

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Гидравлика»

*В.Б.Жинкин, И.В.Качанов, И.Е.Товстых*

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ. ХОДКОСТЬ СУДНА  
Методическое пособие для проведения практических занятий  
по дисциплине «Теория корабля»

М и н с к 2 0 0 9

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Гидравлика»

*В.Б.Жинкин, И.В.Качанов, И.Е.Товстых*

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ. ХОДКОСТЬ СУДНА

Методическое пособие

для проведения практических занятий по дисциплине «Теория корабля»  
для студентов специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая  
эксплуатация водного транспорта»

М и н с к 2 0 0 9

УДК 629.12.03

ББК 0455.9

Ж 66

**Р е ц е н з е н т ы:**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов машиностроительного профиля» БНТУ А.А.Хмелев;  
заместитель начальника управления морского и речного транспорта Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь А.Н.Чернобылец

**Жинкин В.Б., И.В.Качанов, Товстых И.Е.**

Ж66 Теория корабля. Ходкость судна: методическое пособие для проведения практических занятий по дисциплине «Теория корабля», БНТУ, Мн.: 2009, - 54 с.

Предлагаемое учебное пособие предназначено для студентов и магистрантов дневной и заочной форм обучения специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта» Оно включает в себя разделы программы дисциплины «Теория корабля», относящиеся к ходкости судна, вопросы для самопроверки, указания к выполнению контрольного задания (для студентов заочной формы обучения) с примерами расчета и графическими построениями, которые могут быть рассмотрены при проведении практических занятий.

Пособие также будет полезно для студентов-дипломников и инженеров водного транспорта при выполнении расчетов, связанных с определением сопротивления движению судна, мощности судового двигателя, проектированием гребного винта.

УДК 629.12.03

ББК 0455.9

© БНТУ, 2009

## ВВЕДЕНИЕ

Данное методическое пособие подготовлено совместно преподавателями Белорусского национального технического университета и Санкт-Петербургского государственного морского технического университета и предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Теория корабля».

При изучении дисциплины «Теория корабля» согласно учебному плану специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта» предусмотрены практические занятия по таким разделам, как статика и динамика корабля. По динамике корабля предусмотрены практические занятия и контрольное задание по такому подразделу как ходкость. Материал структурно изложен следующим образом:

*глава 1* – «Теория корабля. Ходкость судна» (приведены программа подраздела «Ходкость судна», списки основной и дополнительной литературы, вопросы для самопроверки);

*глава 2* – Контрольное задание «Расчет ходкости судна» (приводятся варианты заданий и необходимые пояснения к их выполнению);

*глава 3* – «Пример расчета ходкости судна» (приводятся все расчеты по ходкости судна, подобные тем, что должны выполнять студенты в контрольном задании или в определенных разделах дипломных проектов).

Данное пособие не заменяет лекционных курсов по теории корабля и не исключает использования существующих учебников. Глубокие теоретические вопросы в нем не затронуты, а нашли отражение в основном практические расчеты, необходимые справочные материалы, расчетные схемы и формулы. В процессе отбора, систематизации и обобщения материала для данного пособия основное внимание было уделено обеспечению методологического единства его содержания, а также более простому и понятному изложению методов расчета ходкости судов в различных путевых условиях.

# 1. ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ. ХОДКОСТЬ СУДНА

Ходкостью называется способность судна двигаться с заданной скоростью при эффективном использовании мощности энергетической установки. Это мореходное качество в значительной степени определяет энергетические затраты на движение судна, а следовательно, и его экономические показатели в процессе эксплуатации.

На движущееся судно действует сила сопротивления, для преодоления которой применяются движители – устройства, предназначенные для создания полезной тяги. Таким образом, ходкость включает в себя две дисциплины: «Сопротивление движению судна» и «Судовые движители». При изучении первой из них рассматриваются причины, вызывающие появление силы сопротивления движению, и способы определения этой силы. Вторая дисциплина изучает устройства, преобразующие механическую энергию двигателя в энергию поступательного движения судна. Особое внимание уделяется самому распространенному движителю – гребному винту, его проектированию, испытаниям, взаимодействию с корпусом судна, а также расчетам ходовых характеристик винтовых судов.

## 1.1. Сопротивление движению судна

### Литература

#### *Основная*

1. **Жинкин В.Б.** Теория и устройство корабля. СПб.:Судостроение, 2002.

#### *Дополнительная*

2. **Мирохин Б.В., Жинкин В.Б., Зильман Г.И.** Теория корабля. Л.:Судостроение, 1989.
3. **Войткунский Я.И.** Сопротивление движению судна. Л.: Судостроение, 1988.
4. **Васильев А.В., Савинов В.Н., Егоров П.Н.** Гидромеханика судов внутреннего плавания. В 4-х ч. Ч. 1. Расчет сопротивления движению судов внутреннего плавания, Нижний Новгород, НГТУ, 1996. – 147 с.

5. **Зуев В.А., Калинина Н.В., Рабазов Ю.И.** Выбор основных характеристик морских транспортных судов на начальной стадии проектирования, Нижний Новгород, НГТУ, 2007. – 225 с.

### **Общие указания**

Материал данной главы в соответствии с приводимой программой изложен в учебнике [1]. Параграфы, указанные в программе, следует внимательно изучить, с остальным материалом учебника достаточно ознакомиться.

В учебнике [1] содержатся необходимые материалы для выполнения контрольного задания, а работы [2], [3], [4], [5] можно использовать с целью получения более глубоких знаний в изучаемой области.

Вопросы для самопроверки необходимо просмотреть по окончании изучения соответствующих тем раздела, давая на них ответы, желательно не пользоваться учебником.

### **Программа**

#### **Тема 1. *Введение. Общие сведения о сопротивлении движению судна***

Предмет и задачи курса. Сопротивление движению судна и причины, его порождающие. Режимы движения судов. Суда водоизмещающие; суда с динамическим поддержанием.

Литература: [1, §3.1].

Вопросы для самопроверки

1. Какие разделы включает в себя ходкость судна?
2. В чем физические причины возникновения сопротивления движения судна?
3. Каким критерием динамического подобия определяется режим движения судна?
4. Перечислите типы высокоскоростных судов с динамическим поддержанием.
5. Почему подавляющее количество судов движется в режиме плавания?

## Тема 2. *Составляющие сопротивления движению*

Основные составляющие сопротивления вязкостной и волновой природы. Категории динамического подобия, их определяющие. Дополнительные составляющие сопротивления. Буксировочная мощность.

Литература: [1, §3.2; 3.3].

### Вопросы для самопроверки

1. Какие составляющие сопротивления движению судна являются основными?
2. Каково соотношение величин вязкостного и волнового сопротивлений и от чего оно зависит?
3. Что включает в себя вязкостное сопротивление?
4. В чем отличие тел хорошо- и плохообтекаемых?
5. Как зависит волновое сопротивление от скорости движения и глубины погружения судна?
6. Какие дополнительные составляющие сопротивления вы знаете?
7. Чем определяется буксировочная мощность судна?

## Тема 3. *Экспериментальные методы определения сопротивления*

Установки для исследования сопротивления судов средствами модельного эксперимента. Требования к проведению модельного эксперимента. Методы пересчета результатов модельного эксперимента на натурное судно.

Литература: [1, §3.4].

### Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой опытовый бассейн?
2. Какие требования предъявляются к модели для экспериментальных исследований?
3. Какие требования необходимо выполнить при проведении модельного эксперимента?
4. В чем заключается пересчет результатов модельного эксперимента на натурное судно?

#### Тема 4. *Приближенные способы расчета сопротивления судна*

Общая характеристика приближенных способов расчета сопротивления. Три группы приближенных способов. Способы расчета полного сопротивления или буксировочной мощности. Приближенные способы определения остаточного сопротивления.

Литература: [1, §3.5].

##### Вопросы для самопроверки

1. На чем основываются приближенные способы расчета сопротивления?
2. Почему способы первой группы наименее точные?
3. В чем заключается основная идея способов второй группы?
4. Каковы основные причины неточности расчетов сопротивления с использованием приближенных способов?

#### Тема 5. *Влияние условий эксплуатации на сопротивление движению*

Сопротивление судна при движении в штормовых условиях. Движение в сплошных и битых льдах. Изменение сопротивления при движении на мелкой воде и в каналах, причины этих изменений.

Литература: [1, §3.6].

##### Вопросы для самопроверки

1. Каковы причины роста сопротивления в штормовых условиях?
2. Перечислите основные характеристики ледяного покрова?
3. Какие суда предназначены для движения в сплошных льдах, в битых льдах?
4. Чем объясняется изменение сопротивления судна при движении на мелкой воде? В каналах?
5. Какие требования предъявляются к глубине воды на мерной миле?



## Тема 6. *Сопротивление движению быстроходных судов с динамическим поддержанием*

Особенности формы глиссирующих судов и сопротивление их движению. Сопротивление движению судов на подводных крыльях (СПК), судов на воздушной подушке (СВП), судов-экранопланов (СЭП).

Литература: [1, §3.7].

### Вопросы для самопроверки

1. Какие обводы характерны для глиссирующих судов?
2. Перечислите основные составляющие глиссирующих судов.
3. В чем заключаются условия равновесия СПК?
4. Назовите составляющие сопротивления СПК в переходном и расчетном режимах движения.
5. Какие типы СВП существуют и в чем их различия?
6. В чем главная особенность зависимости сопротивления СЭП от скорости движения?
7. Почему быстроходные суда с динамическим поддержанием не бывают большого водоизмещения?

## Тема 7. *Методы снижения сопротивления движению судна*

Методы снижения вязкостного сопротивления. Методы снижения волнового сопротивления. Реализация этих методов при проектировании и эксплуатации судов.

Литература: [1, §7.2].

### Вопросы для самопроверки

1. Какие из методов снижения вязкостного сопротивления находят применение на практике?
2. Назовите два основных пути снижения волнового сопротивления.
3. На каких судах реализуются способы снижения волнового сопротивления?

## 1.2. Судовые движители

### Литература

#### *Основная*

1. **Жинкин В.Б.** Теория и устройство корабля. СПб.:Судостроение, 2002.

#### *Дополнительная*

2. **Мирохин Б.В., Жинкин В.Б., Зильман Г.И.** Теория корабля. Л.:Судостроение, 1989.
3. **Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А.** Судовые движители. Л.:Судостроение, 1988.
4. **Васильев А.В., Савинов В.Н., Егоров П.Н.** Гидромеханика судов внутреннего плавания. В 4-х ч. Ч. 1. Расчет сопротивления движению судов внутреннего плавания, Нижний Новгород, НГТУ, 1996. – 147 с.

### Общие указания

Материалы второй главы «Ходкость судна» изложены в [1] в соответствии с приводимой программой. Параграфы, указанные в программе, следует изучить, с остальным материалом достаточно просто ознакомиться. В [1] также содержатся материалы, необходимые для выполнения контрольного задания. Дополнительная литература может быть использована для более глубокого изучения курса.

Вопросы для самопроверки следует просмотреть после изучения соответствующей темы. Пользоваться учебником при ответах не рекомендуется.

### Программа

#### Тема 1. *Введение. Общие сведения о судовых движителях*

Предмет курса. Назначение и классификация судовых движителей, их основные виды. Теория идеального движителя.

Литература: [1, §4.1; 4.2].

#### Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит назначение движителя?

2. На какие два типа по принципу действия разделяются судовые двигатели?
3. Каковы принципы действия активных и гидрореактивных двигателей?
4. Перечислите основные типы активных и гидрореактивных двигателей.
5. В чем состоят основные допущения теории идеального двигателя?
6. Каковы основные выводы теории идеального двигателя?
7. Почему КПД реального двигателя всегда ниже, чем идеального?

## **Тема 2. Геометрия гребного винта. Его кинематические гидродинамические характеристики**

Винтовая линия и винтовая поверхность. Основные геометрические характеристики гребного винта. Поступь и скольжение винта. Результирующая скорость обтекания элемента лопасти, ее составляющие. Силы, действующие на элемент лопасти и гребной винт в целом. Коэффициенты упора, момента, полезного действия гребного винта. Кривые действия, гидродинамические характеристики гребного винта.

Литература: [1, §4.3; 4.4].

### **Вопросы для самопроверки**

1. Как образуются винтовая линия, винтовая поверхность?
2. Дайте определения шагового и дискового отношений.
3. Что является рабочим элементом гребного винта?
4. Дайте определение поступи и скольжения гребного винта.
5. Суммой каких скоростей является результирующая скорость обтекания элемента лопасти?
6. Дайте определение силы упора и момента сопротивления вращению гребного винта.
7. Какие режимы работы гребного винта вы знаете?

### Тема 3. *Экспериментальные исследования работы гребных винтов*

Назначение экспериментальных исследований; установки для их проведения. Моделирование работы гребных винтов, определяющие критерии динамического подобия. Испытания моделей гребных винтов в свободной воде. Влияние геометрии винтов на их гидродинамические характеристики. Диаграммы для расчета гребных винтов.

Литература: [1, §4.5].

#### Вопросы для самопроверки

1. С какой целью проводятся испытания моделей гребных винтов?
2. Почему испытываются модели, а не натурные гребные винты?
3. Какие требования должны выполняться при моделировании работы гребных винтов?
4. Какие критерии динамического подобия являются определяющими при моделировании работы различных типов гребных винтов?
5. Какие геометрические характеристики гребных винтов оказывают наибольшее влияние на их гидродинамические характеристики?
6. В чем заключается способ построения диаграмм для расчета гребных винтов?
7. Какие коэффициенты задания используются при проектировании гребных винтов?

### Тема 4. *Взаимодействие гребного винта с корпусом судна*

Попутный поток и причины его возникновения. Влияние неравномерности поля скоростей на работу гребного винта. Засасывание. Пропульсивный коэффициент и его составляющие.

Литература: [1, §4.6].

#### Вопросы для самопроверки

1. За счет чего возникает попутный поток?
2. Какие составляющие попутного потока вы знаете?

3. В чем заключаются различия между коэффициентами попутного потока: номинального, эффективного и расчетного?
4. Как влияет неравномерность поля скоростей на работу гребного винта?
5. Почему полезная тяга не равна упору гребного винта?
6. Что представляет собой пропульсивный коэффициент?
7. Как влияют коэффициенты попутного потока и засасывания на пропульсивный коэффициент?

### Тема 5. *Кавитация гребных винтов*

Кавитация крыльев и лопастей гребного винта. Стадии кавитации гребных винтов. Негативные последствия кавитации, способы ее отдаления. Кавитирующие и частично погруженные гребные винты.

Литература: [1, §4.7; 4.9].

#### Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение кавитации.
2. В чем причина возникновения кавитации крыльев и лопастей гребных винтов?
3. Какой критерий динамического подобия определяет степень развития кавитации?
4. Как изменяются гидродинамические характеристики винтов в первой и во второй стадиях кавитации?
5. В чем причины кавитационной эрозии?
6. Каким образом можно отдалить кавитацию гребного винта?
7. В каких режимах работают кавитирующие и частично погруженные гребные винты?

### Тема 6. *Проектирование гребных винтов*

Выбор основных геометрических характеристик гребных винтов, их числа и направления вращения. Проектирование гребных винтов по диа-

граммам серийных испытаний. Особенности гребных винтов быстроходных судов, ледоколов. Обеспечение прочности винтов.

Литература: [1, §4.8; 4.9].

#### Вопросы для самопроверки

1. Почему большинство морских транспортных судов являются одновинтовыми?
2. Из каких условий выбираются количество лопастей, направление вращения и дисковое отношение гребного винта?
3. Сколько имеется основных схем проектирования гребных винтов по диаграммам? Когда они используются?
4. В чем заключаются основные особенности некавитирующих гребных винтов быстроходных судов?
5. Каковы особенности гребных винтов ледоколов?

#### Тема 7. *Совместная работа гребного винта и энергетической установки судна*

Пропульсивный комплекс судна: двигатель-движитель. Характеристики двигателя и движителя, связь между ними. Соответствие гребного винта и механической установки. Винты регулируемого шага. Ходовые характеристики судна. Ходовые испытания судов.

Литература: [1, §4.10].

#### Вопросы для самопроверки

1. Что собой представляют характеристики двигателя, гребного винта?
2. Что собой представляет винтовая характеристика двигателя?
3. В чем заключается соответствие гребного винта двигателю?
4. Что общего между гидродинамически тяжелыми и легкими винтами?
5. Перечислите основные достоинства и недостатки гребных винтов регулируемого шага.
6. Что собой представляет паспортная диаграмма судна? Какие задачи решаются с ее помощью?

7. В чем назначение ходовых испытаний? Какие требования предъявляются к их проведению?

### **Тема 8. *Специальные вопросы работы и проектирования гребных винтов***

Реверсирование гребных винтов фиксированного и регулируемого шага. Периодические силы, действующие на гребной винт в равномерном поле скоростей. Усилия, передаваемые гребным винтом на корпус судна. Шум гребного винта. Парциальные режимы движения судна.

Литература: [1, §4.11].

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Что называется реверсом судна?
2. Как протекает процесс реверса ВФШ, ВРШ?
3. Что такое статическая неуравновешенность гребного винта и в чем она проявляется?
4. Какие причины вызывают динамическую неуравновешенность винта и к чему приводит такая неуравновешенность?
5. Назовите 4 основные составляющие шумности гребного винта и причины их порождающие.
6. Когда имеют место парциальные режимы работы гребных винтов и чем они сопровождаются?

### **Тема 9. *Способы повышения эффективности работы гребных винтов***

Потери энергии, сопровождающие работу гребного винта. Снижение потерь – повышение эффективности гребных винтов. Направляющие насадки. Снижение потерь на создание вызванных окружных скоростей. Гребные винты без концевых вихрей. Малооборотные винты увеличенного диаметра. Снижение отрицательного влияния неравномерности поля скоростей в диске гребного винта.

Литература: [1, §7.3].

### Вопросы для самопроверки

1. Перечислите потери энергии, имеющие место при работе гребного винта.
2. Что относят к конструктивным, а что к индуктивным потерям энергии?
3. Какие способы используются для снижения потерь на создание вызванных осевых скоростей и вызванных окружных скоростей?
4. Назовите два пути снижения влияния неравномерности поля скоростей на работу гребного винта.

*Контрольное задание по курсу:*

- варианты заданий и пояснения к выполнению – в главе 2;
- расчетный пример – в главе 3.

## **2. КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ**

### **«Расчет ходкости судна»**

Выполнение задания предусмотрено учебным планом и должно способствовать закреплению изучаемого теоретического материала, а также приобретению навыков расчета ходкости судов.

В контрольном задании производится расчет ходкости одновинтового судна с прямой передачей мощности на гребной винт. Элементы рассчитываемого судна и требуемая скорость его движения принимаются согласно таблице 1. Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера зачетной книжки студента (так, при окончании номера на 03; 23 заданным является вариант №3; для последних цифр 13; 33 – вариант №13).



Таблица 1 – Варианты заданий

№ п/п	Тип судна	Длина по ГВЛ, м	Ширина В, м	Осадка Т, м	Водоизмещение D, т	Расчетная скорость $v_s$ , уз
1	2	3	4	5	6	7
1	Химовоз	97,4	16,6	6,69	8400	13,5
2	Лесовоз	119	17,0	7,33	10200	14,5
3	Танкер	141	19,2	8,50	16300	15,0
4	Балкер	138	23,0	8,50	19600	14,5
5	Сухогруз	140	20,0	8,91	17800	15,5
6	Сухогруз	142	21,8	9,00	19700	16,5
7	Сухогруз	156	21,8	9,96	22100	18,0
8	Контейнеровоз	157	25,4	9,22	22800	19,0
9	Газовоз	185	29,0	10,1	39900	17,5
10	Балкер	175	32,2	12,0	54300	15,5
11	Сухогруз	99,9	12,8	5,67	5380	13,8
12	Лесовоз	113	16,7	6,37	8460	14,0
13	Сухогруз	140	20,6	9,00	17300	18,0
14	Сухогруз	148	21,2	9,72	20300	18,0
15	Танкер	174	23,4	9,50	29300	16,0
16	Балкер	172	22,8	10,1	31800	16,0
17	Танкер	172	32,2	11,0	49800	14,5
18	Танкер	214	31,1	11,6	62300	16,5
19	Танкер	256	38,7	12,9	102000	17,0
20	Танкер	280	45,0	17,0	173000	16,0

*Контрольное задание предусматривает:*

- расчет сопротивления и буксировочной мощности в функции от скорости судна;
- расчет гребного винта, обеспечивающего заданную скорость движения судна;
- выбор главного двигателя;
- расчет гребного винта, обеспечивающего при полном использовании мощности двигателя максимальную скорость движения судна.

*Указания к выполнению контрольного задания.*

Все расчеты должны быть оформлены в виде пояснительной записки на листах А1 формата (297 × 210 мм), а графики – на миллиметровой бумаге то-

го же формата. При вычислениях следует придерживаться международной системы единиц (СИ), оформление работы должно соответствовать требованиям Единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

Физические величины, необходимые для расчетов, принимаются согласно таблице 2.

Таблица 2 – **Физические величины**

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Численное значение и размерность
1	Плотность морской воды стандартная	$\rho$	$1,025 \text{ т/м}^3 = 1,025 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
2	Кинематическая вязкость морской воды при $t = 4^{\circ}\text{C}$	$\nu$	$1,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
3	Атмосферное давление стандартное	$p_a$	101 кПа
4	Давление насыщенных паров воды при $t = 18^{\circ}\text{C}$	$p_v$	2,30 кПа

Скорость судна  $v_s(\text{уз})$  связана со скоростью  $v(\text{м/с})$  соотношением

$$v = 0,514v_s . \quad (1)$$

Во всех расчетах фигурирует скорость с физической размерностью метр в секунду, однако по традиции широко используется и скорость, выраженная в узлах.

В расчетах ходкости достаточно удерживать только 3 значащие цифры, при этом относительная погрешность вычислений ( $\delta \leq 1\%$ ) будет соответствовать точности используемых в расчетах данных.

## 2.1. Расчет сопротивления движению судна

### 2.1.1. Расчет сопротивления судна при движении на тихой воде

Для заданного судна, элементы которого и скорость принимаются по таблице 1, рассчитывается зависимость сопротивления и буксировочной мощности от скорости движения. При этом используется приближенный метод, основанный на результатах испытания серии моделей одновинтовых морских транспортных судов.

В рассматриваемом методе применяется традиционное разделение сопротивления на составляющие:

$$R = (C_{F_0} + C_R + C_A + C_{AP}) \frac{\rho v^2}{2} \Omega. \quad (2)$$

Коэффициент сопротивления трения эквивалентной пластины определяется по формуле Прандтля-Шлихтинга:

$$C_{F_0} = \frac{0,455}{(\lg Re)^{2,58}}, \quad (3)$$

где

$$Re = \frac{vL}{\nu}. \quad (4)$$

Коэффициент остаточного сопротивления находится в виде

$$C_R = C_{R_0} \frac{a_v}{a_{v_0}} k_{B/T} a_{B/T}, \quad (5)$$

где  $C_{R_0} = f(\delta, F_r)$  снимается с рисунка 1;  $a_\psi, a_{\psi_0}$  определяются по рисунку 2 соответственно в функции от  $\psi = L/V^{1/3}$  для заданного судна и от  $\psi_0$  для стандартного, для которого  $\psi_0(\delta)$  находится по рисунку 1;  $k_{B/T}(F_r, B/T)$  и  $a_{B/T}(B/T)$  снимаются с рисунка 3;  $C_A$  – корреляционный коэффициент («надбавка на шероховатость») принимается в зависимости от длины судна: при  $L \leq 150$  м  $C_A = 0,3 \cdot 10^{-3}$ , при  $150 \text{ м} < L \leq 210$  м  $C_A = 0,2 \cdot 10^{-3}$ , при  $210 \text{ м} < L \leq 250$  м  $C_A = 0,1 \cdot 10^{-3}$ , при  $250 \text{ м} < L \leq 300$  м  $C_A = 0$ ,  $C_{AP}$  – коэффициент сопротивления выступающих частей, принимаемый: при  $L \leq 130$  м  $C_{AP} = 0,15 \cdot 10^{-3}$ , при  $130 \text{ м} < L \leq 130$  м  $C_{AP} = 0,1 \cdot 10^{-3}$ , при  $L > 200$  м  $C_{AP} = 0,05 \cdot 10^{-3}$ .

Величина площади смоченной поверхности может быть найдена по формуле Себеки для тихоходных и среднескоростных судов ( $\delta \geq 0,65$ ):

$$\Omega = LT \left[ 2 + 1,37(\delta - 0,274) \frac{B}{T} \right] \quad (6)$$

или по формуле Мурагина для относительно быстроходных судов ( $\delta < 0,65$ ):

$$\Omega = LT \left( 1,36 + 1,13\delta \frac{B}{T} \right) \quad (7)$$

При наличии теоретического чертежа смоченную поверхность можно определить по формуле трапеции

$$\Omega = 2 \frac{L}{n} \left( \sum_0^n l_i - \frac{l_0 + l_n}{2} \right), \quad (7')$$

где  $l_i$  – длина полупериметра  $i$ -го шпангоута;  $n$  – число теоретических шпангоутов.

Величина коэффициента общей полноты находится по формуле

$$\delta = \frac{V}{LBT}, \quad (8)$$

а число Фруда определяется выражением

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}}. \quad (9)$$

Буксировочная мощность  $P_E$  вычисляется как

$$P_E = R \cdot v \quad (10)$$

Расчет искомых зависимостей  $R(v)$  и  $P_E(v)$  удобно производить в табличной форме, задаваясь рядом (в настоящем задании – пятью) значений числа Фруда. При этом число Фруда, соответствующее заданной скорости, должно находиться внутри рассматриваемого промежутка так, чтобы  $F_{r_{расч}} \approx F_{r_4}$ . Интервал  $\Delta F_r$  зависит от величины  $F_{r_{расч}}$  и может приниматься  $\Delta F_r = 0,02$  при  $F_{r_{расч}} \geq 0,22$  и  $\Delta F_r = 0,01$  при  $F_{r_{расч}} < 0,22$ . Чтобы исключить необходимость интерполяции, а следовательно, повысить

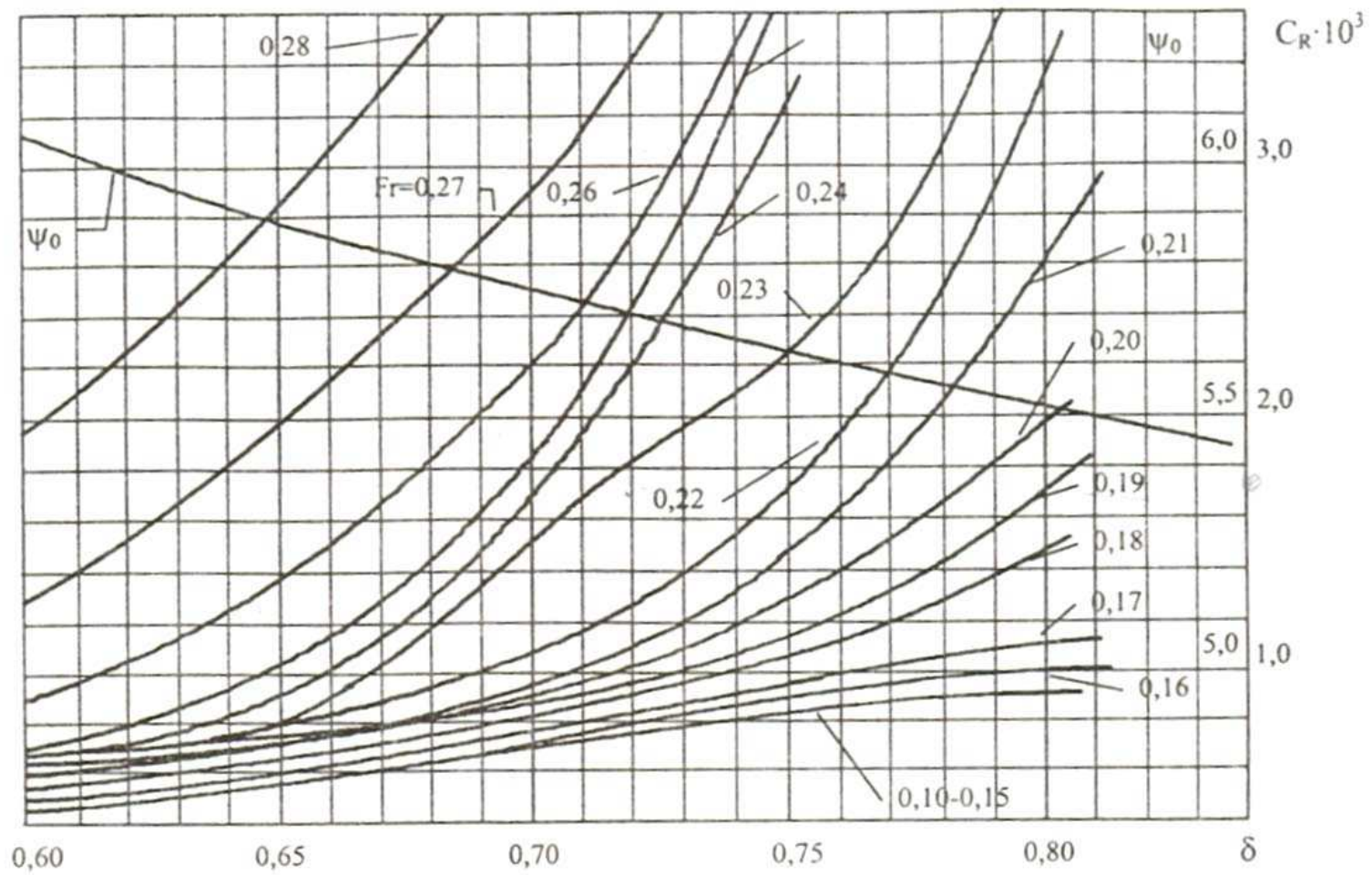


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда

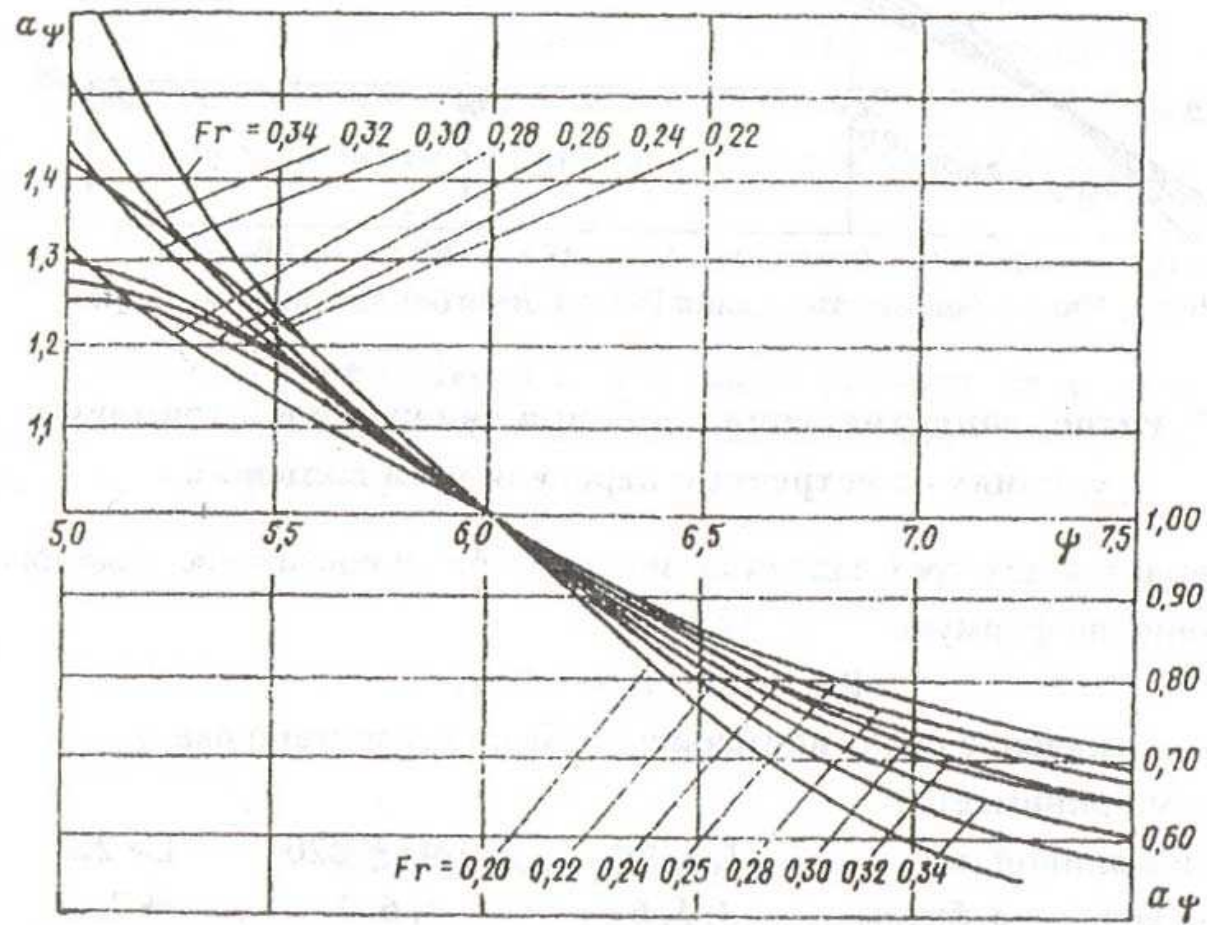


Рисунок 2 – Учет влияния относительной длины судна на остаточное сопротивление

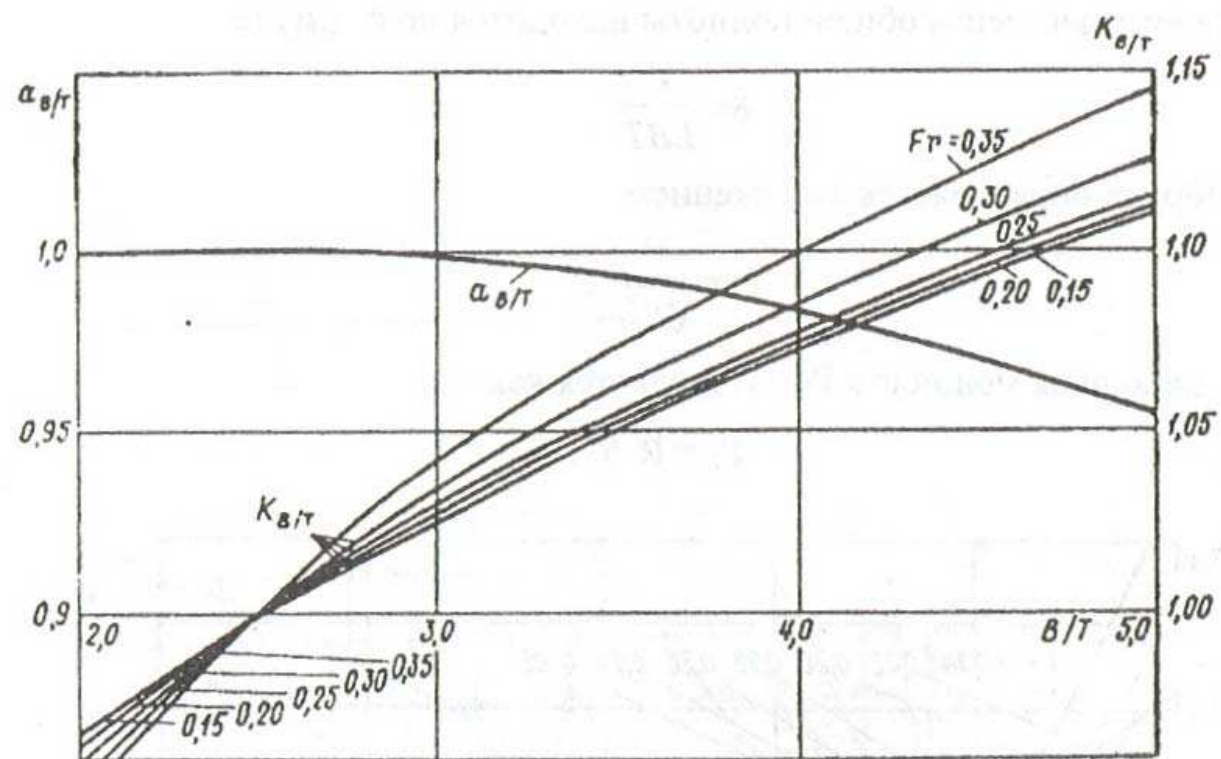


Рисунок 3 – Учет отношения В/Т на остаточное сопротивление



точность расчетов и уменьшить время на их проведение, величины  $F_{r_1} - F_{r_2}$  выбираются так, чтобы они соответствовали тем значениям, которые фигурируют на рисунке 1.

### 2.1.2. Расчет сопротивления судна при движении в штормовых условиях на встречном нерегулярном волнении

Этот расчет производится для трех заданных значений балльности нерегулярного морского волнения по формуле

$$R_{шт} = R_{ТВ} + R_{AW} + R_{AA} \quad (11)$$

где  $R_{ТВ}$  – сопротивление судна на тихой воде, которое было рассчитано ранее в 2.1.1.

При этом принимается:

для судна длиной, м	$L < 120$	$120 < L < 220$	$L > 220$
степень волнения, баллы	4, 5, 6	5, 6, 7	6, 7, 8

Дополнительное сопротивление на нерегулярном волнении определяется по формуле, кН

$$R_{AW} = C_S F_F^{0,687} h^{2,5} f(\alpha), \quad (12)$$

где  $C_S$  – коэффициент, зависящий от формы и размеров судна, кН/м<sup>2,5</sup>;

$$C_S = 2,77 \cdot 10^5 \rho g (B^2 / L^{1,5}) (1 + 4,4\delta). \quad (13)$$

Безразмерные величины:

$$\alpha = 0,252 \cdot F_r^{0,143} \sqrt{L/h}; \quad (14)$$

$$f(\alpha) = (\alpha/e^\alpha)^{12,4}. \quad (15)$$

Дополнительное сопротивление воздуха рассчитывается по формуле, кН

$$R_{AA} = 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot L V_A^2, \quad (16)$$

где скорость воздушного потока равна сумме скоростей ветра и судна:

$$V_A = V_C + V_B. \quad (17)$$

Высота волн 3%-ной обеспеченности  $h$  и расчетная скорость ветра принимаются в зависимости от силы волнения:

степень волнения, баллы	IV	V	VI	VII	VIII
высота волн $h$ , м	2,0	3,5	6,0	8,5	11
скорость ветра $V_B$ , м/с	11	14	19	24	29

Расчет сопротивления в штормовых условиях производится в табличной форме. По результатам расчетов для заданных значений силы волнения строятся зависимости сопротивления на тихой воде и штормовых условиях от скорости.

### 2.1.3. Расчет сопротивления судна при движении на тихой воде

Чтобы мелководье не привело к искажению результатов ходовых испытаний, глубина полигона должна быть не меньше величины, вычисленной по одной из приводимых формул:

$$H_1 > 3,0\sqrt{BT}; \quad (18)$$

$$H_2 > 2,75 \cdot v_s^2 / g. \quad (19)$$

## 2.2. Расчет гребного винта

Заданными являются элементы судна, кривая буксировочного сопротивления и расчетная скорость. В качестве расчетного принимается режим движения, соответствующий средним условиям эксплуатации, когда сопротивление увеличивается по сравнению с таковым во время сдаточных испытаний. Это увеличение обуславливается, в частности, обрастанием обшивки корпуса, волнением моря, что учитывается 15%-ной надбавкой к сопротивлению, определенному выше. Цель расчета – выбор оптимального гребного винта, отвечающего условиям задания и имеющего при этом наивысший КПД.

1. Диаметр гребного винта выбирается из условия  $D_B \cong 0,7T_c$ , где  $T_c$  – осадка судна. Число лопастей для одновинтового судна принимается  $Z_n = 4$ .
2. Коэффициенты взаимодействия винта и корпуса рассчитываются по формулам:

$$W_T = 0,165\delta \sqrt{\frac{\sqrt[3]{V}}{D_B}} - 0,1(F_r - 0,2); \quad (20)$$

$$t = 0,7W_T, \quad (21)$$

где  $W_r$  – коэффициент попутного потока;  $t$  – коэффициент засасывания;

$$V = \delta LBT = \frac{D}{\rho}. \quad (22)$$

3. Определение дискового отношения, минимально допустимого из условия обеспечения прочности и отсутствия кавитации, производится по следующим формулам:

$$\left( \frac{A_E}{A_0} \right)_{\min} = 0,24(1,08 - \bar{d}_H) \left( \frac{Z_L}{\delta_{\max} D_B} \right)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{10mT}{[\sigma]}}, \quad (23)$$

где  $\bar{d}_H = 0,167$  – относительный диаметр ступицы винта;  $Z_L$  – число лопастей гребного винта;  $\delta_{\max} = 0,080$  – относительная толщина сечения лопасти на радиусе  $\bar{r} = 0,6$ ;  $m$  – коэффициент, учитывающий условия работы винта равный 2 для ледоколов; 1,75 – для судов ледового плавания; 1,5 – для буксиров и толкачей; 1,15 – для транспортных судов;  $T = \frac{T_E}{1-t}$  – упор винта  $[\sigma]$  – допустимые напряжения материала лопасти, для углеродистой стали и марганцовистой латуни  $[\sigma] = 6 \cdot 10^4$  кПа

$$\left( \frac{A_E}{A_0} \right)_{\min} = \frac{(1,5 + 0,35 \cdot Z_L)T}{(p_0 - p_V)D_B^2} + \frac{0,2}{Z_p} \quad (24)$$

где  $p_0 = p_a + \gamma h_B$  – абсолютное давление на оси гребного винта;  $p_a$  – атмосферное давление;  $p_V$  – давление насыщенных паров воды;  $h_B \cong T_c - 0,55D_B$  – заглубление оси винта;  $T_c$  – осадка судна;  $\gamma = 10$  кН/м<sup>3</sup> – удельный вес воды;  $Z_p$  – число гребных винтов.

Выбирается диаграммное значение  $\left( \frac{A_E}{A_0} \right)$ , равное либо превышающее большее из рассчитанных по формулам (23) и (24).

4. Расчет гребного винта, обеспечивающего судну заданную скорость, производится с использованием коэффициента задания

$$K_{NT} = \frac{v_A}{\sqrt{n}} \sqrt[4]{\frac{P}{T}}, \quad (25)$$

где  $T = \frac{T_E}{1-t}$  - упор гребного винта, кН;  $v_A = v(1 - W_T)$ , м/с.

При этом задается несколько значений частоты вращения гребного винта  $n$ , об/с.

Параметры оптимального гребного винта: его относительную поступь  $J$ , коэффициент полезного действия в свободной воде  $\eta_0$  и шаговое отношение  $P/D$  снимают с линии  $(K_{NT})_{opt}$  на диаграмме, соответствующей выбранному дисковому отношению  $A_E/A_0$  (рисунки 4 – 6).

Величины оптимального диаметра гребного винта и необходимой мощности двигателя находим по формулам:

$$D_{opt} = \frac{v_A}{J_n}; \quad (26)$$

$$P_S = \frac{T_E v}{\eta_D \eta_S}, \quad (27)$$

где  $\eta_S = 0,98$  – КПД валопровода;

$$\eta_D = \frac{1-t}{1-W_T} \eta_0 = \eta_H \eta_0 \quad (28)$$

– пропульсивный коэффициент;  $\eta_H$  – коэффициент влияния корпуса.

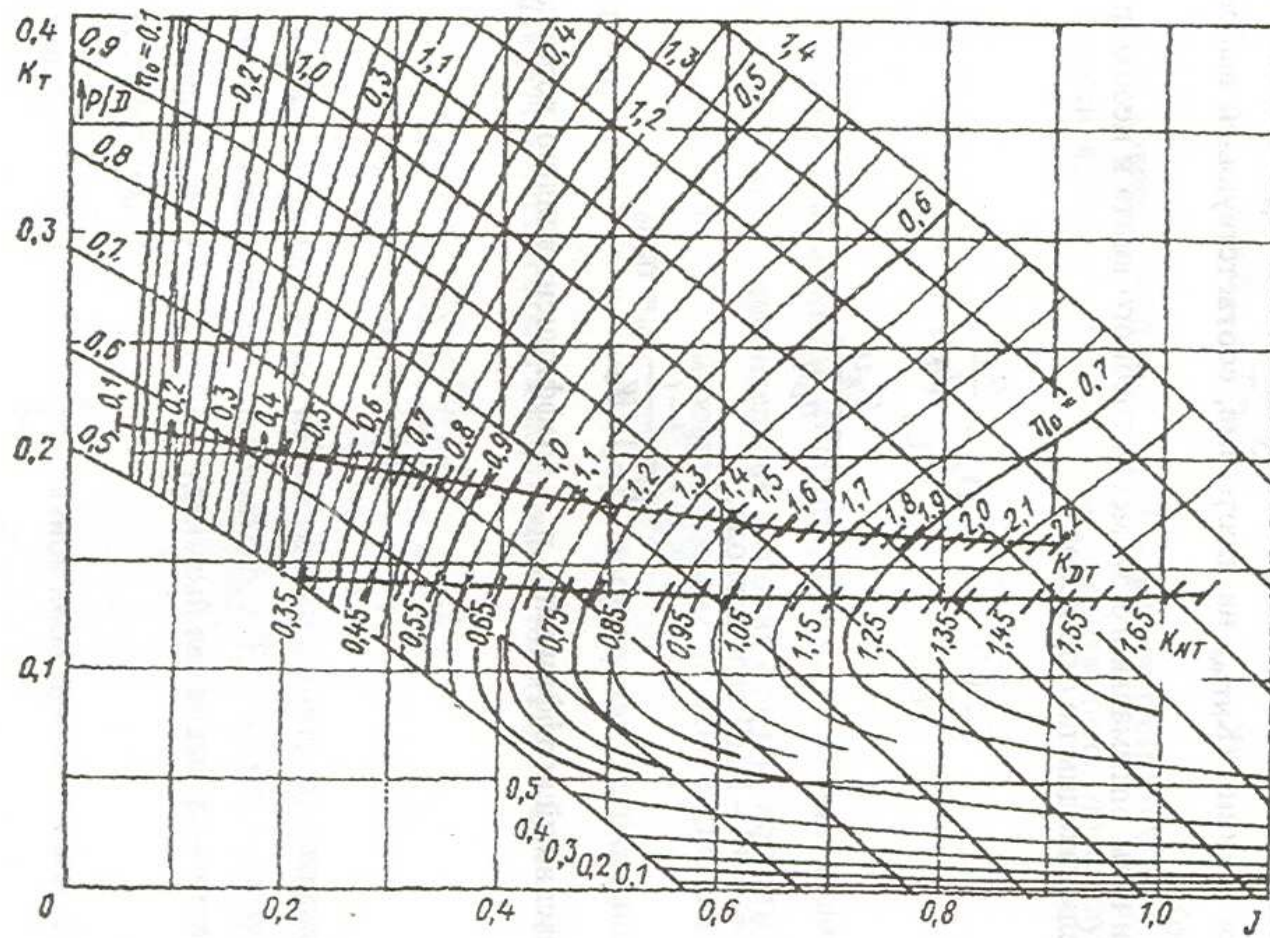


Рисунок 4 – Диаграмма для расчета гребных винтов ( $Z_n = 4, A_E/A_0 = 0,55$ )

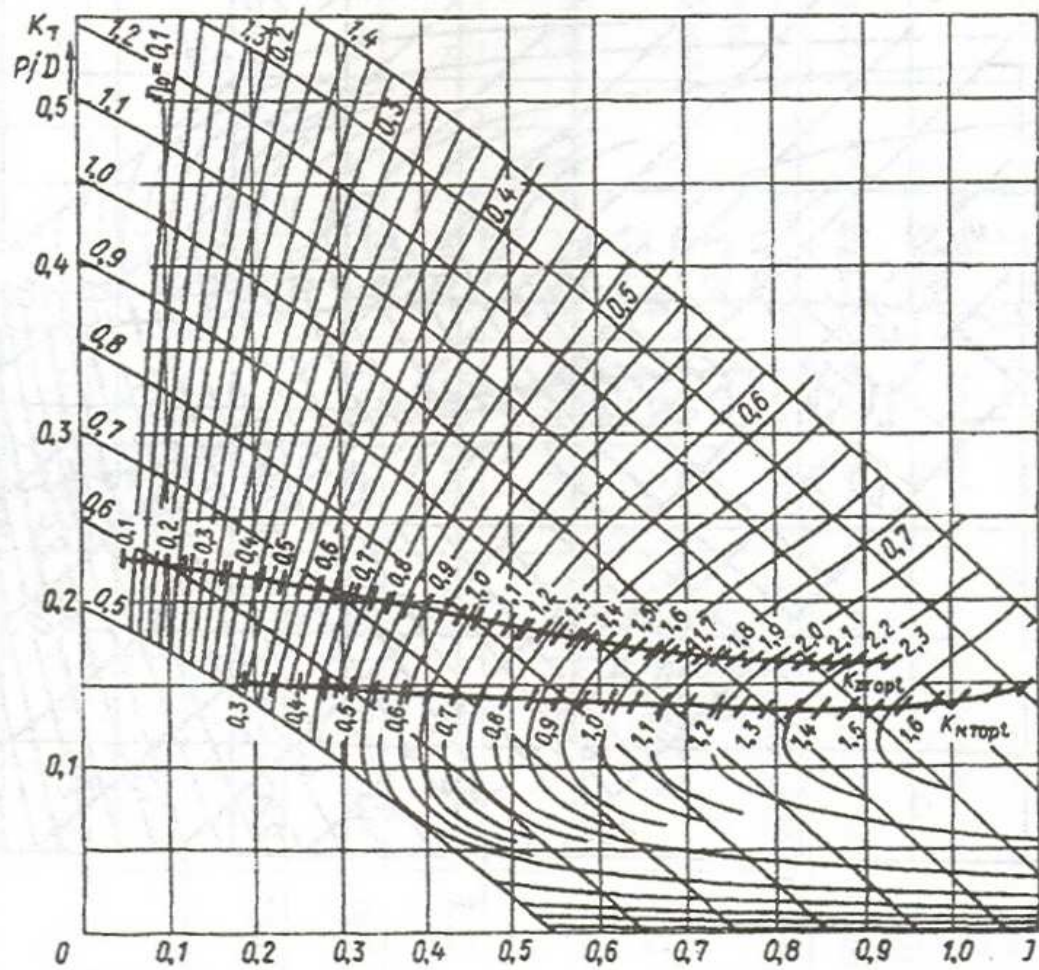


Рисунок 5 – Диаграмма для расчета гребных винтов ( $Z_n = 4, A_E/A_0 = 0,70$ )

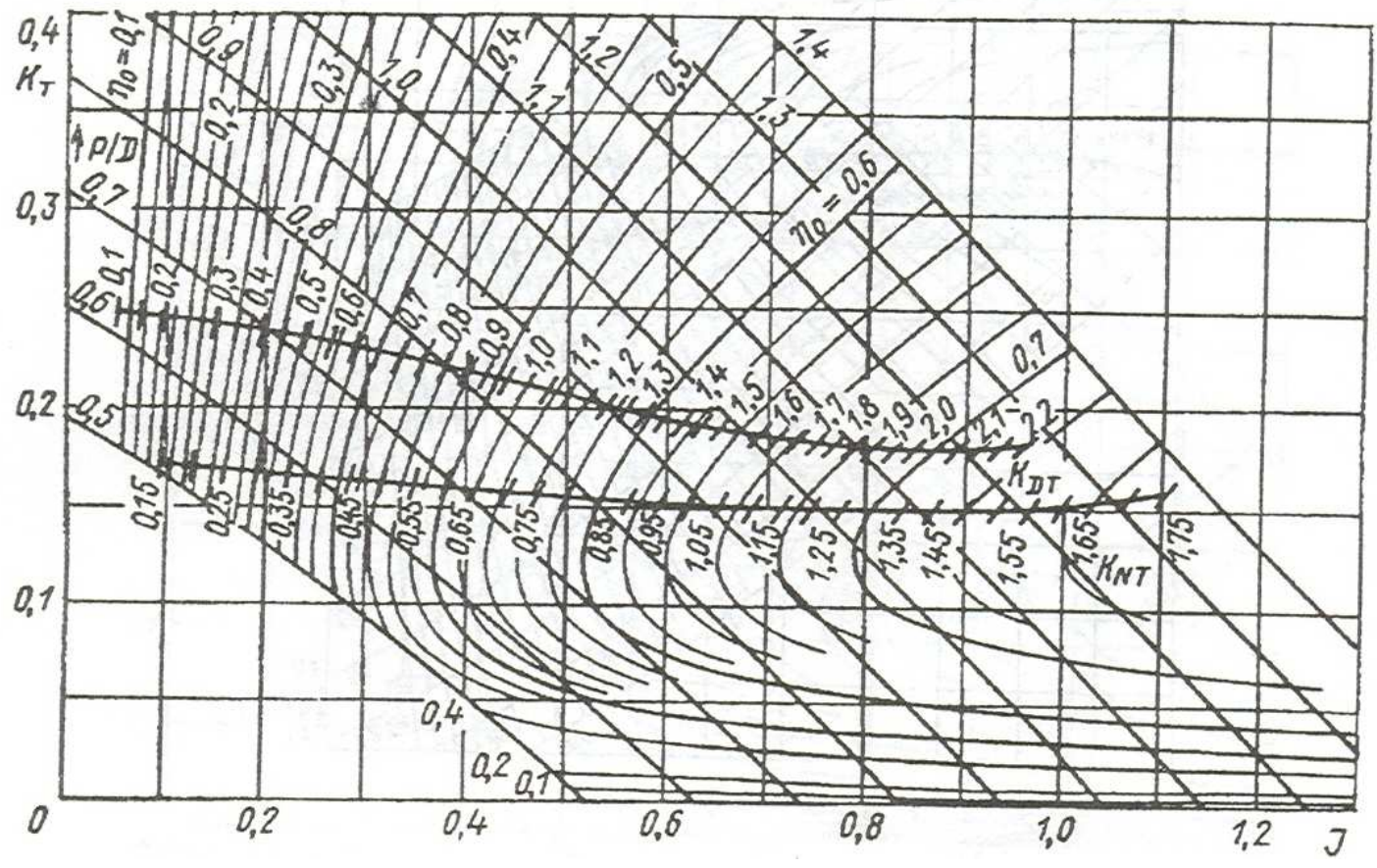


Рисунок 6 – Диаграмма для расчета гребных винтов ( $Z_n = 4, A_E/A_0 = 0,85$ )



По результатам расчетов, которые удобно производить в табличной форме, строятся зависимости  $D_{opt}$  и  $P_S$  в функции от  $n$  и для точки, в которой  $D_{opt} = D_B$ , т.е. оптимальный диаметр равен выбранному ранее, находится значение мощности  $P'_S$  и частоты вращения  $n'$ . Если во всем диапазоне частот  $D_{opt} < D_B$  (что случается достаточно редко), выбирается винт, соответствующий  $P'_{S \min}$ .

5. Выбор главного двигателя производится по каталогам предприятий и фирм с учетом полученных выше значений  $P'_S$  и  $n'$ . В настоящем задании можно ограничиться материалами таблиц 3, 4, где представлены основные характеристики некоторых малооборотных двигателей внутреннего сгорания (дизелей) и дизельных редукторных агрегатов соответственно.

Таблица 3 – Характеристики некоторых судовых малогабаритных дизелей (МОД)

Марка дизеля	Частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	Агрегатная мощность $p_s$ , тыс. кВт, при числе цилиндров								
		4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ДКРН 45/90	227	-	3,24	3,88	4,53	5,18	5,82	6,47	7,12	7,76
ДКРН 52/105	183	3,54	4,43	5,31	6,20	7,08	7,97	-	-	-
ДКРН 45/120	170	2,59	3,24	3,88	4,53	5,18	5,82	6,47	7,12	7,76
ДКРН 55/138	150	3,94	4,93	5,91	6,90	7,88	8,87	9,85	10,8	11,8
ДКРН 67/140	145	-	6,88	8,25	9,63	11,0	12,4	13,8	15,1	46,5
ДКРН 80/160	126	-	9,7	11,6	13,6	15,5	17,5	19,4	21,3	23,3
ДКРН 90/160	122	-	-	16,2	18,9	21,6	24,3	27,0	-	32,4
ДКРН 67/170	119	5,5	6,88	8,25	9,63	11,0	12,4	13,8	15,1	16,5
ДКРН 90/1800	114	-	12,6	15,1	17,1	20,1	22,6	25,1	27,6	30,1
ДКРН 80/195	103	7,76	9,70	11,6	13,6	15,5	17,5	19,4	21,3	23,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ДКРН 98/200	103	-	-	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	33,0	36,0
ДКРН 90/218	94	10,1	12,6	15,1	17,6	20,1	22,6	25,1	27,6	30,1
ДКРН 50/191	92	3,92	4,90	5,88	6,86	7,84	-	-	-	-
ДКРН 90/255	90	12,6	15,8	19,0	22,1	25,3	28,4	31,6	32,2	35,1
ДКРН 60/194	87	5,16	6,45	7,74	9,03	10,3	-	-	-	-
ДКРН 90/292	78	15,6	19,6	23,5	27,4	31,3	35,2	39,1	43,0	46,9
ДКРН 60/229	76	4,48	5,6	6,72	7,84	8,96	-	-	-	-
ДКРН 80/259	66	9,28	11,6	13,9	16,2	18,6	20,9	23,2	25,5	27,8
ДКРН 90/292	58	11,6	14,6	17,5	20,4	23,3	26,2	29,1	32,0	34,9

*Примечания:* 1. Двигатели типа ДКРН – двухтактные крейцкопфные, с газотурбонаддувом, цифры за буквенным обозначением – диаметр цилиндра и ход поршня в сантиметрах.

2. В таблице приведены номинальные значения мощности  $P_{SH}$  и частоты вращения  $n_H$ .

3. Пример записи характеристик 12-цилиндрового двигателя:

12ДКРН 90/292,  $P_{SH} = 34900$  кВт;  $n_H = 58$  мин<sup>-1</sup>.

Таблица 4 – Основные характеристики некоторых дизель-редукторных агрегатов

№ п/п	Тип двигателя	Количество цилиндров	Мощность $P_s$ , тыс.кВт	Число оборотов на выходе редуктора, $n$ , мин <sup>-1</sup>	Расход топлива, $\frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{час}}$	Габариты двигателя, $L \times B \times H$ , мм
1	MAN L28/32A	6	1,470	252	192	5330×1732×3186
2		6	1,470	201	192	5330×1732×3186
3		6	1,470	161	192	5330×1732×3186
4		6	1,470	141	192	5330×1732×3186
5		7	1,715	252	192	5810×1732×3186
6		7	1,715	201	192	5810×1732×3186
7		7	1,715	161	192	5810×1732×3186
8		7	1,715	141	192	5810×1732×3186
9		8	1,960	252	192	6290×1732×3186
10		8	1,960	201	192	6290×1732×3186
11		8	1,960	161	192	6290×1732×3186
12		8	1,960	141	192	6290×1732×3186
13		9	2,205	252	192	6770×1844×3242
14		9	2,205	201	192	6770×1844×3242
15		9	2,205	161	192	6770×1844×3242
16		9	2,205	141	192	6770×1844×3242
17	MAN V28/32A	12	2,940	248	193	5560×2015×3032
18		12	2,940	201	193	5560×2015×3032
19		12	2,940	171	193	5560×2015×3032
20		12	2,940	151	193	5560×2015×3032
21		16	3,920	248	193	5560×2015×3032

Продолжение таблицы 4

22		16	3,920	231	193	5560×2015×3032
23	MAN V28/32A	16	3,920	191	193	5560×2015×3032
24		16	3,920	151	193	5560×2015×3032
25	MAN L23/30A-E	6	0,800	268	192	6680×2015×3032
26		6	0,800	214	192	6680×2015×3032
27		6	0,800	190	192	6680×2015×3032
28		6	0,800	159	192	6680×2015×3032
29	MAN L23/30A	6	0,960	292	194	3737×1628×2467
30		6	0,960	233	194	3737×1628×2467
31		6	0,960	207	194	3737×1628×2467
32		6	0,960	173	194	3737×1628×2467
33		8	1,280	292	194	3737×1628×2467
34		8	1,280	233	194	3737×1628×2467
35		8	1,280	207	194	3737×1628×2467
36		8	1,280	173	194	3737×1628×2467
37	MAN V28/30A	12	1,920	292	195	4477×1628×2467
38		12	1,920	233	195	4477×1628×2467
39		12	1,920	187	195	4477×1628×2467
40		12	1,920	164	195	4477×1628×2467
41	Wartsila 6L170	6	0,660	270	190	2895×1312×(1226+849)
42	Wartsila 8L170	8	0,880	260	190	3507×1312×(1461+849)
43	Wartsila 12V170	12	1,320	250	190	3065×1589×(1470+880)
44	Wartsila 12V200	12	2,400	250	190	4119×1636×(1624+990)
45	Wartsila 18V200	18	3,600	250	190	4812×1840×(1827+1023)

Продолжение таблицы 4

46	Wartsila 6L20	6	0,990	290	190	$3123 \times 1360 \times (1612 + 630)$
47	Wartsila 8L20	8	1,320	250	190	$3731 \times 1360 \times (1740 + 630)$
48	Wartsila 9L20	9	1,485	230	190	$4031 \times 1360 \times (1720 + 630)$
49	Wartsila 6L26	6	1,950	220	190	$3660 \times 1804 \times (1918 + 790)$
50	Wartsila 8L26	8	2,600	220	190	$40440 \times 1804 \times (1918 + 790)$
51	Wartsila 6L32	6	2,760	185	190	$5110 \times 2207 \times (2553 + 1150)$
52	Wartsila 9L26	9	2,925	180	190	$4830 \times 1804 \times (1918 + 790)$
53	Wartsila 8L32	8	3,680	175	190	$6405 \times 2207 \times (2806 + 1150)$
54	Wartsila 12V26	12	3,900	180	190	$4000 \times 2375 \times (2012 + 790)$
55	Wartsila 6L38	6	3,960	180	190	$6069 \times 2073 \times (4178 + 1269)$
56	Wartsila 9L32	9	4,140	175	190	$6895 \times 2207 \times (2806 + 1150)$
57	Wartsila 8L38	8	5,280	170	190	$7135 \times 2073 \times (4501 + 1296)$
58	Wartsila 12V32	12	5,520	165	190	$6868 \times 2920 \times (2680 + 1472)$
59	Wartsila 9L38	9	5,940	155	190	$7990 \times 2073 \times (4501 + 1296)$
60	Wartsila 6L46	6	6,300	150	190	$8290 \times 2895 \times (3970 + 1457)$
61	Wartsila 12V38	12	7,920	140	190	$7705 \times 3158 \times (4750 + 1540)$
62	Wartsila 8L46	8	8,400	130	190	$10005 \times 3105 \times (3970 + 1457)$
63	Wartsila 9L46	9	9,450	125	190	$11015 \times 3270 \times (4135 + 1457)$
64	Wartsila 6L64	6	12,000	120	190	$10135 \times 3965 \times 6315$
65	Wartsila 12V46	12	12,600	120	190	$10330 \times 3740 \times (4365 + 1502)$
66	Wartsila 864	8	16,000	115	190	$12525 \times 3965 \times 6655$

Чтобы скорость судна не оказалось меньше, чем заданная, при выборе двигателя следует выполнить условие  $P_S > P'_S$ ; при этом желательно, чтобы частота вращения возможно меньше отличалась от найденного выше значения, причем лучше в большую сторону.

*Примечание.* Сегодня ведущие фирмы-изготовители малооборотных судовых дизелей (МОД) могут поставлять по индивидуальному заказу двигатели с заданными значениями мощности и частоты вращения. При этом отпадает необходимость расчета гребного винта во втором приближении (на достижение максимальной скорости).

Однако для других типов двигателей (средне- и высокооборотные дизели, паровые и газовые турбины) это второе приближение остается актуальным.

Поэтому хотя в приводимом примере расчета ходкости судна используется МОД, в расчетной схеме все же сохранено второе приближение. Это позволяет сделать указанную схему проекторочного расчета гребного винта универсальной, т. е. пригодной и в случае применения других типов двигателей.

Кроме того, в рекомендуемой учебной литературе нет методики расчета винта и выбора двигателя с учетом последних возможностей фирм-изготовителей, о которых речь шла выше.

6. Расчет гребного винта, обеспечивающего судну максимальную скорость.

Поскольку характеристики выбранного двигателя  $P_S$  и  $n$  не совпадают полностью с определенными на первом этапе расчета  $P'_S$  и  $n'$ , возникает необходимость расчета винта, который бы при использовании полной (номинальной) мощности обеспечивал судну максимальную скорость. При этом должно выполняться условие  $D_B \leq D_{\max} = 0,7 T_c$ , обеспечивающее требование размещения винта в кормовой оконечности судна.

Расчет производится по схеме, подобной изложенной выше, однако заданными считаются характеристики двигателя  $P_S$ ,  $n$  и корпуса судна  $R(v)$ , а скорость движения варьируется.

При этом, как правило, достаточно задаться тремя значениями  $v$ :  $v_2 = v_{\text{расч}}$ ;  $v_1 = v_2 - \Delta v$ ;  $v_3 = v_2 + \Delta v$ , где  $\Delta v = (0,5 - 1,0)$  уз. Если определенный по диаграмме диаметр окажется больше  $D_{\text{max}}$ , то в дальнейших расчетах следует принимать  $D_B = D_{\text{max}}$ . При расчетах по диаграмме и в данном случае используется коэффициент задания  $K_{\text{НТ}}$ .

По результатам расчетов строятся графики  $D_B(v_s)$ ;  $P/D_B(v_s)$ ;  $P_S(v_s)$ . Искомая максимально достижимая скорость судна, диаметр гребного винта и его шаговое отношение определяются графически при условии равенства требуемой мощности и номинальной мощности выбранного двигателя.

Расчеты винта удобно производить в табличной форме (см. пример расчета ходкости судна).

В конце контрольного задания должны быть выписаны характеристики гребного винта ( $D_B, A_E/A_0, P/D, z_n$ ) двигателя (марка  $P_S$ ,  $n$ ) и достижимая судном (максимальная для расчетного режима) скорость.

7. Расчет и построение паспортной диаграммы (ходовых характеристик) судна.

Паспортная диаграмма – это сведенные воедино и согласованные между собой характеристики корпуса, двигателя и гребного винта. Для построения паспортной диаграммы используются найденные выше зависимости:  $R_{\text{расч}}(v)$  - характеристика корпуса;  $P_S(n)$  – характеристика двигателя;  $K_T(J)$  - характеристика рассчитанного гребного винта.

Паспортная диаграмма состоит из двух расположенных друг над другом частей. На одной (обычно верхней) приводятся расчетное сопротивление корпуса и полезная тяга, развиваемая гребным винтом, в зависимости от скорости движения для ряда значений частоты вращения при  $n = \text{const}$ .

На второй, нижней части диаграммы, строится потребляемая гребным винтом мощность в зависимости от скорости (для тех же значений  $n = \text{const}$ ), а также максимальная мощность механической установки (верхняя ограничительная и регуляторная характеристики выбранного двигателя).

Расчет паспортной диаграммы удобнее производить в табличной форме, задаваясь рядом фиксированных значений частоты вращения гребного винта  $n_i \leq n_{\text{ном}}$ . При этом учитываются характеристики взаимодействия винта и корпуса  $W_T$  и  $t$ .

Паспортная диаграмма позволяет получить полную информацию о ходовых качествах судна, потребляемой винтом мощности и частоте его вращения на всех возможных в процессе эксплуатации режимах движения. В расчетном режиме диаграмма служит для контроля всех выполненных вычислений: на ее верхней части зависимости  $R_{\text{расч}}(v)$  и при  $n = n_{\text{ном}}$  должны пересечься в точке, соответствующей максимально достижимой скорости, на нижней части той же точке должен соответствовать и номинальный режим работы двигателя  $P_S = P_{\text{ном}}$ ;  $n = n_{\text{ном}}$ .

### 3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ХОДКОСТИ СУДНА

Исходные данные для расчета:

$$L = 173 \text{ м}; B = 28,2 \text{ м}; T = 9,50 \text{ м}; D = 29400 \text{ м}^3; v_s = 21 \text{ уз } (v = 10,8 \text{ м/с}).$$

#### 3.1. Расчет сопротивления движению

1. Определим величины, необходимые для расчета:

$$V = \frac{D}{P} = \frac{29400}{1,025} = 28\,700 \text{ м}^3; \quad \delta = \frac{V}{LBT} = \frac{28700}{173 \cdot 28,2 \cdot 9,5} = 0,619;$$

$$\psi = \frac{L}{V^{1/3}} = \frac{173}{\sqrt[3]{28700}} = 5,65;$$

$$\frac{B}{T} = \frac{28,2}{9,5} = 2,97; \quad Fr_{\text{расч}} = \frac{v}{\sqrt{gL}} = 0,262;$$



$$\Omega = LT \left( 1,36 + 1,138 \frac{B}{T} \right) = 173 \cdot 9,5 (1,36 + 1,13 \cdot 0,619 \cdot 2,97) = 5650 \text{ м}^2.$$

2. Задаемся пятью значениями чисел Фруда:  $Fr = 0,20; 0,22; 0,24; 0,26; 0,28$ . С рисунка 1 снимаем  $\psi_0 = 6,0$ . Дальнейший расчет ведем в таблице 5, принимая значения физических постоянных  $\nu$  и  $\rho$  согласно таблицы 2, а коэффициенты сопротивления шероховатости и выступающих частей соответственно

$$C_A = 0,2 \cdot 10^{-3}, C_{AP} = 0,1 \cdot 10^{-3}.$$

3. Расчет сопротивления движению судна в штормовых условиях производим для трех чисел Фруда ( $Fr_1, Fr_3, Fr_5$ ) и трех значений степени морского волнения – 5, 6, 7 баллов.

Величину сопротивления судна на тихой воде принимаем из предыдущих расчетов (таблица 5).

Таблица 5 – Приближенный расчет сопротивления движению судна

№ п/п	Величина	Размерность	Численные значения				
1	$Fr$	-	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28
2	$C_{R0} 10^3$ с рис.1	-	0,57	0,66	0,79	1,02	1,31
3	$\alpha_{\psi_0}$ с рис. 2	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
4	$\alpha_{\psi}$ с рис. 2	-	1,116	1,15	1,12	1,11	1,11
5	$K_{B/T}$ с рис. 3	-	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03
6	$\alpha_{B/T}$ с рис. 3	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7	$C_R 10^3$ по (5)	-	0,673	0,774	0,902	1,15	1,51
8	$\nu = Fr \sqrt{gL}$	м/с	8,24	9,06	9,89	10,7	11,5
9	$Re 10^{-8}$ по (4)	-	9,08	9,98	10,9	11,8	12,7
10	$C_{F0}$ по (3)	-	1,59	1,57	1,55	1,54	1,52
11	$C \cdot 10^3 = (C_R + C_{F0} + C_A + C_{AP}) \cdot 10^3$	-	2,56	2,64	2,71	2,99	3,34
12	$R$ по (2)	кН	517	628	766	993	1290
13	$P_E = R \cdot \nu$	кВт	4260	5690	7570	10600	14900
14	$\nu_s = \nu / 0,514$	уз	16,0	17,6	19,2	20,8	22,4

По результатам расчетов строим зависимости  $C_R(Fr)$ , которые приведены на рисунке 7, а также  $R(v_s)$  и  $P_s(v_s)$  - на рисунке 8.

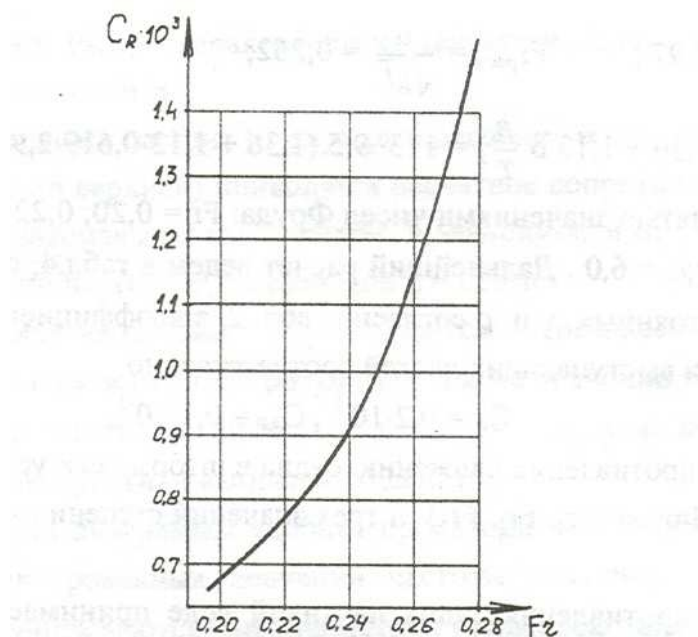


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда

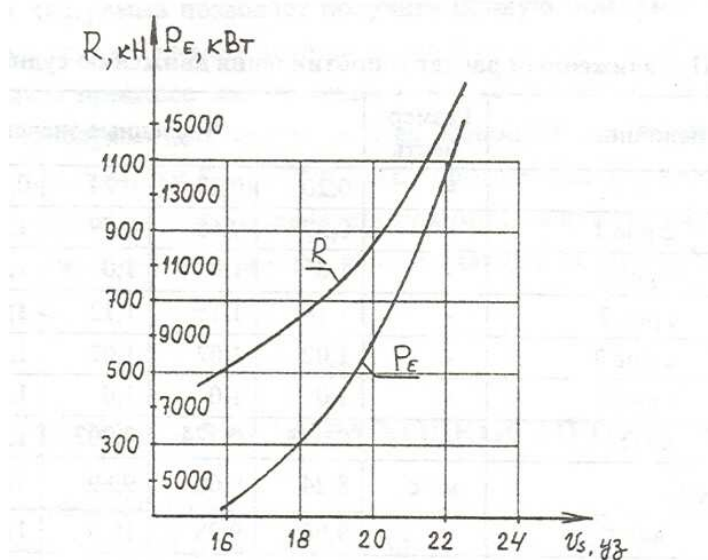


Рисунок 8 – Сопротивление и буксировочная мощность в функции от скорости движения

Дополнительное сопротивление на нерегулярном волнении рассчитываем по формуле (12):

$$R_{AW} = C_s \cdot Fr^{0,687} h^{2,5} f(\alpha),$$

коэффициент, зависящий от формы и размеров судна, находим по (13):

$$\begin{aligned} C_s &= 2,77 \cdot 10^5 \rho g (B^2/L^{1,5})(1 + 4,4\delta) = \\ &= 2,77 \cdot 10^5 \cdot 1,025 \cdot 9,81 \cdot 28,2^2 (1 + 4,4 \cdot 0,619) / 173^{1,5} = \\ &= 3,6 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^{2,5} \end{aligned}$$

Дополнительное сопротивление воздуха определяем по формуле (16):

$$R_{AA} = 1,08 \cdot 10^{-3} L \cdot v_A^2 = 0,187 \cdot v_A^2 ; \text{ кН},$$

$$v_A = v_C + v_B.$$

Дальнейшие расчеты производим в таблице 6

Таблица 6 – Расчет сопротивления движению судна в штормовых условиях

№ п/ п	Величина	Раз- мер- ность	Численное значение								
			5	6	7	5	6	7	5	6	7
1	$Fr$	-	0,20			0,24			0,28		
2	$v$	м/с	8,24			9,89			11,5		
3	$v_S$	уз	16			19,2			22,4		
4	$R_{тв}$	кН	517			766			1290		
5	Волнение моря, бал- лы	-	5	6	7	5	6	7	5	6	7
6	$\alpha$ по (14)	-	1,41	1,07	0,905	1,44	1,10	0,929	1,48	1,13	0,95 1
7	$10^6 f(\alpha)$ по (15)	-	1,81	4,00	3,88	1,62	3,89	3,99	1,38	3,74	4,06
8	$R_{AW}$ по (12)	кН	49,4	420	974	50,0	463	1130	47,4	493	1280
9	$v_A = v_C + v_B$	м/с	22,4	27,2	32,2	23,9	28,9	33,9	25,5	30,5	35,5
10	$R_{AA}$ по (16)	кН	92	138	194	107	156	215	121	174	235
11	$R_{AW} + R_{AA}$	кН	141	558	1170	157	619	1350	168	667	1510

12	$R_{шт}$ по (11)	к/Н	658	1080	1690	923	1390	2110	1460	1960	2800
----	------------------	-----	-----	------	------	-----	------	------	------	------	------

По результатам расчетов строим зависимости сопротивления судна при движении на тихой воде и в штормовых условиях от скорости (рисунок 9).

4. Минимальная глубина полигона для проведения ходовых испытаний определяется по формулам (18) и (19):

$$H_1 \geq 3 \cdot \sqrt{B/T} = 3 \cdot \sqrt{28,2 \cdot 9,5} = 49 \text{ м};$$

$$H_2 = 2,75 \frac{v_s^2}{g} = 2,75 \frac{21^2}{9,81} = 125 \text{ м}.$$

Принимаем бóльшую из двух полученных величин  $H \geq 125 \text{ м}$ .

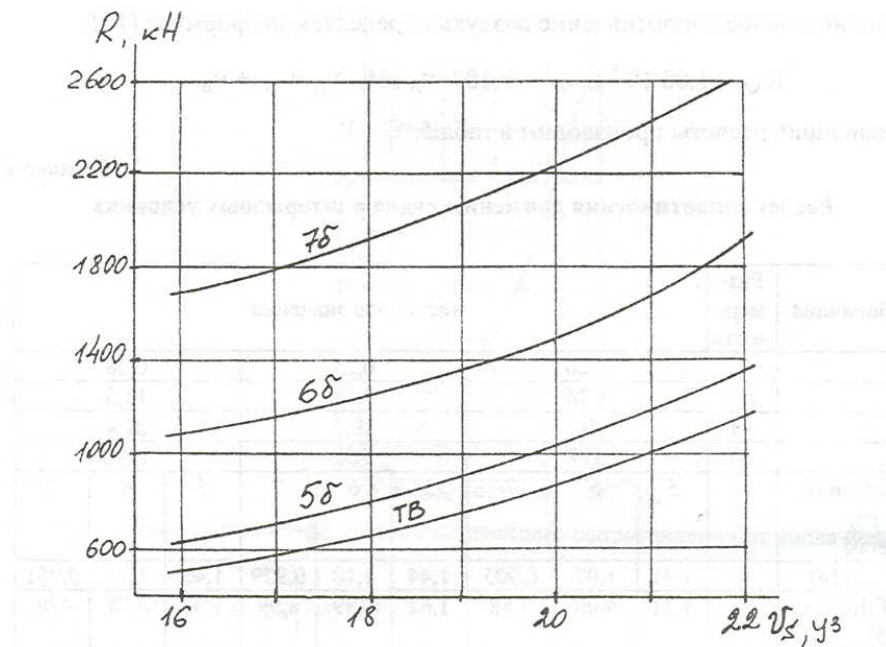


Рисунок 9 – Сопротивление движению судна в штормовых условиях

### 3.2. Расчет гребного винта

1. Выбор геометрических характеристик и определение коэффициентов взаимодействия.

Судно одновинтовое, принимаем число лопастей  $z_n = 4$ . Максимальный диаметр гребного винта  $D_B = 6,6$  м.

В качестве расчетного берем сопротивление, на 15% превышающее таковое на тихой воде. При заданной скорости  $v_s = 21$  уз по рисунку 8 определяем  $R_{ТВ} = 1030$  кН и находим  $R_{расч} = 1,15 R_{ТВ} = 1180$  кН.

Коэффициент попутного потока рассчитываем по (20):

$$\begin{aligned} W_T &= 0,165 \sqrt{\frac{\sqrt[3]{V}}{D_B}} - 0,1(Fr - 0,2) = \\ &= 0,165 \cdot 0,619 \sqrt{\frac{\sqrt[3]{28700}}{6,6}} - 0,1(0,262 - 0,2) = 0,216. \end{aligned}$$

Коэффициент засасывания находим по (21):

$$t = 0,7 \cdot W_T = 0,7 \cdot 0,216 = 0,151.$$

Коэффициенты влияния неравномерности потока на момент и упор принимаем  $i_Q = i_T = 1,0$ .

Определяем минимально допустимое дисковое отношение:

– из условия обеспечения прочности по (23) ( $[\sigma] = 6 \cdot 10^4$  кПа,  $m = 1,15$ ;  $d_n$

$$= 0,167; \delta_{\max} = 0,08; T = \frac{T_E}{1-t} = 1180 / (1 - 0,151) = 1390 \text{ кН}$$

$$A_E/A_0 = 0,24(1,08 - \bar{d}_n) \left( \frac{z_{\text{л}}}{\delta_{\text{max}} D_B} \right)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{10mT}{[\sigma]}} =$$

$$= 0,24(1,08 - 0,167) \times \left( \frac{4}{0,08 \cdot 6,6} \right)^{2/3} \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 1,15 \cdot 1390}{6 \cdot 10^4}} = 0,543;$$

– из условия отсутствия вредных последствий кавитации по (24)

$$(h_B = T_c - 0,55D) = 9,5 - 0,55 \cdot 6,6 = 5,9; p_a = 101 \text{ кПа}; p_v = 2,3 \text{ кПа}$$

$$A_E/A_0 (1,5 + 0,35 \cdot z_{\text{л}}) \frac{T}{(p_0 - p_v)} + \frac{0,2}{z_p}$$

$$= (1,5 + 0,35 \cdot 4) \frac{1390}{(101 + 59 - 2,3) \cdot 6,6^2} + 0,2 =$$

$$= 0,786.$$

Таким образом, более жесткие требования к дисковому отношению предъявляет условие отсутствия кавитации. Это, кстати говоря, типично для гребных винтов транспортных судов. Принимаем ближайшее большее значение дискового отношения  $A_E/A_0 = 0,85$ .

*2. Расчет гребного винта, обеспечивающего судну заданную скорость. Выбор двигателя.*

Расчет оптимального гребного винта будем производить с использованием коэффициента задания  $K_{\text{НТ}}$ .

Расчетная диаграмма приведена на рисунке 6:  $z_{\text{л}} = 4$ ;  $A_E/A_0 = 0,85$ .

Данные, закладываемые в расчет:

$$v_a = v(1 - W_T) = 10,8(1,0 - 0,216) = 8,46 \text{ м/с}; T = 1380 \text{ кН}; \eta_n = \frac{1}{i_0} \frac{1-t}{1-W_T} = 1,08;$$

$\eta_s = 0,98$  – машинное отделение в корме.

Задаваясь частотой вращения гребного винта в диапазоне  $n = (80-140)$  об/мин, дальнейшие расчеты ведем в таблице 7. В строке 5 таблицы 7 нахо-

дится исправленное значение относительной поступи  $J^1 = a \cdot J$ , где  $a$  - поправочный коэффициент, для винта в ДП  $a=1,05$ .

Таблица 7 – Расчет гребного винта, обеспечивающего заданную скорость

№ п/п	Величина	Размерность	Численные значения			
			80	100	120	140
1	$n$	о/мин	80	100	120	140
2	$n^1$	об/сек	1,33	1,67	2,00	2,33
3	$K_{NT}$	-	1,21	1,08	0,986	0,913
4	$J = f(K_{NT})$ по рис. 6	-	0,745	0,675	0,615	0,565
5	$J^1 = 1,05 J$	-	0,782	0,709	0,646	0,593
6	$D_{opt}$	м	8,11	7,16	6,55	6,11
7	$K_T$	-	0,176	0,185	0,184	0,178
8	$\eta_0 = f(K_T J^1)$ по рис. 6	-	0,678	0,655	0,630	0,610
9	$\eta_0$	-	0,732	0,707	0,680	0,659
10	$P_S$	кВт	17000	18300	19000	19700

По результатам расчета строим график  $P_S(n)$  и  $D_{opt}(n)$  (рисунок 10), с которого при условии  $D_{opt} = D_{max} = 6,6$  м снимаем:

$$P_S = 18900 \text{ кВт}, n = 118 \text{ об/мин.}$$

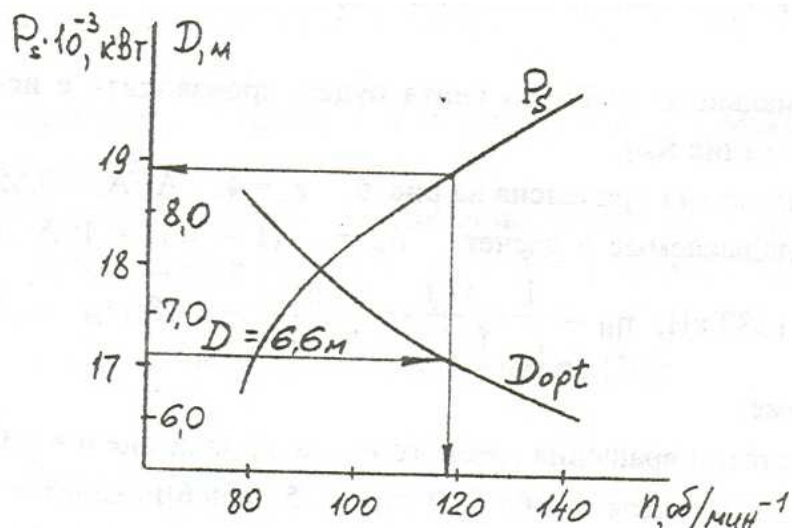


Рисунок 10 – Определение диаметра гребного винта и необходимой мощности

По таблице 3 выбираем десятицилиндровый двигатель 10 ДКРН 80/160, номинальные характеристики которого:  $P_{SH} = 19400$  кВт,  $n = 118$  об/мин.

3. Расчет гребного винта, обеспечивающего судну максимальной достижимую скорость.

Хотя выбранный двигатель и имеет несколько большую, чем требуемая, мощность, но в силу различия в частоте вращения скорость судна, в принципе, может и уменьшаться. Исходя из этих соображений, задаемся диапазоном скоростей  $v_S = (20-22)$  уз, а дальнейшие расчеты при  $n = n_H = 126$  об/мин ведем в таблице 8.

По результатам расчетов строим зависимости  $D_{opt}(v_S)$ ,  $P_S(v_S)$  – (рисунок 11) и при  $P_{SH} = 19400$  кВт определяем  $v_{max} = 21,1$  уз;  $D = D_{opt} = 6,42$  м.

Для указанной скорости по рисунку 8 находим:  $R = 1040$  кН;

$$T_E = 1,15 \quad R = 1120 \text{ кН}; \quad T = \frac{T_E}{1-t} = 1410 \text{ кН};$$

$$v_A = 0,514 v_S (1 - W_T) = 8,5 \text{ м/с}$$

$$J = \frac{v_A}{nD} = 0,630; \quad K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} = 0,184.$$

На диаграмме (рисунок 6) по координатам  $J$  и  $K_T$  определяем КПД винта в свободной воде  $\eta_0 = 0,630$  и его шаговое отношение  $P/D = 0,95$ .

Таблица 8 – Расчет винта, обеспечивающего максимальную скорость

№ п/п	Величина	Размерность	Численные значения			
			4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7
1	$v_S$	уз	20,0	20,5	21,0	22,0
2	$v$	м/с	10,3	10,5	11,0	11,3
3	$v_A = v(1 - W_T)$	м/с	8,06	8,22	8,62	8,85
4	$R(v)$ по рис. 8	кН	870	940	1090	1190
5	$T_E = 1,15 R$	кН	1000	1080	1250	1370
6	$T$	кН	1180	1270	1470	1610
7	$K_{NT}$	-	0,955	0,960	0,970	0,971
8	$J = f(K_{NT})$ по рис. 6	-	0,595	0,598	0,603	0,605



9	$J^1 = 1,05 J$	-	0,625	0,628	0,633	0,635
10	$D_{opt}$	м	6,14	6,27	6,52	0,65
11	$D_{opt} \geq D_{max} \mid D_{opt} > D_{max}$ $D = D_{opt} \mid D = D_{max}$	м	6,14	6,27	6,52	6,60
1	2	3	4	5	6	7
12	$J = J^1 \quad j = v_A / nD_{max}$	-	0,625	0,628	0,633	0,640
13	$K_T$	-	0,182	0,183	0,184	0,188
14	$\eta_0 = f(K_T)$ по рис. 6	-	0,625	6,28	0,630	0,620
15	$\eta_0$	-	0,675	0,678	0,680	0,670
16	$P_S$	кВт	1550 0	1710 0	1910 0	23400

Примечание: В столбцах 4-7 таблицы 8  $D_{opt} < D_{max}$ , поэтому принимается  $D = D_{opt}$ ; в последнем столбце  $D_{opt} > D_{max}$  и принято  $D = D_{max}$ .

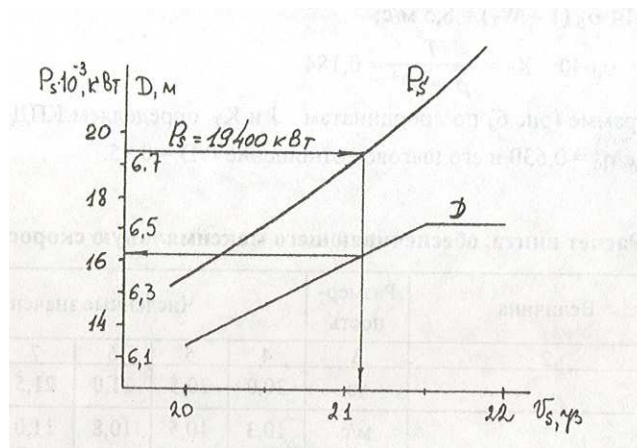


Рисунок 11 – Определение диаметра гребного винта и достижимой скорости

Подведем итоги.

Геометрические характеристики выбранного гребного винта:

$D = 6,42$  м;  $P/D = 0,95$ ;  $\frac{A_E}{A_0} = 0,85$ ;  $z_{л} = 4$ . Его гидродинамические характери-

стики в расчетном режиме:  $j = 0,630$ ;  $K_T = 0,184$ ;  $\eta_0 = 0,630$ .

Максимальная скорость, достижимая судном в расчетном режиме движения,  $v_s = 21,1$  уз.

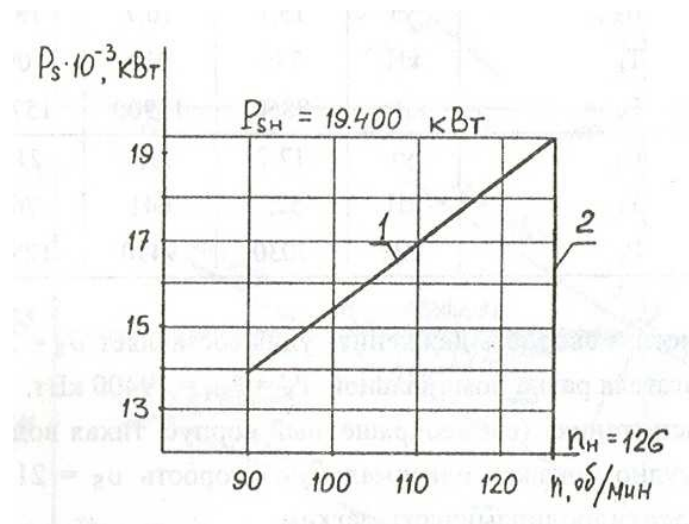
4. Расчет паспортной диаграммы (ходовых характеристик) судна.

Зададимся рядом фиксированных значений частоты вращения, включая номинальную:  $n = 95; 105; 115; 126$  об/мин.

Для нескольких относительных поступей с диаграммы снимаем значение  $K_T$  и  $\eta_0$ , соответствующие рассчитанному гребному винту ( $P/D = 0,95$ ):

$j$	0,40	0,50	0,60	0,70
$K_T$	0,297	0,248	0,198	0,149
$\eta_0$	0,424	0,520	0,608	0,672

Верхнюю ограничительную характеристику выбранного двигателя принимаем линейной  $P_s(n) = \left(\frac{P_{SH}}{n_H}\right)n$ ; регулярную – вертикальной прямой, отвечающей условию  $n = n_H$  (рисунок 12). Расчет будем вести в таблице 9.



1 – верхняя ограничительная; 2 - регуляторная

Рисунок 12 – Характеристики двигателя

По данным таблицы строим паспортную диаграмму – ходовые характеристики судна (рисунок 13). Расчетному режиму движения отвечает точка А, в которой сходятся: расчетная зависимость сопротивления  $R = 1,15R_{ТВ}$  (кри-

вая 1 – потребная тяга); верхняя ограничительная характеристика двигателя (кривая 3 – располагаемая мощность); зависимости  $T_E(\nu_S)$  и  $P_S(\nu_S)$ , соответствующие номинальной частоте вращения.

Таблица 9 – Расчет ходовых характеристик судна

№ п/п	Величина		Размер ность	Численные значения			
	1	$n^1$		об/мин	95	105	115
2	$n$		об/с	1,58	1,75	1,92	2,10
3	$J=0,40$	$\nu_S = JnD / [0,514(1 - W_T)]$	уз	10,1	11,1	12,2	13,4
4		$T_E = K_T \rho n^2 D^4 (1 - t)$	кН	1180	1440	1730	2080
5		$P_S = 0,514 \nu_S T_E / \eta_D \eta_S$	кВт	12700	17100	22500	29600
6	$J=0,50$	$\nu_S$	уз	12,6	13,9	15,3	16,7
7		$T_E$	кН	966	1180	1420	1700
8		$P_S$	кВт	108000	14600	19200	25200
9	$J=0,60$	$\nu_S$	уз	15,1	16,7	18,3	20,1
10		$T_E$	кН	745	910	1090	1310
11		$P_S$	кВт	8850	11900	15700	20600
12	$J=0,62$	$\nu_S$	уз	17,7	19,5	21,4	23,4
13		$T_E$	кН	525	641	769	923
14		$P_S$	кВт	7030	9490	12500	16400

При этом расчетная скорость движения судна составляет  $\nu_S = 21,1$  уз, а мощность на валу двигателя равна номинальной  $P_S = P_{SH} = 19400$  кВт.

На ходовых испытаниях (свежеокрашенный корпус, тихая вода - кривая сопротивления 2) судно покажет максимальную скорость  $\nu_S = 21,6$  уз, гребной винт при этом будет гидродинамически легким.

В штормовых условиях, на встречном нерегулярном волнении, скорость движения судна снизится и составит:

при 5 баллах  $\nu_S = 20,9$  уз

при 6 баллах  $\nu_S = 17,8$  уз

при 7 баллах  $\nu_S = 12,4$  уз

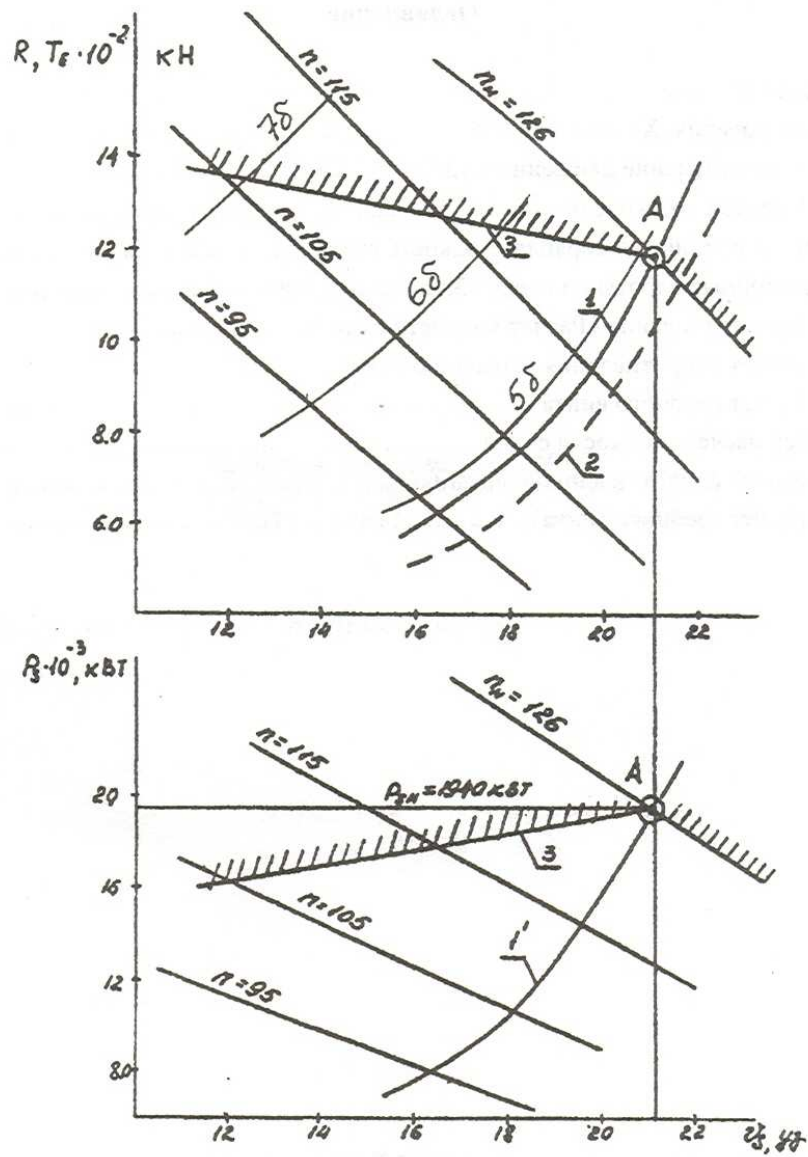


Рисунок 13 – Паспортная диаграмма судна

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ. ХОДКОСТЬ СУДНА .....	5
1.1. Сопротивление движению судна .....	5
1.2. Судовые движители.....	10
2. КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ .....	16
2.1. Расчет сопротивления движению судна.....	19
2.1.1. Расчет сопротивления судна при движении на тихой воде .....	19
2.1.2. Расчет сопротивления судна при движении в штормовых условиях на встречном нерегулярном волнении .....	25
2.1.3. Расчет сопротивления судна при движении на тихой воде .....	26
2.2. Расчет гребного винта .....	27
3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ХОДКОСТИ СУДНА .....	40
3.1. Расчет сопротивления движению .....	40
3.2. Расчет гребного винта .....	45

*Валентин Борисович ЖИНКИН*

*Игорь Владимирович Качанов*

*Игорь Евгеньевич ТОВСТЫХ*

Теория корабля. Ходкость судна