точки зрения воздействия на судно подвешенный груз может быть заменён грузом, помещённым в точку подвеса. Отсюда следует, что подъём и опускание подвешенного груза не влияет на начальную остойчивость судна.

В момент отрыва груза от поверхности, когда натяжение в шкентеле станет равным весу груза, происходит как бы перемещение центра массы груза в точку подвеса (рис. 2.6.1, б), в результате чего

остойчивость изменяется резко, скачком. Поправка на влияние подвешенного груза определяется по формуле:

$$\delta h = -\frac{m}{M}l, \quad (6.2)$$

где m и M – масса подвешенного груза и водоизмещение судна соответственно;

l – расстояние по вертикали между ЦТ груза до подвешивания и точкой подвеса.

Из формулы (6.2) следует, что значение поправки δh не зависит от того, где находится груз после отрыва от поверхности и сам процесс подъёма и опускания груза не влияет на остойчивость судна [13].

Метацентрическая высота судна h_1 после подвешивания груза будет равна:

$$h_1 = h + \delta h.$$

Если подвешенный груз принимается (рис. 2.6.1, в), то в формулах для приращения метацентрической высоты необходимо учесть поправку на влияние подвешенного груза:

$$\delta h = \frac{m}{M+m} \left(T + \frac{\delta T}{2} - z - l - h \right). \quad (6.3)$$

Из формул видно, что груз как бы принимается в точку подвеса, имеющую аппликату $z_A = z + l_z$.

Расчёты показывают, что подъём груза судовыми стрелами большой опасности для судна не представляет. Значительно более опасным, особенно для судов небольшого водоизмещения, является приём груза стрелами, выведенными за борт. В условиях пониженной остойчивости судно получает значительный крен, который может привести к смещению рыбы и иных грузов в сторону крена, что ещё больше ухудшит положение.

Известны случаи опрокидывания по этой причине малых промысловых судов. Например, несколько норвежских сейнеров опрокинулись во время выборки кошельковых неводов с помощью силовых блоков, установленных на выведенных за борт стрелах. В момент подъёма неводов силовыми блоками суда резко накренились на угол 10-12°, происходило разрушение чердачных досок, рыба перемещалась в сторону накрённого борта, вызывая увеличение угла крена. Открытый люк трюма входил в воду, что приводило к быстрому затоплению трюма водой и опрокидыванию сейнеров [1-5].

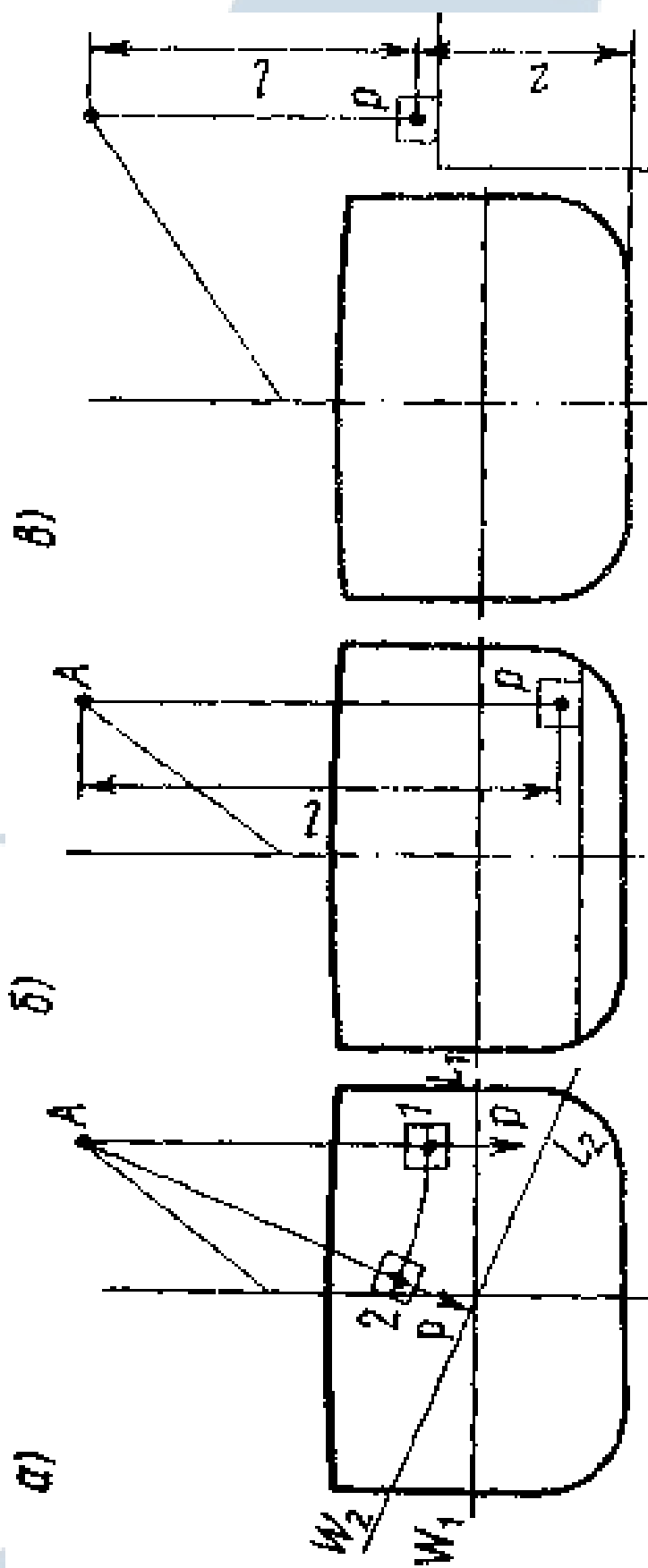


Рис. 2.6.1. Влияние подвешенного груза на остойчивость:

а – схема действия груза; б – подъем груза; в – прием груза

Методика проведения лабораторной работы

1. Подготовить установку к проведению экспериментов. Модель должна плавать без крена. Продольная штанга должна находиться на расстоянии 0,3 м от палубы, груз $m_{гр} = 0,375$ кг должен находиться на палубе модели в точке с координатами $x = 0,03$ м; $y = 0$ м; $z = 0,12$ м.

2. Выполнить эксперименты, связанные с определением метацентрической высоты модели. Для этого переместить груз $m_{гр}$ по поперечной штанге так, чтобы модель наклонилась на малый угол крена ($\theta \approx 3^\circ$).

Внести в табл. 2.6.1 (опыт № 1) данные о плече переноса l_y и показания на отвесах по правому и левому борту модели. Повторить операции по наклонению модели ещё пять раз.

Внести результаты экспериментов в табл. 2.6.1 (опыт № 1).

3. Переместить груз $m_{гр}$ в вертикальной плоскости и закрепить его на продольной штанге. Замерить расстояние l между ЦТ груза в исходном и перемещённом положении.

4. Выполнить эксперименты, связанные с определением метацентрической высоты модели с перемещённым грузом. Внести в табл. 2.6.1 (опыт № 2) данные о плече переноса l_y и показания на отвесах по правому и левому борту модели. Повторить операции по наклонению модели ещё пять раз. Внести результаты экспериментов в таблицу 2.6.1 (опыт № 2).

5. Снять груз $m_{гр}$ с траверсы. Закрепить конец гибкой нити к траверсе в точке с абсциссой, указанной преподавателем. Подвесить груз на гибкой нити. Выполнить эксперименты, связанные с определением метацентрической высоты модели, указанные в п. 2.

6. Внести в табл. 2.6.1 (опыт № 3) данные о плече переноса l_y и показания на отвесах по правому и левому борту модели. Повторить операции по наклонению модели ещё пять раз. Внести результаты экспериментов в табл. 2.6.1 (опыт № 3).

Таблица 2.6.1

**Определение метацентрических высот модели
при различных вариантах закрепления груза**

Опыт № 1 груз m_{zp} закреплен на палубе модели								
№ опыта	$Z_{пбi},$ см	$Z_{лбi},$ см	$Z_{пбi} - Z_{лбi},$ см	$\theta_i = \frac{ z_{нбi} - z_{лбi} }{a},$ рад	$m_i,$ кг	$l_i,$ м	$m_i l_i,$ кг·м	$h_i = \frac{m_i \cdot l_i}{(M_0 + m_{zp})\theta_i},$ м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
3								
4								
5								
6								
Среднее значение метацентрической высоты $\bar{h}_1 = \frac{\sum h_i}{6} = \text{---}, \text{м}$								
Опыт № 2 груз m_{zp} закреплен в точке подвеса (на продольной траверсе) $l = \text{---} \text{м}$								
№ опыта	$Z_{пбi},$ см	$Z_{лбi},$ см	$Z_{пбi} - Z_{лбi},$ см	$\theta_i = \frac{ z_{нбi} - z_{лбi} }{a},$ рад	$m_i,$ кг	$l_i,$ м	$m_i l_i,$ кг·м	$h_i = \frac{m_i \cdot l_i}{(M_0 + m_{zp})\theta_i},$ м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
3								
4								
5								
6								
Среднее значение метацентрической высоты $\bar{h}_2 = \frac{\sum h_i}{6} = \text{---}, \text{м}$								

Опыт № 3 груз m_{zp} на свободном подвесе								
№ опыта	$Z_{пбi},$ см	$Z_{лбi},$ см	$Z_{пбi} - Z_{лбi},$ см	$\theta_i = \frac{ z_{пбi} - z_{лбi} }{a},$ рад	$m_i,$ кг	$l_i,$ м	$m_i l_i,$ кг·м	$h_i = \frac{m_i \cdot l_i}{(M_0 + m_{zp}) \theta_i},$ м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
3								
4								
5								
6								
Среднее значение метацентрической высоты $\bar{h}_3 = \frac{\sum h_i}{6} = \text{---}, \text{м}$								

Таблица 2.6.2

Сравнение экспериментальных данных с их теоретическими значениями

Заданные и определяемые величины	Обозначение	Размерность	Расчетная формула или таблица	Численные значения
Метацентрическая высота (опыт № 3)	h_3	м	Табл. 2.6.1	
Метацентрическая высота (опыт № 2)	h_2	м	Табл. 2.6.1	
Относительная погрешность опытов	δh	%	$\delta h = \frac{h_3 - h_2}{h_3} \cdot 100$	
Расчетное приращение метацентрической высоты	δh_p	м	$\delta h_p = -\frac{m_{zp} \cdot l}{M}$	
Метацентрическая высота (опыт № 1)	h_1	м	Табл. 2.6.1	
Экспериментальное приращение метацентрической высоты	δh_3	м	$\delta h_3 = h_2 - h_1$	
Относительная погрешность опытов	δh	%	$\delta h = \frac{\delta h_p - \delta h_3}{\delta h_p} \cdot 100$	

7. По данным табл. 2.6.1 вычислить средние значения метацентрических высот в опытах № 1, 2, 3.

8. В табл. 2.6.2 сравнить h_2 и h_3 и определить относительную погрешность экспериментов.

9. Вычислить приращение метацентрической высоты как разность между результатами опытов № 1 и № 2, теоретическое приращение по формуле

$$\Delta h = -\frac{m_{cp} l}{M}$$

и сравнить результаты.

Сделать выводы из проделанной работы.

Сделать вывод о том, удовлетворяет ли полученное значение требованиям ИМО и Правил Морского Регистра судоходства.

В конце работы построить график зависимости кренящего момента $M_{кр}$ от угла крена θ .

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Почему наличие незакрепленного подвешенного груза приводит к ухудшению начальной остойчивости судна?

2. Запишите формулу для приращения метацентрической высоты при наличии подвешенного груза.

3. Отличается ли влияние на начальную остойчивость подвешенного груза, который до подъема грузовой стрелой находится в трюме, от груза, который до подъема находился на причале?

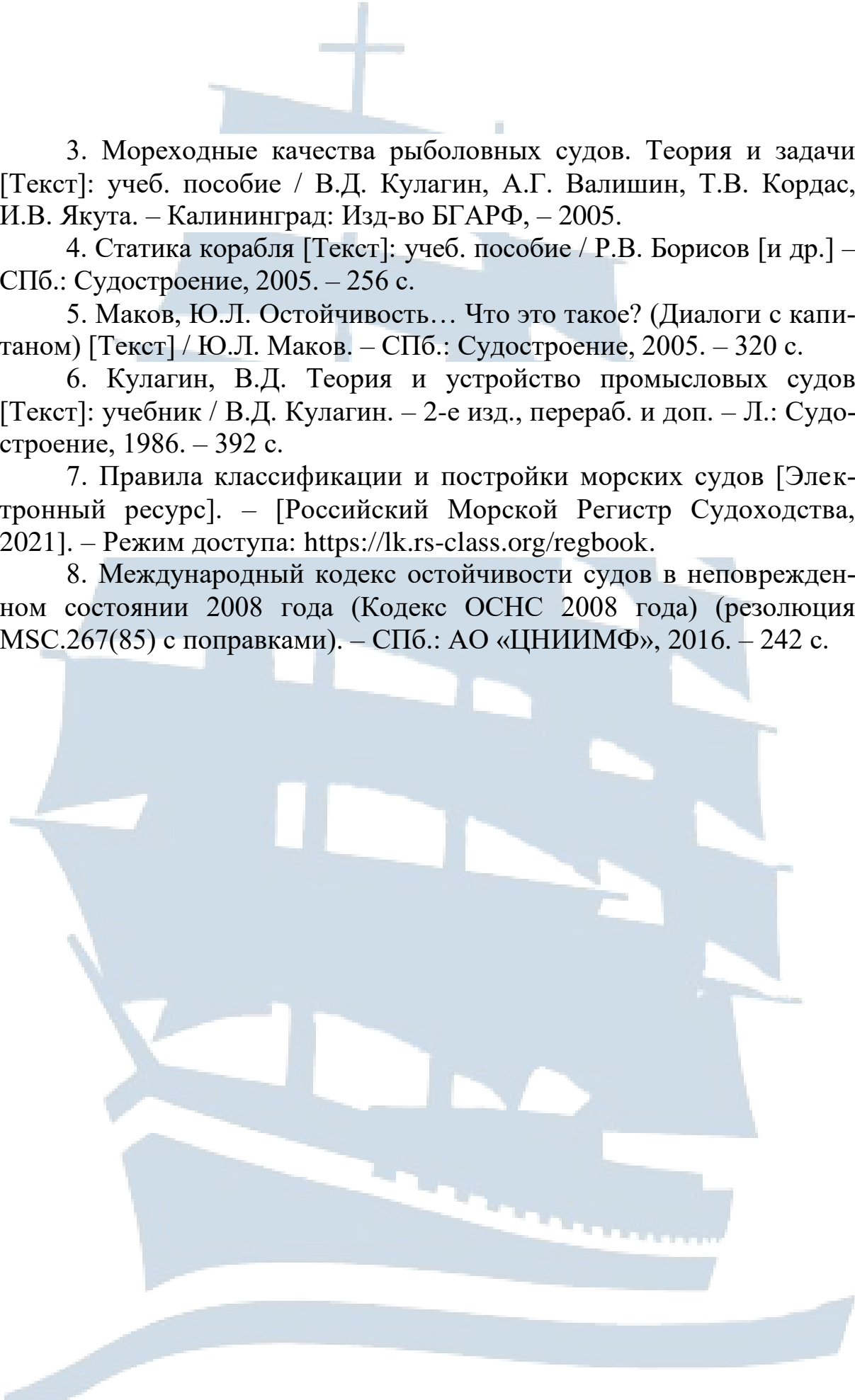
4. Какое влияние оказывает на остойчивость судна процесс подъема груза, находящегося на грузовом шкентеле?

5. Какое влияние оказывает подвешенный груз на остойчивость судна при больших углах крена?

Литература

1. Якута И.В. Теория и устройство судна. Раздел «Теория судна». Часть 1: учеб. пособие по самостоятельному изучению дисциплины «Теория и устройство судна» для студентов специальности 26.05.05 «Судовождение» [Текст]. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020.

2. Жинкин, В.Б. Теория и устройство корабля [Текст]: учебник / В.Б. Жинкин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с. (или 4-е изд., испр. и доп. – 2010. – 408 с.).



3. Мореходные качества рыболовных судов. Теория и задачи [Текст]: учеб. пособие / В.Д. Кулагин, А.Г. Валишин, Т.В. Кордас, И.В. Якута. – Калининград: Изд-во БГАРФ, – 2005.

4. Статика корабля [Текст]: учеб. пособие / Р.В. Борисов [и др.] – СПб.: Судостроение, 2005. – 256 с.

5. Маков, Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? (Диалоги с капитаном) [Текст] / Ю.Л. Маков. – СПб.: Судостроение, 2005. – 320 с.

6. Кулагин, В.Д. Теория и устройство промысловых судов [Текст]: учебник / В.Д. Кулагин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1986. – 392 с.

7. Правила классификации и постройки морских судов [Электронный ресурс]. – [Российский Морской Регистр Судостроения, 2021]. – Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook>.

8. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОЧС 2008 года) (резолюция MSC.267(85) с поправками). – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. – 242 с.

Лабораторная работа № 7. Влияние жидкого груза со свободной поверхностью на посадку и остойчивость судна

Цель работы: определить влияние свободной поверхности и продольных разделительных переборок на остойчивость судна.

Основные теоретические положения

К жидким грузам относятся топливо, питьевая и мытьевая вода, смазочные масла, а также забортная вода, принятая на судно в качестве балласта. Если цистерны заполнены полностью, т. е. не имеют свободной поверхности, жидкий груз при крене не переливается и оказывает на остойчивость судна такое же влияние как твердый груз. При наличии свободной поверхности жидкий груз будет перетекать в сторону наклона судна, увеличивая угол крена [1; 4; 13].

Для оценки влияния жидкого груза, имеющего свободную поверхность, на начальную остойчивость судна, рассмотрим смещение центра тяжести жидкости в цистерне при крене (рис. 2.7.1).

Смещение ffi при малых углах наклона может быть принято за дугу окружности с центром в точке a . Но точно также перемещался при крене центр тяжести подвешенного груза, поэтому поправка на жидкий груз будет

$$\delta h = -\frac{m_{ж}}{M} \cdot af = -\frac{\rho_{ж} \cdot v}{M} af, \quad (7.1)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкого груза;
 v – объём жидкости в цистерне.

Радиус смещения центра тяжести жидкого груза af по аналогии с метацентрическим радиусом судна определяется по формуле:

$$af = i_x/v,$$

где i_x – момент инерции свободной поверхности жидкости относительно оси наклона.

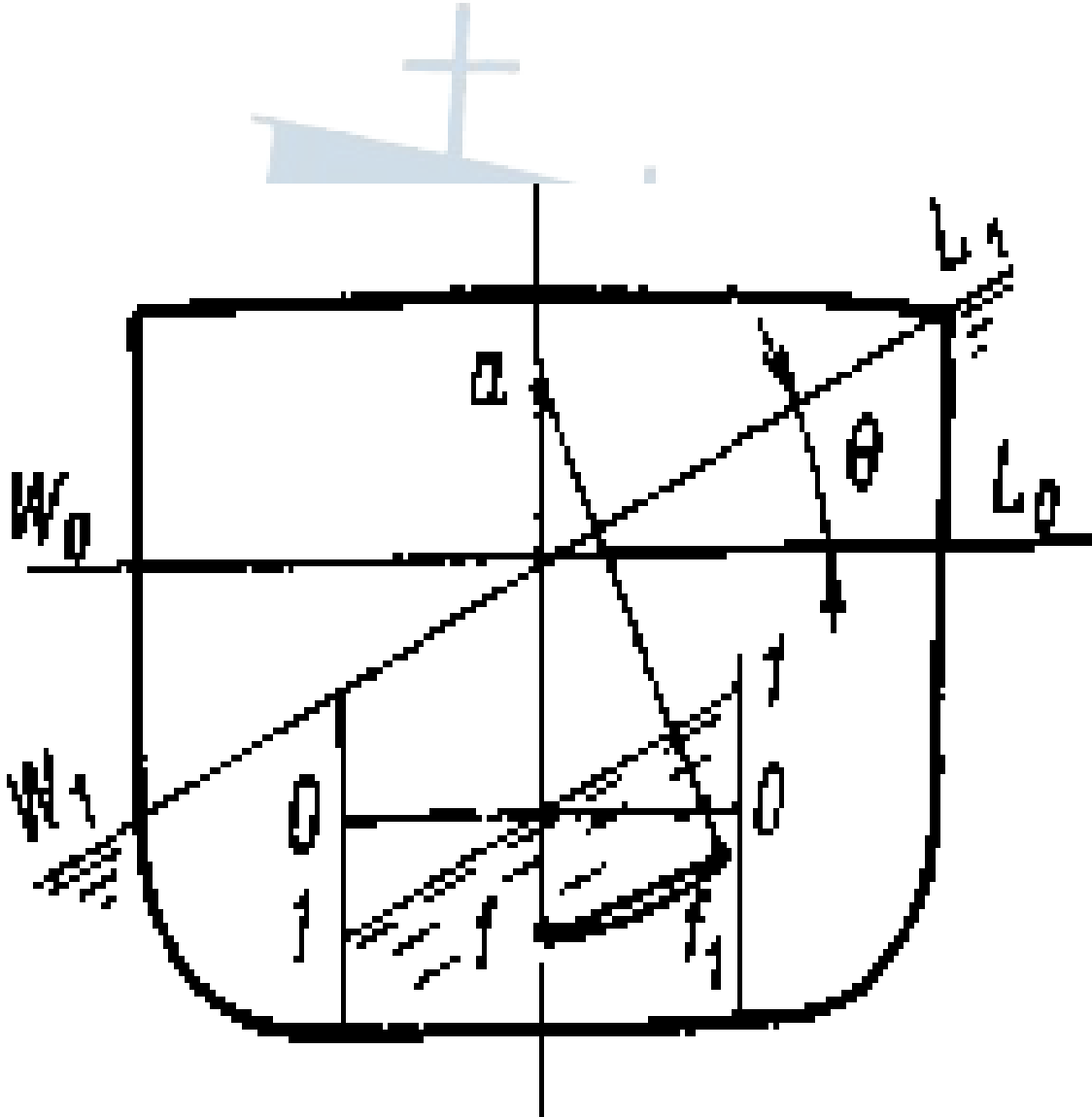


Рис. 2.7.1. Влияние жидкого груза на остойчивость

Момент инерции свободной поверхности жидкости можно вычислить по формуле

$$i_x = klb^3,$$

где l и b – длина и наибольшая ширина цистерны;

k – безразмерный коэффициент, определяемый по справочным данным.

Таким образом, при появлении свободной поверхности метацентрическая высота изменяется на величину:

$$\delta h = -\frac{\rho_{жс}}{\rho} \cdot \frac{i_x}{V} = -\frac{\rho_{жс} i_x}{M}. \quad (7.1)$$

При приеме (расходовании) жидкого груза изменение метацентрической высоты будет определяться по формуле:

$$\delta h = \frac{m_{жс}}{M + m_{жс}} \left(T + \frac{\delta T}{2} - z - h - \frac{i_x}{V} \right). \quad (7.2)$$

Потеря остойчивости зависит от площади свободной поверхности жидкости. Уменьшить потерю остойчивости можно, установив в цистерне переборки, параллельные оси наклонения.

Оценим влияние переборок на остойчивость судна, предположив, что в прямоугольной цистерне установлено n переборок на равных расстояниях друг от друга. Поскольку для прямоугольных в плане цистерн $k = 1/12$, момент инерции свободных поверхностей жидкости в цистерне без переборок и с переборками будут [1; 12]

$$i_x = \frac{lb^3}{12},$$

$$i_{x\Pi} = (n+1) \frac{l\left(\frac{b}{n+1}\right)^3}{12} = \frac{lb^3}{12(n+1)^2}. \quad (7.3)$$

Отношение поправок к метацентрической высоте до установки и после установки переборок составит

$$\frac{\delta h}{\delta h_{\Pi}} = \frac{i_x}{i_{x\Pi}} = (n+1)^2. \quad (7.4)$$

Таким образом, установка переборок уменьшает влияние свободной поверхности жидкости на остойчивость судна в $(n+1)^2$ раз. Установка одной переборки уменьшает влияние свободной поверхности жидкости на остойчивость в 4 раза, двух переборок – в 9 раз и т. д.

При практических расчетах остойчивости влияние жидких грузов учитывается с помощью таблиц, приведенных в «Информации об остойчивости судна». В таблицах даны поправки к метацентрической высоте судна δh или к коэффициенту поперечной остойчивости $\delta m_h = \Delta \delta h = \gamma_{ж} i_x$.

Поправки на свободные поверхности приведены либо для каждой цистерны в отдельности, либо для совокупности цистерн, которые по условиям эксплуатации могут оказаться частично заполненными [1].

В зависимости от вида представления поправок метацентрическую высоту судна с учетом влияния жидких грузов в частично заполненных цистернах находят по формулам:

$$h = z_m - z_g - \Sigma \delta h = z_{mu} - z_g = z_m - z_{gu};$$

$$h = z_m - z_g - (\Sigma \delta m_h / \Delta) = z_{mu} - z_g = z_m - z_{gu}, \quad (7.5)$$

где $\Sigma \delta h$ и $\Sigma \delta m_h$ – суммарные поправки на влияние жидких грузов;

$z_{mu} = z_m - \Sigma\delta h = z_m - (\Sigma\delta m_h / \Delta)$ – исправленная на влияние жидких грузов аппликата поперечного метацентра;

$z_{gu} = z_g + \Sigma\delta h = z_g + (\Sigma\delta m_h / \Delta)$ – исправленная на влияние жидких грузов аппликата центра тяжести судна.

Как видим, свободные поверхности как бы превышают центр тяжести судна или снижают его поперечный метацентр на величину

$$\delta z_g = \delta z_m = \Sigma\delta h = \Sigma\delta m_h / \Delta, \quad (7.6)$$

либо увеличивают статический момент нагрузки относительно основной плоскости на $\delta M_z = \Sigma\delta m_h$.

Расчет поправок на свободные поверхности $\Sigma\delta h$ и $\Sigma\delta m_h$ производится в соответствии с «Инструкцией по учету влияния свободных поверхностей жидких грузов на остойчивость судна» [1; 4].

Порядок проведения работы

1. Проверить соответствие посадки модели исходным данным, убедиться в отсутствии крена.

Водоизмещение модели в исходном состоянии со снятыми люковыми крышками и продольной штангой M_0 (для каждой модели свое).

Масса отсека с жидкостью m_{ep} *рассчитывается;*

Длина отсека l *измеряется;*

Ширина отсека b *измеряется;*

Высота отсека t *измеряется*

Поперечная штанга с грузами для опыта кренования установлена на уровне $z = 0,25$ м;

Начальная метацентрическая высота при водоизмещении M_0 h (2 лаб. работа).

2. Исследовать теоретическим путём влияние свободной поверхности жидких грузов на характеристики остойчивости модели судна.

2.1. Вычислить поправку к метацентрической высоте, вызванную наличием свободной поверхности, используя формулу:

$$\delta h_1 = - \frac{\rho_{ж} i_x}{M_0 + m_{ep}}.$$

Массу воды в отсеке рассчитать.

2.2. Рассчитать поправку к метацентрической высоте в случае установки в отсеке продольной водонепроницаемой переборки по формуле:

$$\delta h_2 = - \frac{\rho_{ж} l b^3}{12 (M_0 + m_{ep}) (n+1)^2}.$$

3. Исследовать экспериментально влияние свободной поверхности жидких грузов на характеристики остойчивости судна.

3.1. Установить отсек с жидким грузом на носовой люк модели в 1-е положение. Отсек в этом случае заполнен полностью и свободная поверхность отсутствует.

Выполнить опыты кренования модели и найти опытное значение метацентрической высоты h .

Показания на мерных линейках $z_{нб}$ и $z_{лб}$ при определении h занести в табл. 2.7.1.

Опыт кренования повторить шесть раз.

3.2. Отлить воду из отсека, чтобы появилась свободная поверхность и установить отсек на модели во 2-е положение.

Выполнить опыт кренования и найти метацентрическую высоту h_1 . Для определения метацентрической высоты h_1 выполнить шесть опытов.

Вычислить изменение метацентрической высоты, вызванное наличием поверхности

$$\delta h_1' = h_1 - h.$$

3.3. Установить отсек с жидким грузом на носовой люк модели таким образом, чтобы переборка была установлена параллельно ДП модели.

Таблица 2.7.1

Определение метацентрической высоты модели с жидким грузом опытным путем

1-е положение Отсек заполнен полностью и свободная поверхность отсутствует					
№ опыта	Показания отвеса ПБ $z_{нбi}$, см	Показания отвеса ЛБ $z_{лбi}$, см	Угол крена $\theta_i = \frac{ z_{нбi} - z_{лбi} }{a}$, рад	Плечо переноса груза l_y , м	Метацентрическая высота $h_i = \frac{m_i \cdot l_y}{(M_0 + m_{ep})\theta_i}$, м
1					
2					
3					
4					
5					
6					
$\bar{h} = \frac{\sum h_i}{6} = \text{---}, \text{ м}$					

2-е положение Отсек со свободной поверхностью					
№ опыта	Показания отвеса ПБ $z_{пбi}$, см	Показания отвеса ЛБ $z_{лбi}$, см	Угол крена $\theta_i = \frac{ z_{пбi} - z_{лбi} }{a}$, рад	Плечо переноса груза l_y , м	Метацентрическая высота $h_i = \frac{m_i \cdot l_y}{(M_0 + m_{cp})\theta_i}$, м
1					
2					
3					
4					
5					
6					
$\bar{h}_1 = \frac{\Sigma h_i}{6} = \text{---}, \text{ м}$					
3-е положение Переборка в отсеке расположена параллельно ДП модели					
№ опыта	Показания отвеса ПБ $z_{пбi}$, см	Показания отвеса ЛБ $z_{лбi}$, см	Угол крена $\theta_i = \frac{ z_{пбi} - z_{лбi} }{a}$, рад	Плечо переноса груза l_y , м	Метацентрическая высота $h_i = \frac{m_i \cdot l_y}{(M_0 + m_{cp})\theta_i}$, м
1					
2					
3					
4					
5					
6					
$\bar{h}_2 = \frac{\Sigma h_i}{6} = \text{---}, \text{ м}$					

Выполнить опыт кренования и найти метацентрическую высоту h_2 . Для определения метацентрической высоты h_2 выполнить шесть опытов.

Вычислить изменение метацентрической высоты от наличия свободной поверхности для отсека с одной продольной разделяющей переборкой

$$\delta h_2' = h_2 - h_1.$$

3.4. Сравнить в табл. 2.7.2 опытные значения $\delta h_1'$ и $\delta h_2'$ с полученными расчётным путём поправками.

3.5. Заполнить отчёт лабораторной работы.

Таблица 2.7.2

Сравнение опытных и расчетных данных

Определяемая величина	Расчетная формула	Значение
Ожидаемое значение поправки на свободную поверхность	$\delta h_1 = -\frac{\rho_{жс} \cdot i_x}{M_0 + m_{зр}}$	
Ожидаемое значение поправки на свободную поверхность в случае установки одной продольной переборки	$\delta h_2 = -\frac{\rho_{жс} \cdot i_x}{M_0 + m_{зр}}$	
Отношение	$\delta h_1 / \delta h_2$	
Опытное значение метацентрической высоты модели. Отсек запрессован h	кренование	
Опытное значение метацентрической высоты модели. Отсек со свободной поверхностью h_1	кренование	
Опытное значение метацентрической высоты модели. Отсек со свободной поверхностью и одной продольной разделяющей переборкой h_2	кренование	
Изменение метацентрической высоты от свободной поверхности	$\delta h_1' = h_1 - h$	
Изменение метацентрической высоты для отсека с одной продольной разделяющей переборкой	$\delta h_2' = h_2 - h_1$	
Отношение	$\delta h_1' / \delta h_2'$	

Сделать вывод о том, удовлетворяет ли полученное значение h_0 требованиям ИМО и Правил Морского Регистра судоходства.

В конце работы построить график зависимости кренящего момента $M_{кр}$ от угла крена θ .

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Какие жидкие грузы имеются на судах ФРП?
2. Как сказывается приём жидкого груза на остойчивость судна?
3. Запишите формулу влияния жидкого груза на остойчивость судна.
4. Как изменяются характеристики остойчивости в случае приёма жидкого груза выше и ниже предельной плоскости?
5. Как влияют на остойчивость водонепроницаемые разделяющие переборки, установленные параллельно и перпендикулярно диаметральной плоскости?

Литература

1. Якута И.В. Теория и устройство судна. Раздел «Теория судна». Часть 1: учеб. пособие по самостоятельному изучению дисциплины «Теория и устройство судна» для студентов специальности 26.05.05. «Судовождение» [Текст]. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020.
2. Жинкин, В.Б. Теория и устройство корабля [Текст]: учебник / В.Б. Жинкин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с. (или 4-е изд., испр. и доп. – 2010. – 408 с.).
3. Мореходные качества рыболовных судов. Теория и задачи [Текст]: учеб. пособие / В.Д. Кулагин, А.Г. Валишин, Т.В. Кордас, И.В. Якута. – Калининград: Изд-во БГАРФ, – 2005.
4. Статика корабля [Текст]: учеб. пособие / Р.В.Борисов [и др.] – СПб.: Судостроение, 2005. – 256 с.
5. Маков, Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? (Диалоги с капитаном) [Текст] / Ю.Л. Маков. – СПб.: Судостроение, 2005. – 320 с.
6. Кулагин, В.Д. Теория и устройство промысловых судов [Текст]: учебник / В.Д. Кулагин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1986.– 392 с.
7. Правила классификации и постройки морских судов [Электронный ресурс]. – [Российский Морской Регистр Судостроения, 2021]. – Режим доступа: <https://lk.rs-class.org>.
8. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОЧС 2008 года) (резолюция MSC.267(85) с поправками). – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. – 242 с.

Лабораторная работа № 8.

Определение поперечной метацентрической высоты по периоду собственных бортовых колебаний судна

Целью работы является изучение наиболее доступного метода оперативного контроля остойчивости судна по периоду бортовой качки, а также тех пределов, в которых этот метод может быть использован на судах.

В рамках работы следует определить метацентрическую высоту и аппликату центра тяжести модели методом кренования и по периоду ее бортовой качки при четырех вариантах размещения грузов, сравнить полученные результаты.

Основные теоретические положения

Определение метацентрической высоты судна **методом раскачивания** базируется на применении капитанской формулы:

$$\tau_{\theta} = CB / \sqrt{h},$$

где τ_{θ} – период собственных бортовых колебаний судна, т. е. время одного полного колебания на тихой воде с борта на борт и обратно;

B – ширина судна;

C – эмпирический коэффициент, зависящий от формы судна, наличия и размеров скуловых частей и других выступающих частей.

Для определения τ_{θ} судно на тихой воде раскачивают, с помощью секундомера измеряют время нескольких полных колебаний, поделив время на число колебаний, находят период. На практике это применимо только для малых судов. Крупнотоннажное судно можно раскачать на ходу перекладкой руля с борта на борт несколько раз. Самым реальным способом для всех судов является замер периода бортовой качки, вызванной волнением моря. Для повышения точности подобных измерений применяют специальную методику, хорошие результаты дает использование технических средств регистрации бортовых колебаний. Очевидно, что капитанская формула может использоваться и для нахождения периода качки при известной метацентрической высоте [1; 13].

В линейной теории качки получено выражение для периода собственных малых бортовых колебаний судна:

$$\tau_{\theta} = 2\pi \sqrt{\frac{I_x + \delta I_x}{Mgh}}, \quad (8.1)$$

где I_x – главный центральный момент инерции массы судна относительно продольной оси, проходящей через его центр тяжести;

δI_x – момент инерции присоединенных масс воды относительно той же оси;

M и h – водоизмещение судна и его метацентрическая высота.

Таким образом, зная период бортовых колебаний, можно определить h , если тем или другим способом определены I_x , δI_x и M .

Момент инерции массы судна может быть определен по формуле:

$$I_x = \sum m_i (y_i^2 + z_i^2) + \sum i_x, \quad (8.2)$$

где m_i – масса отдельных статей нагрузки, составляющих водоизмещение судна;

y_i и z_i – ординаты и аппликаты ЦТ этих масс, вычисленные относительно продольной оси G_x ;

i_x – собственный момент инерции каждой массы.

Из формулы следует, что чем дальше отнесена от оси G_x та или другая масса, тем (при прочих равных условиях) больше момент инерции массы судна.

Величина момента инерции присоединенных масс воды δI_x обычно составляет не более 35 % от I_x . Она зависит от дифферента и скорости судна, а также других факторов, которые рассматриваются в специальной литературе [1-5].

Для практических целей момент инерции массы судна и присоединенных масс воды определяют по приближенной формуле:

$$I_x + \delta I_x = M \left(\frac{C_0 B}{2} \right)^2, \quad (8.3)$$

где B – ширина судна;

C_0 – безразмерный множитель.

После подстановки (8.3) в (8.1) и некоторых преобразований можно получить

$$h = \frac{C^2 B^2}{\tau_\theta^2}, \quad (8.4)$$

где C – инерционный коэффициент, зависящий от схемы загрузки судна (численно $C \approx C_0$).

Как правило, инерционные коэффициенты промысловых судов при различных состояниях нагрузки варьируются в сравнительно узких пределах: $C = 0,78 \div 0,86$ (верхние значения характерны для судна порожнем). Поэтому формула (8.4) может быть использована для

приближенной оценки остойчивости судна по измеренному периоду бортовой качки. Можно принять для рыболовных судов коэффициент $C = 0,80$. Более точные значения коэффициента C при том или другом состоянии загрузки судна могут быть получены путем его кренования, когда известно значение h и может быть замерен период бортовой качки.

Однако в отдельных случаях применение формулы (8.4) может привести к грубым ошибкам в оценке остойчивости судна, если при расчете метацентрической высоты использовано значение $C = 0,8$ или полученное на основе единичного кренования.

Действительно, в отличие от выражения (8.2) формулы (8.3) и (8.4) не учитывают расстояния от продольной G_x до ЦТ масс, составляющих переменную нагрузку судна, а также факторы, определяющие величину присоединенных масс воды.

Поэтому, если на судне оказались тяжеловесные грузы, расположенные на большом расстоянии от продольной оси G_x , коэффициент C может существенно увеличиться, выйти за пределы, указанные выше. Например, при обледенении судна до 20 %.

Так как метацентрическая высота пропорциональна квадрату инерционного коэффициента, расчеты по формуле (8.4) дадут заниженную остойчивость судна. Напротив, если основная масса переменных грузов по тем или иным причинам окажется в районе оси G_x , фактическое значение инерционного коэффициента может быть много меньше расчетного или рекомендованного. Например, при затоплении судовых отсеков или при перевозке живой рыбы в трюмах коэффициент C может уменьшиться на 25 и более процентов. В этом случае фактическое значение метацентрической высоты может оказаться меньше расчетного, определенного по формуле (8.4). Переоценка плавсоставом фактических запасов остойчивости крайне опасна для судна и его экипажа.

Методика проведения лабораторной работы

1. В кормовой трюм модели на днище следует уложить балласт массой 1,0 кг и абсциссой ЦТ $x = -0,28$ м. Короткая поперечная штанга должна быть снята, продольная – развернута под прямым углом к диаметральной плоскости и опущена в крайнее нижнее положение. На штанге у мачты с ПБ и ЛБ разместить два груза массой $m_{гр} = 0,043$ кг для первой модели и $m_{гр} = 0,049$ кг для второй модели.

Модель должна плавать без крена. Данные о водоизмещении модели, полученные на основе замера её осадок и рис. 1.4, внести в табл. 2.8.1.

2. Выполнить опыт кренования модели в исходном состоянии (табл.2.8.2), найти опытное значение метацентрической высоты h_1 , внести полученные данные в табл. 2.8.1.

Таблица 2.8.1

Экспериментальное определение инерционного коэффициента и метацентрической высоты модели

Заданные и определяемые величины	Обозначение	Размерность	Расчетная формула	Численное значение
Опыт № 1. Водоизмещение модели $M = \underline{\hspace{2cm}}$ кг				
Метацентрическая высота модели	h_1	м	кренование	
Время десяти колебаний модели	t_1'	с	измерение	
	t_1''	с	измерение	
	t_1'''	с	измерение	
Средний период бортовой качки	$\tau_{\theta 1}$	с	$\tau_{\theta 1} = \frac{t_1' + t_1'' + t_1'''}{30}$	
Инерционный коэффициент	C_1	с/м ^{0,5}	$C_1 = \frac{\tau_{\theta 1} \sqrt{h_1}}{B}$	
Опыт № 2. Водоизмещение модели $M = \underline{\hspace{2cm}}$ кг				
Метацентрическая высота модели	h_2	м	кренование	
Время десяти колебаний модели	t_2'	с	измерение	
	t_2''	с	измерение	
	t_2'''	с	измерение	
Средний период бортовой качки	$\tau_{\theta 2}$	с	$\tau_{\theta 2} = \frac{t_2' + t_2'' + t_2'''}{30}$	
Инерционный коэффициент	C_2	с/м ^{0,5}	$C_2 = \frac{\tau_{\theta 2} \sqrt{h_2}}{B}$	
Опыт № 3. Водоизмещение модели $M = \underline{\hspace{2cm}}$ кг				
Метацентрическая высота модели	h_3	м	кренование	
Время десяти колебаний модели	t_3'	с	измерение	
	t_3''	с	измерение	
	t_3'''	с	измерение	
Средний период бортовой качки	$\tau_{\theta 3}$	с	$\tau_{\theta 3} = \frac{t_3' + t_3'' + t_3'''}{30}$	
Инерционный коэффициент	C_3	с/м ^{0,5}	$C_3 = \frac{\tau_{\theta 3} \sqrt{h_3}}{B}$	

Заданные и определяемые величины	Обозначение	Размерность	Расчетная формула	Численное значение
Опыт № 4. Водоизмещение модели $M = \underline{\hspace{1cm}}$ кг				
Метацентрическая высота модели	h_4	м	кренование	
Время десяти колебаний модели	t_4'	с	измерение	
	t_4''	с	измерение	
	t_4'''	с	измерение	
Средний период бортовой качки	$\tau_{\theta 4}$	с	$\tau_{\theta 4} = \frac{t_4' + t_4'' + t_4'''}{30}$	

3. Возбудить свободные колебания модели, отклонив её от положения равновесия на $3-5^\circ$, замерить время 10 колебаний. Процедуру повторить еще два раза. Внести полученные данные в табл. 2.8.1.

4. Переместить поперечину с грузами по мачте в верхнее крайнее положение.

Выполнить опыт кренования модели (табл. 2.8.3), внести опытное значение метацентрической высоты h_2 в табл. 2.8.1.

Переместить грузы по поперечине на уровень бортов модели.

5. Возбудить свободные колебания модели, отклонив её от положения равновесия на $3-5^\circ$, замерить время 10 колебаний. Процедуру повторить еще два раза. Внести полученные данные в табл. 2.8.1.

6. Установить на поперечине с ПБ и ЛБ дополнительные грузы $m_1 = m_2$ с массой 0,064 кг.

Разнести все грузы на максимальное расстояние от ДП.

Провести опыт кренования (табл. 2.8.4), определить опытным путем метацентрическую высоту h_3 .

Внести данные о водоизмещении модели M_3 и метацентрической высоте h_3 в табл. 2.8.1.

7. Возбудить свободные колебания модели, отклонив её от положения равновесия на $3-5^\circ$, замерить время 10 колебаний. Процедуру повторить еще два раза. Внести полученные данные в табл. 2.8.1.

8. Снять грузы m_1 и m_2 с модели. Переместить поперечину с грузами по мачте так, чтобы она оказалась на расстоянии 0,10-0,12 м от нижнего крайнего положения.

9. Выполнить опыт кренования модели (табл. 2.8.5), найти опытное значение метацентрической высоты h_4 , внести полученные данные в табл. 2.8.1.

Таблица 2.8.2

Определение поперечной метацентрической высоты. 1 опыт

№ опыта	Z _{пбi} , см	Z _{лбi} , см	Z _{пбi} - Z _{лбi} , см	$\theta_i = \frac{ z_{нбi} - z_{лбi} }{a}$, рад	m _i , кг	l _i , м	m _i l _i , кг·м	$h_i = \frac{m_i \cdot l_i}{(M_0 + m_{zp})\theta_i}$, м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Таблица 2.8.3

Определение поперечной метацентрической высоты. 2 опыт

№ опыта	Z _{пбi} , см	Z _{лбi} , см	Z _{пбi} - Z _{лбi} , см	$\theta_i = \frac{ z_{нбi} - z_{лбi} }{a}$, рад	m _i , кг	l _i , м	m _i l _i , кг·м	$h_i = \frac{m_i \cdot l_i}{(M_0 + m_{zp})\theta_i}$, м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Таблица 2.8.4

Определение поперечной метацентрической высоты. 3 опыт

№ опыта	Z _{пбi} , см	Z _{лбi} , см	Z _{пбi} - Z _{лбi} , см	$\theta_i = \frac{ z_{нбi} - z_{лбi} }{a}$, рад	m _i , кг	l _i , м	m _i l _i , кг·м	$h_i = \frac{m_i \cdot l_i}{(M_0 + m_{zp})\theta_i}$, м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Таблица 2.8.5

Определение поперечной метацентрической высоты. 4 опыт

№ опыта	Z _{пбi} , см	Z _{лбi} , см	Z _{пбi} - Z _{лбi} , см	$\theta_i = \frac{ z_{пбi} - z_{лбi} }{a}$, рад	m _i , кг	l _i , м	m _i l _i , кг·м	$h_i = \frac{m_i \cdot l_i}{(M_0 + m_{zp})\theta_i}$, м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Обработка результатов испытаний

1. Вычислить в табл. 2.8.6 средние периоды и инерционные коэффициенты на основе данных опытов 1-4.

2. Определить метацентрические высоты модели при нагрузке, соответствующей опыту № 4 (табл. 2.8.6), используя инерционные коэффициенты, полученные в процессе опытов № 1-3 (табл. 2.8.6).

3. Определить относительные погрешности метода оценки метацентрической высоты по периоду бортовой качки, сравнив в таблице 2.8.6 метацентрические высоты, полученные путем кренования модели (опыт 4, табл. 2.8.5), и путем расчета по формуле (8.4). Выполнить анализ полученных результатов.

Таблица 2.8.6

Определение метацентрической высоты модели по периоду бортовой качки при нагрузке, соответствующей опыту № 4

Постоянные величины: ширина модели $B = 0,186$ м; период бортовой качки $\tau_{\theta 4} = \underline{\hspace{2cm}}$ с; метацентрическая высота модели $h_4 = \underline{\hspace{2cm}}$ м				
Заданные и определяемые величины	Обозначение	Размерность	Расчетная формула	Численное значение
Инерционный коэффициент	C_1	с/м ^{0,5}	опыт № 1	
Расчетная метацентрическая высота	h_4'	м	$h_4' = \left(\frac{C_1 B}{\tau_{\theta 4}} \right)^2$	
Относительная погрешность	δ_1	%	$\delta_1 = \frac{h_4' - h_4}{h_4'} \cdot 100$	

Заданные и определяемые величины	Обозначение	Размерность	Расчетная формула	Численное значение
Инерционный коэффициент	C_2	с/м ^{0,5}	опыт № 2	
Расчетная метацентрическая высота	h_4''	м	$h_4'' = \left(\frac{C_2 B}{\tau_{\theta_4}} \right)^2$	
Относительная погрешность	δ_2	%	$\delta_2 = \frac{h_4'' - h_4'}{h_4'} \cdot 100$	
Инерционный коэффициент	C_3	с/м ^{0,5}	опыт № 3	
Расчетная метацентрическая высота	h_4'''	м	$h_4''' = \left(\frac{C_3 B}{\tau_{\theta_4}} \right)^2$	
Относительная погрешность	δ_3	%	$\delta_3 = \frac{h_4''' - h_4''}{h_4''} \cdot 100$	

4. На основании проделанной работы можно установить (табл. 2.8.6), что величина инерционного коэффициента зависит от размещения грузов на судне. При этом, чем меньше расстояние от оси G_x до ЦТ масс, составляющих переменную нагрузку, тем меньше величина инерционного коэффициента.

Сделать вывод о том, удовлетворяет ли полученное значение требованиям ИМО и Правил Морского Регистра судоходства.

В конце работы построить график зависимости кренящего момента $M_{кр}$ от угла крена θ .

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Что называется периодом свободных бортовых колебаний?
2. Как раскачать судно на тихой воде и определить средний период бортовой качки?
3. Как приближенно оценить по формуле (8.4) метацентрическую высоту судна при его движении на волнении?
4. Почему инерционный коэффициент модели возрастает при перемещении грузов вверх и к бортам?
5. Почему инерционный коэффициент судна порожнем обычно выше, чем у судна в полном грузу?
6. Почему не рекомендуется определять по периоду бортовой качки метацентрическую высоту судов с $h < 0,2$ м?
7. Почему ИМО рекомендует принимать для рыболовных судов открытого моря $C = 0,8$, а для судов с живорыбными танками $C = 0,60$?



Литература

1. Якута И.В. Теория и устройство судна. Раздел «Теория судна». Часть 1: учеб. пособие по самостоятельному изучению дисциплины «Теория и устройство судна» для студентов специальности 26.05.05 «Судовождение» [Текст]. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020.
2. Жинкин, В.Б. Теория и устройство корабля [Текст]: учебник / В.Б. Жинкин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с. (или 4-е изд., испр. и доп. – 2010. – 408 с.).
3. Мореходные качества рыболовных судов. Теория и задачи [Текст]: учеб. пособие / В.Д. Кулагин, А.Г. Валишин, Т.В. Кордас, И.В. Якута. – Калининград: Изд-во БГАРФ, – 2005.
4. Статика корабля [Текст]: учеб. пособие / Р.В. Борисов [и др.] – СПб. – Судостроение, 2005. – 256 с.
5. Маков, Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? (Диалоги с капитаном) [Текст] / Ю.Л. Маков. – СПб.: Судостроение, 2005. – 320 с.
6. Кулагин, В.Д. Теория и устройство промысловых судов [Текст]: учебник / В.Д. Кулагин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1986.– 392 с.
7. Правила классификации и постройки морских судов [Электронный ресурс]. – [Российский Морской Регистр Судостроения, 2021]. – Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook>.
8. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОСНС 2008 года) (резолюция MSC.267(85) с поправками). – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. – 242 с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жинкин, В.Б. Теория и устройство корабля [Текст]: учебник / В.Б. Жинкин. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с. (или 4-е изд., испр. и доп. – 2010. – 408 с.).
2. Маков, Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? (Диалоги с капитаном) [Текст] / Ю.Л. Маков. – СПб.: Судостроение, 2005. – 320 с.
3. Статика корабля [Текст]: учеб. пособие / Р.В.Борисов [и др.] – СПб.: Судостроение, 2005. – 256 с.
4. Якута, И.В. Теория и устройство судна. Раздел «Теория судна». Часть 1: учеб. пособие по самостоятельному изучению дисциплины «Теория и устройство судна» для студентов специальности 26.05.05. «Судовождение» [Текст]. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2020.
5. Данилов А.Т., Середохо В.А. Современное морское судно [Текст]: Учебник. – СПб.: Судостроение, 2011. – 448 с.
6. Правила о грузовой марке морских судов [Электронный ресурс]. – [Российский Морской Регистр Судоходства, 2021]. – Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook>.
7. Правила классификации и постройки морских судов [Электронный ресурс]. Ч. IV. – [Российский Морской Регистр Судоходства, 2021]. – Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook>.
8. Новиков А.И. Оценка посадки, остойчивости и прочности судна в процессе эксплуатации [Текст]/ А.И. Новиков: учеб. пособие. – Севастополь: Издатель Кручинин Л.Ю., 2005 – 136 с.
9. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДМНВ-78) с поправками (консолидированный текст) [Текст] = International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978 (STCW 1978), as amended (consolidated text): отв. исполн. В.Я. Васильев. – Введ. с 28.04.1984 года: с поправками по состоянию на сентябрь 2016 года. – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016.
10. Международная морская организация (ИМО) Модельный курс ИМО 7.03 "Officer in Charge of a Navigational Watch" раздел 3.2 MAINTAIN THE SEAWORTHINESS OF THE SHIP (3.2.1 SHIP STABILITY; 3.2.2 SHIP CONSTRUCTION).
11. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОСНС 2008 года) (резолюция MSC.267(85) с поправками). – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. – 242 с.
12. Кулагин В.Д. Мореходные качества рыболовных судов. Теория и задачи. [Текст] – Учеб. пособие / Кулагин В.Д., Валишин А.Г., Кордас Т.В., Якута И.В. – Калининград: Изд-во БГАРФ, – 2005.
13. Кулагин В.Д. Теория и устройство промысловых судов [Текст]: учебник для вузов / В.Д. Кулагин. – 2-е изд., перераб. и доп., – Л.: Судостроение, 1986. – 392 с.

**Пример оформления протокола
лабораторной работы**

Лабораторная работа № 3

**Влияние на посадку и остойчивость судна
приёма (снятия) малого груза**

Цель работы: изучение влияния на посадку и остойчивость судна типичной грузовой операции – приёма или снятия малого груза, закрепление теоретического материала.

Методика проведения лабораторной работы

1. Исходное состояние модели (перед приёмом малого груза) принять таким, как в лабораторной работе № 1. Модель имеет: M_0 , $T_{н0} = T_{к0} = T_0$. Метацентрическую высоту в исходном состоянии h_0 взять из опыта кренования модели без учёта абсолютной погрешности опыта, т. е. принять её равной: $\bar{h}(h_0 = \bar{h})$.

2. Груз массой $m_{гр} = 0,50$ кг (для модели в первом лотке) и $m_{гр} = 0,49$ кг (для модели во втором лотке) поместить в точку с координатами $x = -0,20$ м, $y = 0,025$ м и $z = 0,15$ м, замерить по мерным линейкам осадки оконечностей T_n и T_k и снять показания на линейках $z_{лб}$ и $z_{лб}$ (на миделе).

Масса модели после приёма груза:

$$M = M_0 + m_{гр}.$$

3. Груз переместить в точку с координатами $x = -0,20$ м, $y = 0$ м и $z = 0,15$ м, т. е. поместить его в диаметрально плоскость модели и произвести кренование модели. Для опытного определения h выполнить шесть наклонений модели.

4. Измеренные параметры посадки судна после приема груза записываются в табл. 3.1.

5. Результаты размеров $z_{лбi}$ и $z_{лбi}$ после кренования модели записываются в табл. 3.2.

Таблица 3.1

Вычисление приращения параметров посадки судна после приема груза

Определяемая величина	Параметры посадки после приема груза		Изменение параметров посадки, вызванное приемом груза	
	Обозначение или формула	Численное значение	Обозначение или формула	Численное значение
I	II	III	IV	V
Осадка носом	T_n		$\delta T_n = T_n - T_{n0}$	
Осадка кормой	T_k		$\delta T_k = T_k - T_{k0}$	
Средняя осадка	$T = (T_n + T_k)/2$		$\delta T = T - T_0$	
Показания отвеса ПБ	$z_{пбi}$		-	
Показания отвеса ЛБ	$z_{лбi}$		-	
Угол крена	$\theta_i = 57,3 \frac{ z_{пбi} - z_{лбi} }{a}$		θ	

Таблица 3.2

Вычисление приращения поперечной метацентрической высоты после приема груза

№ опыта	$z_{пбi},$ см	$z_{лбi},$ см	$ z_{пбi} - z_{лбi} ,$ см	$\theta_i = \frac{ z_{пбi} - z_{лбi} }{a},$ рад	$m_i,$ кг	$l_i,$ м	$m_i l_i,$ кг·м	$h_i = \frac{m_i l_i}{M \theta_i},$ м
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1								
2								
3								
4								
5								
6								
								Σ_{IX}
$h = \frac{1}{6} \Sigma_{IX} = \text{---}, \text{ м}; \quad \delta h = h - h_0 = \text{---} \text{ м}$								

Расчётная часть

По формулам рассчитываются δT , δh , θ^0 , δT_n и δT_k .

Полученные теоретические значения приращений параметров посадки и остойчивости модели от приёма груза сравниваются с опытными параметрами.

По результатам опыта кренования определяется значение метацентрической высоты h . Определяется изменение метацентрической высоты вследствие приема малого груза $\delta h = h - h_0$.

В конце работы сделать вывод о том, удовлетворяет ли полученное значение h требованиям ИМО и Правил Морского Регистра судоходства. Построить график зависимости $M_{кр}(\theta)$.

Работа № _____ выполнена « _____ » _____ 20__ г.

Курсант гр. _____

Преподаватель _____

**Якута Ирина Владимировна
Гуральник Борис Самуилович**

ТЕОРИЯ И УСТРОЙСТВО СУДНА

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ
для курсантов и студентов
высших учебных заведений
по специальности 26.05.05 «Судовождение»
всех форм обучения

*Ведущий редактор О.В. Напалкова
Младший редактор Г.В. Деркач*

*Компьютерное редактирование
В.А. Ляшок*

*Подписано в печать 21.05.2021 г.
Усл. печ. л. 7,3. Уч.-изд. л. 7,5.*

Лицензия № 021350 от 28.06.99.

Печать офсетная.

Формат 60x90/16.

Заказ № 1669. Тираж 80 экз.

*Доступ к архиву публикации и условия доступа к нему:
<https://bgarf.ru/akademia/#biblioteka>*

БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»

*Издательство БГАРФ,
член Издательско-полиграфической ассоциации высших учебных заведений
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6.*

БГАРФ