**Федеральное агентство морского и речного транспорта**
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования**
**«Государственный Морской Университет им. Адмирала Ф.Ф. Ушакова»**

**Заочный факультет**

**«К ЗАЩИТЕ ДОПУСТИТЬ»**

Начальник кафедры_____

_____
(дата, подпись, фамилия)

# Дипломный проект

«Выбор оптимального скоростного режима работы танкеров различного водоизмещения на основе оценки показателей эффективности эксплуатации дизельной установки»

Исполнитель (студент) _____ _____

Руководитель _____ _____

Нормоконтроль _____ _____

**Консультанты по разделам:**

1. Технико-экономическое обоснование _____ _____

2. Судоремонт _____ _____

3. Охрана окружающей среды _____ _____

4. Английский язык _____ _____

Рецензент _____ _____
(должность, ФИО) (дата, подпись)

**Новороссийск**
**2013**

# РЕФЕРАТ

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СКОРОСТНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ТАНКЕРОВ РАЗЛИЧНОГО ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Исполнитель: студент Починков Роман Адольфович
Консультант: д.т.н., проф. Башуров Борис Павлович

Дипломная работа содержит: 134 с., 49 рис., 20 табл., 30 библ. ист.

Выполнен обзор качественного и количественного состава современного флота нефтеналивных судов. Произведен анализ изменения усредненных технических характеристик нефтеналивных судов в зависимости от их дедвейта. Дано детальное описание отдельных элементов их энергетических установок.

Выполнена оценка технических характеристик дизельных энергетических установок нефтеналивных судов различного дедвейта. Рассмотрена техническая возможность и экономическая эффективность схем замещения «вспомогательный котел – утилизационный котел» и «дизель-генератор – валогенератор» в процессе эксплуатации. Найдены оптимальные режимы эксплуатации дизельных энергетических установок нефтеналивных судов различного дедвейта с использованием их винтовых и ограничительных характеристик.

Построены ходовые характеристики нефтеналивных судов различного дедвейта с использованием классической методики и современных численных методов. Найдены оптимальные режимы эксплуатации дизельных энергетических установок нефтеналивных судов различного дедвейта с использованием их экономических показателей.

Изложены особенности эксплуатации дизельных энергетических установок нефтеналивных судов. Проанализированы причины нарушения режима работы их отдельных элементов. Представлены основные способы контроля технического состояния элементов дизельных энергетических установок.

Перечислены основные источники экологического загрязнения окружающей среды нефтеналивными судами. Рассчитаны объемы выбросов выпускных газов дизельными энергетическими установками нефтеналивных судов в процессе эксплуатации. Представлены основные способы защиты окружающей среды от данных выбросов.

# SUMMARY

SELECTION OF THE OPTIMAL SPEED MODE
OF OIL TANKERS WITH VARIOUS DEADWEIGHTS
BASED ON THE EVALUATION OF THE EXPLOITATION EFFICIENCY
OF THE DIESEL POWER PLANT

Performer: Roman A. Pochinkov, student
Instructor: Boris P. Bashurov, Prof., Ph.D. in Mech. Eng.

The contents: pages 134, pictures 49, tables 20, bibliography 30.

The review of the qualitative and quantitative structure of a modern fleet of oil tankers has been made. Changes of the average technical characteristics of oil tankers, depending on their deadweight, also have been analyzed. The detailed description of the separate elements of their power plants has been given.

The evaluation of the technical characteristics of the diesel power plants of oil tankers with various deadweights has been made. Technical possibility and cost-effectiveness of the equivalent circuits "auxiliary boiler - heat recovery boiler" and "diesel generator - shaft generator" in the process of exploitation have been considered. The optimal modes for the diesel power plants of oil tankers with various deadweights have been found with the usage of the screw and limiting characteristics.

Propulsive performance of oil tankers with various deadweights has been built by means of classical calculation methodology and modern numerical methods. The optimal modes for the diesel power plants of oil tankers with various deadweights have been found with the usage of cost efficiency.

Operational features of the diesel power plants of oil tankers have been described. The reasons of the abnormal operation of the separate elements of the ship power plants have been analyzed. The basic ways to control the technical state of the elements of the diesel power plants of oil tankers were presented.

The major sources of the environmental pollution from oil tankers have been enumerated. Emissions of the exhaust gases, generated by the diesel power plants during exploitation process, have been calculated. The basic ways to the environment protection from the harmful emissions have been presented.

# СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ ..... 1
СОДЕРЖАНИЕ ..... 3
ВВЕДЕНИЕ ..... 6
1. СОВРЕМЕННЫЕ НЕФТЕНАЛИВНЫЕ СУДА И ИХ ДИЗЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ..... 7
1.1. Обзор флота нефтеналивных судов ..... 7
1.1.1. Основное предназначение ..... 7
1.1.2. Способы классификации ..... 8
1.1.3. Численный состав ..... 10
1.1.4. Мощностные показатели ..... 11
1.1.5. Тенденции развития ..... 15
1.2. Характеристики отдельных нефтеналивных судов ..... 16
1.2.1. Архитектурно-конструктивный тип ..... 16
1.2.2. Судно [1] дедвейтом 40 120 т ..... 16
1.2.3. Судно [2] дедвейтом 94 918 т ..... 18
1.2.4. Судно [3] дедвейтом 152 852 т ..... 20
1.2.5. Судно [4] дедвейтом 185 091 т ..... 22
1.2.6. Судно [5] дедвейтом 259 999 т ..... 24
1.2.7. Судно [6] дедвейтом 317 441 т ..... 26
1.3. Энергетические установки нефтеналивных судов ..... 28
1.3.1. Главный двигатель ..... 28
1.3.2. Вспомогательный котел ..... 32
1.3.3. Дизель-генератор ..... 33
2. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДОВ ..... 36
2.1. Исходные данные для проведения оценки ..... 36
2.1.1. Условия эксплуатации ..... 36
2.1.2. Транспортные характеристики ..... 36
2.1.3. Мощностные характеристики ..... 36
2.1.4. Технические характеристики ..... 37
2.1.5. Экономические характеристики ..... 39
2.2. Оценка технических характеристик работы ..... 39
2.2.1. Общие характеристики ..... 39
2.2.2. Индикаторные характеристики ..... 42
2.2.3. Эффективные характеристики ..... 43
2.3. Выбор оптимального режима эксплуатации ..... 44

2.3.1. Номинальная винтовая характеристика ..... 44
2.3.2. Заданная винтовая характеристика ..... 47
2.3.3. Ограничительная винтовая характеристика..... 51
2.3.4. Построение зависимостей ..... 54

2.4. Расчет теплоутилизационного контура..... 61

2.4.1. Тепловой расчет ..... 61
2.4.2. Расчет производительности и мощности насосов ..... 62
2.4.3. Расчет потребностей в паре, воде и электричестве..... 65

2.5. Оценка возможности замещения ..... 66

2.5.1. Расчет расхода топлива ..... 66
2.5.2. Замещение вспомогательного котла утилизационным..... 68
2.5.3. Замещение дизель-генератора валогенератором ..... 70
2.5.4. Расчет эффективности замещения ..... 71

3. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СКОРОСТНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДОВ ..... 74

3.1. Построение ходовой характеристики..... 74

3.1.1. Расчет сопротивления воды ..... 74
3.1.2. Расчет упора гребного винта ..... 77
3.1.3. Построение зависимостей ..... 77
3.1.4. Использование численных методов ..... 79

3.2. Расчет экономических показателей ..... 89

3.2.1. Заявка топлива на рейс ..... 89
3.2.2. Заявка масла на рейс ..... 91
3.2.3. Заявка воды на рейс ..... 91
3.2.4. Годовые доходы и расходы..... 92

4. АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДОВ..... 100

4.1. Особенности эксплуатации ..... 100

4.1.1. Подготовка к действию ..... 100
4.1.2. Ввод в действие..... 103
4.1.3. Вывод из действия ..... 104

4.2. Причины нарушения режима работы..... 104

4.2.1. Элементы главного двигателя ..... 105
4.2.2. Элементы газотурбонагнетателя ..... 109

4.3. Контроль технического состояния ..... 111

4.3.1. Элементы главного двигателя ..... 111

4.3.2. Элементы газотурбонагнетателя ..... 113
4.3.3. Элементы валопровода ..... 115
4.3.4. Элементы гребного винта ..... 115

5. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДОВ ..... 117

5.1. Образование экологически вредных веществ ..... 117

5.1.1. Источники загрязнения ..... 117
5.1.2. Загрязнение выпускными газами ..... 118

5.2. Расчет выброса выпускных газов ..... 119

5.2.1. Главный двигатель ..... 119
5.2.2. Дизель-генераторы ..... 122
5.2.3. Вспомогательный котел ..... 124
5.2.4. Суммарный выброс ..... 127

5.3. Защита от выброса выпускных газов ..... 128

5.3.1. Нормативы выбросов ..... 128
5.3.2. Средства защиты ..... 128

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 132

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ..... 133

# ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемое в последнее десятилетие, непрерывное увеличение потребления энергии, вызванное ростом промышленного производства в экономически развитых и развивающихся странах, приводит к стремительному росту объемов нефтедобычи. Вследствие различного географического положения главных месторождений и районов интенсивного потребления основная масса нефти перевозилась, перевозится и, скорее всего, будет перевозиться морским путем. Высокая экономическая эффективность морской перевозки нефти, по сравнению с другими видами транспорта, сделала данный способ транспортировки главенствующим в мировом транспортном процессе. Существенное увеличение доходов от морской перевозки нефти при увеличении размеров нефтеналивных судов является одним из главных стимулов постройки средне и крупнотоннажных танкеров. Они получили широкое распространение и составляют основную часть пополнения мирового наливного флота с конца 60-х, начала 70-х годов.

Экономическая эффективность любого нефтеналивного судна складывается из многих факторов, важнейшее значение среди которых занимает эффективность его энергетической установки. В настоящее время суда мирового нефтеналивного флота оборудованы в основном дизельными энергетическими установками, эффективность которых определяется совершенством конструкции главного двигателя и вспомогательных механизмов, а также надежностью всего пропульсивного комплекса: главного двигателя с газотурбонагнетателем, передачи, валопровода, гребного винта.

Работа главного двигателя на винт в изменяющихся условиях эксплуатации связана с изменением параметров рабочего процесса, обусловливающих механическую и тепловую напряженность деталей двигателя. В связи с этим исключительную важность приобретает построение нагрузочных, винтовых и ограничительных характеристик двигателя при различных режимах его работы, а также *выбор оптимального эксплуатационного режима*.

Большое влияние на работу главного двигателя оказывают его динамические характеристики, зависящие от совершенства системы наддува. Во многом сбалансированность именно этой системы позволяет существенно повысить экономическую эффективность всего пропульсивного комплекса судна. С другой стороны без должной организации системы технического обслуживания и ремонта элементов пропульсивного комплекса невозможно представить его надежную и долговечную работу.

В связи с вышесказанным, инженерам-судомеханикам постоянно приходится решать вопросы выбора оптимальных эксплуатационных режимов главных двигателей, а также организации их технического обслуживания и ремонта с использованием экологически безопасных подходов и методов. *Раскрытию данных вопросов на примере нефтеналивных судов различного водоизмещения, оснащенных дизельными энергетическими установками, посвящена* **настоящая работа**.

# 1. СОВРЕМЕННЫЕ НЕФТЕНАЛИВНЫЕ СУДА И ИХ ДИЗЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

## 1.1. Обзор флота нефтеналивных судов

### 1.1.1. Основное предназначение

**Наливные суда**, *предназначенные для перевозки жидких грузов наливом*, относятся к числу наиболее распространенных судов морского транспортного флота. Особенно в последнее время, когда перевозка нефти и нефтепродуктов морским путем является наиболее выгодной и удобной. В настоящее время одним из путей развития мирового судостроения является создание *средне* и *крупнотоннажных нефтеналивных судов*, оборудованных дизельной энергетической установкой (рисунок 1.1). Это обуславливается хорошими показателями дизельных двигателей по сравнению с другими типами энергетических установок: более экономичным расходом топлива, удобством при обслуживании и ремонте, возможностью использования более дешевых сортов топлива.

Рисунок 1.1 – Современное нефтеналивное судно

Вместе с тем, строительство нефтеналивных судов сопряжено с рядом проблем, в том числе с задачей сохранения груза, а также снижением стоимости его транспортировки. Для вновь строящихся судов стоимость транспортировки может быть существенно снижена за счет применения прогрессивных архитектурно-конструктивных решений. Для уже существующих судов наиболее перспективным путем является *выбор наиболее оптимального режима работы судовой энергетической установки в заданных эксплуатационных условиях*.

## 1.1.2. Способы классификации

*В зависимости от рода перевозимого груза* наливные суда подразделяются:

- *Танкеры* (*Oil Tankers*) – грузовые суда, предназначенные для перевозки наливом в специальных грузовых помещениях (танках) жидких грузов, в основном нефти и продуктов ее переработки (рисунок 1.2);

Рисунок 1.2 – Современный танкер

- *Газовозы* (*Liquefied Gas Tankers*) – грузовые суда, предназначенные для перевозки природных и нефтяных газов в жидком состоянии под давлением (при пониженной температуре), в специально предназначенных грузовых помещениях (емкостях) различных типов (рисунок 1.3);

Рисунок 1.3 – Современный газовоз

- *Химовозы* (*Chemical Tankers*) – грузовые суда, предназначенные для перевозки жидких химических грузов, грузовая система и грузовые помещения (танки) которых изготавливаются из специальной нержавеющей стали, либо покрываются специальными кислотостойкими материалами (рисунок 1.4).

Рисунок 1.4 – Современный химовоз

*В зависимости от дедвейта* танкеры подразделяются:

- *Малотоннажные танкеры специального назначения* (*Special Purpose*), дедвейтом от 6 000 т до 16 499 т, используемые для перевозки специализированных грузов (асфальтов, битумов и т.д.);
- *Малотоннажные танкеры общего назначения* (*General Purpose*), дедвейтом от 16 500 т до 24 999 т, используемые для перевозки светлых нефтепродуктов;
- *Среднетоннажные танкеры* (*Medium Range*), дедвейтом от 25 000 т до 44 999 т, используемые для перевозки светлых нефтепродуктов или темных нефтепродуктов;
- *Крупнотоннажные танкеры 1 класса* (*Long Range 1*), дедвейтом от 45 000 т до 69 999 т, используемые для перевозки темных нефтепродуктов или сырой нефти;
- *Крупнотоннажные танкеры 2 класса* (*Long Range 2*)**,** дедвейтом от 70 000 т до 149 999 т, используемые для перевозок темных нефтепродуктов или сырой нефти;
- *Крупнотоннажные танкеры 3 класса* (*Very Large Crude Carrier*), дедвейтом от 150 000 т до 300 000 т, используемые для перевозки сырой нефти;
- *Супертанкеры* (*Ultra Very Large Crude Carrier*), дедвейтом более 300 000 т, используемые для перевозки сырой нефти на большие расстояния;

- *Супертанкеры* (*Floating Storage and Offloading unit*), дедвейтом более 300 000 т, используемые для хранения и выгрузки нефти на более мелкие суда.

*В зависимости от размера* танкеры подразделяются:

- *Танкеры, способные проходить канал Святого Лаврентия* (*Seaway-max*), дедвейтом от 10 000 т до 59 999 т. Габариты канала накладывают следующие ограничения на танкера: длина до 226 м, ширина до 24 м, осадка до 8 м;
- *Танкеры, способные проходить Панамский канал* (*Panamax*), дедвейтом от 60 000 т до 79 999 т. Габариты канала накладывают следующие ограничения на танкера: длина до 228 м, ширина до 32 м, осадка до 12 м;
- *Танкеры, способные проходить Суэцкий канал* (*Aframax*), дедвейтом от 80 000 т до 119 999 т. Габариты канала накладывают следующие ограничения на танкера: ширина до 70 м, осадка до 16 м. Исторически название возникло, когда такие танкера не могли преодолеть Суэцкий канал и отправлялись с грузом в обход Африканского континента;
- *Танкеры, способные проходить Суэцкий канал* (*Suezmax*), дедвейтом от 120 000 т до 199 999 т. Габариты канала накладывают следующие ограничения на танкера: ширина до 70 м, осадка до 16 м;
- *Танкеры, способные проходить Малаккский пролив* (*Malacca-max*), дедвейтом от 200 000 т до 314 999 т. Габариты пролива накладывают следующие ограничения на танкера: длина до 330 м, ширина до 60 м, осадка до 20 м;

### 1.1.3. Численный состав

*По данным на начало 2012* (таблицы 1.1, 1.2) *года* **общее число наливных судов** составило 12 902 ед. с общим дедвейтом 547 млн. т. Из них танкера для перевозки нефти и нефтепродуктов составили 10 194 ед. с общим дедвейтом 496,60 млн. т., газовозы – 1 564 ед. с общим водоизмещением 44,50 млн. т и химовозы – 1 144 ед. с общим водоизмещением 6,30 млн. т.

Таблица 1.1 – Численность современных наливных судов в зависимости от типа

| Тип судна | 2008 год | | 2012 год | | Рост числа судов, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | Число судов, ед. | Дедвейт, млн. т | Число судов, ед. | Дедвейт, млн. т. | |
| Танкеры (нефть и нефтепродукты) | 6 298 | 349,60 | 6 508 | 417,00 | 4,50 |
| Танкеры (нефть и химические грузы) | 2 395 | 50,20 | 3 686 | 79,60 | 12,20 |
| Газовозы | 1 318 | 30,20 | 1 564 | 44,50 | 10,20 |
| Химовозы | 1 345 | 9,30 | 1 144 | 6,30 | -9,40 |

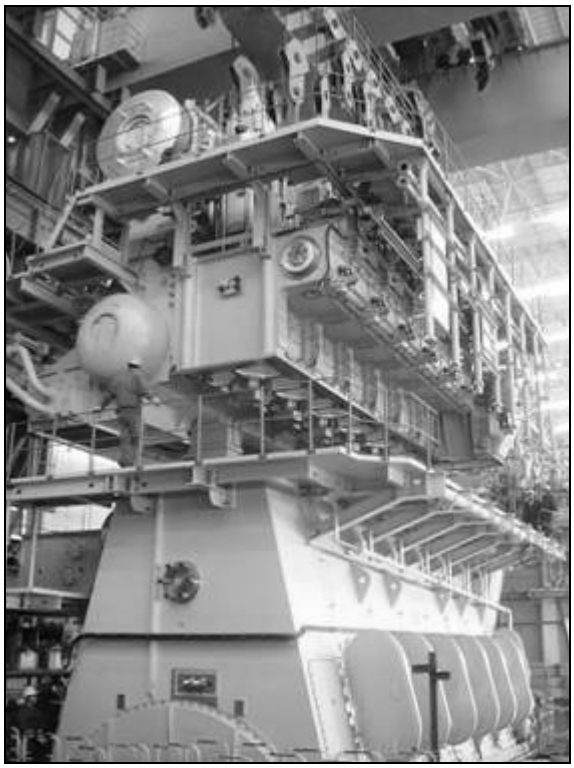
Таблица 1.2 – Дедвейт современных наливных судов в зависимости от размера

| Тип судна | Дедвейт, млн. т | | Рост дедвейта судов, % |
|---|---|---|---|
| | 2002 год | 2012 год | |
| Малый танкер | 60,40 | 108,80 | 80,10 |
| Танкер *Panamax* | 14,50 | 30,00 | 106,90 |
| Танкер *Aframax* | 53,70 | 97,50 | 81,60 |
| Танкер *Suezmax* | 41,80 | 72,70 | 73,90 |
| Танкер *Malaccamax* | 124,80 | 187,60 | 50,32 |

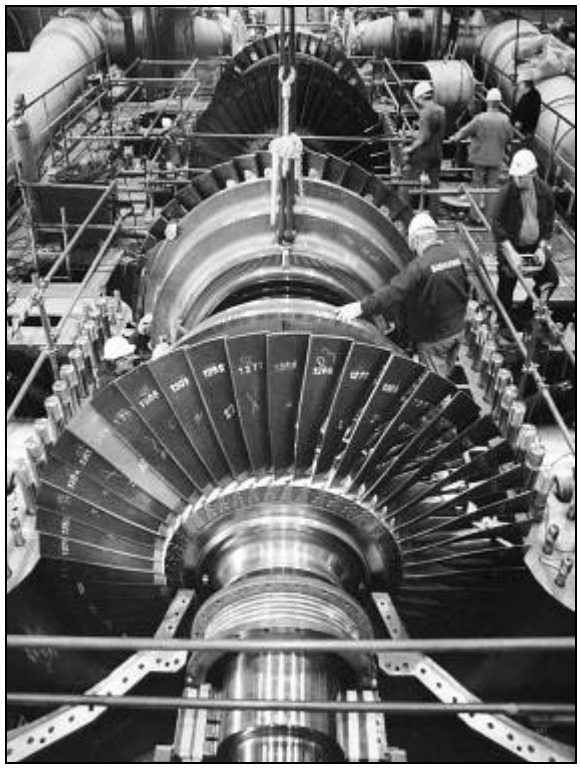
## 1.1.4. Мощностные показатели

*На нефтеналивных судах в качестве главных широко применяются* **дизельные энергетические установки** *с* **малооборотными** *и* **среднеоборотными дизельными двигателями** (таблицы 1.3 – 1.5)*, оснащенными газотурбинным наддувом* (рисунок 1.5).

*Малооборотные дизельные двигатели*, имеющие частоту вращения до 250 об/мин, предназначены для непосредственной работы на винт без трансформации частоты и крутящего момента. *Среднеоборотные дизельные двигатели*, имеющие частоту вращения до 750 об/мин, предназначены для работы на винт через редукторную передачу.



Дизельная энергетическая установка



Паротурбинная энергетическая установка

Рисунок 1.5 – Энергетические установки нефтеналивных судов

Реже *на нефтеналивных судах применяются* **паротурбинные энергетические установки** *с одновальными паровыми турбинами* (рисунок 1.5).

Таблица 1.3 – Мощностные показатели наливных судов дедвейтом от 5 000 до 25 000 т

| Основные параметры | Малый танкер | | Танкер *Seawaymax* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Дедвейт, тыс. т | 5 | 8 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Длина габаритная, м | 100,00 | 116,00 | 124,00 | 141,00 | 155,00 | 170,00 |
| Длина расчетная, м | 94,50 | 110,00 | 117,00 | 133,00 | 147,00 | 161,00 |
| Ширина, м | 16,00 | 18,00 | 19,00 | 21,90 | 24,00 | 25,50 |
| Осадка расчетная, м | 6,00 | 7,10 | 7,50 | 8,40 | 8,60 | 8,90 |
| Осадка максимальная, м | 6,40 | 7,50 | 8,00 | 9,00 | 9,30 | 9,60 |
| Средняя скорость судна, уз. | 13,50 | 14,00 | 14,50 | 15,00 | 15,50 | 15,50 |
| Номинальная мощность, МВт | 2,34 | 3,30 | 4,10 | 5,70 | 7,10 | 7,70 |
| Марка двигателя | 6S26MC6 | 5S35MC7<br>6L35MC6<br>5S35ME-B9 | 6S35MC7<br>6L35MC6<br>5S35ME-B9 | 5S40ME-B9<br>7S35ME-B9<br>6S42MC7<br>8S35MC7 | 5S50MC6<br>5S50MC-C7<br>6S46MC-C7<br>7S40ME-B9 | 5S50MC-C7<br>6S50MC6<br>6S46MC-C7<br>7S40ME-B9 |
| Средняя скорость судна (- 0,5 уз.), уз. | 13,00 | 13,50 | 14,00 | 14,50 | 15,00 | 15,00 |
| Номинальная мощность, МВт | 2,00 | 2,830 | 3,53 | 4,90 | 6,20 | 6,80 |
| Марка двигателя | 5S26MC6 | 5L35MC6 | 5S35MC7<br>5L35MC6<br>5S35ME-B9 | 6S35ME-B9<br>5S40ME-B9<br>5S42MC7<br>7S35MC7 | 5S50MC6<br>5S46MC-C7<br>6S40ME-B9<br>6S42MC7 | 5S50MC-C7<br>5S50MC6<br>5S46MC-C8<br>6S40ME-B9 |
| Средняя скорость судна (+ 0,50 уз.), уз. | 14,00 | 14,50 | 15,00 | 15,50 | 16,00 | 16,00 |
| Номинальная мощность, МВт | 2,76 | 3,84 | 4,75 | 6,60 | 8,20 | 8,80 |
| Марка двигателя | 5S35MC7<br>7S26MC6 | 6S35MC7<br>6L35MC6<br>5S35ME-B9 | 7S35MC7<br>8L35MC6<br>6S35ME-B9 | 6S40ME-B9<br>8S35ME-B9<br>7S42MC7<br>9S35MC7 | 6S50MC-C7<br>6S50MC6<br>7S46MC-C7<br>8S40ME-B9 | 6S50MC-C7<br>7S50MC6<br>7S46MC-C7<br>8S40ME-B9 |

Таблица 1.4 – Мощностные показатели наливных судов дедвейтом от 30 000 до 70 000 т

| Основные параметры | Танкер *Seawaymax* | | | | Танкер *Panamax* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Дедвейт, тыс. т | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| Длина габаритная, м | 176,00 | 176,00 | 183,00 | 183,00 | 228,60 | 228,60 |

Таблица 1.4 – Продолжение

| Основные параметры | Танкер *Seawaymax* | | | | Танкер *Panamax* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Длина расчетная, м | 168,00 | 168,00 | 174,00 | 174,00 | 219,00 | 219,00 |
| Ширина, м | 28,00 | 30,00 | 31,50 | 32,20 | 32,20 | 32,20 |
| Осадка расчетная, м | 9,00 | 9,60 | 10,00 | 11,30 | 11,00 | 12,60 |
| Осадка максимальная, м | 9,90 | 10,60 | 11,60 | 12,40 | 12,30 | 14,10 |
| Средняя скорость судна, уз. | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 |
| Номинальная мощность, МВт | 7,40 | 8,00 | 8,50 | 9,40 | 10,10 | 10,80 |
| Марка двигателя | 5S50MC-C7<br>6S50MC66<br>S46MC-C7<br>7S40ME-B9 | 6S50MC-C7<br>6S50MC6<br>6S46MC-C8<br>8S40ME-B9 | 6S50MC-C7<br>6S50MC6<br>5S50ME-B9<br>7S46MC-C7 | 6S50MC-C7<br>7S50MC6<br>6S50ME-B9 | 5S60MC-C7<br>5S60MC6<br>6S60MC-C7<br>6S50ME-B9 | 5S60MC-C7<br>6S60MC6<br>6S60MC-C7<br>7S50ME-B9 |
| Средняя скорость судна (- 0,5 уз.), уз. | 14,50 | 14,50 | 14,50 | 14,50 | 14,50 | 14,50 |
| Номинальная мощность, МВт | 6,00 | 7,00 | 7,50 | 8,20 | 9,00 | 9,60 |
| Марка двигателя | 5S50MC-C7<br>5S50MC65<br>S46MC-C7<br>6S40ME-B9 | 5S50MC-C7<br>5S50MC6<br>6S46MC-C7<br>7S40ME-B9 | 5S50MC-C7<br>6S50MC6<br>6S46MC-C7<br>7S40ME-B9 | 5S50MC-C8<br>6S50MC6<br>5S50ME-B9 | 5S60MC-C7<br>5S60MC6<br>6S50ME-B9 | 5S60MC-C7<br>5S60MC6<br>6S50ME-B9 |
| Средняя скорость судна (+ 0,50 уз.), уз. | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,5 | 15,50 |
| Номинальная мощность, МВт | 8,50 | 9,10 | 9,70 | 10,60 | 11,30 | 12,10 |
| Марка двигателя | 6S50MC-C7<br>6S50MC67<br>S46MC-C7<br>8S40ME-B9 | 6S50MC-C7<br>7S50MC6<br>7S46MC-C7<br>8S40ME-B9 | 6S50MC-C8<br>7S50MC6<br>6S50ME-B9 | 7S50MC-C7<br>6S50ME-B9 | 5S60MC-C7<br>6S60MC6<br>6S60MC-C7<br>6S50ME-B9 | 6S60MC-C7<br>6S60MC6<br>7S50ME-B9 |

Таблица 1.5 – Мощностные показатели наливных судов дедвейтом от 85 000 до 165 000 т

| Основные параметры | Танкер *Aframax* | | Танкер *Suezmax* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Дедвейт, тыс. т | 85 | 105 | 115 | 125 | 150 | 165 |
| Ширина, м | 244,00 | 244,00 | 250,00 | 270,00 | 274,00 | 274,00 |
| Осадка расчетная, м | 233,00 | 233,00 | 239,00 | 256,00 | 264,00 | 264,00 |
| Длина расчетная, м | 42,00 | 42,00 | 44,00 | 46,00 | 48,00 | 50,00 |
| Ширина, м | 11,00 | 13,40 | 13,50 | 13,50 | 14,80 | 15,60 |
| Осадка максимальная, м | 12,10 | 14,70 | 15,00 | 14,60 | 16,10 | 17,00 |

Таблица 1.5 – Продолжение

| Основные параметры | Танкер *Aframax* | | Танкер *Suezmax* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Средняя скорость судна, уз. | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 |
| Номинальная мощность, МВт | 12,30 | 13,40 | 14,30 | 15,20 | 16,00 | 16,80 |
| Марка двигателя | 6S60MC-C7<br>6S60MC65<br>S70MC65S<br>65ME-C8 | 6S60MC-C7<br>7S60MC6<br>5S70MC6<br>5S65ME-C8 | 6S60MC-C8<br>7S60MC6<br>5S70MC-C7<br>5S65ME-C8 | 7S60MC-C7<br>5S70MC-C7<br>6S70MC6<br>6S65ME-C8 | 5S70MC-C8<br>6S70MC6<br>8S60MC6<br>6S65ME-C8 | 6S70MC-C7<br>6S70MC6<br>8S60MC-C7<br>6S65ME-C8 |
| Средняя скорость судна (- 0,5 уз.), уз. | 14,50 | 14,50 | 14,50 | 14,50 | 14,50 | 14,50 |
| Номинальная мощность, МВт | 11,00 | 12,00 | 12,80 | 13,60 | 14,40 | 15,10 |
| Марка двигателя | 5S60MC-C7<br>6S60MC6 | 6S60MC-C7<br>6S60MC6<br>5S70MC6<br>5S65ME-C8 | 6S60MC-C7<br>7S60MC6<br>5S70MC6<br>5S65ME-C8 | 6S60MC-C8<br>7S60MC6<br>5S70MC6<br>5S65ME-C8 | 7S60MC-C7<br>5S70MC-C7<br>6S70MC6<br>6S65ME-C8 | 7S60MC-C7<br>5S70MC-C7<br>6S70MC6<br>6S65ME-C8 |
| Средняя скорость судна (+ 0,50 уз.), уз. | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,50 |
| Номинальная мощность, МВт | 13,80 | 15,00 | 16,00 | 16,90 | 17,90 | 18,70 |
| Марка двигателя | 5S70MC-C7<br>6S60MC-C8<br>7S60MC65<br>S65ME-C8 | 5S70MC-C7<br>6S70MC6<br>7S60MC-C7<br>6S65ME-C8 | 6S70MC65<br>S70MC-C8<br>7S60MC-C8<br>6S65ME-C8 | 6S70MC6<br>6S70MC-C7<br>8S60MC-C7<br>6S65ME-C8 | 6S70MC-C7<br>7S70MC6<br>8S60MC-C7<br>7S65ME-C8 | 6S70MC-C8<br>7S70MC6<br>7S65ME-C8 |

Таблица 1.6 – Мощностные показатели наливных судов дедвейтом от 260 000 до 440 000 т

| Основные параметры | Танкер *Malaccamax* (*VLCC*) | | | | Танкер *Malaccamax* (*ULCC*) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Дедвейт, тыс. т | 260 | 280 | 300 | 319 | 360 | 440 |
| Длина габаритная, м | 333,00 | 333,00 | 333,00 | 333,00 | 341,00 | 380,00 |
| Длина расчетная, м | 320,00 | 320,00 | 320,00 | 319,00 | 327,00 | 362,00 |
| Ширина, м | 58,00 | 58,00 | 58,00 | 60,00 | 65,00 | 68,00 |
| Осадка расчетная, м | 17,70 | 19,00 | 20,40 | 21,00 | 21,40 | 22,50 |
| Осадка максимальная, м | 91,10 | 20,50 | 22,00 | 22,70 | 23,10 | 24,30 |
| Средняя скорость судна, уз. | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 16,00 | 16,00 |
| Номинальная мощность, МВт | 24,10 | 25,00 | 25,90 | 27,10 | 30,60 | 34,20 |

Таблица 1.6 – Продолжение

| Основные параметры | Танкер *Malaccamax* (*VLCC*) | | | | Танкер *Malaccamax* (*ULCC*) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Марка двигателя | 7S80MC-C7<br>7S80MC66<br>S80MC-C8<br>6S80ME-C9 | 7S80MC-C7<br>7S80MC6<br>6S80MC-C8<br>6S80ME-C9 | 7S80MC-C7<br>6S90MC-C7<br>6S80ME-C9 | 7S80MC-C7<br>6S90MC-C7<br>6S80ME-C9 | 8S80MC-C7<br>6S90MC-C8<br>9S80MC6<br>7S80ME-C9 | 7S90MC-C7<br>10S80MC6<br>8S80ME-C9 |
| Средняя скорость судна (- 0,5 уз.), уз. | 16,00 | 16,00 | 16,00 | 16,00 | 16,50 | 16,50 |
| Номинальная мощность, МВт | 26,60 | 27,60 | 28,70 | 30,00 | 33,50 | 37,60 |
| Марка двигателя | 6S80MC66<br>S80MC-C7<br>7S80MC6 | 6S80MC-C7<br>7S80MC-C7<br>7S80MC6 | 6S80MC-C8<br>7S80MC6<br>6S80ME-C9 | 6S80MC-C8<br>7S80MC6<br>6S80ME-C9 | 6S90MC-C7<br>7S80MC-C8<br>8S80MC6<br>7S80ME-C9 | 8S80MC-C7<br>6S90MC-C8<br>9S80MC6<br>7S80ME-C9 |
| Средняя скорость судна (+ 0,50 уз.), уз. | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,50 | 15,50 |
| Номинальная мощность, МВт | 21,80 | 22,60 | 23,50 | 24,60 | 27,80 | 31,10 |
| Марка двигателя | 7S80MC-C7<br>6S90MC-C7<br>8S80MC6<br>6S80ME-C9 | 6S90MC-C7<br>7S80MC-C8<br>8S80MC6<br>7S80ME-C9 | 6S90MC-C7<br>7S80MC-C8<br>8S80MC6<br>7S80ME-C9 | 8S80MC-C7<br>6S90MC-C8<br>9S80MC6<br>7S80ME-C9 | 7S90MC-C7<br>10S80MC6<br>8S80MC-C8<br>8S80ME-C9 | 8S90MC-C7<br>11S80MC6<br>9S80ME-C9 |

*Особенностью нефтеналивных судов* является наличие крупных потребителей электрической (механической) энергии – *грузовых насосов большой мощности*, время работы которых в течение рейса ограничено длительностью погрузо-разгрузочных операций. На судах, используемых для перевозки нефти и тяжелых нефтепродуктов, большое количество тепловой энергии расходуется на подогрев груза перед его выгрузкой. Поэтому данные суда оборудуют крупными *вспомогательными котельными установками* для производства преимущественно насыщенного пара. Привод грузовых насосов на нефтеналивных судах может осуществляться от *автономных паровых турбин*, питающихся паром от вспомогательных котельных установок, или от *электродвигателей*, получающих питание от дизель-генераторов.

## 1.1.5. Тенденции развития

*На развитие нефтеналивных судов существенное влияние оказывает ужесточение требований к безопасности перевозки нефти и нефтепродуктов.*

В соответствии с требованиями Международной Морской Организации *IMO* нефтеналивные суда должны иметь двойной корпус. Требования Международной Конвенции по Предотвращению Загрязнения с Судов *MARPOL* ограничивают объём одного танка да 40 000 м$^3$, а также предписывают выполнять грузовые помещения с изолированным балластом. Выполнение данных требований сокращает вероятность крупных загрязнений моря при авариях, однако значительно утяжеляет корпус судна, что делает строительство нефтеналивных судов дедвейтом выше 450 000…500 000 т нецелесообразным.

*Одной из* **концепций** *безопасного и надёжного* **нефтеналивного судна** *начала XXI века является судно с двойным корпусом, двумя изолированными машинными отделениями, оснащенными двумя двигателями, двумя винтами и рулями*.

## 1.2. Характеристики отдельных нефтеналивных судов

### 1.2.1. Архитектурно-конструктивный тип

Как правило, *нефтеналивные судна оснащены дизельными энергетическими установками с одним гребным валом и одним гребным винтом фиксированного шага. Нефтеналивные суда имеют продольную систему набора корпуса, бульбообразный нос и транцевую корму. Жилые помещения, включая навигационный мостик, машинное отделение, с симметрично размещенными топливными цистернами и насосным помещением, расположены в кормовой оконечности судна. Корпус, элементы набора корпуса, грузовые помещения выполнены из малоуглеродистой и высокопрочной стали. Танки двойного дна, бортовые двойные танки, ахтерпиковый и форпиковый танки предназначены для изолированного балласта. Грузовые помещения нефтеналивных судов, включая грузовые и отстойные танки, предназначены для перевозки нефтепродуктов одного или нескольких разных сортов*.

### 1.2.2. Судно [1] дедвейтом 40 120 т

Таблица 1.7 – Параметры нефтеналивного судна дедвейтом 40 120 т

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Класс регистра | *LR*: ✠ 100 *A1 NAV1*, *LMC*, *UMS*, *IGS*, *ESP*, *COW*, *IWS*, *SCM*. Танкер для перевозки нефтепродуктов. Двойной корпус |
| Год постройки | 2000 |
| Место постройки | Сплит (Хорватия) |
| Длина габаритная<br>Длина расчетная<br>Ширина габаритная<br>Ширина расчетная<br>Высота борта | 182,40 м<br>174,00 м<br>32,20 м<br>32,20 м<br>17,60 м |
| Осадка расчетная<br>Осадка максимальная<br>Дедвейт при расчетной осадке<br>Дедвейт при максимальной осадке | 11,00 м<br>12,00 м<br>40 120,00 т<br>44 990,00 т |
| Валовая грузовместимость | 27 254,00 т |

Таблица 1.7 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Чистая грузовместимость грузовых танков<br>Чистая грузовместимость балластных танков | 53 012,00 $м^3$<br>20 158,00 $м^3$ |
| Система инертных газов (*IGS*)<br>Система танков изолированного балласта (*SBT*)<br>Система очистки сырой нефтью (*COW*) | Да<br>Да<br>Да |
| Грузовые насосы (паровой турбопривод)<br>Зачистные насосы (электропривод)<br>Зачистные насосы (эжектор) | 4х1 100 $м^3$/ч, 120 м.в.ст.<br>1х100 $м^3$/ч, 120 м.в.ст.<br>1х200 $м^3$/ч, 20 м.в.ст. |
| Скорость хода при расчетной осадке | 15,30 уз. |
| Энергетическая установка<br>Фирма изготовитель \ Тип<br>Число \ Мощность<br>Тип \ Количество \ Число лопастей<br>Частота вращения | Дизельный двигатель<br>*MAN-B&W \ 6S50MC*<br>1 \ 7 740 кВт<br>ВФШ \ 1 \ 4<br>104 об/мин |
| Основная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>3\ 740 кВт<br>720 об/мин<br>60 Гц |
| Аварийная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>1\ 96 кВт<br>1 800 об/мин<br>60 Гц |
| Основная котельная установка<br>Число \ Производительность | Котел на жидком топливе<br>2 \ 16 т/ч |
| Дополнительная котельная установка<br>Число<br>Производительность испарителя<br>Производительность экономайзера | Утилизационный котел<br>1<br>1,50 т/ч<br>1,40 т/ч |
| Ежедневное потребление топлива | 31,80 т тяжелого топлива |
| Запас тяжелого топлива<br>Запас дизельного топлива<br>Запас пресной воды | 1 826,00 $м^3$<br>130,00 $м^3$<br>200,00 $м^3$ |
| Число грузовых танков<br>Внутреннее покрытие грузовых танков<br>Внутреннее покрытие балластных танков<br>Покрытие подводной части корпуса<br><br><br>Покрытие надводной части корпуса | 10 + 2 (танки для отстоя)<br>Эпоксидная смола<br>Каменноугольная смола<br>Эпоксидная смола + виниловая смола + однокомпонентный полимер<br>Эпоксидная смола + полиуретан |

Таблица 1.7 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Число грузовых магистралей<br>Магистраль для выгрузки через корму | 4х300 мм<br>Нет |

Рисунок 1.6 – Нефтеналивное судно дедвейтом 40 120 т

### 1.2.3. Судно [2] дедвейтом 94 918 т

Таблица 1.8 – Параметры нефтеналивного судна дедвейтом 94 918 т

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Класс регистра | *DNV*: ✠ *1A1 ICE-1C*, *ESP*, *SPM*, *E0*, *NAUT-OC*, *LSC* (*DIS*), *VCS* 2, *CLEAN*, *NAUTICUS*, *TMON*. Танкер для перевозки сырой, неочищенной нефти, нефтепродуктов. Двойной корпус |
| Год постройки | 2004 |
| Место постройки | Сплит (Хорватия) |
| Длина габаритная<br>Длина расчетная<br>Ширина габаритная<br>Ширина расчетная | 247,24 м<br>236,00 м<br>42,00 м<br>42,00 м |

Таблица 1.8 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Высота борта | 21,00 м |
| Осадка расчетная<br>Осадка максимальная<br>Дедвейт при расчетной осадке<br>Дедвейт при максимальной осадке | 13,50 м<br>14,90 м<br>94 918,00 т<br>108 078,00 т |
| Валовая грузовместимость | 58 918,00 т |
| Чистая грузовместимость грузовых танков<br>Чистая грузовместимость балластных танков | 126 211,00 $м^3$<br>37 366,00 $м^3$ |
| Система инертных газов (*IGS*)<br>Система танков изолированного балласта (*SBT*)<br>Система очистки сырой нефтью (*COW*) | Да<br>Да<br>Да |
| Грузовые насосы (гидропривод)<br>Зачистные насосы (электропривод)<br>Зачистные насосы (эжектор) | 4х3 000 $м^3$/ч, 130 м.в.ст.<br>1х200 $м^3$/ч, 130 м.в.ст.<br>1х250 $м^3$/ч, 25 м.в.ст. |
| Скорость хода при расчетной осадке | 15,50 уз. |
| Энергетическая установка<br>Фирма изготовитель \ Тип<br>Число \ Мощность<br>Тип \ Количество \ Число лопастей<br>Частота вращения | Дизельный двигатель<br>MAN-B&W \ 7S60MC-C<br>1 \ 14 020 кВт<br>ВФШ \ 1 \ 4<br>94 об/мин |
| Основная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>3\ 870 кВт<br>1 500 об/мин<br>60 Гц |
| Аварийная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>1\ 248 кВт<br>1 800 об/мин<br>60 Гц |
| Основная котельная установка<br>Число \ Производительность | Котел на жидком топливе<br>2 \ 35 т/ч, 16 бар |
| Дополнительная котельная установка<br>Число<br>Производительность испарителя<br>Производительность экономайзера | Утилизационный котел<br>1<br>2,50 т/ч, 7 бар<br>1,70 т/ч, 7 бар |
| Ежедневное потребление топлива | 51,20 т тяжелого топлива |
| Запас тяжелого топлива<br>Запас дизельного топлива<br>Запас пресной воды | 2 822,00 $м^3$<br>162,00 $м^3$<br>300,00 $м^3$ |
| Число грузовых танков | 12 + 2 (танки для отстоя) |

Таблица 1.8 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Внутреннее покрытие грузовых танков<br>Покрытие подводной части корпуса<br><br><br><br>Ледовый пояс<br><br>Покрытие надводной части корпуса | *INTERSHIELD* 300<br>*INTERSPEED* 340 + без-оловянное, необрастаю-щее, самоочищающееся покрытие<br>Герметик + антифрикци-онная эпоксидная смола<br>Эпоксидная смола |
| Число грузовых магистралей<br>Магистраль для выгрузки через корму | 4x500 мм<br>Нет |

Рисунок 1.7 – Нефтеналивное судно дедвейтом 94 918 т

## 1.2.4. Судно [3] дедвейтом 152 852 т

Таблица 1.9 – Параметры нефтеналивного судна дедвейтом 152 852 т

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Класс регистра | *BV*: 1 ✠ *HULL* ✠ *MACH*, *ESP UNRESTRICTED NAVIGATION*, *SYS-NEQ-1* ✠ *VERISTAR-HULL*, ✠ *AUT-UMS*, *SPM*, *IN WATER SURVEY*, *VCS* ✠ *CARGO CONTROL*, ✠ |

Таблица 1.9 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| | *NMONSHAFT*. Танкер для перевозки сырой, неочищенной нефти, нефтепродуктов. Двойной корпус |
| Год постройки | 2007 |
| Место постройки | Сплит (Хорватия) |
| Длина габаритная<br>Длина расчетная<br>Ширина габаритная<br>Ширина расчетная<br>Высота борта | 281,20 м<br>270,00 м<br>48,20 м<br>48,20 м<br>23,00 м |
| Осадка расчетная<br>Осадка максимальная<br>Дедвейт при расчетной осадке<br>Дедвейт при максимальной осадке | 16,00 м<br>17,10 м<br>152 852,00 т<br>166 447,00 т |
| Валовая грузовместимость | 84 315,00 т |
| Чистая грузовместимость грузовых танков<br>Чистая грузовместимость балластных танков | 185 447,00 $м^3$<br>52 313,00 $м^3$ |
| Система инертных газов (*IGS*)<br>Система танков изолированного балласта (*SBT*)<br>Система очистки сырой нефтью (*COW*) | Да<br>Да<br>Да |
| Грузовые насосы (паровой турбопривод)<br>Зачистные насосы (паровой турбопривод)<br>Зачистные насосы (эжектор) | 3х3 500 $м^3$/ч, 140 м.в.ст.<br>1х250 $м^3$/ч, 140 м.в.ст.<br>2х406 $м^3$/ч, 30 м.в.ст. |
| Скорость хода при расчетной осадке | 15,50 уз. |
| Энергетическая установка<br>Фирма изготовитель \ Тип<br>Число \ Мощность<br>Тип \ Количество \ Число лопастей<br>Частота вращения | Дизельный двигатель<br>*MAN-B&W \ 6S70MC-C*<br>1 \ 16 330 кВт<br>ВФШ \ 1 \ 4<br>82 об/мин |
| Основная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>3\ 912 кВт<br>1 800 об/мин<br>60 Гц |
| Аварийная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>1\ 248 кВт<br>1 500 об/мин<br>60 Гц |
| Основная котельная установка<br>Число \ Производительность | Котел на жидком топливе<br>2 \ 35 т/ч, 18 бар |

Таблица 1.9 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Дополнительная котельная установка<br>Число<br>Производительность испарителя<br>Производительность экономайзера | Утилизационный котел<br>1<br>1,80 т/ч, 7 бар<br>1,50 т/ч, 7 бар |
| Ежедневное потребление топлива | 56,70 т тяжелого топлива |
| Запас тяжелого топлива<br>Запас дизельного топлива<br>Запас пресной воды | 4 025,00 $м^3$<br>130,00 $м^3$<br>410,00 $м^3$ |
| Число грузовых танков<br>Внутреннее покрытие грузовых танков<br>Покрытие корпуса | 12 + 2 (танки для отстоя)<br>*HEMPADUR* 4515<br>*HEMPADUR COMBIC* 7199, безоловянное, необрастающее, самоочищающееся покрытие |
| Число грузовых магистралей<br>Магистраль для выгрузки через корму | 3х500 мм<br>Нет |

Рисунок 1.8 – Нефтеналивное судно дедвейтом 152 852 т

## 1.2.5. Судно [4] дедвейтом 185 091 т

Таблица 1.10 – Параметры нефтеналивного судна дедвейтом 185 091 т

| Основные параметры | Значение |
|---|---|

Таблица 1.10 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Класс регистра | *ABS*: ✠ *A1* (*E*), *WAMS*, *WACCU*, *CPP*, *VEC*, *SH*, *RES*, *ESP*, *with spec. rot*. *UWILD*, *COW*, *SPM*. Танкер для перевозки сырой, не-очищенной нефти, нефте-продуктов. Двойной корпус |
| Год постройки | 1986 |
| Место постройки | Улсан (Южная Корея) |
| Длина габаритная<br>Длина расчетная<br>Ширина габаритная<br>Ширина расчетная<br>Высота борта | 286,85 м<br>275,00 м<br>50,00 м<br>50,00 м<br>28,00 м |
| Осадка расчетная<br>Осадка максимальная<br>Дедвейт при расчетной осадке<br>Дедвейт при максимальной осадке | 18,75 м<br>19,57 м<br>185 091,00 т<br>193 048,00 т |
| Валовая грузовместимость | 97 525,00 т |
| Чистая грузовместимость грузовых танков<br>Чистая грузовместимость балластных танков | 216 008,00 $м^3$<br>59 533,00 $м^3$ |
| Система инертных газов (*IGS*)<br>Система танков изолированного балласта (*SBT*)<br>Система очистки сырой нефтью (*COW*) | Да<br>Да<br>Да |
| Грузовые насосы (паровой турбопривод)<br>Зачистные насосы (электропривод) | 2х4 000 $м^3$/ч<br>1х2 300 $м^3$/ч |
| Скорость хода при расчетной осадке | 15,30 уз. |
| Энергетическая установка<br>Фирма изготовитель \ Тип<br>Число \ Мощность \ Частота вращения<br>Тип \ Количество \ Число лопастей<br>Частота вращения гребного винта | Дизельный двигатель<br>*MAN-B&W* \ *6S80MC-C*<br>1 \ 20 141 кВт<br>ВФШ \ 1 \ 4<br>69 об/мин |
| Основная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>3\ 970 кВт<br>1 650 об/мин<br>60 Гц |
| Аварийная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>1\ 300 кВт<br>1 500 об/мин<br>60 Гц |

Таблица 1.10 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Основная котельная установка<br>Число \ Производительность | Котел на жидком топливе<br>2 \ 42 т/ч |
| Дополнительная котельная установка<br>Число<br>Производительность испарителя<br>Производительность экономайзера | Утилизационный котел<br>1<br>2,20 т/ч<br>1,60 т/ч |
| Ежедневное потребление топлива | 64,40 т тяжелого топлива |
| Запас тяжелого топлива<br>Запас дизельного топлива<br>Запас пресной воды | 4 455,00 $м^3$<br>141,00 $м^3$<br>455,00 $м^3$ |
| Число грузовых танков<br>Внутреннее покрытие грузовых танков<br>Покрытие подводной части корпуса<br><br>Покрытие надводной части корпуса | 12 + 2 (танки для отстоя)<br>Эпоксидная смола<br>Эпоксидная смола + однокомпонентный полимер<br>Эпоксидная смола + полиуретан |
| Число грузовых магистралей<br>Магистраль для выгрузки через корму | 3х500 мм<br>Нет |

Рисунок 1.9 – Нефтеналивное судно дедвейтом 185 091 т

## 1.2.6. Судно [5] дедвейтом 259 999 т

Таблица 1.11 – Параметры нефтеналивного судна дедвейтом 259 999 т

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Класс регистра | *NK*: ✠ *NS Tob*, *IWS*, *PSCM*, *MNS* ✠ *CHG*, *MPP*, *LSA*, *RCF*, *M0*, *AFS*, *ESP*. Танкер для перевозки сырой, неочищенной нефти, нефтепродуктов. Двойной корпус |
| Год постройки | 2000 |
| Место постройки | Кобе (Япония) |
| Длина габаритная<br>Длина расчетная<br>Ширина габаритная<br>Ширина расчетная<br>Высота борта | 330,00 м<br>319,00 м<br>60,00 м<br>60,00 м<br>28,80 м |
| Осадка расчетная<br>Осадка максимальная<br>Дедвейт при расчетной осадке<br>Дедвейт при максимальной осадке | 20,35 м<br>20,58 м<br>259 999,00 т<br>281 050,00 т |
| Валовая грузовместимость | 152 139,00 т |
| Чистая грузовместимость грузовых танков<br>Чистая грузовместимость балластных танков | 308 376,00 $м^3$<br>82 841,00 $м^3$ |
| Система инертных газов (*IGS*)<br>Система танков изолированного балласта (*SBT*)<br>Система очистки сырой нефтью (*COW*) | Да<br>Да<br>Да |
| Грузовые насосы (паровой турбопривод) | 3х5 000 $м^3$/ч |
| Скорость хода при расчетной осадке | 16,00 уз. |
| Энергетическая установка<br>Фирма изготовитель \ Тип<br>Число \ Мощность<br>Тип \ Количество \ Число лопастей<br>Частота вращения | Дизельный двигатель<br>*MAN-B&W* \ *7S80MC-C*<br>1 \ 24 089 кВт<br>ВФШ \ 1 \ 4<br>75 об/мин |
| Основная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>3\ 1 100 кВт<br>1 200 об/мин<br>60 Гц |
| Аварийная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>1\ 400 кВт<br>1 800 об/мин<br>60 Гц |

Таблица 1.11 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Основная котельная установка<br>Число \ Производительность | Котел на жидком топливе<br>1 \ 87 т/ч, 22 бар |
| Дополнительная котельная установка<br>Число \ Производительность | Утилизационный котел<br>1 \ 2,70 т/ч, 6 бар |
| Ежедневное потребление топлива | 82,59 т тяжелого топлива |
| Запас тяжелого топлива<br>Запас дизельного топлива<br>Запас пресной воды | 6 212,00 $м^3$<br>181,00 $м^3$<br>755,00 $м^3$ |
| Число грузовых танков<br>Внутреннее покрытие грузовых танков<br>Покрытие подводной части корпуса<br><br>Покрытие надводной части корпуса | 15 + 2 (танки для отстоя)<br>Эпоксидная смола<br>Эпоксидная смола + однокомпонентный полимер<br>Эпоксидная смола + полиуретан |
| Число грузовых магистралей<br>Магистраль для выгрузки через корму | 4х500 мм<br>Нет |

Рисунок 1.10 – Нефтеналивное судно дедвейтом 259 999 т

## 1.2.7. Судно [6] дедвейтом 317 441 т

Таблица 1.12 – Параметры нефтеналивного судна дедвейтом 317 441 т

| Основные параметры | Значение |
|---|---|

Таблица 1.12 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Класс регистра | *LR*: ✠ 100*A1*, *ESP*, *SDA*, *FDA*, *CM*, *WBT*, ✠ *LMC*, *UMS*, *IGS*, *IWS*, *SPM*. Танкер для перевозки сырой, неочищенной нефти, нефтепродуктов. Двойной корпус |
| Год постройки | 2009 |
| Место постройки | Улсан (Южная Корея) |
| Длина габаритная<br>Длина расчетная<br>Ширина габаритная<br>Ширина расчетная<br>Высота борта | 333,13 м<br>319,00 м<br>60,00 м<br>60,00 м<br>30,40 м |
| Осадка расчетная<br>Осадка максимальная<br>Дедвейт при расчетной осадке<br>Дедвейт при максимальной осадке | 22,65 м<br>23,61 м<br>317 441,00 т<br>325 646,00 т |
| Валовая грузовместимость | 160 135,00 т |
| Чистая грузовместимость грузовых танков<br>Чистая грузовместимость балластных танков | 352 771,00 м$^3$<br>98 242,00 м$^3$ |
| Система инертных газов (*IGS*)<br>Система танков изолированного балласта (*SBT*)<br>Система очистки сырой нефтью (*COW*) | Да<br>Да<br>Да |
| Грузовые насосы (паровой турбопривод)<br>Зачистные насосы (паровой турбопривод)<br>Зачистные насосы (эжектор) | 3х5 000 м$^3$/ч, 150 м.в.ст.<br>1х400 м$^3$/ч<br>2х600 м$^3$/ч |
| Скорость хода при расчетной осадке | 15,50 уз. |
| Энергетическая установка<br>Фирма изготовитель \ Тип<br>Число \ Мощность<br>Тип \ Количество \ Число лопастей<br>Частота вращения | Дизельный двигатель<br>*MAN-B&W* \ *6S90MC-C*<br>1 \ 24 939 кВт<br>ВФШ \ 1 \ 4<br>75 об/мин |
| Основная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>3\ 1 190 кВт<br>900 об/мин<br>60 Гц |
| Аварийная генераторная установка<br>Число \ Мощность<br>Частота вращения<br>Частота тока | Дизельный двигатель<br>1\ 465 кВт<br>1 800 об/мин<br>60 Гц |

Таблица 1.12 – Продолжение

| Основные параметры | Значение |
|---|---|
| Основная котельная установка<br>Число \ Производительность | Котел на жидком топливе<br>2 \ 45 т/ч, 22 бар |
| Дополнительная котельная установка<br>Число \ Производительность | Утилизационный котел<br>1 \ 2,50 т/ч, 6 бар |
| Ежедневное потребление топлива | 104,17 т тяжелого топлива |
| Запас тяжелого топлива<br>Запас дизельного топлива<br>Запас пресной воды | 8 416,00 $м^3$<br>443,00 $м^3$<br>615,00 $м^3$ |
| Число грузовых танков<br>Внутреннее покрытие грузовых танков<br>Покрытие подводной части корпуса<br><br>Покрытие надводной части корпуса | 17 + 2 (танки для отстоя)<br>Эпоксидная смола<br>Эпоксидная смола + однокомпонентный полимер<br>Эпоксидная смола + полиуретан |
| Число грузовых магистралей<br>Магистраль для выгрузки через корму | 3х500 мм<br>Нет |

Рисунок 1.11 – Нефтеналивное судно дедвейтом 317 441 т

## 1.3. Энергетические установки нефтеналивных судов

### 1.3.1. Главный двигатель

*Фирма MAN Burmeister&Wain является основным поставщиком главных судовых малооборотных дизелей для нефтеналивных судов морского флота*. Широкий модельный ряд и многолетние традиции производства позволили фирме занять лидирующие положение на рынке. К настоящему времени *наибольшее распространение в сегменте судовых малооборотных дизельных двигателей получили* **двигатели серии *MAN-B&W S50-90MC*** (рисунок 1.12).

*Двигатели серии MAN B&W S50-90MC* представляют собою однорядные, двухтактные, крейцкопфные, реверсивные дизельные двигатели с газотурбинным наддувом.

*Характерной особенностью двигателей серии MAN B&W S50-90MC* является использование механизма отбора мощности у распределительного вала для осуществления впрыска топлива и работы выпускных клапанов. Кроме того двигатели этой серии оснащены пневмоэлектрической системой управления, обеспечивающей регулирование частоты вращения коленчатого вала двигателя посредством электрогидравлического регулятора.

*Особенностью топливной системы двигателей серии MAN B&W S50-90MC* является то, что каждый цилиндр двигателя оснащен индивидуальным топливным насосом высокого давления, плунжер которого приводится в движение посредством кулачковой шайбы, расположенной на распределительном валу. Оптимальное значение удельного расхода топлива при наименьшем содержании окислов азота в выхлопных газах достигается за счет системы регулирования момента впрыска топлива в цилиндр (система *VIT – Variable Injection Timing*), входящей в конструкцию топливного насоса.

*Особенностью системы газораспределения двигателей серии MAN B&W S50-90MC* является то, что работа выпускных клапанов регулируется кулачками, расположенными на распределительном валу. При этом открытие каждого клапана осуществляется индивидуально, посредством соответствующего гидравлического привода, а закрытие – посредством воздушной пружины, размещенной в корпусе клапана. Оптимальное значение удельного расхода топлива при наименьшем содержании окислов азота в выхлопных газах достигается за счет системы регулирования угла закрытия выпускного клапана (система *VEC – Valve Exhaust Closing*), входящей в конструкцию выпускного клапана.

*Особенностью системы смазки двигателей серии MAN B&W S50-90MC* является то, что смазка коленчатого и распределительного вала двигателя осуществляется раздельно. При этом смазка коленчатого вала, а также других элементов цилиндрово-поршневой группы и цепной передачи механизма газораспределения осуществляется посредством центральной смазочной системы. Смазка распределительного вала, а также питание гидравлической системы открытия выпускных клапанов обеспечивается автономной системой смазки. Смазка цилиндра осуществляется посредством специальных смазочных насосов, управляемых электронной системой, что обеспечивает более равномерное распределение масляной пленки по поверхности цилиндра, и как следствие более низкий расход масла.

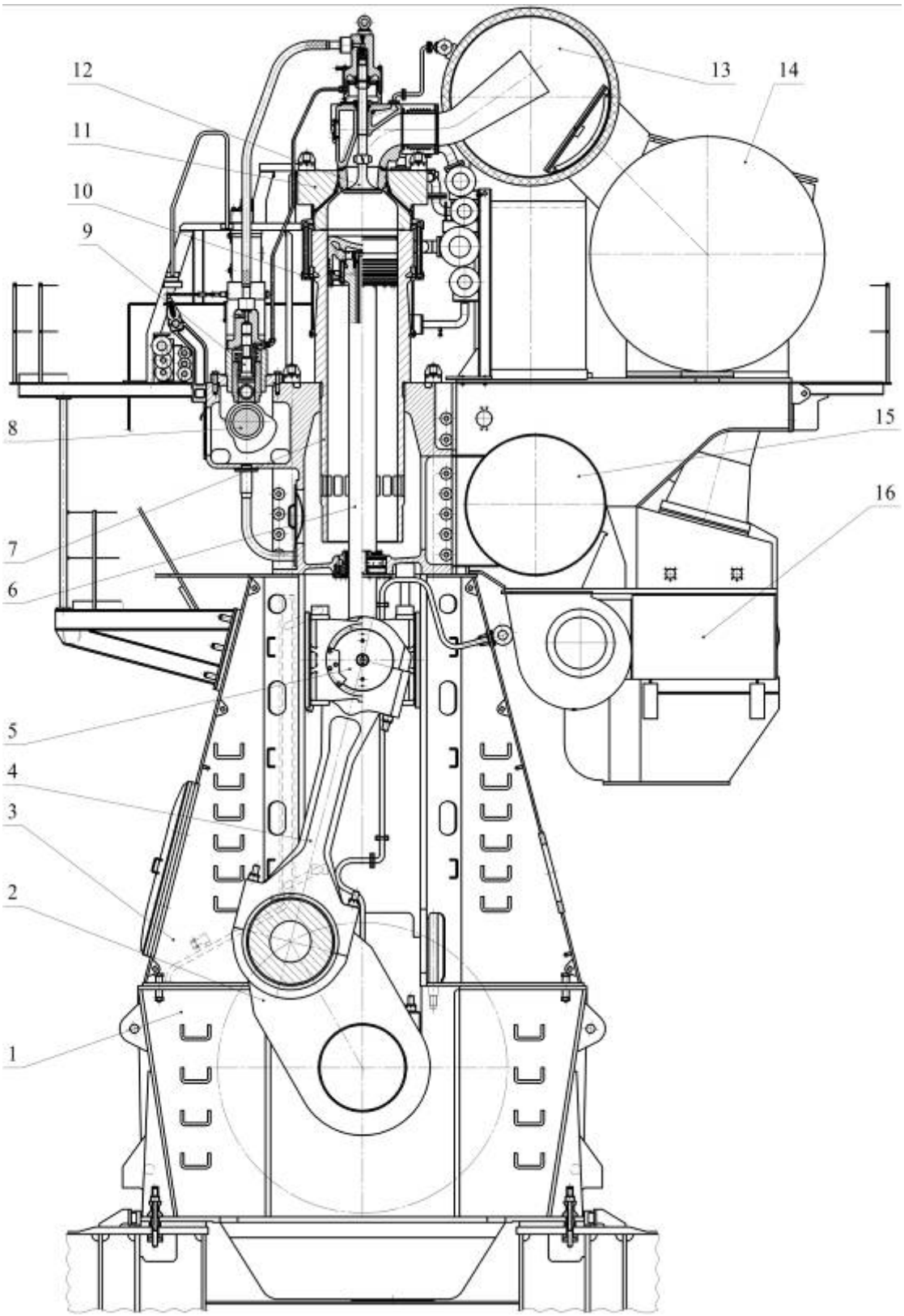



Рисунок 1.12 – Дизельный двигатель серии *MAN-B&W S50-90MC*: 1 – фундаментная рама; 2 – коленчатый вал; 3 – станина; 4 – шатун; 5 – крейцкопфный узел; 6 – шатун; 7 – втулка цилиндра; 8 – распределительный вал; 9 – гидропривод; 10 – рубашка цилиндра; 11 – крышка цилиндра; 12 – выпускной клапан; 13 – выпускной ресивер; 14 – газотурбонагнетатель; 15 – продувочный ресивер; 16 – воздухоохладитель

*Особенностью системы пуска и реверсирования двигателей серии MAN B&W S50-90MC* является то, что пусковые клапаны, установленные на каждом цилиндре, открываются посредством сжатого воздуха, подающегося от воздухораспределителя, и закрываются при помощи специальных пружин.

## Газотурбонагнетатель

*Система наддува двигателей серии MAN B&W S50-90MC* состоит из газотурбонагнетателя, воздухоохладителя, продувочного ресивера и выхлопного коллектора (рисунок 1.13).

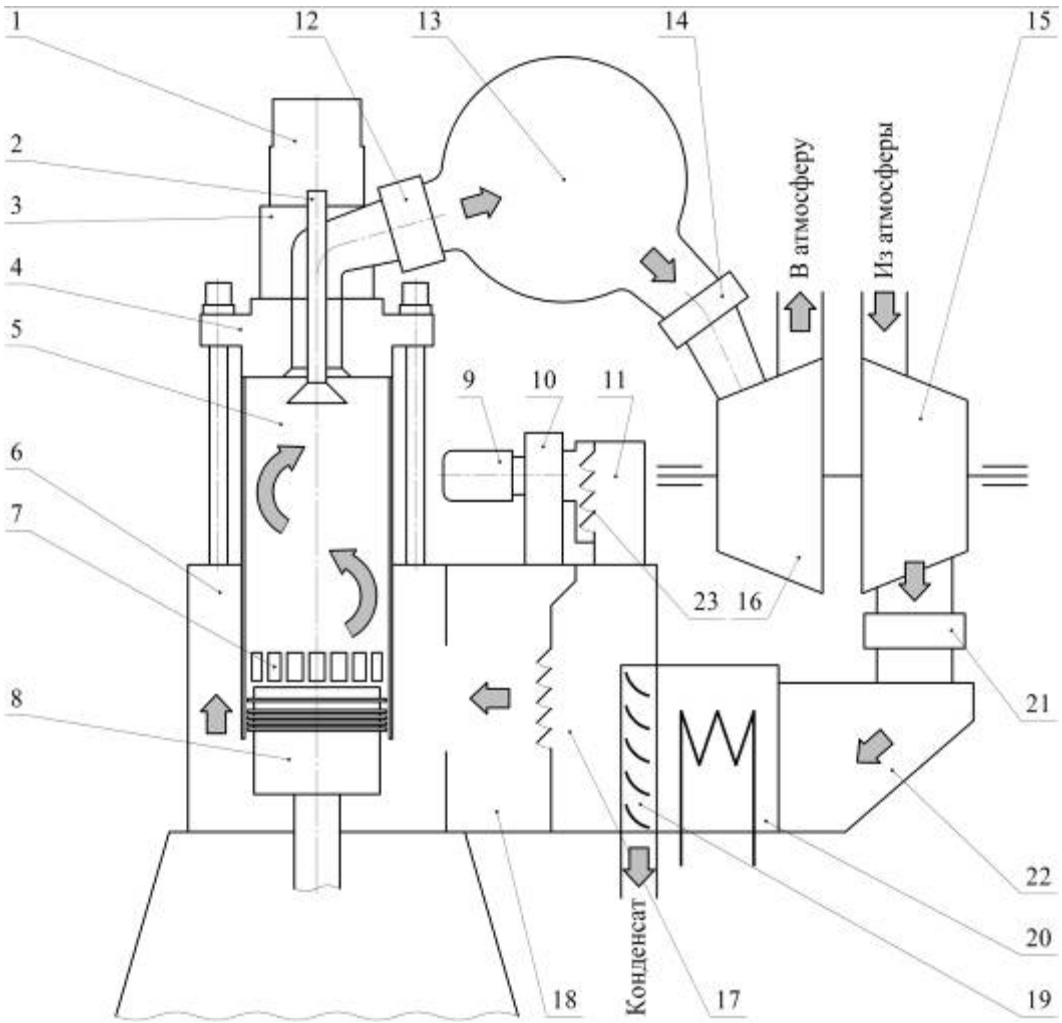



Рисунок 1.13 – Система наддува дизельного двигателя серии *MAN B&W S50-98MC*: 1 – привод выпускного клапана; 2 – выпускной клапан; 3 – кожух выпускного клапана; 4 – крышка цилиндра; 5 – втулка цилиндра; 6 – блок цилиндра; 7 – продувочные окна; 8 – поршень; 9 – привод электрической воздуходувки; 10 – электрическая воздуходувка; 11 – всасывающая часть электрической воздуходувки; 12 – расширительное кольцо; 13 – выпускной ресивер; 14 – расширительное кольцо; 15 – компрессор; 16 – турбина; 17 – воздушные заслонки; 18 – продувочный ресивер; 19 – водоотделитель; 20 – воздухоохладитель; 21 – расширительное кольцо; 22 – воздуховод; 23 – воздушные заслонки

*Для обеспечения необходимого давления продувочного воздуха в дизельном двигателе MAN B&W S50-90MC* используется два газотурбонагнетателя фирмы *ASEA Brown&Boveri – ABB B&B VTR*, которые подают воздух в общий продувочный ресивер.

Турбина и компрессор газотурбонагнетателя установлены на одном валу. Компрессор всасывает воздух из машинного отделения через воздушный фильтр, также выполняющий функции глушителя. Далее, сжатый в компрессоре воздух, поступает в воздухоохладитель, а затем в воздушный ресивер. Воздухоохладитель представляет собой поверхностный теплообменник трубчатого типа, по змеевикам которого циркулирует охлаждающая вода. Из ресивера воздух через продувочные окна и пластинчатые клапаны направляется в цилиндры двигателя, где, смешиваясь с топливом, образует воздушно-топливную смесь.

В процессе сгорания воздушно-топливной смеси в цилиндрах двигателя совершается механическая работа, а отработавшие газы, удаляются из цилиндров через выпускные клапаны. Из цилиндров двигателя газы поступают в выхлопной коллектор, где импульсы от каждого цилиндра выравниваются, в результате чего давление в коллекторе поддерживается постоянным. Далее газы попадают в газовую турбину и затем удаляются через газоход. Трубопровод, соединяющий цилиндры двигателя и выхлопной коллектор, оснащен системой конденсаторов, предназначенных для защиты конструкции от неравномерного термического расширения.

*Газотурбонагнетатель ABB B&B VTR* использует теплоту отработавших газов для подачи сжатого воздуха в цилиндры двигателя. *Данный газотурбонагнетатель состоит из одноступенчатой осевой газовой турбины и центробежного компрессора, имеющих общий ротор*.

## 1.3.2. Вспомогательный котел

*Фирма HYUNDAI является лидирующим производителем судовых вспомогательных котлов для нефтеналивных судов морского флота*. Широкий модельный ряд, надежность и простота конструкции позволили фирме занять особое положение на рынке. К настоящему времени *наибольшее распространение в сегменте судовых вспомогательных котлов получили* **вспомогательные котлы серии *HYUNDAI HMT*** (рисунок 1.14).

*Вспомогательные котлы серии HYUNDAI HMT* представляют собою водотрубные котлы с естественной циркуляцией.

*Особенностью вспомогательных котлов серии HYUNDAI HMT* является то, что газообразные продукты сгорания топлива движутся вертикально от топки, через пучки труб к газоводу в верхней точке котла. В основании топки имеется жаропрочная защита от перегрева. Конвективная часть котла состоит из мульти-генерирующих труб и находится между паровым и водяным барабанами. В паровом барабане устанавливаются элементы скруббера для сепарации пара от воды, что гарантирует достаточную сухость пара при подаче к потребителям.

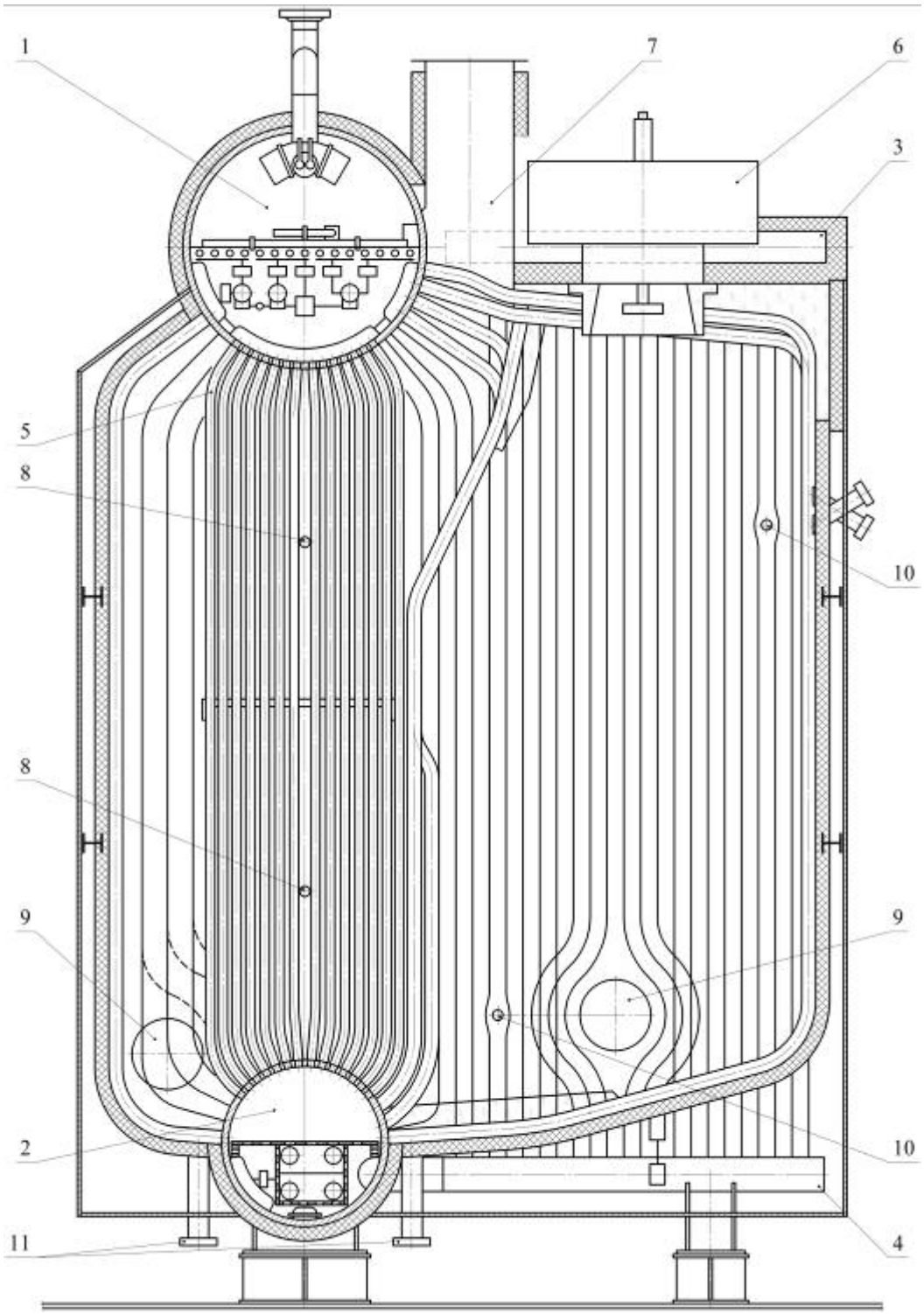



Рисунок 1.14 – Вспомогательный котел серии *HYUNDAI HMT*: 1 – пароводяной барабан; 2 – водяной барабан; 3 – верхний водяной коллектор; 4 – нижний водяной коллектор; 5 – водогрейные трубки; 6 – форсунка; 7 – газовод; 8 – распылители сажеобдувочной системы; 9 – съемный щиток; 10 – смотровое стекло; 11 – трубки системы продувания котла

### 1.3.3. Дизель-генератор

*Фирма CATERPILLAR является ведущим производителем судовых дизель-генераторов для нефтеналивных судов морского флота*. Широкий модельный

ряд, огромный выбор комплектующих, разветвленная сеть сервисных центров по всему миру позволили фирме занять свою нишу на рынке. К настоящему времени *наибольшее распространение в сегменте судовых дизель-генераторов получили* **дизель-генераторы серии *CATERPILLAR 3406-3516*** (рисунок 1.15).

*Дизель-генераторы серии CATERPILLAR 3406-3516* представляют собою двухрядные, четырехтактные, тронковые, нереверсивные дизельные двигателя с газотурбинным наддувом.

*Характерной особенностью дизель-генераторов серии CATERPILLAR 3406-3516* является то, что блок цилиндров двигателя представляет собой *V*-образный моноблок, оснащенный каналами для подачи масла и охлаждающей жидкости, а также посадочными местами для установки цилиндровых втулок мокрого типа. На внешней стороне моноблока размещены отсеки с подшипниками для установки распределительного вала, а также отверстия для привода толкателей клапанов и насос-форсунок. Каждый цилиндр двигателя закрыт отдельной крышкой цилиндра.

*Особенностью топливной системы дизель-генераторов серии CATERPILLAR 3406-3516* является использование насос-форсунок, объединяющих в одном агрегате насосную секцию и распылитель. Установленная непосредственно на крышке цилиндра, каждая насос-форсунка имеет индивидуальный штанговый привод. Используемые в топливной системе фильтры оборудованы сигнализацией, предупреждающей о наличии воды в топливе. Также данные фильтры оснащены системой, позволяющей производить их очистку без остановки подачи топлива.

*Особенностью системы газораспределения дизель-генераторов серии CATERPILLAR 3406-3516* является использование сухого газонепроницаемого выпускного коллектора, покрытого специальным термоизоляционным покрытием. Впускной коллектор оснащен воздухоохладителем со специальным антикоррозионным покрытием и индивидуальной системой циркуляции охлаждающей жидкости.

*Особенностью системы смазки дизель-генераторов серии CATERPILLAR 3406-3516* является то, что основной объем масла находится в картере двигателя, оснащенным телескопическим маслопроводом поплавкового типа. Циркуляция масла по каналам двигателя осуществляется с помощью навесного масляного насоса.

*Особенностью системы охлаждения дизель-генераторов серии CATERPILLAR 3406-3516* является использование пресной и забортной воды в двухконтурной, замкнутой системе. Контур низких температур включает в себя воздухоохладитель, встроенный насос пресной воды, теплообменник между морской и пресной водой, термостат, расширительная цистерна. Контур высоких температур включает в себя водяную рубашку блока цилиндров, встроенный насос пресной воды, теплообменник между морской и пресной водой, термостат, расширительную цистерну.

*Особенностью генераторной части дизель-генераторов серии CATERPILLAR 3406-3516* является использование микропроцессорного контроллера, обеспечивающего полное измерение рабочих параметров и защитные функции.

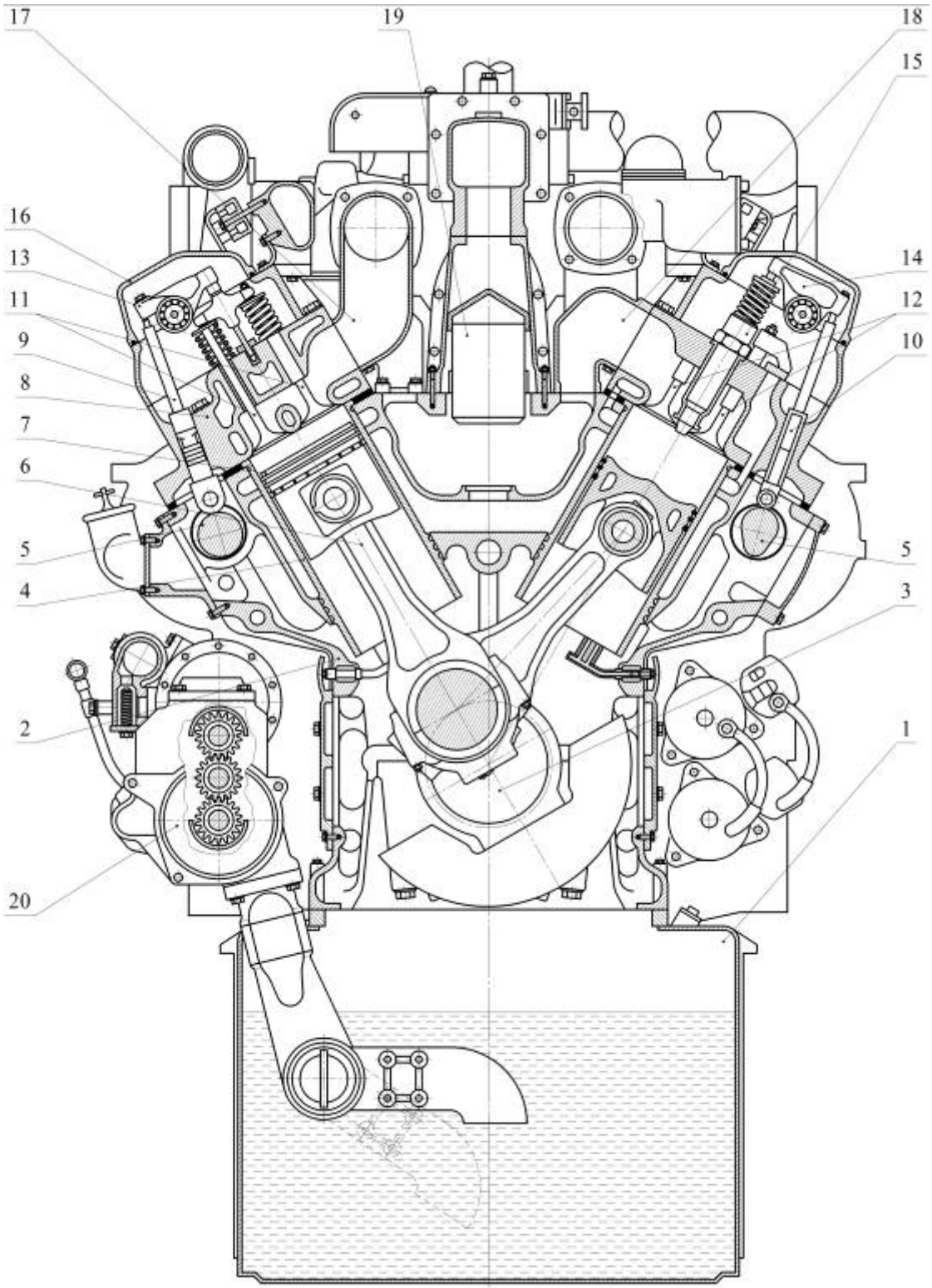



Рисунок 1.15 – Дизель-генератор серии *CATERPILLAR 3406-3516*: 1 – картер; 2 – блок цилиндров; 3 – коленчатый вал; 4 – втулка цилиндра; 5 – распределительный вал; 6 – шатун; 7 – поршень; 8 – крышка цилиндра; 9 – привод толкателей клапанов; 10 – привод толкателя насос-форсунки; 11 – выпускные клапаны; 12 – впускные клапаны; 13 – коромысло толкателей клапанов; 14 – коромысло толкателя насос-форсунки; 15 – насос-форсунка; 16 – крышка головки цилиндра; 17 – выпускной коллектор; 18 – впускной коллектор; 19 – воздушный фильтр; 20 – масляный насос

# 2. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДОВ

## 2.1. Исходные данные для проведения оценки

### 2.1.1. Условия эксплуатации

*Среднее расстояние, проходимое судном за рейс*, *DST*:

$DST = 6\,385{,}00$ *миль* – принимается из опыта эксплуатации.

*Годовая длительность эксплуатации судна*, *TME*:

$TME = 360{,}00$ *сут* – принимается из опыта эксплуатации.

### 2.1.2. Транспортные характеристики

*Водоизмещение судна за рейс*, *W*:

$W = 44\,938{,}00$ *м*$^3$ – принимается из вышеприведенных таблиц.

$[W]_1 = 44\,938{,}00$ *м*$^3$, $[W]_4 = 207\,319{,}00$ *м*$^3$,
$[W]_2 = 106\,317{,}00$ *м*$^3$, $[W]_5 = 291\,223{,}00$ *м*$^3$,
$[W]_3 = 171\,208{,}00$ *м*$^3$, $[W]_6 = 355\,563{,}00$ *м*$^3$.

*Грузовместимость судна за рейс*, *G*:

$G = 53\,012{,}00$ *м*$^3$ – принимается из вышеприведенных таблиц.

$[G]_1 = 53\,012{,}00$ *м*$^3$, $[G]_4 = 216\,008{,}00$ *м*$^3$,
$[G]_2 = 126\,211{,}00$ *м*$^3$, $[G]_5 = 308\,376{,}00$ *м*$^3$,
$[G]_3 = 185\,447{,}00$ *м*$^3$, $[G]_6 = 352\,771{,}00$ *м*$^3$.

*Средняя скорость движения судна за рейс*, *V*:

$V = 15{,}30$ *уз* – принимается из вышеприведенных таблиц.

$[V]_1 = 15{,}30$ *уз*, $[V]_4 = 15{,}30$ *уз*,
$[V]_2 = 15{,}50$ *уз*, $[V]_5 = 16{,}00$ *уз*,
$[V]_3 = 15{,}50$ *уз*, $[V]_6 = 15{,}50$ *уз*.

### 2.1.3. Мощностные характеристики

*Номинальная мощность главного двигателя*, $N_e^н$:

$N_e^н = 9\,480{,}00$ *кВт* – принимается из вышеприведенных таблиц.

$[N_e^н]_1 = 9\,480{,}00$ *кВт*, $[N_e^н]_2 = 15\,820{,}00$ *кВт*,

$\left[N_e^н\right]_3 = 18\,660{,}00\ кВт,$ $\left[N_e^н\right]_5 = 27\,160{,}00\ кВт,$

$\left[N_e^н\right]_4 = 23\,280{,}00\ кВт,$ $\left[N_e^н\right]_6 = 29\,340{,}00\ кВт.$

*Номинальная частота вращения главного двигателя*, $n^н$:

| |
|---|
| $n^н = 127{,}00\ об/мин$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$\left[n^н\right]_1 = 127{,}00\ об/мин,$ $\left[n^н\right]_4 = 76{,}00\ об/мин,$

$\left[n^н\right]_2 = 105{,}00\ об/мин,$ $\left[n^н\right]_5 = 76{,}00\ об/мин,$

$\left[n^н\right]_3 = 91{,}00\ об/мин,$ $\left[n^н\right]_6 = 76{,}00\ об/мин.$

*Среднее индикаторное давление на заданном режиме*, $p_i^з$:

| |
|---|
| $p_i^з = 2{,}02\ МПа$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$\left[p_i^з\right]_1 = 2{,}02\ МПа,$ $\left[p_i^з\right]_4 = 1{,}93\ МПа,$

$\left[p_i^з\right]_2 = 2{,}00\ МПа,$ $\left[p_i^з\right]_5 = 1{,}82\ МПа,$

$\left[p_i^з\right]_3 = 1{,}97\ МПа,$ $\left[p_i^з\right]_6 = 1{,}74\ МПа.$

*Частота вращения главного двигателя на заданном режиме*, $n^з$:

| |
|---|
| $n^з = 104{,}00\ об/мин$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$\left[n^з\right]_1 = 104{,}00\ об/мин,$ $\left[n^з\right]_4 = 69{,}00\ об/мин,$

$\left[n^з\right]_2 = 94{,}00\ об/мин,$ $\left[n^з\right]_5 = 75{,}00\ об/мин,$

$\left[n^з\right]_3 = 82{,}00\ об/мин,$ $\left[n^з\right]_6 = 75{,}00\ об/мин.$

*Среднее индикаторное давление* $p_i^з$ и *частота вращения главного двигателя* $n^з$ *определяют режим эксплуатации главного двигателя.*

### 2.1.4. Технические характеристики

*Расчетная длина судна*, $L$:

| |
|---|
| $L = 174{,}00\ м$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$[L]_1 = 174{,}00\ м,$ $[L]_4 = 275{,}00\ м,$

$[L]_2 = 236{,}00\ м,$ $[L]_5 = 319{,}00\ м,$

$[L]_3 = 270{,}00\ м,$ $[L]_6 = 319{,}00\ м.$

*Расчетная ширина судна*, $B$:

| |
|---|
| $B = 32{,}20\ м$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$[B]_1 = 32{,}20\ м,$ $[B]_4 = 50{,}00\ м,$

$[B]_2 = 42{,}00\ м,$ $[B]_5 = 60{,}00\ м,$

$[B]_3 = 48{,}20\ м,$ $[B]_6 = 60{,}00\ м.$

*Расчетная осадка судна*, $T$:

| |
|---|
| $T = 11{,}00\ м$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$[T]_1 = 11{,}00\ м$, $[T]_4 = 18{,}75\ м$,
$[T]_2 = 13{,}50\ м$, $[T]_5 = 20{,}35\ м$,
$[T]_3 = 16{,}00\ м$, $[T]_6 = 22{,}65\ м$.

*Число цилиндров главного двигателя*, $i$:

| |
|---|
| $i = 6{,}00\ шт$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$[i]_1 = 6{,}00\ шт$, $[i]_4 = 6{,}00\ шт$,
$[i]_2 = 7{,}00\ шт$, $[i]_5 = 7{,}00\ шт$,
$[i]_3 = 6{,}00\ шт$, $[i]_6 = 6{,}00\ шт$.

*Диаметр цилиндров главного двигателя*, $D$:

| |
|---|
| $D = 0{,}50\ м$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$[D]_1 = 0{,}50\ м$, $[D]_4 = 0{,}80\ м$,
$[D]_2 = 0{,}60\ м$, $[D]_5 = 0{,}80\ м$,
$[D]_3 = 0{,}70\ м$, $[D]_6 = 0{,}90\ м$.

*Ход поршня главного двигателя*, $S$:

| |
|---|
| $S = 2{,}00\ м$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$[S]_1 = 2{,}00\ м$, $[S]_4 = 3{,}20\ м$,
$[S]_2 = 2{,}40\ м$, $[S]_5 = 3{,}20\ м$,
$[S]_3 = 2{,}80\ м$, $[S]_6 = 3{,}20\ м$.

*Давление наддува главного двигателя*, $p_к$:

| |
|---|
| $p_к = 0{,}22\ МПа$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$[p_к]_1 = 0{,}22\ МПа$, $[p_к]_4 = 0{,}29\ МПа$,
$[p_к]_2 = 0{,}26\ МПа$, $[p_к]_5 = 0{,}30\ МПа$,
$[p_к]_3 = 0{,}28\ МПа$, $[p_к]_6 = 0{,}30\ МПа$.

*Число лопастей гребного винта*, $z$:

| |
|---|
| $z = 4{,}00\ шт$ – принимается из вышеприведенных таблиц. |

$[z]_1 = 4{,}00\ шт$, $[z]_4 = 4{,}00\ шт$,
$[z]_2 = 4{,}00\ шт$, $[z]_5 = 4{,}00\ шт$,
$[z]_3 = 4{,}00\ шт$, $[z]_6 = 4{,}00\ шт$.

*Радиус гребного винта*, $R$:

$R = 2{,}40\ м$ – принимается из вышеприведенных таблиц.

$[R]_1 = 2{,}40\ м$, $[R]_4 = 4{,}10\ м$,
$[R]_2 = 3{,}00\ м$, $[R]_5 = 4{,}50\ м$,
$[R]_3 = 3{,}50\ шт$, $[R]_6 = 5{,}00\ м$.

*Число гребных винтов*, *x*:

$x = 1{,}00\ шт$ – принимается из вышеприведенных таблиц.

*Коэффициент тактности главного двигателя*, *m*:

$m = 1{,}00$ – принимается из вышеприведенных таблиц.

*КПД главного двигателя*, $\eta_{мех}$:

$\eta_{мех} = 0{,}94$ – принимается из опыта эксплуатации.

### 2.1.5. Экономические характеристики

*Цена на топливо для главного двигателя*, $Ц_m^{ГД}$:

$Ц_m^{ГД} = 16\,500{,}00\ руб/т$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Цена на топливо для дизель-генератора*, $Ц_m^{ДГ}$:

$Ц_m^{ДГ} = 25\,400{,}00\ руб/т$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Цена на топливо для вспомогательного котла*, $Ц_m^{ВК}$:

$Ц_m^{ВК} = 15\,200{,}00\ руб/т$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Цена на цилиндровое масло для главного двигателя*, $Ц_м^{ГД}$:

$Ц_м^{ГД} = 115\,400{,}00\ руб/т$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Навигационные расходы судна за рейс*, *H*:

$H = 7\,500\,000{,}00\ руб$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Тариф на перевозку судном 1 т груза*, *S*:

$A = 10{,}00\ руб/т$ – принимается из опыта эксплуатации.

## 2.2. Оценка технических характеристик работы

### 2.2.1. Общие характеристики

*Процентное содержание углерода в топливе*, $C_m$:

$C_m = 87{,}00\,\%$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Процентное содержание водорода в топливе*, $H_m$:

$H_m = 12{,}60\,\%$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Процентное содержание кислорода в топливе*, $O_m$:

$O_m = 0{,}40\,\%$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Процентное содержание серы в топливе*, $S_m$:

$H_m = 3{,}50\,\%$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Процентное содержание воды в топливе*, $W_m$:

$$W_т = 0{,}00\,\%$$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Низшая теплотворная способность 1 кг топлива*, $Q_т^н$:

$$Q_т^н = \frac{33913{,}00 \cdot C_т + 10299{,}00 \cdot H_т - 10866{,}00 \cdot (O_т \cdot S_т) - 2512{,}00 \cdot W_т}{100} =$$

$$= \frac{33913{,}00 \cdot 87{,}00 + 10299{,}00 \cdot 12{,}60 - 10866{,}00 \cdot (0{,}40 \cdot 3{,}50) - 2512{,}00 \cdot 0{,}00}{100} \approx$$

$$\approx 42\,329{,}28\,кДж/кг.$$

*Коэффициент избытка воздуха для горючей смеси*, $\alpha_в$:

$$\alpha_в = 2{,}10$$ – принимается из опыта эксплуатации.

Здесь *коэффициент избытка воздуха* – отношение действительного количества воздуха в горючей смеси, подаваемой в цилиндр двигателя за цикл, к теоретическому количеству воздуха, необходимому для ее полного сгорания.

*Теоретическое количество воздуха необходимое для сжигания 1 кг топлива*, $L_т^о$:

$$L_т^о = \frac{1}{23{,}20} \cdot \left( \frac{C_т}{12} + \frac{H_т}{4} + \frac{S_т}{32} - \frac{O_т}{32} \right) =$$

$$= \frac{1}{23{,}20} \cdot \left( \frac{87{,}00}{12} + \frac{12{,}60}{4} + \frac{3{,}50}{32} - \frac{0{,}40}{32} \right) \approx 0{,}45\,кмоль/кг.$$

*Действительное количество воздуха необходимое для сжигания 1 кг топлива*, $L_т$:

$$L_т = \alpha_в \cdot L_т^о = 2{,}10 \cdot 0{,}45 \approx 0{,}95\,кмоль/кг.$$

*Коэффициент падения давления в продувочном ресивере двигателя*, $\xi_р$:

$$\xi_р = 0{,}95$$ – принимается из опыта эксплуатации.

Здесь *коэффициент падения давления в продувочном ресивере* – отношение давления воздуха на входе в продувочный ресивер двигателя к давлению воздуха на выходе из продувочного ресивера двигателя.

*Давление воздуха в продувочном ресивере двигателя*, $p_р$:

$$p_р = \xi_р \cdot p_к = 0{,}95 \cdot 0{,}22 \approx 0{,}21\,МПа.$$

*Температура воздуха окружающей среды*, $t^{атм}$:

$$t^{атм} = 298{,}00\,К$$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Давление воздуха окружающей среды*, $p^{атм}$:

$$p^{атм} = 0{,}10\,МПа$$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Показатель политропы сжатия воздуха в наддувочном компрессоре двигателя*, $n_в$:

$$n_в = 1{,}50$$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Температура воздуха в наддувочном компрессоре двигателя*, $t_к$:

$$t_к = t^{атм} \cdot \left( \frac{p_к}{p^{атм}} \right)^{\frac{n_в - 1}{n_в}} = 298{,}00 \cdot \left( \frac{0{,}22}{0{,}10} \right)^{\frac{1{,}50-1}{1{,}50}} \approx 387{,}58\,К.$$

*Температура воздуха в продувочном ресивере двигателя*, $t_p$:

$$t_p = t_к - 135{,}00 = 387{,}58 - 135{,}00 \approx 252{,}58\ К.$$

*Коэффициент падения давления в цилиндре двигателя*, $\xi_ц$:

$\xi_ц = 0{,}95$ – принимается из опыта эксплуатации.

Здесь *коэффициент падения давления в цилиндре двигателе* – отношение давления воздуха на входе в цилиндр двигателя к давлению воздуха на выходе из цилиндра двигателя.

*Коэффициент остаточных газов в цилиндре двигателя*, $\gamma_г$:

$\gamma_г = 0{,}10$ – принимается из опыта эксплуатации.

Здесь *коэффициент остаточных газов* – отношение количества газов, оставшихся в цилиндре двигателя от предыдущего цикла, к количеству свежего воздуха, подаваемого в цилиндр двигателя.

*Температура остаточных газов в цилиндре двигателя*, $t_г$:

$t_г = 700{,}00\ К$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Подогрев воздуха за счет трения о стенки цилиндра двигателя*, $\Delta t_в$:

$\Delta t_в = 10{,}00\ К$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Давление в цилиндре двигателя в начале процесса сжатия*, $p_a$:

$$p_a = \xi_ц \cdot p_p = 0{,}95 \cdot 0{,}21 \approx 0{,}20\ МПа.$$

*Температура в цилиндре двигателя в начале процесса сжатия*, $t_a$:

$$t_a = \frac{t_p + \Delta t_в + \gamma_г \cdot t_г}{1 + \gamma_г} = \frac{252{,}58 + 10{,}00 + 0{,}10 \cdot 700{,}00}{1 + 0{,}10} \approx 302{,}34\ К.$$

*Относительная доля хода поршня, потерянного на продувку цилиндра двигателя*, $\psi$:

$\psi = 0{,}10$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Действительная степень сжатия горючей смеси в цилиндре двигателя*, $\varepsilon$:

$\varepsilon = 13{,}00$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Коэффициент наполнения цилиндра двигателя*, $\mu$:

$$\boxed{\mu = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{p_a \cdot t_p}{p_p \cdot t_a} \cdot \frac{1 - \psi}{1 + \gamma_г} = \frac{13{,}00}{13{,}00 - 1} \cdot \frac{0{,}20 \cdot 252{,}58}{0{,}21 \cdot 302{,}34} \cdot \frac{1 - 0{,}10}{1 + 0{,}10} \approx 0{,}70.}$$

$[\mu]_1 = 0{,}70,$ $\qquad$ $[\mu]_4 = 0{,}73,$

$[\mu]_2 = 0{,}72,$ $\qquad$ $[\mu]_5 = 0{,}73,$

$[\mu]_3 = 0{,}72,$ $\qquad$ $[\mu]_6 = 0{,}73.$

Здесь *коэффициент наполнения цилиндра двигателя* характеризует степень наполнения цилиндра свежим воздухом и выражает отношение действительного количества воздуха, поступившего в цилиндр двигателя за цикл, к тому количеству воздуха, которое могло бы заполнить рабочий объем цилиндра при давлении и температуре окружающей среды.

## 2.2.2. Индикаторные характеристики

*Рабочий объем цилиндра главного двигателя*, $V_ц$:

$$V_ц = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}50^2}{4} \cdot 2{,}00 \approx 0{,}39\ м^3.$$

*Индикаторная мощность двигателя на заданном режиме*, $N_i^з$:

$$N_i^з = \frac{p_i^з \cdot V_ц \cdot n^з \cdot i}{0{,}06 \cdot m} = \frac{2{,}02 \cdot 0{,}39 \cdot 104{,}00 \cdot 6{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \approx 8\,233{,}89\ кВт.$$

$\left[N_i^з\right]_1 = 8\,233{,}89\ кВт,$ $\left[N_i^з\right]_4 = 21\,426{,}99\ кВт,$

$\left[N_i^з\right]_2 = 14\,914{,}86\ кВт,$ $\left[N_i^з\right]_5 = 25\,626{,}55\ кВт,$

$\left[N_i^з\right]_3 = 17\,372{,}55\ кВт,$ $\left[N_i^з\right]_6 = 26\,531{,}45\ кВт.$

*Индикаторный вращающий момент на валу двигателя на заданном режиме*, $M_i^з$:

$$M_i^з = \frac{30 \cdot N_i^з}{\pi \cdot n^з} = \frac{30 \cdot 8\,233{,}89}{\pi \cdot 104{,}00} \approx 756{,}04\ Н \cdot м.$$

$\left[M_i^з\right]_1 = 756{,}04\ кН \cdot м,$ $\left[M_i^з\right]_4 = 2\,965{,}40\ кН \cdot м,$

$\left[M_i^з\right]_2 = 1\,515{,}18\ кН \cdot м,$ $\left[M_i^з\right]_5 = 3\,262{,}87\ кН \cdot м,$

$\left[M_i^з\right]_3 = 2\,032{,}12\ кН \cdot м,$ $\left[M_i^з\right]_6 = 3\,378{,}09\ кН \cdot м.$

*Индикаторный расход топлива на заданном режиме* (*удельный*), $g_i^з$:

$$g_i^з = \frac{433 \cdot \eta_{мех} \cdot p_p}{L_m \cdot n^з \cdot t_p} = \frac{433 \cdot 0{,}94 \cdot 0{,}21}{0{,}95 \cdot 104{,}00 \cdot 252{,}58} \approx 0{,}18\ кг/(кВт \cdot ч).$$

$\left[g_i^з\right]_1 = 0{,}18\ кг/(кВт \cdot ч),$ $\left[g_i^з\right]_4 = 0{,}21\ кг/(кВт \cdot ч),$

$\left[g_i^з\right]_2 = 0{,}19\ кг/(кВт \cdot ч),$ $\left[g_i^з\right]_5 = 0{,}23\ кг/(кВт \cdot ч),$

$\left[g_i^з\right]_3 = 0{,}20\ кг/(кВт \cdot ч),$ $\left[g_i^з\right]_6 = 0{,}24\ кг/(кВт \cdot ч).$

*Индикаторный расход топлива на заданном режиме* (*часовой*), $B_i^з$:

$$B_i^з = g_i^з \cdot N_i^з = 0{,}18 \cdot 8\,233{,}89 \approx 1\,447{,}68\ кг/ч.$$

$\left[B_i^з\right]_1 = 1\,447{,}68\ кг/ч,$ $\left[B_i^з\right]_4 = 4\,493{,}32\ кг/ч,$

$\left[B_i^з\right]_2 = 2\,865{,}69\ кг/ч,$ $\left[B_i^з\right]_5 = 5\,778{,}78\ кг/ч,$

$\left[B_i^з\right]_3 = 3\,532{,}56\ кг/ч,$ $\left[B_i^з\right]_6 = 6\,323{,}28\ кг/ч.$

*Индикаторный КПД двигателя на заданном режиме*, $\eta_i^з$:

$$\eta_i^з = \frac{3\,600}{g_i^з \cdot Q_m^н} = \frac{3\,600}{0{,}18 \cdot 42\,329{,}28} \approx 0{,}48.$$

$$\left[\eta_i^з\right]_1 = 0{,}48, \qquad \left[\eta_i^з\right]_4 = 0{,}41,$$
$$\left[\eta_i^з\right]_2 = 0{,}44, \qquad \left[\eta_i^з\right]_5 = 0{,}38,$$
$$\left[\eta_i^з\right]_3 = 0{,}42, \qquad \left[\eta_i^з\right]_6 = 0{,}36.$$

### 2.2.3. Эффективные характеристики

*Эффективная мощность двигателя на заданном режиме*, $N_e^з$:

$$N_e^з = \eta_{мех} \cdot N_i^з = 0{,}94 \cdot 8\,233{,}89 \approx 7\,739{,}86\ кВт.$$

$$\left[N_e^з\right]_1 = 7\,739{,}86\ кВт, \qquad \left[N_e^з\right]_4 = 20\,141{,}37\ кВт,$$
$$\left[N_e^з\right]_2 = 14\,019{,}97\ кВт, \qquad \left[N_e^з\right]_5 = 24\,088{,}96\ кВт,$$
$$\left[N_e^з\right]_3 = 16\,330{,}19\ кВт, \qquad \left[N_e^з\right]_6 = 24\,939{,}56\ кВт.$$

*Эффективный вращающий момент на валу двигателя на заданном режиме*, $M_e^з$:

$$M_e^з = \eta_{мех} \cdot M_i^з = 0{,}94 \cdot 756{,}04 \approx 710{,}68\ Н \cdot м.$$

$$\left[M_e^з\right]_1 = 710{,}68\ кН \cdot м, \qquad \left[M_e^з\right]_4 = 2\,787{,}48 кН \cdot м,$$
$$\left[M_e^з\right]_2 = 1\,424{,}26\ кН \cdot м, \qquad \left[M_e^з\right]_5 = 3\,067{,}10\ кН \cdot м,$$
$$\left[M_e^з\right]_3 = 1\,901{,}73\ кН \cdot м, \qquad \left[M_e^з\right]_6 = 3\,175{,}40\ кН \cdot м.$$

*Эффективный расход топлива на заданном режиме* (*удельный*), $g_e^з$:

$$g_e^з = \frac{g_i^з}{\eta_{мех}} = \frac{0{,}18}{0{,}94} \approx 0{,}19\ кг/(кВт \cdot ч).$$

$$\left[g_e^з\right]_1 = 0{,}19\ кг/(кВт \cdot ч), \qquad \left[g_e^з\right]_4 = 0{,}22\ кг/(кВт \cdot ч),$$
$$\left[g_e^з\right]_2 = 0{,}20\ кг/(кВт \cdot ч), \qquad \left[g_e^з\right]_5 = 0{,}24\ кг/(кВт \cdot ч),$$
$$\left[g_e^з\right]_3 = 0{,}22\ кг/(кВт \cdot ч), \qquad \left[g_e^з\right]_6 = 0{,}25\ кг/(кВт \cdot ч).$$

*Эффективный расход топлива на заданном режиме* (*часовой*), $B_e^з$:

$$B_e^з = \frac{B_i^з}{\eta_{мех}} = \frac{1\,447{,}68}{0{,}94} \approx 1\,540{,}08\ кг/ч.$$

$$\left[B_e^з\right]_1 = 1\,540{,}08\ кг/ч, \qquad \left[B_e^з\right]_4 = 4\,780{,}13\ кг/ч,$$
$$\left[B_e^з\right]_2 = 3\,048{,}61\ кг/ч, \qquad \left[B_e^з\right]_5 = 6\,147{,}64\ кг/ч,$$
$$\left[B_e^з\right]_3 = 3\,758{,}05\ кг/ч, \qquad \left[B_e^з\right]_6 = 6\,726{,}89\ кг/ч.$$

*Эффективный КПД двигателя на заданном режиме*, $\eta_e^з$:

$$\eta_e^з = \frac{\eta_i^з}{\eta_{мех}} = \frac{0{,}48}{0{,}94} \approx 0{,}45.$$

$\left[\eta_e^з\right]_1 = 0{,}45,$ $\left[\eta_e^з\right]_4 = 0{,}38,$

$\left[\eta_e^з\right]_2 = 0{,}42,$ $\left[\eta_e^з\right]_5 = 0{,}35,$

$\left[\eta_e^з\right]_3 = 0{,}39,$ $\left[\eta_e^з\right]_6 = 0{,}34.$

## 2.3. Выбор оптимального режима эксплуатации

### 2.3.1. Номинальная винтовая характеристика

*Среднее эффективное давление на номинальном режиме*, $p_e^н$:

$$p_e^н = \frac{0{,}06 \cdot N_e^н \cdot m}{V_ц \cdot n^н \cdot i} = \frac{0{,}06 \cdot 9\,480{,}00 \cdot 1{,}00}{0{,}39 \cdot 104{,}00 \cdot 6{,}00} \approx 1{,}9008\ МПа.$$

$\left[p_e^н\right]_1 = 1{,}9008\ МПа,$ $\left[p_e^н\right]_4 = 1{,}9044\ МПа,$

$\left[p_e^н\right]_2 = 1{,}9031\ МПа,$ $\left[p_e^н\right]_5 = 1{,}9044\ МПа,$

$\left[p_e^н\right]_3 = 1{,}9029\ МПа,$ $\left[p_e^н\right]_6 = 1{,}8964\ МПа.$

*Среднее индикаторное давление на номинальном режиме*, $p_i^н$:

$$p_i^н = \frac{p_e^н}{\eta_{мех}} = \frac{1{,}9008}{0{,}94} \approx 2{,}0222\ МПа.$$

$\left[p_i^н\right]_1 = 2{,}0222\ МПа,$ $\left[p_i^н\right]_4 = 2{,}0259\ МПа,$

$\left[p_i^н\right]_2 = 2{,}0246\ МПа,$ $\left[p_i^н\right]_5 = 2{,}0259\ МПа,$

$\left[p_i^н\right]_3 = 2{,}0244\ МПа,$ $\left[p_i^н\right]_6 = 2{,}0174\ МПа.$

*Среднее давление механических потерь на номинальном режиме*, $p_{мех}^н$:

$$p_{мех}^н = p_i^н - p_e^н = 2{,}0222 - 1{,}9008 \approx 0{,}1213\ МПа.$$

$\left[p_{мех}^н\right]_1 = 0{,}1213\ МПа,$ $\left[p_{мех}^н\right]_4 = 0{,}1216\ МПа,$

$\left[p_{мех}^н\right]_2 = 0{,}1215\ МПа,$ $\left[p_{мех}^н\right]_5 = 0{,}1216\ МПа,$

$\left[p_{мех}^н\right]_3 = 0{,}1215\ МПа,$ $\left[p_{мех}^н\right]_6 = 0{,}1210\ МПа.$

*Эффективная мощность на номинальном режиме*, $N_e^н$:

$N_e^н = 9\,480{,}00\ кВт$ – принимается из вышеприведенных таблиц.

$\left[N_e^н\right]_1 = 9\,480{,}00\ кВт,$ $\left[N_e^н\right]_3 = 18\,660{,}00\ кВт,$

$\left[N_e^н\right]_2 = 15\,820{,}00\ кВт,$ $\left[N_e^н\right]_4 = 23\,280{,}00\ кВт,$

$$\left[N_e^н\right]_5 = 27\,160{,}00\ кВт, \qquad \left[N_e^н\right]_6 = 29\,340{,}00\ кВт.$$

*Индикаторная мощность на номинальном режиме*, $N_i^н$:

$$\boxed{N_i^н = \frac{N_e^н}{\eta_{мех}} = \frac{9\,480{,}00}{0{,}94} \approx 10\,085{,}11\ кВт.}$$

$$\left[N_i^н\right]_1 = 10\,085{,}11\ кВт, \qquad \left[N_i^н\right]_4 = 24\,765{,}96\ кВт,$$
$$\left[N_i^н\right]_2 = 16\,829{,}79\ кВт, \qquad \left[N_i^н\right]_5 = 28\,893{,}62\ кВт,$$
$$\left[N_i^н\right]_3 = 19\,851{,}06\ кВт, \qquad \left[N_i^н\right]_6 = 31\,212{,}77\ кВт.$$

*Мощность механических потерь на номинальном режиме*, $N_{мех}{}^н$:

$$\boxed{N_{мех}^н = N_i^н - N_e^н = 10\,085{,}11 - 9\,480{,}00 \approx 605{,}11\ кВт.}$$

$$\left[N_{мех}^н\right]_1 = 605{,}11\ кВт, \qquad \left[N_{мех}^н\right]_4 = 1\,485{,}96\ кВт,$$
$$\left[N_{мех}^н\right]_2 = 1\,009{,}79\ кВт, \qquad \left[N_{мех}^н\right]_5 = 1\,733{,}62\ кВт,$$
$$\left[N_{мех}^н\right]_3 = 1191{,}06\ кВт, \qquad \left[N_{мех}^н\right]_6 = 1\,872{,}77\ кВт.$$

*Показатель степени*, $\beta$:

$\beta = 1{,}10$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Среднее эффективное давление на номинальном режиме*, $p_e$:

$$p_e^{50\%} = p_e^н \cdot \left(\frac{n^{50\%}}{n^н}\right)^2 = 1{,}9008 \cdot \left(\frac{63{,}50}{127{,}00}\right)^2 \approx 0{,}4752\ МПа,$$

$$p_e^{60\%} = p_e^н \cdot \left(\frac{n^{60\%}}{n^н}\right)^2 = 1{,}9008 \cdot \left(\frac{76{,}20}{127{,}00}\right)^2 \approx 0{,}6843\ МПа,$$

$$p_e^{70\%} = p_e^н \cdot \left(\frac{n^{70\%}}{n^н}\right)^2 = 1{,}9008 \cdot \left(\frac{88{,}90}{127{,}00}\right)^2 \approx 0{,}9314\ МПа,$$

$$p_e^{80\%} = p_e^н \cdot \left(\frac{n^{80\%}}{n^н}\right)^2 = 1{,}9008 \cdot \left(\frac{101{,}60}{127{,}00}\right)^2 \approx 1{,}2165\ МПа,$$

$$p_e^{90\%} = p_e^н \cdot \left(\frac{n^{90\%}}{n^н}\right)^2 = 1{,}9008 \cdot \left(\frac{114{,}30}{127{,}00}\right)^2 \approx 1{,}5397\ МПа,$$

$$p_e^{100\%} = p_e^н \cdot \left(\frac{n^{100\%}}{n^н}\right)^2 = 1{,}9008 \cdot \left(\frac{127{,}00}{127{,}00}\right)^2 \approx 1{,}9008\ МПа.$$

*Среднее давление механических потерь на номинальном режиме*, $p_{мех}$:

$$p_{мех}^{50\%} = p_{мех}^н \cdot \left(\frac{n^{50\%}}{n^н}\right)^{\beta-1} = 0{,}1213 \cdot \left(\frac{63{,}50}{127{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1132\ МПа,$$

$$p_{мех}^{60\%} = p_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{60\%}}{n^{н}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1213 \cdot \left(\frac{76{,}20}{127{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1153\ МПа,$$

$$p_{мех}^{70\%} = p_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{70\%}}{n^{н}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1213 \cdot \left(\frac{88{,}90}{127{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1171\ МПа,$$

$$p_{мех}^{80\%} = p_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{80\%}}{n^{н}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1213 \cdot \left(\frac{101{,}60}{127{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1187\ МПа,$$

$$p_{мех}^{90\%} = p_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{90\%}}{n^{н}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1213 \cdot \left(\frac{114{,}30}{127{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1201\ МПа,$$

$$p_{мех}^{100\%} = p_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{100\%}}{n^{н}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1213 \cdot \left(\frac{127{,}00}{127{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1213\ МПа.$$

*Среднее индикаторное давление на номинальном режиме*, $p_i$:

$$p_i^{50\%} = p_e^{50\%} + p_{мех}^{50\%} = 0{,}4752 + 0{,}1132 \approx 0{,}5884\ МПа,$$

$$p_i^{60\%} = p_e^{60\%} + p_{мех}^{60\%} = 0{,}6843 + 0{,}1153 \approx 0{,}7996\ МПа,$$

$$p_i^{70\%} = p_e^{70\%} + p_{мех}^{70\%} = 0{,}9314 + 0{,}1171 \approx 1{,}0485\ МПа,$$

$$p_i^{80\%} = p_e^{80\%} + p_{мех}^{80\%} = 1{,}2165 + 0{,}1187 \approx 1{,}3352\ МПа,$$

$$p_i^{90\%} = p_e^{90\%} + p_{мех}^{90\%} = 1{,}5397 + 0{,}1201 \approx 1{,}6597\ МПа,$$

$$p_i^{100\%} = p_e^{100\%} + p_{мех}^{100\%} = 1{,}9008 + 0{,}1213 \approx 2{,}0222\ МПа.$$

*Эффективная мощность на номинальном режиме*, $N_e$:

$$N_e^{50\%} = N_e^{н} \cdot \left(\frac{n^{50\%}}{n^{н}}\right)^{3} = 9\,480{,}00 \cdot \left(\frac{63{,}50}{127{,}00}\right)^{3} \approx 1185{,}00\ кВт,$$

$$N_e^{60\%} = N_e^{н} \cdot \left(\frac{n^{60\%}}{n^{н}}\right)^{3} = 9\,480{,}00 \cdot \left(\frac{76{,}20}{127{,}00}\right)^{3} \approx 2\,047{,}68\ кВт,$$

$$N_e^{70\%} = N_e^{н} \cdot \left(\frac{n^{70\%}}{n^{н}}\right)^{3} = 9\,480{,}00 \cdot \left(\frac{88{,}90}{127{,}00}\right)^{3} \approx 3\,251{,}64\ кВт,$$

$$N_e^{80\%} = N_e^{н} \cdot \left(\frac{n^{80\%}}{n^{н}}\right)^{3} = 9\,480{,}00 \cdot \left(\frac{101{,}60}{127{,}00}\right)^{3} \approx 4\,853{,}76\ кВт,$$

$$N_e^{90\%} = N_e^{н} \cdot \left(\frac{n^{90\%}}{n^{н}}\right)^{3} = 9\,480{,}00 \cdot \left(\frac{114{,}30}{127{,}00}\right)^{3} \approx 6\,910{,}92\ кВт,$$

$$N_e^{100\%} = N_e^{н} \cdot \left(\frac{n^{100\%}}{n^{н}}\right)^{3} = 9\,480{,}00 \cdot \left(\frac{127{,}00}{127{,}00}\right)^{3} \approx 9\,480{,}00\ кВт.$$

*Мощность механических потерь на номинальном режиме*, $N_{мех}$:

$$N_{мех}^{50\%} = N_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{50\%}}{n^{н}}\right)^{\beta} = 605{,}11 \cdot \left(\frac{63{,}50}{127{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 282{,}29\ кВт,$$

$$N_{мех}^{60\%} = N_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{60\%}}{n^{н}}\right)^{\beta} = 605{,}11 \cdot \left(\frac{76{,}20}{127{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 344{,}98\ кВт,$$

$$N_{мех}^{70\%} = N_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{70\%}}{n^{н}}\right)^{\beta} = 605{,}11 \cdot \left(\frac{88{,}90}{127{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 408{,}73\ кВт,$$

$$N_{мех}^{80\%} = N_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{80\%}}{n^{н}}\right)^{\beta} = 605{,}11 \cdot \left(\frac{101{,}60}{127{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 473{,}40\ кВт,$$

$$N_{мех}^{90\%} = N_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{90\%}}{n^{н}}\right)^{\beta} = 605{,}11 \cdot \left(\frac{114{,}30}{127{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 538{,}89\ кВт,$$

$$N_{мех}^{100\%} = N_{мех}^{н} \cdot \left(\frac{n^{100\%}}{n^{н}}\right)^{\beta} = 605{,}11 \cdot \left(\frac{127{,}00}{127{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 605{,}11\ кВт.$$

*Индикаторная мощность на номинальном режиме*, $N_i$:

$$N_i^{50\%} = N_e^{50\%} + N_{мех}^{50\%} = 1185{,}00 + 282{,}29 \approx 1\,467{,}29\ кВт,$$

$$N_i^{60\%} = N_e^{60\%} + N_{мех}^{60\%} = 2\,047{,}68 + 344{,}98 \approx 2\,392{,}66\ кВт,$$

$$N_i^{70\%} = N_e^{70\%} + N_{мех}^{70\%} = 3\,251{,}64 + 408{,}73 \approx 3\,660{,}37\ кВт,$$

$$N_i^{80\%} = N_e^{80\%} + N_{мех}^{80\%} = 4\,853{,}76 + 473{,}40 \approx 5\,327{,}16\ кВт,$$

$$N_i^{90\%} = N_e^{90\%} + N_{мех}^{90\%} = 6\,910{,}92 + 538{,}89 \approx 7\,449{,}81\ кВт,$$

$$N_i^{100\%} = N_e^{100\%} + N_{мех}^{100\%} = 9\,480{,}00 + 605{,}11 \approx 10\,085{,}11\ кВт.$$

*Механический КПД на номинальном режиме*, $\eta_{мех}$:

$$\eta_{мех}^{50\%} = \frac{p_e^{50\%}}{p_i^{50\%}} = \frac{0{,}4752}{0{,}5884} \approx 0{,}81, \quad \eta_{мех}^{60\%} = \frac{p_e^{60\%}}{p_i^{60\%}} = \frac{0{,}6843}{0{,}7996} \approx 0{,}86,$$

$$\eta_{мех}^{70\%} = \frac{p_e^{70\%}}{p_i^{70\%}} = \frac{0{,}9314}{1{,}0485} \approx 0{,}89, \quad \eta_{мех}^{80\%} = \frac{p_e^{80\%}}{p_i^{80\%}} = \frac{1{,}2165}{1{,}3352} \approx 0{,}91,$$

$$\eta_{мех}^{90\%} = \frac{p_e^{90\%}}{p_i^{90\%}} = \frac{1{,}5397}{1{,}6597} \approx 0{,}93, \quad \eta_{мех}^{100\%} = \frac{p_e^{100\%}}{p_i^{100\%}} = \frac{1{,}9008}{2{,}0222} \approx 0{,}94.$$

По результатам проведенных вычислений строится *номинальная винтовая характеристика* (рисунок 2.3–2.13) – зависимость мощности главного двигателя, работающего на гребной винт, от частоты его вращения при номинальном режиме эксплуатации главного двигателя.

### 2.3.2. Заданная винтовая характеристика

*Среднее эффективное давление на заданном режиме*, $p_e^{з}$:

$$p_e^з = \frac{0{,}06 \cdot N_e^з \cdot m}{V_ц \cdot n^з \cdot i} = \frac{0{,}06 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 1{,}00}{0{,}39 \cdot 104{,}00 \cdot 6{,}00} \approx 1{,}8591\,МПа.$$

$\left[p_e^з\right]_1 = 1{,}8951\,МПа,$ $\left[p_e^з\right]_4 = 1{,}8148\,МПа,$

$\left[p_e^з\right]_2 = 1{,}8839\,МПа,$ $\left[p_e^з\right]_5 = 1{,}7116\,МПа,$

$\left[p_e^з\right]_3 = 1{,}8481\,МПа,$ $\left[p_e^з\right]_6 = 1{,}6334\,МПа.$

*Среднее индикаторное давление на заданном режиме*, $p_i^з$:

$p_i^з = 2{,}0161\,МПа$ – принимается из вышеприведенных таблиц.

$\left[p_i^з\right]_1 = 2{,}0161\,МПа,$ $\left[p_i^з\right]_4 = 1{,}9306\,МПа,$

$\left[p_i^з\right]_2 = 2{,}0042\,МПа,$ $\left[p_i^з\right]_5 = 1{,}8208\,МПа,$

$\left[p_i^з\right]_3 = 1{,}9661\,МПа,$ $\left[p_i^з\right]_6 = 1{,}7377\,МПа.$

*Среднее давление механических потерь на заданном режиме*, $p_{мех}^з$:

$$p_{мех}^з = p_i^з - p_e^з = 2{,}0161 - 1{,}8951 \approx 0{,}1210\,МПа.$$

$\left[p_{мех}^з\right]_1 = 0{,}1210\,МПа,$ $\left[p_{мех}^з\right]_4 = 0{,}1158\,МПа,$

$\left[p_{мех}^з\right]_2 = 0{,}1203\,МПа,$ $\left[p_{мех}^з\right]_5 = 0{,}1092\,МПа,$

$\left[p_{мех}^з\right]_3 = 0{,}1180\,МПа,$ $\left[p_{мех}^з\right]_6 = 0{,}1043\,МПа.$

*Эффективная мощность на заданном режиме*, $N_e^з$:

$$N_e^з = \frac{p_e^з \cdot V_ц \cdot n^з \cdot i}{0{,}06 \cdot m} = \frac{1{,}90 \cdot 0{,}39 \cdot 104{,}00 \cdot 6{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \approx 7\,739{,}86\,кВт.$$

$\left[N_e^з\right]_1 = 7\,739{,}86\,кВт,$ $\left[N_e^з\right]_4 = 20\,141{,}37\,кВт,$

$\left[N_e^з\right]_2 = 14\,019{,}97\,кВт,$ $\left[N_e^з\right]_5 = 24\,088{,}96\,кВт,$

$\left[N_e^з\right]_3 = 16\,330{,}19\,кВт,$ $\left[N_e^з\right]_6 = 24\,939{,}56\,кВт.$

*Индикаторная мощность на заданном режиме*, $N_i^з$:

$$N_i^з = \frac{N_e^з}{\eta_{мех}} = \frac{7\,739{,}86}{0{,}94} \approx 8\,233{,}89\,кВт.$$

$\left[N_i^з\right]_1 = 8\,233{,}89\,кВт,$ $\left[N_i^з\right]_4 = 21\,426{,}99\,кВт,$

$\left[N_i^з\right]_2 = 14\,914{,}86\,кВт,$ $\left[N_i^з\right]_5 = 25\,626{,}55\,кВт,$

$\left[N_i^з\right]_3 = 17\,372{,}55\,кВт,$ $\left[N_i^з\right]_6 = 26\,531{,}45\,кВт.$

*Мощность механических потерь на заданном режиме*, $N_{мех}^з$:

$$N_{мех}^з = N_i^з - N_e^з = 8\,233{,}89 - 7\,739{,}86 \approx 494{,}03\,кВт.$$

$$\left[N^{з}_{мех}\right]_1 = 494{,}03\ кВт, \qquad \left[N^{з}_{мех}\right]_4 = 1\,285{,}62\ кВт,$$
$$\left[N^{з}_{мех}\right]_2 = 894{,}89\ кВт, \qquad \left[N^{з}_{мех}\right]_5 = 1\,537{,}59\ кВт,$$
$$\left[N^{з}_{мех}\right]_3 = 1\,042{,}35\ кВт, \qquad \left[N^{з}_{мех}\right]_6 = 1\,591{,}89\ кВт.$$

*Показатель степени*, $\beta$:

$\beta = 1{,}10$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Среднее эффективное давление на заданном режиме*, $p_e$:

$$p_e^{50\%} = p_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{50\%}}{n^{з}}\right)^2 = 1{,}8951 \cdot \left(\frac{52{,}00}{104{,}00}\right)^2 \approx 0{,}4738\ МПа,$$

$$p_e^{60\%} = p_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{60\%}}{n^{з}}\right)^2 = 1{,}8951 \cdot \left(\frac{62{,}40}{104{,}00}\right)^2 \approx 0{,}6822\ МПа,$$

$$p_e^{70\%} = p_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{70\%}}{n^{з}}\right)^2 = 1{,}8951 \cdot \left(\frac{72{,}80}{104{,}00}\right)^2 \approx 0{,}9286\ МПа,$$

$$p_e^{80\%} = p_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{80\%}}{n^{з}}\right)^2 = 1{,}8951 \cdot \left(\frac{83{,}20}{104{,}00}\right)^2 \approx 1{,}2129\ МПа,$$

$$p_e^{90\%} = p_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{90\%}}{n^{з}}\right)^2 = 1{,}8951 \cdot \left(\frac{93{,}60}{104{,}00}\right)^2 \approx 1{,}5351\ МПа,$$

$$p_e^{100\%} = p_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{100\%}}{n^{з}}\right)^2 = 1{,}8951 \cdot \left(\frac{104{,}00}{104{,}00}\right)^2 \approx 1{,}8951\ МПа.$$

*Среднее давление механических потерь на заданном режиме*, $p_{мех}$:

$$p_{мех}^{50\%} = p_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{50\%}}{n^{з}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1210 \cdot \left(\frac{52{,}00}{104{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1129\ МПа,$$

$$p_{мех}^{60\%} = p_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{60\%}}{n^{з}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1210 \cdot \left(\frac{62{,}40}{104{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1149\ МПа,$$

$$p_{мех}^{70\%} = p_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{70\%}}{n^{з}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1210 \cdot \left(\frac{72{,}80}{104{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1167\ МПа,$$

$$p_{мех}^{80\%} = p_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{80\%}}{n^{з}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1210 \cdot \left(\frac{83{,}20}{104{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1183\ МПа,$$

$$p_{мех}^{90\%} = p_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{90\%}}{n^{з}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1210 \cdot \left(\frac{93{,}60}{104{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1197\ МПа,$$

$$p_{мех}^{100\%} = p_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{100\%}}{n^{з}}\right)^{\beta-1} = 0{,}1210 \cdot \left(\frac{104{,}00}{104{,}00}\right)^{0{,}10} \approx 0{,}1210\ МПа.$$

*Среднее индикаторное давление на заданном режиме*, $p_i$:

$$p_i^{50\%} = p_e^{50\%} + p_{мех}^{50\%} = 0{,}4738 + 0{,}1129 \approx 0{,}5866\ МПа,$$

$$p_i^{60\%} = p_e^{60\%} + p_{мех}^{60\%} = 0{,}6822 + 0{,}1149 \approx 0{,}7972\ МПа,$$

$$p_i^{70\%} = p_e^{70\%} + p_{мех}^{70\%} = 0{,}9286 + 0{,}1167 \approx 1{,}0453\ МПа,$$

$$p_i^{80\%} = p_e^{80\%} + p_{мех}^{80\%} = 1{,}2129 + 0{,}1183 \approx 1{,}3312\ МПа,$$

$$p_i^{90\%} = p_e^{90\%} + p_{мех}^{90\%} = 1{,}5351 + 0{,}1197 \approx 1{,}6548\ МПа,$$

$$p_i^{100\%} = p_e^{100\%} + p_{мех}^{100\%} = 1{,}8951 + 0{,}1210 \approx 2{,}0161\ МПа.$$

*Эффективная мощность на заданном режиме*, $N_e$:

$$N_e^{50\%} = N_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{50\%}}{n^{з}}\right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left(\frac{52{,}00}{104{,}00}\right)^3 \approx 967{,}48\ кВт,$$

$$N_e^{60\%} = N_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{60\%}}{n^{з}}\right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left(\frac{62{,}40}{104{,}00}\right)^3 \approx 1\,671{,}81\ кВт,$$

$$N_e^{70\%} = N_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{70\%}}{n^{з}}\right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left(\frac{72{,}80}{104{,}00}\right)^3 \approx 2\,654{,}77\ кВт,$$

$$N_e^{80\%} = N_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{80\%}}{n^{з}}\right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left(\frac{83{,}20}{104{,}00}\right)^3 \approx 3\,962{,}81\ кВт,$$

$$N_e^{90\%} = N_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{90\%}}{n^{з}}\right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left(\frac{93{,}60}{104{,}00}\right)^3 \approx 5\,642{,}36\ кВт,$$

$$N_e^{100\%} = N_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{100\%}}{n^{з}}\right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left(\frac{104{,}00}{104{,}00}\right)^3 \approx 7\,739{,}86\ кВт.$$

*Мощность механических потерь на заданном режиме*, $N_{мех}$:

$$N_{мех}^{50\%} = N_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{50\%}}{n^{з}}\right)^{\beta} = 494{,}03 \cdot \left(\frac{52{,}00}{104{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 230{,}47\ кВт,$$

$$N_{мех}^{60\%} = N_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{60\%}}{n^{з}}\right)^{\beta} = 494{,}03 \cdot \left(\frac{62{,}40}{104{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 281{,}66\ кВт,$$

$$N_{мех}^{70\%} = N_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{70\%}}{n^{з}}\right)^{\beta} = 494{,}03 \cdot \left(\frac{72{,}80}{104{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 333{,}71\ кВт,$$

$$N_{мех}^{80\%} = N_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{80\%}}{n^{з}}\right)^{\beta} = 494{,}03 \cdot \left(\frac{83{,}20}{104{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 386{,}51\ кВт,$$

$$N_{мех}^{90\%} = N_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{90\%}}{n^{н}}\right)^{\beta} = 494{,}03 \cdot \left(\frac{93{,}60}{104{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 439{,}97\ кВт,$$

$$N_{мех}^{100\%} = N_{мех}^{з} \cdot \left(\frac{n^{100\%}}{n^{н}}\right)^{\beta} = 494{,}03 \cdot \left(\frac{104{,}00}{104{,}00}\right)^{1{,}10} \approx 494{,}03\ кВт.$$

*Индикаторная мощность на заданном режиме*, $N_i$:

$$N_i^{50\%} = N_e^{50\%} + N_{мех}^{50\%} = 967{,}48 + 230{,}47 \approx 1197{,}96\ кВт,$$

$$N_i^{60\%} = N_e^{60\%} + N_{мех}^{60\%} = 1\,671{,}81 + 281{,}66 \approx 1\,953{,}47\ кВт,$$

$$N_i^{70\%} = N_e^{70\%} + N_{мех}^{70\%} = 2\,654{,}77 + 333{,}71 \approx 2\,988{,}48\ кВт,$$

$$N_i^{80\%} = N_e^{80\%} + N_{мех}^{80\%} = 3\,962{,}81 + 386{,}51 \approx 4\,349{,}31\ кВт,$$

$$N_i^{90\%} = N_e^{90\%} + N_{мех}^{90\%} = 5\,642{,}36 + 439{,}97 \approx 6\,082{,}33\ кВт,$$

$$N_i^{100\%} = N_e^{100\%} + N_{мех}^{100\%} = 7\,739{,}86 + 494{,}03 \approx 8\,233{,}89\ кВт.$$

*Механический КПД на заданном режиме*, $\eta_{мех}$:

$$\eta_{мех}^{50\%} = \frac{p_e^{50\%}}{p_i^{50\%}} = \frac{0{,}4738}{0{,}5866} \approx 0{,}81, \quad \eta_{мех}^{60\%} = \frac{p_e^{60\%}}{p_i^{60\%}} = \frac{0{,}6822}{0{,}7972} \approx 0{,}86,$$

$$\eta_{мех}^{70\%} = \frac{p_e^{70\%}}{p_i^{70\%}} = \frac{0{,}9286}{1{,}0453} \approx 0{,}89, \quad \eta_{мех}^{80\%} = \frac{p_e^{80\%}}{p_i^{80\%}} = \frac{1{,}2129}{1{,}3312} \approx 0{,}91,$$

$$\eta_{мех}^{90\%} = \frac{p_e^{90\%}}{p_i^{90\%}} = \frac{1{,}5351}{1{,}6548} \approx 0{,}93, \quad \eta_{мех}^{100\%} = \frac{p_e^{100\%}}{p_i^{100\%}} = \frac{1{,}8951}{2{,}0161} \approx 0{,}94.$$

По результатам проведенных вычислений строится *заданная винтовая характеристика* (рисунок 2.3–2.13) – зависимость мощности главного двигателя, работающего на гребной винт, от частоты его вращения при заданном режиме эксплуатации главного двигателя.

### 2.3.3. Ограничительная винтовая характеристика

*Ограничительное значение ограничения по индикаторному давлению при длительной работе на заданном режиме*:

$[p_{i-д}^{40\%}] \approx 82{,}36\ \%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

$[p_{i-д}^{52\%}] \approx 87{,}97\ \%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

$[p_{i-д}^{64\%}] \approx 93{,}59\ \%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

$[p_{i-д}^{76\%}] \approx 99{,}21\ \%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

$[p_{i-д}^{88\%}] \approx 104{,}82\ \%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

$[p_{i-д}^{100\%}] \approx 110{,}44\ \%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

*Абсолютное значение ограничения по индикаторному давлению при длительной работе на заданном режиме*:

$$p_{i-д}^{40\%} = \frac{[p_{i-д}^{40\%}] \cdot p_i^{н}}{100} = \frac{82{,}36 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 1{,}6654\ МПа,$$

$$p_{i-д}^{52\%} = \frac{[p_{i-д}^{52\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{87{,}97 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 1{,}7790\ МПа,$$

$$p_{i-д}^{64\%} = \frac{[p_{i-д}^{64\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{93{,}59 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 1{,}8925\ МПа,$$

$$p_{i-д}^{76\%} = \frac{[p_{i-д}^{76\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{99{,}21 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 2{,}0061\ МПа,$$

$$p_{i-д}^{88\%} = \frac{[p_{i-д}^{88\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{104{,}82 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 2{,}1197\ МПа,$$

$$p_{i-д}^{100\%} = \frac{[p_{i-д}^{100\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{110{,}44 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 2{,}2333\ МПа.$$

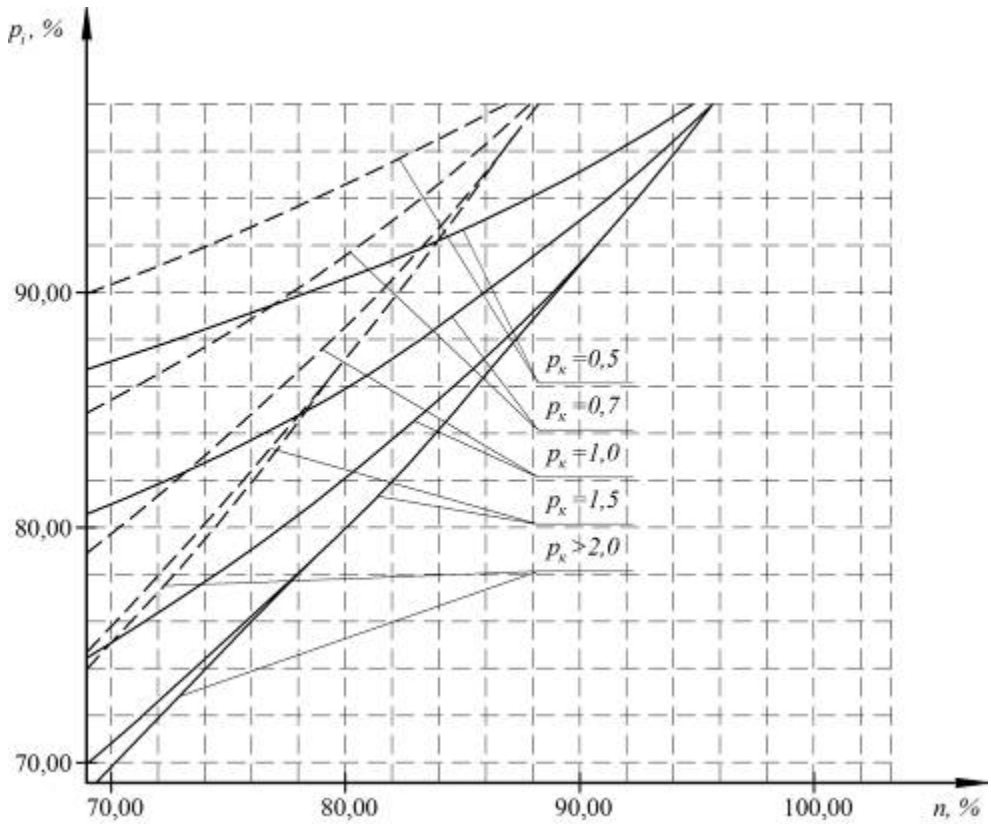



Рисунок 2.1 – Скоростная ограничительная характеристика дизельного двигателя с изобарным наддувом (--- – длительная, - - – кратковременная работа)

*Абсолютное значение ограничения по индикаторной мощности при длительной работе на заданном режиме*:

$$N_{i-д}^{40\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-д}^{40\%}] \cdot 0{,}40 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 82{,}36 \cdot 0{,}40 \approx 332{,}28\ кВт,$$

$$N_{i-д}^{52\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-д}^{52\%}] \cdot 0{,}52 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 87{,}97 \cdot 0{,}52 \approx 461{,}51\ кВт,$$

$$N_{i-д}^{64\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-д}^{64\%}] \cdot 0{,}64 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 93{,}59 \cdot 0{,}64 \approx 6\,040{,}69\,кВт;$$

$$N_{i-д}^{76\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-д}^{76\%}] \cdot 0{,}76 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 99{,}21 \cdot 0{,}76 \approx 7\,603{,}81\,кВт;$$

$$N_{i-д}^{88\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-д}^{88\%}] \cdot 0{,}88 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 104{,}82 \cdot 0{,}88 \approx 9\,302{,}88\,кВт;$$

$$N_{i-д}^{100\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-д}^{100\%}] \cdot 1{,}00 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 110{,}44 \cdot 1{,}00 \approx 11\,137{,}90\,кВт$$

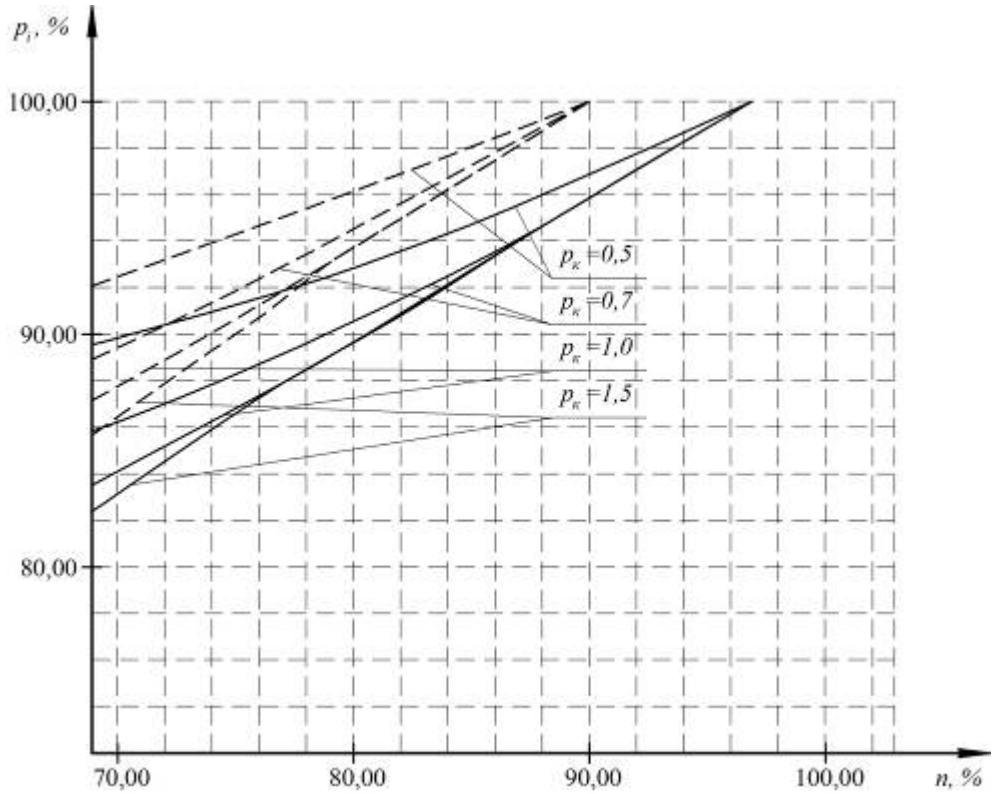



Рисунок 2.2 – Скоростная ограничительная характеристика дизельного двигателя с импульсным наддувом (--- – длительная, - - – кратковременная работа)

*Ограничительное значение ограничения по индикаторному давлению при кратковременной работе на заданном режиме*:

$[p_{i-к}^{40\%}] \approx 85{,}21\,\%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

$[p_{i-к}^{52\%}] \approx 90{,}94\,\%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

$[p_{i-к}^{64\%}] \approx 96{,}67\,\%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

$[p_{i-к}^{76\%}] \approx 102{,}40\,\%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

$[p_{i-к}^{88\%}] \approx 108{,}13\,\%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

$[p_{i-к}^{100\%}] \approx 113{,}86\,\%$ – принимается по графику (рисунки 2.1, 2.2).

*Абсолютное значение ограничения по индикаторному давлению при кратковременной работе на заданном режиме*:

$$p_{i-к}^{40\%} = \frac{[p_{i-к}^{40\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{85{,}21 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 1{,}7230\ МПа,$$

$$p_{i-к}^{52\%} = \frac{[p_{i-к}^{52\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{90{,}94 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 1{,}8389\ МПа,$$

$$p_{i-к}^{64\%} = \frac{[p_{i-к}^{64\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{96{,}67 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 1{,}9548\ МПа,$$

$$p_{i-к}^{76\%} = \frac{[p_{i-к}^{76\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{102{,}40 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 2{,}0707\ МПа,$$

$$p_{i-к}^{88\%} = \frac{[p_{i-к}^{88\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{108{,}13 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 2{,}1866\ МПа,$$

$$p_{i-к}^{100\%} = \frac{[p_{i-к}^{100\%}] \cdot p_i^н}{100} = \frac{113{,}86 \cdot 2{,}0222}{100} \approx 2{,}3024\ МПа.$$

*Абсолютное значение ограничения по индикаторной мощности при кратковременной работе на заданном режиме*:

$$N_{i-к}^{40\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-к}^{40\%}] \cdot 0{,}40 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 85{,}21 \cdot 0{,}40 \approx 3\,437{,}24\ кВт,$$

$$N_{i-к}^{52\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-к}^{52\%}] \cdot 0{,}52 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 90{,}94 \cdot 0{,}52 \approx 4\,768{,}96\ кВт,$$

$$N_{i-к}^{64\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-к}^{64\%}] \cdot 0{,}64 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 96{,}67 \cdot 0{,}64 \approx 6\,239{,}39\ кВт,$$

$$N_{i-к}^{76\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-к}^{76\%}] \cdot 0{,}76 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 102{,}40 \cdot 0{,}76 \approx 7\,848{,}53\ кВт,$$

$$N_{i-к}^{88\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-к}^{88\%}] \cdot 0{,}88 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 108{,}13 \cdot 0{,}88 \approx 9\,596{,}38\ кВт,$$

$$N_{i-к}^{100\%} = \frac{V_ц \cdot i \cdot n^н}{0{,}06 \cdot m} \cdot [p_{i-к}^{100\%}] \cdot 1{,}00 = \frac{0{,}39 \cdot 6{,}00 \cdot 127{,}00}{0{,}06 \cdot 1{,}00} \cdot 113{,}86 \cdot 1{,}00 \approx 11\,482{,}95\ кВт$$

По результатам проведенных вычислений строится *ограничительная характеристика* – зависимость мощности главного двигателя, работающего на гребной винт, от частоты его вращения при ограничении некоторых параметров работы главного двигателя с целью недопущения возможных перегрузок, возникающих в процессе его эксплуатации.

### 2.3.4. Построение зависимостей

*Оптимальная частота вращения главного двигателя*, $n^{опт}$:

| |
|---|
| $n^{опт} = 105{,}39\ об/мин$ – принимается по графику. |

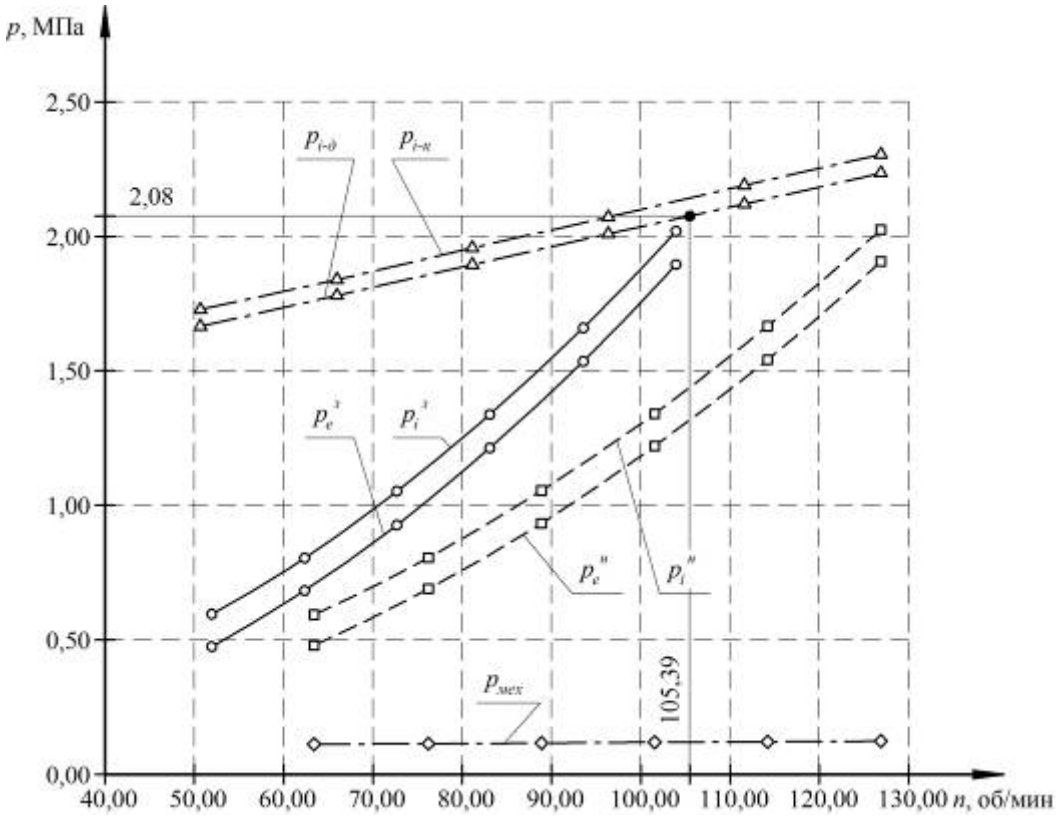



Рисунок 2.3 – Зависимость давлений $p_i$, $p_e$ и $p_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [1] дедвейтом 40 120 т

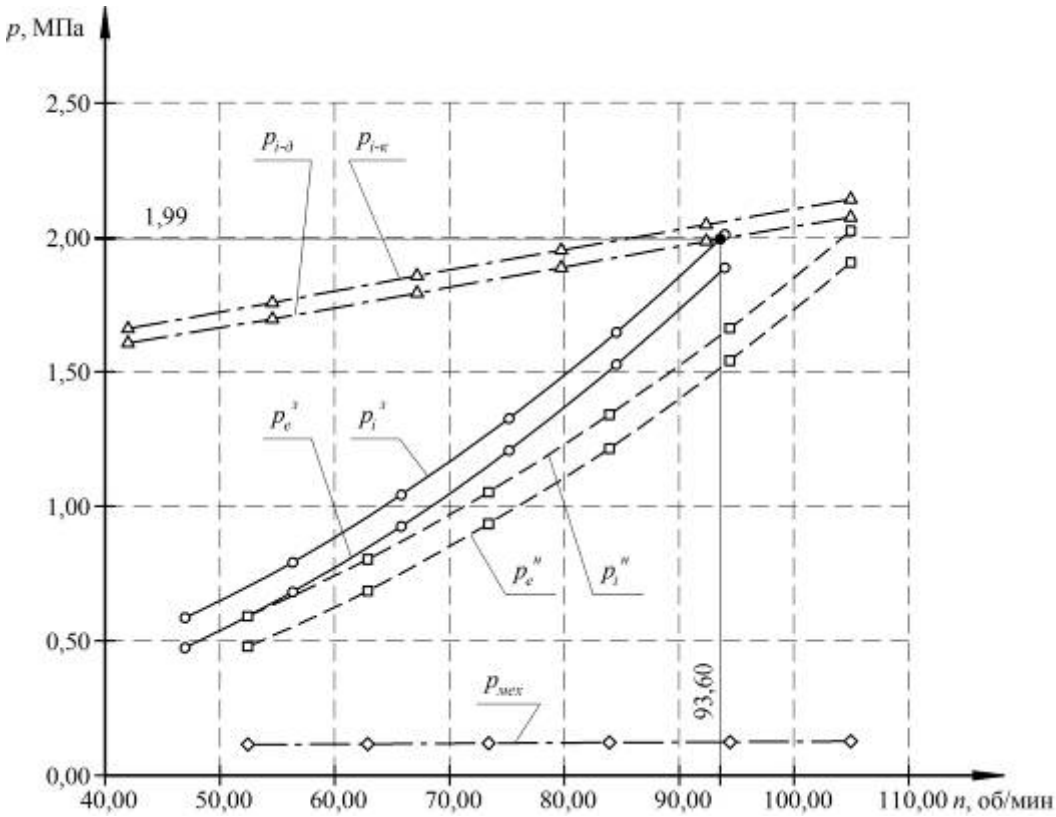



Рисунок 2.4 – Зависимость давлений $p_i$, $p_e$ и $p_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [2] дедвейтом 94 918 т

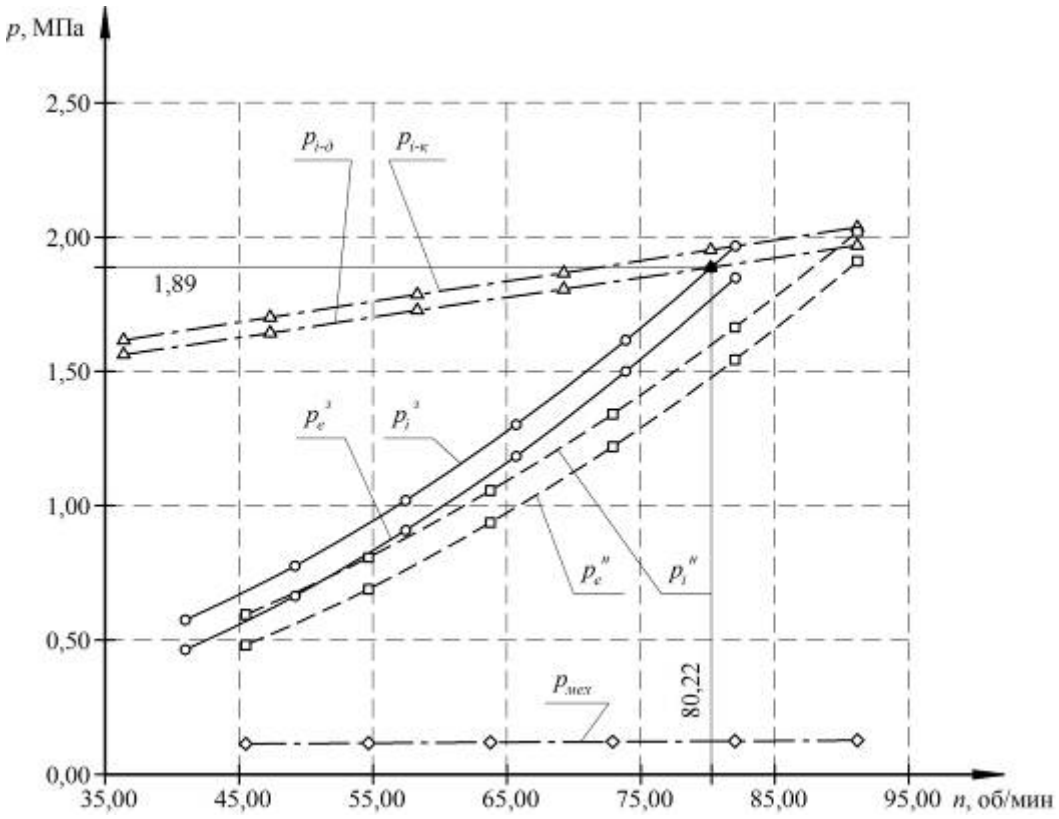



Рисунок 2.5 – Зависимость давлений $p_i$, $p_e$ и $p_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [3] дедвейтом 152 852 т

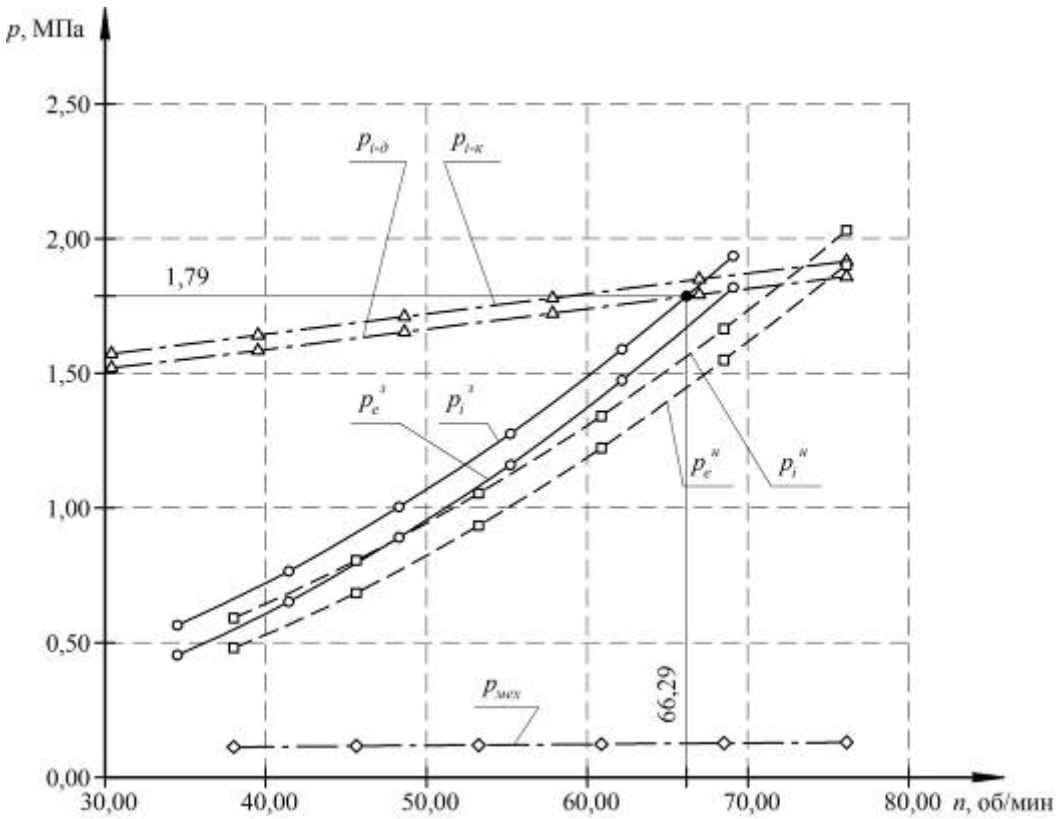



Рисунок 2.6 – Зависимость давлений $p_i$, $p_e$ и $p_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [4] дедвейтом 185 091 т

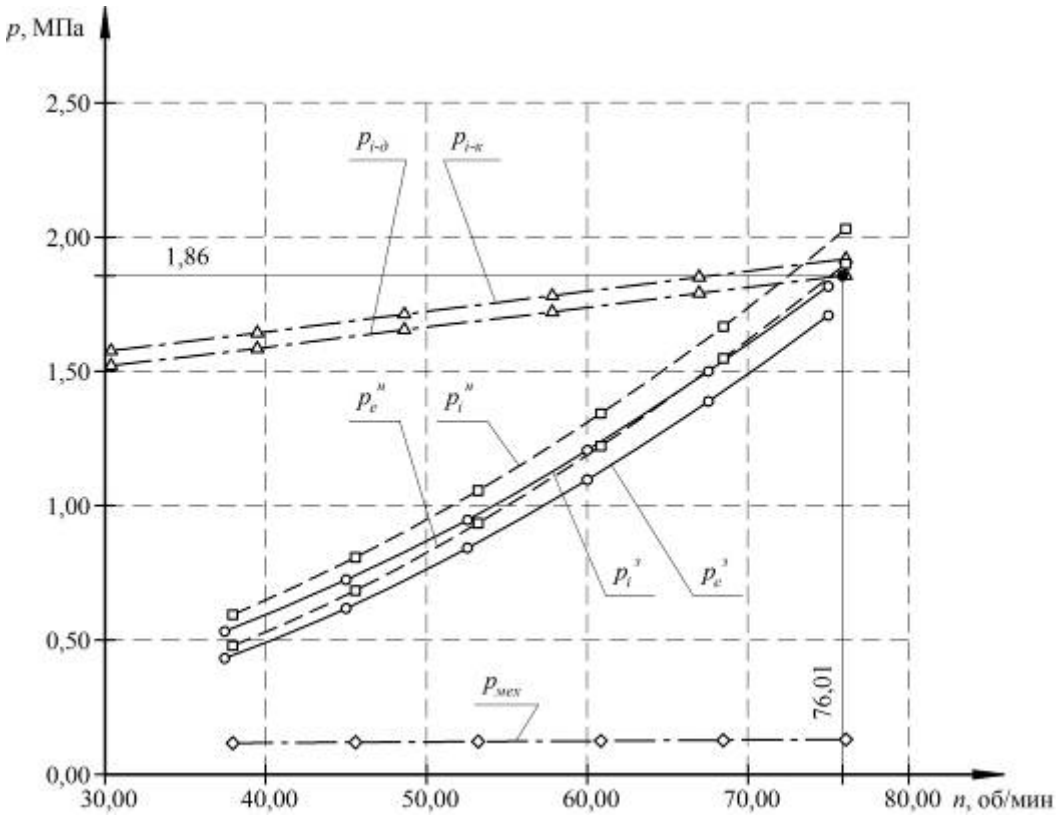



Рисунок 2.7 – Зависимость давлений $p_i$, $p_e$ и $p_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [5] дедвейтом 259 999 т

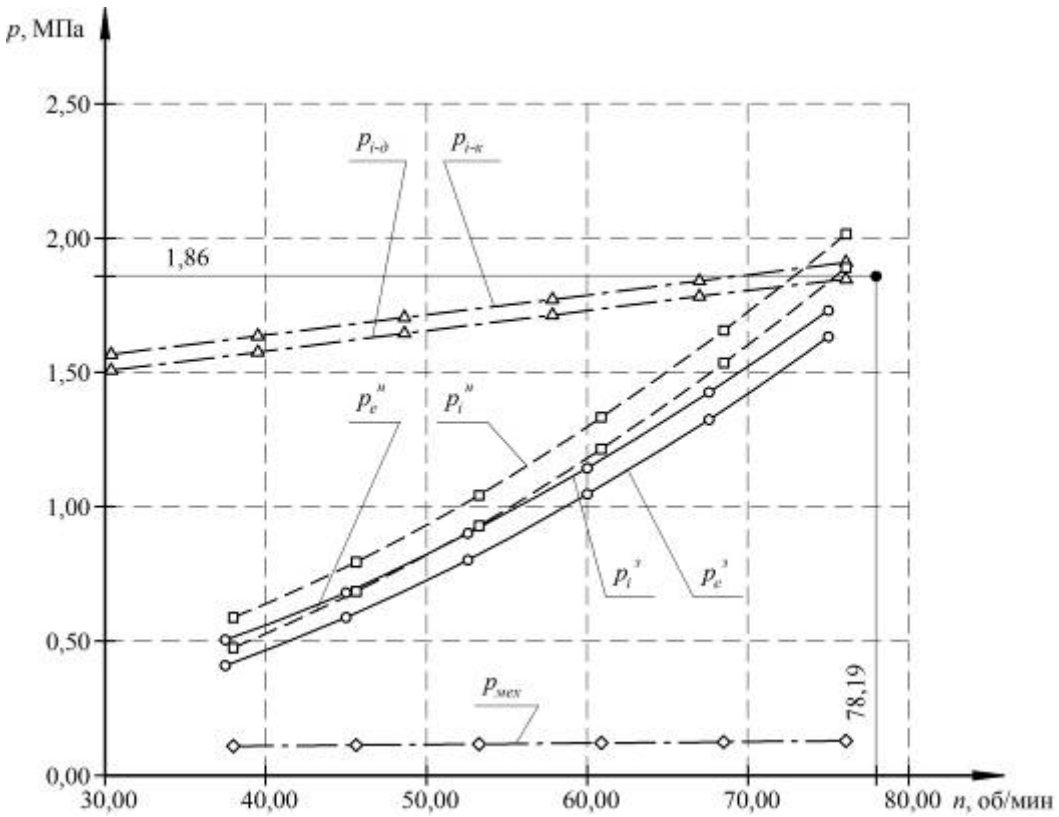



Рисунок 2.8 – Зависимость давлений $p_i$, $p_e$ и $p_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [6] дедвейтом 317 441 т

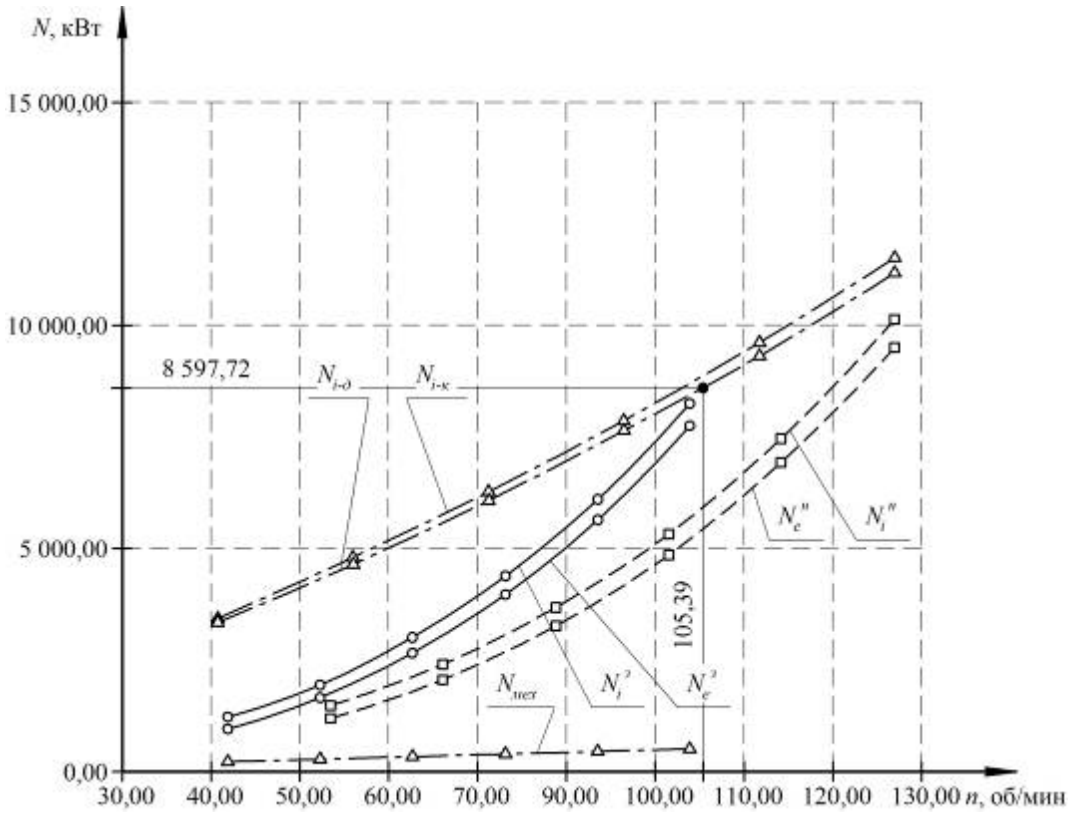



Рисунок 2.9 – Зависимость мощности $N_i$, $N_e$ и $N_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [1] дедвейтом 40 120 т

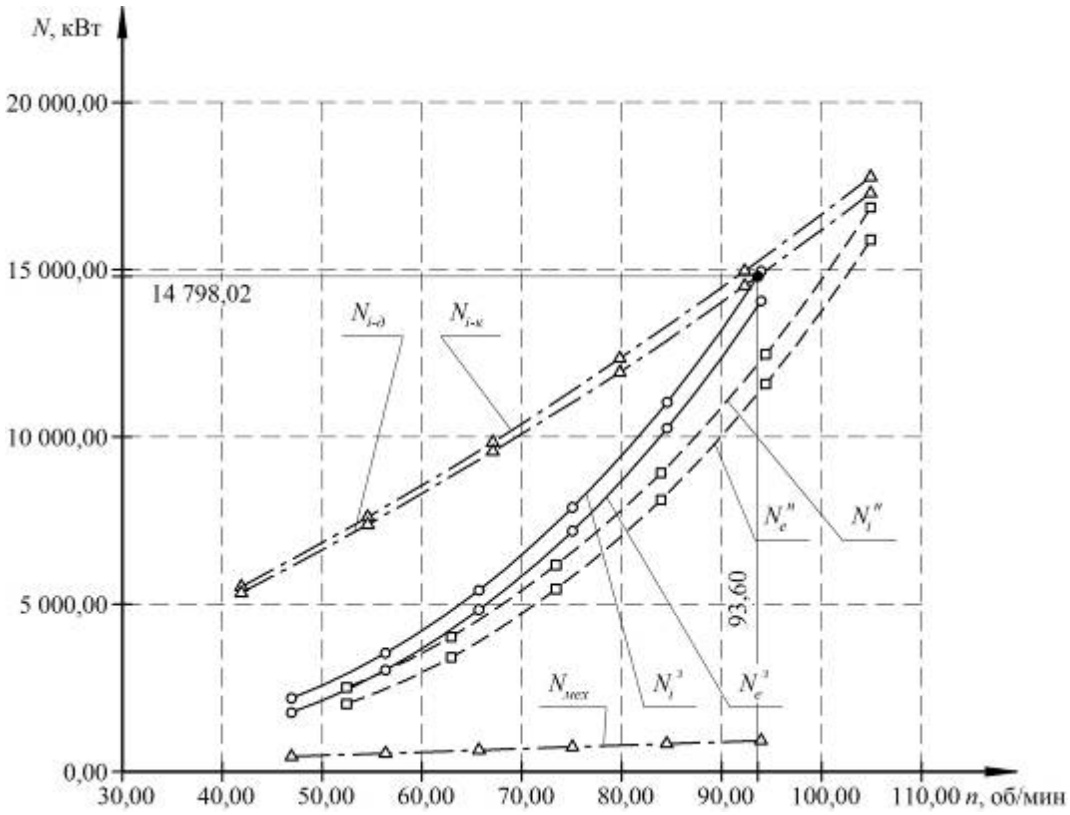



Рисунок 2.10 – Зависимость мощности $N_i$, $N_e$ и $N_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [2] дедвейтом 94 918 т

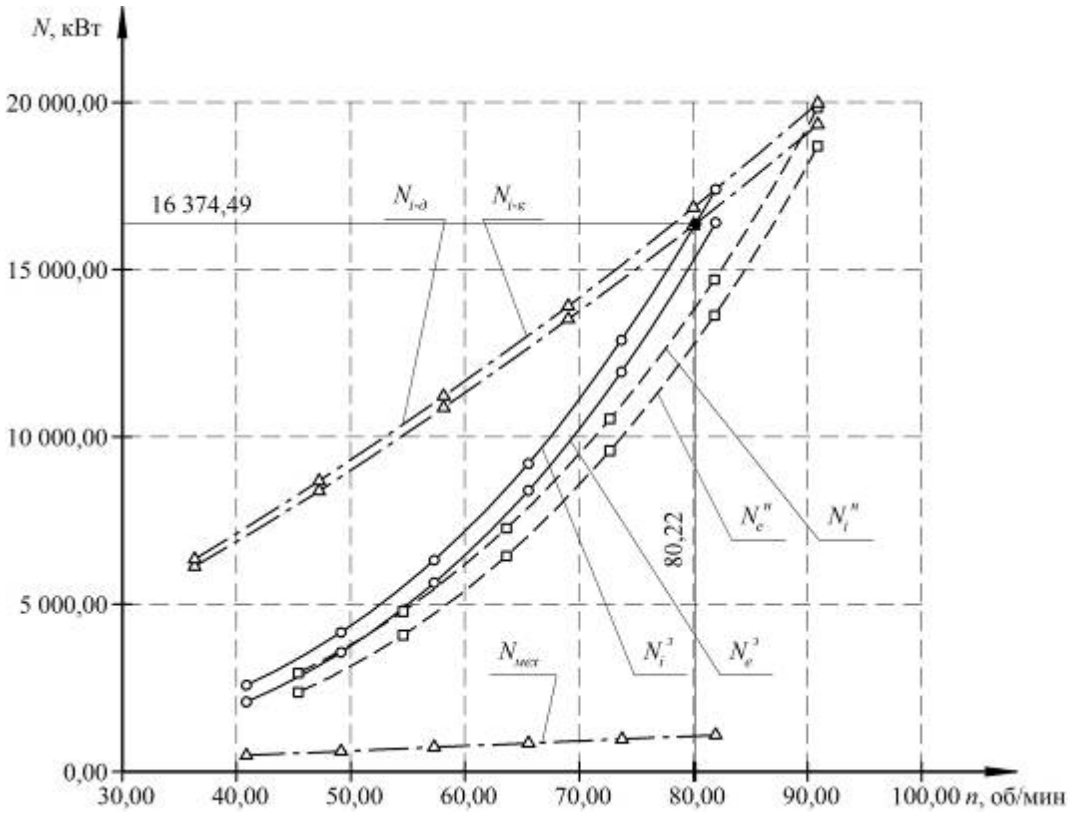



Рисунок 2.11 – Зависимость мощности $N_i$, $N_e$ и $N_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [3] дедвейтом 152 852 т

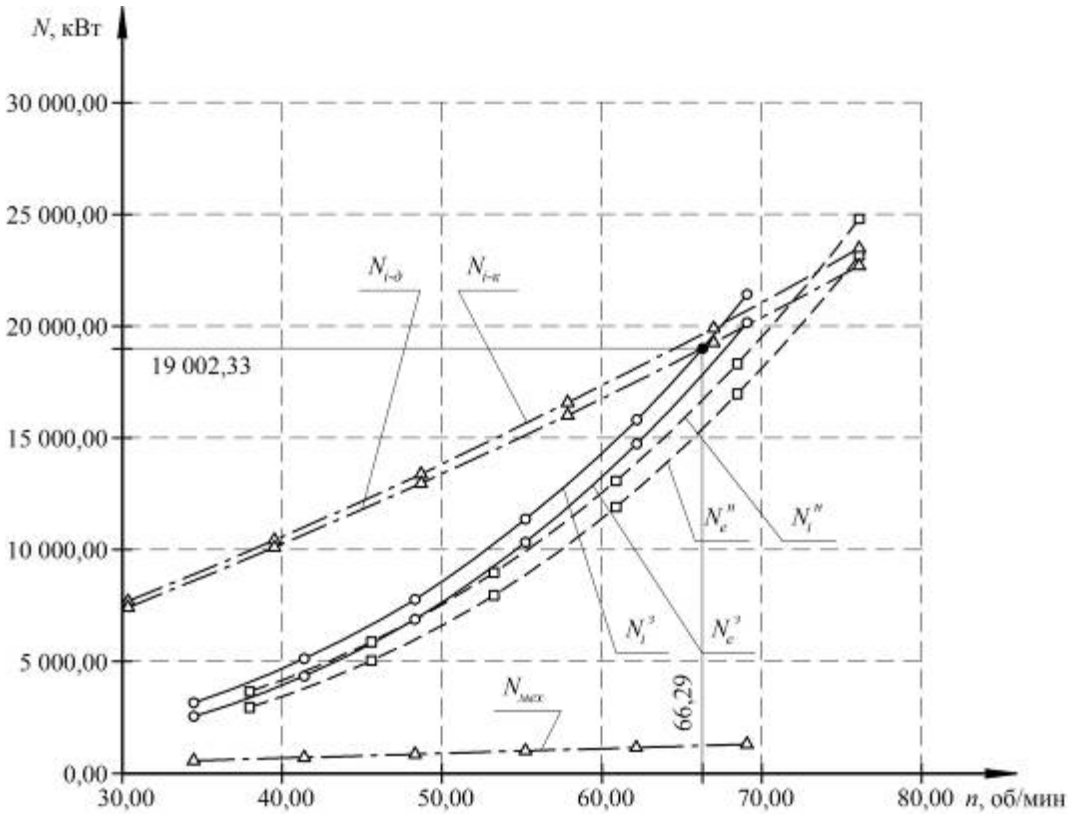



Рисунок 2.12 – Зависимость мощности $N_i$, $N_e$ и $N_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [4] дедвейтом 185 091 т

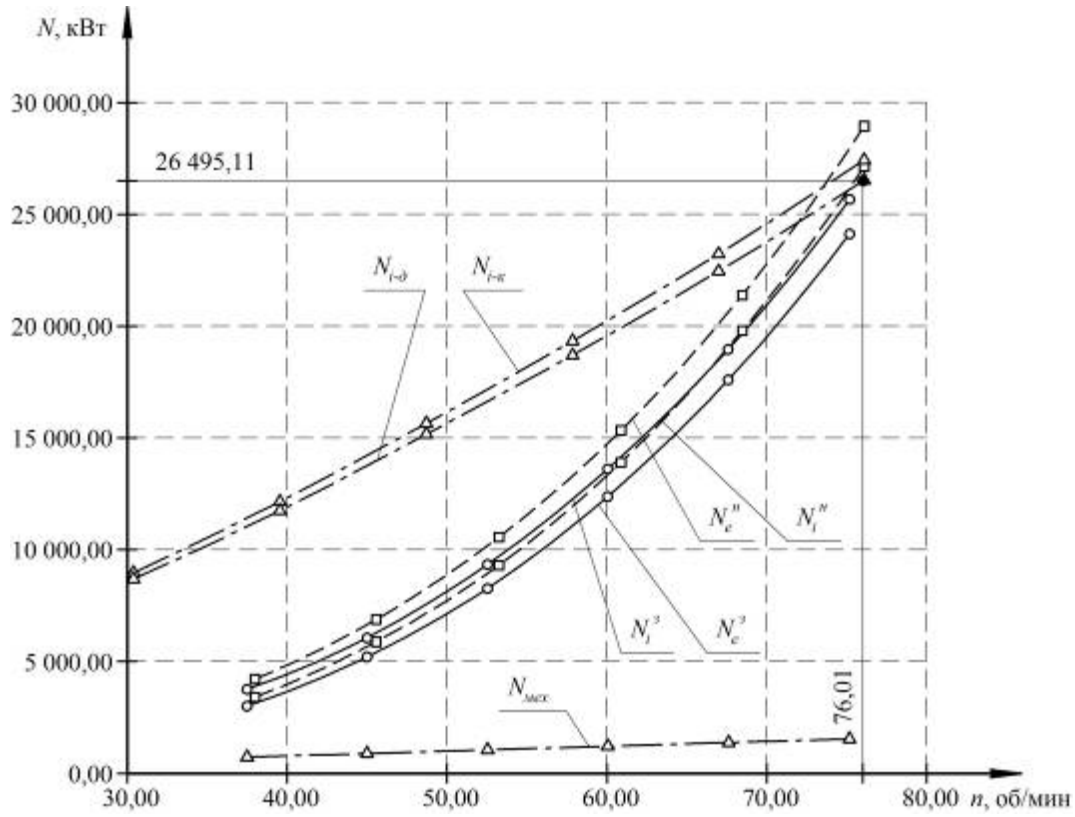



Рисунок 2.13 – Зависимость мощности $N_i$, $N_e$ и $N_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [5] дедвейтом 259 999 т

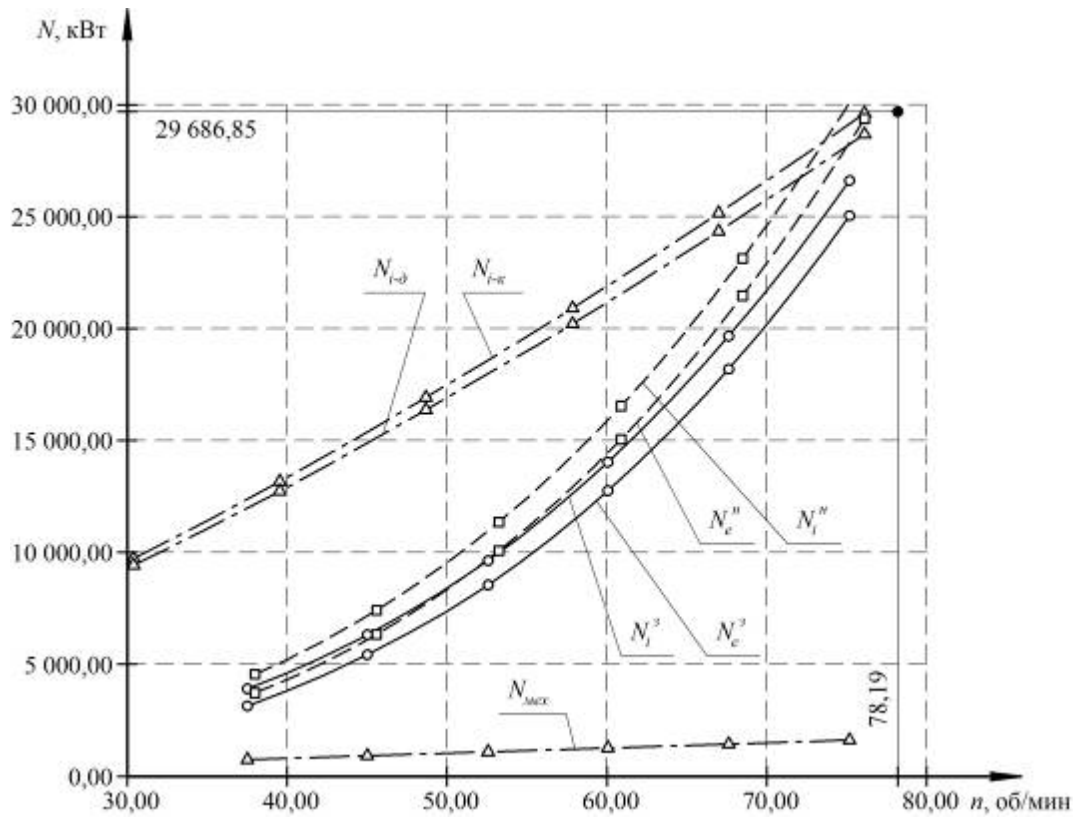



Рисунок 2.14 – Зависимость мощности $N_i$, $N_e$ и $N_{мех}$ от частоты вращения главного двигателя $n$ для нефтеналивного судна [6] дедвейтом 317 441 т

$$\left[n^{опт}\right]_1 = 105{,}39\ об/мин, \qquad \left[n^{опт}\right]_4 = 66{,}29\ об/мин,$$
$$\left[n^{опт}\right]_2 = 93{,}60\ об/мин, \qquad \left[n^{опт}\right]_5 = 76{,}01\ об/мин,$$
$$\left[n^{опт}\right]_3 = 80{,}22\ об/мин, \qquad \left[n^{опт}\right]_6 = 78{,}19\ об/мин.$$

*Оптимальная мощность главного двигателя*, $N_e^{опт}$:

$N_e^{опт} = 8\,597{,}72\ кВт$ – принимается по графику.

$$\left[N_e^{опт}\right]_1 = 8\,597{,}72\ кВт, \qquad \left[N_e^{опт}\right]_4 = 19\,002{,}33\ кВт,$$
$$\left[N_e^{опт}\right]_2 = 14\,798{,}02\ кВт, \qquad \left[N_e^{опт}\right]_5 = 26\,495{,}11\ кВт,$$
$$\left[N_e^{опт}\right]_3 = 16\,374{,}49\ кВт, \qquad \left[N_e^{опт}\right]_6 = 29\,686{,}85\ кВт.$$

## 2.4. Расчет теплоутилизационного контура

### 2.4.1. Тепловой расчет

*Количество тепла, получаемое при сгорании топлива в главном двигателе на заданном режиме*, $Q_{сум}$:

$$Q_{сум} = \frac{g_e^з \cdot N_e^з \cdot Q_m^н}{3600} = \frac{0{,}19 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 42\,329{,}28}{3\,600} \approx 17\,021{,}97\ кВт.$$

*Коэффициент избытка продувочного воздуха в главном двигателе*, $\varphi_в$:

$\varphi_в = 1{,}55$ – принимается из опыта эксплуатации.

Здесь *коэффициент избытка продувочного воздуха* – отношение количества свежего воздуха, подаваемого в цилиндр двигателя за цикл, к рабочему объему цилиндра двигателя.

*Теоретическое количество воздуха необходимое для сжигания топлива*, $L_m^{o\prime}$:

$$L_m^o{}' = 32 \cdot L_m^o = 32 \cdot 0{,}45 \approx 14{,}48\ кг/кг.$$

*Температура газов на выходе из газотурбонагнетателя главного двигателя*, $t_г^{ост}$:

$t_г^{ост} = 600{,}00\ К$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Количество газов, уходящих из газотурбонагнетателя главного двигателя на заданном режиме*, $G_г^{ГД}$:

$$G_г^{ГД} = \alpha_в \cdot g_e^з \cdot N_e^з \cdot \varphi_в \cdot L_m^o{}' + g_e^з \cdot N_e^з =$$
$$= 2{,}10 \cdot 0{,}19 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 1{,}55 \cdot 14{,}48 + 0{,}19 \cdot 7\,739{,}86 \approx 69\,672{,}81\ кг/ч.$$

*Количество воздуха, входящего в воздухоохладитель главного двигателя на заданном режиме*, $G_в^{ГД}$:

$$G_в^{ГД} = \alpha_в \cdot g_e^з \cdot N_e^з \cdot L_m^o{}' = 2{,}10 \cdot 0{,}19 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 14{,}48 \approx 44\,016{,}22\ кг/ч.$$

*Теплоемкость газов на выходе из газотурбонагнетателя главного двигателя*, $c_г$:

$c_г = 1{,}05\ кДж/(кг \cdot К)$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Теплоемкость воздуха на входе в воздухоохладитель главного двигателя*, $c_в$:

$c_в = 1{,}05\ кДж/(кг \cdot К)$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Количество тепла, получаемое из газов на выходе из газотурбонагнетателя главного двигателя на заданном режиме, $Q_г$:*

$$Q_г = \frac{G_г^{ГД} \cdot c_г \cdot \left(t_г^{ост} - t^{атм}\right)}{3\,600} = \frac{69\,672{,}81 \cdot 1{,}05 \cdot (600{,}00 - 298{,}00)}{3\,600} \approx 6\,137{,}01\ кДж.$$

*Количество тепла, отнимаемое у сжатого воздуха в воздухоохладителе главного двигателя на заданном режиме, $Q_в$:*

$$Q_в = \frac{G_в^{ГД} \cdot c_в \cdot \left(t_к - t_р\right)}{3\,600} = \frac{44\,016{,}22 \cdot 1{,}05 \cdot (387{,}58 - 252{,}58)}{3\,600} \approx 1\,733{,}14\ кДж.$$

*Доля тепла, уносимого с отработавшими газами на заданном режиме, $q_г$:*

$$\boxed{q_г = \frac{Q_г}{Q_{сум}} = \frac{6\,137{,}01}{1\,733{,}14} \approx 0{,}36.}$$

$[q_г]_1 = 0{,}36,$ $[q_г]_4 = 0{,}36,$
$[q_г]_2 = 0{,}36,$ $[q_г]_5 = 0{,}36,$
$[q_г]_3 = 0{,}36,$ $[q_г]_6 = 0{,}36.$

*Доля тепла, передаваемая охлаждающей среде (воздушный холодильник) на заданном режиме, $q_в$:*

$$\boxed{q_в = \frac{Q_в}{Q_{сум}} = \frac{1\,733{,}14}{17\,021{,}97} \approx 0{,}10.}$$

$[q_в]_1 = 0{,}10,$ $[q_в]_4 = 0{,}10,$
$[q_в]_2 = 0{,}10,$ $[q_в]_5 = 0{,}10,$
$[q_в]_3 = 0{,}10,$ $[q_в]_6 = 0{,}10.$

*Доля тепла, передаваемая охлаждающей среде (водяной и масляный холодильники) на заданном режиме, $q_о$:*

$$\boxed{q_о = 1 - \eta_е^з - q_г - q_в = 1 - 0{,}45 - 0{,}36 - 0{,}10 \approx 0{,}08.}$$

$[q_о]_1 = 0{,}08,$ $[q_о]_4 = 0{,}16,$
$[q_о]_2 = 0{,}12,$ $[q_о]_5 = 0{,}18,$
$[q_о]_3 = 0{,}14,$ $[q_о]_6 = 0{,}20.$

### 2.4.2. Расчет производительности и мощности насосов

*Плотность масла, охлаждающего элементы главного двигателя, $\rho_м$:*

$\rho_м = 900{,}00\ кг/м^3$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Плотность воды, охлаждающей элементы главного двигателя (пресная вода), $\rho_{вп}$:*

$\rho_{вп} = 1000{,}00\ кг/м^3$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Плотность воды, охлаждающей элементы главного двигателя* (*забортная вода*), $\rho_{вз}$:

$\rho_{вз} = 1024{,}00\ кг/м^3$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Теплоемкость масла, охлаждающего элементы главного двигателя*, $c_м$:

$c_м = 2{,}00\ кДж/(кг\cdot^\circ C)$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Теплоемкость воды, охлаждающей элементы главного двигателя* (*пресная вода*), $c_{вп}$:

$c_{вп} = 4{,}17\ кДж/(кг\cdot^\circ C)$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Теплоемкость воды, охлаждающей элементы главного двигателя* (*забортная вода*), $c_{вз}$:

$c_{вз} = 3{,}95\ кДж/(кг\cdot^\circ C)$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Перепад температур между входом и выходом масляного холодильника*, $\Delta t_м$:

$\Delta t_м = 20{,}00\ ^\circ C$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Перепад температур между входом и выходом водяного холодильника* (*пресная вода*), $\Delta t_{вп}$:

$\Delta t_{вп} = 8{,}00\ ^\circ C$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Перепад температур между входом и выходом водяного холодильника* (*забортная вода*), $\Delta t_{вз}$:

$\Delta t_{вз} = 8{,}00\ ^\circ C$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Доля тепла, переданная охлаждающему маслу в водяном холодильнике*, $q_{ом}$:

$q_{ом} = 0{,}01\ Дж/кг$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Доля тепла, переданная охлаждающей воде в водяном холодильнике* (*пресная вода*), $q_{овп}$:

$q_{овп} = 0{,}03\ Дж/кг$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Доля тепла, переданная охлаждающей воде в водяном холодильнике* (*забортная вода*), $q_{овз}$:

$q_{овз} = 0{,}04\ Дж/кг$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Производительность масляного насоса на заданном режиме*, $Q^{МН}$:

$$\boxed{Q^{МН} = \frac{q_{ом}\cdot g_e^з\cdot N_e^з\cdot Q_m^н}{c_м\cdot \Delta t_м} = \frac{0{,}01\cdot 0{,}19\cdot 7\,739{,}86\cdot 42\,329{,}28}{2{,}00\cdot 20{,}00} \approx 21\,602{,}90\ кг/ч.}$$

$[Q^{МН}]_1 = 21\,602{,}90\ кг/ч$, $[Q^{МН}]_4 = 126\,442{,}00\ кг/ч$,

$[Q^{МН}]_2 = 62\,671{,}13\ кг/ч$, $[Q^{МН}]_5 = 190\,377{,}12\ кг/ч$,

$[Q^{МН}]_3 = 91\,826{,}30\ кг/ч$, $[Q^{МН}]_6 = 230\,027{,}39\ кг/ч$.

*Производительность водяного насоса* (*пресная вода*) *на заданном режиме*, $Q^{ВНП}$:

$$Q^{ВНП} = \frac{q_{овп} \cdot g_e^з \cdot N_e^з \cdot Q_m^н}{c_{вп} \cdot \Delta t_{вп}} = \frac{0{,}03 \cdot 0{,}19 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 42\,329{,}28}{4{,}17 \cdot 8{,}00} \approx 51805{,}51\,кг/ч.$$

$$\left[Q^{ВНП}\right]_1 = 51\,805{,}51\,кг/ч, \qquad \left[Q^{ВНП}\right]_4 = 303\,218{,}24\,кг/ч,$$
$$\left[Q^{ВНП}\right]_2 = 150\,290{,}48\,кг/ч, \qquad \left[Q^{ВНП}\right]_5 = 456\,539{,}87\,кг/ч,$$
$$\left[Q^{ВНП}\right]_3 = 220\,206{,}96\,кг/ч, \qquad \left[Q^{ВНП}\right]_6 = 551\,624{,}44\,кг/ч.$$

*Производительность водяного насоса* (*забортная вода*) *на заданном режиме*, $Q^{ВНЗ}$:

$$Q^{ВНЗ} = \frac{q_{овз} \cdot g_e^з \cdot N_e^з \cdot Q_m^н}{c_{вз} \cdot \Delta t_{вз}} = \frac{0{,}04 \cdot 0{,}19 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 42\,329{,}28}{3{,}95 \cdot 8{,}00} \approx 82\,036{,}33\,кг/ч.$$

$$\left[Q^{ВНЗ}\right]_1 = 82\,036{,}33\,кг/ч, \qquad \left[Q^{ВНЗ}\right]_4 = 480\,159{,}51\,кг/ч,$$
$$\left[Q^{ВНЗ}\right]_2 = 237\,991{,}63\,кг/ч, \qquad \left[Q^{ВНЗ}\right]_5 = 722\,951{,}11\,кг/ч,$$
$$\left[Q^{ВНЗ}\right]_3 = 348\,707{,}47\,кг/ч, \qquad \left[Q^{ВНЗ}\right]_6 = 873\,521{,}74\,кг/ч.$$

*Коэффициент запаса мощности по производительности для масляного насоса*, $K^{МН}$:

$K^{МН} = 1{,}20$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Коэффициент запаса мощности по производительности для водяного насоса* (*пресная вода*), $K^{ВНП}$:

$K^{ВНП} = 1{,}20$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Коэффициент запаса мощности по производительности для водяного насоса* (*забортная вода*), $K^{ВНЗ}$:

$K^{ВНЗ} = 1{,}20$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Напор масляного насоса*, $H^{МН}$:

$H^{МН} = 0{,}35\,МПа$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Напор водяного насоса* (*пресная вода*), $H^{ВНП}$:

$H^{ВНП} = 0{,}25\,МПа$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Напор водяного насоса* (*забортная вода*), $H^{ВНЗ}$:

$H^{ВНЗ} = 0{,}15\,МПа$ – принимается из опыта эксплуатации.

*КПД масляного насоса*, $\eta^{МН}$:

$\eta^{МН} = 0{,}70\,МПа$ – принимается из опыта эксплуатации.

*КПД водяного насоса* (*пресная вода*), $\eta^{ВНП}$:

$\eta^{ВНП} = 0{,}70\,МПа$ – принимается из опыта эксплуатации.

*КПД водяного насоса* (*забортная вода*), $\eta^{ВНЗ}$:

$\eta^{ВНЗ} = 0{,}70\,МПа$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Мощность, потребляемая масляным циркуляционным насосом на заданном режиме*, $N^{МН}$:

$$N^{МН} = \frac{K^{МН} \cdot Q^{МН} \cdot H^{МН}}{3{,}60 \cdot \rho_{м} \cdot \eta^{МН}} = \frac{1{,}20 \cdot 21\,602{,}90 \cdot 0{,}35}{3{,}60 \cdot 900{,}00 \cdot 0{,}70} \approx 4{,}00\ кВт.$$

$\left[N^{МН}\right]_1 = 4{,}00\ кВт,$ $\left[N^{МН}\right]_4 = 23{,}42\ кВт,$

$\left[N^{МН}\right]_2 = 11{,}61\ кВт,$ $\left[N^{МН}\right]_5 = 35{,}26\ кВт,$

$\left[N^{МН}\right]_3 = 17{,}00\ кВт,$ $\left[N^{МН}\right]_6 = 42{,}60\ кВт.$

*Мощность, потребляемая водяным циркуляционным насосом (пресная вода) на заданном режиме,* $N^{ВНП}$:

$$N^{ВНП} = \frac{K^{ВНП} \cdot Q^{ВНП} \cdot H^{ВНП}}{3{,}60 \cdot \rho_{вп} \cdot \eta^{ВНП}} = \frac{1{,}20 \cdot 51\,805{,}51 \cdot 0{,}25}{3{,}60 \cdot 1\,000{,}00 \cdot 0{,}70} \approx 6{,}17\ кВт.$$

$\left[N^{МН}\right]_1 = 6{,}17\ кВт,$ $\left[N^{МН}\right]_4 = 36{,}10\ кВт,$

$\left[N^{МН}\right]_2 = 17{,}89\ кВт,$ $\left[N^{МН}\right]_5 = 54{,}35\ кВт,$

$\left[N^{МН}\right]_3 = 26{,}22\ кВт,$ $\left[N^{МН}\right]_6 = 65{,}67\ кВт.$

*Мощность, потребляемая водяным циркуляционным насосом (забортная вода) на заданном режиме,* $N^{ВНЗ}$:

$$N^{ВНЗ} = \frac{K^{ВНЗ} \cdot Q^{ВНЗ} \cdot H^{ВНЗ}}{3{,}60 \cdot \rho_{вз} \cdot \eta^{ВНЗ}} = \frac{1{,}20 \cdot 82\,036{,}33 \cdot 0{,}15}{3{,}60 \cdot 1\,024{,}00 \cdot 0{,}70} \approx 5{,}72\ кВт.$$

$\left[N^{ВНЗ}\right]_1 = 5{,}72\ кВт,$ $\left[N^{ВНЗ}\right]_4 = 33{,}49\ кВт,$

$\left[N^{ВНЗ}\right]_2 = 16{,}60\ кВт,$ $\left[N^{ВНЗ}\right]_5 = 50{,}43\ кВт,$

$\left[N^{ВНЗ}\right]_3 = 24{,}32\ кВт,$ $\left[N^{ВНЗ}\right]_6 = 60{,}93\ кВт.$

### 2.4.3. Расчет потребностей в паре, воде и электричестве

*Потери на охлаждение цилиндра пресной водой,* $\Delta q_ц$:

$\Delta q_ц = 0{,}03\ кДж/кг$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Количество тепла, необходимое для получения 1 кг дистиллята в опреснителе,* $q_д$:

$q_д = 3\,000{,}00\ кДж/кг$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Производительность вакуумной опреснительной установки на заданном режиме,* $Q^{ВОУ}$:

$$Q^{ВОУ} = 24{,}00 \cdot \frac{\Delta q_ц \cdot g_e^з \cdot N_e^з \cdot Q_m^н}{q_д} =$$

$$= 24{,}00 \cdot \frac{0{,}04 \cdot 0{,}19 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 42\,329{,}28}{3\,000{,}00} \approx 13\,825{,}86\ кг/ч.$$

$\left[Q^{ВОУ}\right]_1 = 13\,825{,}86\ кг/ч,$ $\left[Q^{ВОУ}\right]_2 = 40\,109{,}52\ кг/ч,$

$$\left[Q^{ВОУ}\right]_3 = 58\,768{,}83\ кг/ч, \qquad \left[Q^{ВОУ}\right]_5 = 121\,841{,}36\ кг/ч,$$
$$\left[Q^{ВОУ}\right]_4 = 80\,922{,}88\ кг/ч, \qquad \left[Q^{ВОУ}\right]_6 = 147\,217{,}53\ кг/ч.$$

*Производительность котельной установки на заданном режиме*, $Q^{КУ}$:

$$\boxed{Q^{КУ} = 1\,000{,}00 + 0{,}09 \cdot N_e^{з} = 1000{,}00 + 0{,}09 \cdot 7\,739{,}86 \approx 1\,696{,}59\ кг/ч.}$$

$$\left[Q^{КУ}\right]_1 = 1\,696{,}59\ кг/ч, \qquad \left[Q^{КУ}\right]_4 = 2\,812{,}72\ кг/ч,$$
$$\left[Q^{КУ}\right]_2 = 2\,261{,}80\ кг/ч, \qquad \left[Q^{КУ}\right]_5 = 3\,168{,}01\ кг/ч,$$
$$\left[Q^{КУ}\right]_3 = 2\,469{,}72\ кг/ч, \qquad \left[Q^{КУ}\right]_6 = 3\,244{,}56\ кг/ч.$$

*Мощность электроэнергетической установки на заданном режиме*, $N^{ЭЭУ}$:

$$\boxed{N^{ЭЭУ} = 120{,}00 + 0{,}03 \cdot N_e^{з} = 120{,}00 + 0{,}03 \cdot 7\,739{,}86 \approx 352{,}20\ кВт.}$$

$$\left[N^{ЭЭУ}\right]_1 = 352{,}20\ кВт, \qquad \left[N^{ЭЭУ}\right]_4 = 724{,}24\ кВт,$$
$$\left[N^{ЭЭУ}\right]_2 = 540{,}60\ кВт, \qquad \left[N^{ЭЭУ}\right]_5 = 842{,}67\ кВт,$$
$$\left[N^{ЭЭУ}\right]_3 = 609{,}91\ кВт, \qquad \left[N^{ЭЭУ}\right]_6 = 868{,}19\ кВт.$$

## 2.5. Оценка возможности замещения

### 2.5.1. Расчет расхода топлива

*Число работающих дизель-генераторов на заданном режиме*, $i^{ДГ}$:

$i^{ДГ} = 1{,}00\ шт$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Удельный расход топлива на дизель-генераторе на заданном режиме*, $g^{ДГ}$:

$g^{ДГ} = 0{,}39\ кг/(кВт \cdot ч)$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Удельный расход топлива на вспомогательном котле на заданном режиме*, $g^{ВК}$:

$g^{ВК} = 0{,}33\ кг/(кВт \cdot ч)$ – принимается из опыта эксплуатации.

*КПД дизель-генератора*, $\eta^{ДГ}$:

$\eta^{ДГ} = 0{,}95$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Мощность, снимаемая с главного распределительного щита на заданном режиме*, $N^{ГРЩ}$:

$$N^{ГРЩ} = 120{,}00 + 0{,}03 \cdot N_e^{з} = 120{,}00 + 0{,}03 \cdot 7\,739{,}86 \approx 352{,}20\ кВт.$$

*Мощность механических потерь на дизель-генераторе на заданном режиме*, $N_{мех}^{ДГ}$:

$$N_{мех}^{ДГ} = \left(\frac{N^{ГРЩ}}{\eta^{ДГ}}\right) - N^{ГРЩ} = \left(\frac{352{,}20}{0{,}95}\right) - 352{,}20 \approx 18{,}54\ кВт.$$

*Мощность дизель-генератора на заданном режиме*, $N^{ДГ}$:

$$N^{ДГ} = N^{ГРЩ} + N_{мех}^{ДГ} \cdot i^{ДГ} = 352{,}20 + 18{,}54 \cdot 1{,}00 \approx 370{,}73\ кВт.$$

*Мощность вспомогательного котла на заданном режиме*, $N^{ВК}$:

$$N^{ВК} = 0{,}03 \cdot N_e^{з} = 0{,}03 \cdot 7\,739{,}86 \approx 232{,}20\ кВт.$$

*Расход топлива на главном двигателе на заданном режиме, $G_m^{ГД}$:*

$$G_m^{ГД} = \frac{24{,}00 \cdot N_e^{з} \cdot g_e^{з}}{1\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 0{,}19}{1\,000} \approx 34{,}74\ т/сут.$$

$$\left[G_m^{ГД}\right]_1 = 34{,}74\ т/сут, \qquad \left[G_m^{ГД}\right]_4 = 107{,}84\ т/сут,$$
$$\left[G_m^{ГД}\right]_2 = 68{,}78\ т/сут, \qquad \left[G_m^{ГД}\right]_5 = 138{,}69\ т/сут,$$
$$\left[G_m^{ГД}\right]_3 = 84{,}78\ т/сут, \qquad \left[G_m^{ГД}\right]_6 = 151{,}76\ т/сут.$$

*Расход топлива на дизель-генераторе на заданном режиме, $G_m^{ДГ}$:*

$$G_m^{ДГ} = \frac{24{,}00 \cdot N^{ДГ} \cdot g^{ДГ}}{1\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 370{,}73 \cdot 0{,}39}{1\,000} \approx 3{,}43\ т/сут.$$

$$\left[G_m^{ДГ}\right]_1 = 3{,}43\ т/сут, \qquad \left[G_m^{ДГ}\right]_4 = 7{,}04\ т/сут,$$
$$\left[G_m^{ДГ}\right]_2 = 5{,}26\ т/сут, \qquad \left[G_m^{ДГ}\right]_5 = 8{,}20\ т/сут,$$
$$\left[G_m^{ДГ}\right]_3 = 5{,}93\ т/сут, \qquad \left[G_m^{ДГ}\right]_6 = 8{,}44\ т/сут.$$

*Расход топлива на вспомогательном котле на заданном режиме, $G_m^{ВК}$:*

$$G_m^{ВК} = \frac{24{,}00 \cdot N^{ВК} \cdot g^{ВК}}{1\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 232{,}20 \cdot 0{,}33}{1\,000} \approx 1{,}81\ т/сут.$$

$$\left[G_m^{ВК}\right]_1 = 1{,}81\ т/сут, \qquad \left[G_m^{ВК}\right]_4 = 4{,}71\ т/сут,$$
$$\left[G_m^{ВК}\right]_2 = 3{,}28\ т/сут, \qquad \left[G_m^{ВК}\right]_5 = 5{,}64\ т/сут,$$
$$\left[G_m^{ВК}\right]_3 = 3{,}82\ т/сут, \qquad \left[G_m^{ВК}\right]_6 = 5{,}84\ т/сут.$$

*Суммарный расход топлива судовой энергетической установкой на заданном режиме, $G_m$:*

$$G_m = G_m^{ГД} + G_m^{ДГ} + G_m^{ВК} = 34{,}74 + 3{,}43 + 1{,}81 \approx 39{,}98\ т/сут.$$

$$\left[G_m\right]_1 = 39{,}98\ т/сут, \qquad \left[G_m\right]_4 = 119{,}60\ т/сут,$$
$$\left[G_m\right]_2 = 77{,}32\ т/сут, \qquad \left[G_m\right]_5 = 152{,}52\ т/сут,$$
$$\left[G_m\right]_3 = 94{,}53\ т/сут, \qquad \left[G_m\right]_6 = 166{,}04\ т/сут.$$

*Относительный расход топлива на главном двигателе на заданном режиме, X:*

$$X = \frac{G_m^{ГД}}{G_m} = \frac{34{,}74}{39{,}98} \approx 0{,}87.$$

*Относительный расход топлива на дизель-генераторе на заданном режиме, Y:*

$[X]_1 = 0{,}87,$ $[X]_4 = 0{,}90,$
$[X]_2 = 0{,}89,$ $[X]_5 = 0{,}91,$
$[X]_3 = 0{,}90,$ $[X]_6 = 0{,}91.$

$$Y = \frac{G_m^{ДГ}}{G_m} = \frac{3{,}43}{39{,}98} \approx 0{,}09.$$

$[Y]_1 = 0{,}09,$ $[Y]_4 = 0{,}06,$
$[Y]_2 = 0{,}07,$ $[Y]_5 = 0{,}05,$
$[Y]_3 = 0{,}06,$ $[Y]_6 = 0{,}05.$

*Относительный расход топлива на вспомогательном котле на заданном режиме*, Z:

$$Z = \frac{G_m^{ВК}}{G_m} = \frac{1{,}81}{39{,}98} \approx 0{,}05.$$

$[Z]_1 = 0{,}05,$ $[Z]_4 = 0{,}04,$
$[Z]_2 = 0{,}04,$ $[Y]_5 = 0{,}04,$
$[Z]_3 = 0{,}04,$ $[Y]_6 = 0{,}04.$

### 2.5.2. Замещение вспомогательного котла утилизационным

*Длина выхлопного тракта главного двигателя*, $l_г$:

$l_г = 7{,}00\ м$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Погонное снижение температуры газов в выхлопном тракте главного двигателя*, $\Delta t_г$:

$\Delta t_г = 1{,}50\ К$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Температура газов на входе в утилизационный котел*, $t_г^{вхд}$:

$$t_г^{вхд} = t_г^{ост} - \Delta t_г \cdot l_г = 600{,}00 - 1{,}50 \cdot 7{,}00 \approx 589{,}50\ К.$$

*Температура насыщенного пара в утилизационном котле*, $t_{нп}$:

$t_{нп} = 470{,}00\ К$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Увеличение температуры стенки утилизационного котла из-за загрязнения*, $\Delta t_з$:

$\Delta t_з = 20{,}00\ ^\circ C$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Увеличение температуры стенки утилизационного котла из-за температурного напора*, $\Delta t_н$:

$\Delta t_н = 30{,}00\ ^\circ C$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Температура конденсации паров воды в утилизационном котле*, $t_{конд}$:

$$t_{конд} = 313{,}00 + 98{,}50 \cdot \sqrt[3]{S_m} = 313{,}00 + 98{,}50 \cdot \sqrt[3]{3{,}50} \approx 462{,}55\ К.$$

*Температура газов на выходе из утилизационного котла* (*при условии отсутствия коррозии*), $t_г^{вых}{}'$:

$$t_г^{вых}{}' = t_{конд} + 25{,}00 = 462{,}55 + 25{,}00 \approx 487{,}55\ К.$$

*Температура газов на выходе из утилизационного котла* (*минимально допустимая при эксплуатации*), $t_г^{вых}{}''$:

$$t_г^{вых}{}'' = t_{нп} + \Delta t_з + \Delta t_н = 470{,}00 + 20{,}00 + 30{,}00 \approx 520{,}00\ К.$$

*Температура газов на выходе из утилизационного котла*, $t_г^{вых}$:

$$t_г^{вых} = \max\left(t_г^{вых}{}';t_г^{вых}{}''\right) = \max\left(487{,}55;520{,}00\right) \approx 520{,}00\ К.$$

*Теплоемкость газов, уходящих из главного двигателя*, $c_г$:

$c_г = 1{,}05\ кДж/(кг \cdot К)$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Количество тепла, забираемое утилизационным котлом у уходящих газов на заданном режиме*, $Q_г^{УК}$:

$$Q_г^{УК} = \frac{G_г^{ГД} \cdot c_г \cdot \left(t_г^{вхд} - t_г^{вых}\right)}{3\,600} = \frac{69\,672{,}81 \cdot 1{,}05 \cdot (589{,}50 - 520{,}00)}{3\,600} \approx 1\,412{,}33\ кДж.$$

*Энтальпия перегретого пара в утилизационном котле*, $i_{пп}$:

$i_{пп} = 2850{,}00\ кДж/кг$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Энтальпия питательной воды в утилизационном котле*, $i_{вп}$:

$i_{вп} = 250{,}00\ кДж/кг$ – принимается из опыта эксплуатации.

*КПД утилизационного котла*, $\eta^{УК}$:

$\eta^{УК} = 0{,}95$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Производительность котельной установки на заданном режиме до замещения*, $Q^{КУ}$:

$$\boxed{Q^{КУ} \approx 1\,696{,}59\ кг/ч.}$$

$\left[Q^{КУ}\right]_1 = 1\,696{,}59\ кг/ч,$ $\left[Q^{КУ}\right]_4 = 2\,812{,}72\ кг/ч,$

$\left[Q^{КУ}\right]_2 = 2\,261{,}80\ кг/ч,$ $\left[Q^{КУ}\right]_5 = 3\,168{,}01\ кг/ч,$

$\left[Q^{КУ}\right]_3 = 2\,469{,}72\ кг/ч,$ $\left[Q^{КУ}\right]_6 = 3\,244{,}56\ кг/ч.$

*Производительность котельной установки на заданном режиме после замещения*, $Q^{КУ}{}'$:

$$\boxed{Q^{КУ}{}' = \frac{3\,600 \cdot Q_г^{УК}}{i_{пп} - i_{вп}} \cdot \eta^{УК} = \frac{3\,600 \cdot 1412{,}33}{2850{,}00 - 250{,}00} \cdot 0{,}95 \approx 1\,857{,}75\ кг/ч.}$$

$\left[Q^{КУ}{}'\right]_1 = 1\,857{,}75\ кг/ч,$ $\left[Q^{КУ}{}'\right]_4 = 5\,766{,}12\ кг/ч,$

$\left[Q^{КУ}{}'\right]_2 = 3\,677{,}44\ кг/ч,$ $\left[Q^{КУ}{}'\right]_5 = 7\,415{,}71\ кг/ч,$

$\left[Q^{КУ}{}'\right]_3 = 4\,533{,}22\ кг/ч,$ $\left[Q^{КУ}{}'\right]_6 = 8\,114{,}44\ кг/ч.$

*Коэффициент замещения вспомогательного котла утилизационным котлом*, $K^{ВК\text{-}УК}$:

$$K^{ВК-УК} = \frac{Q^{КУ}{}'}{Q^{КУ}} = \frac{1\,857{,}75}{1\,696{,}59} \approx 1{,}09.$$

$\left[K^{ВК-УК}\right]_1 = 1{,}09,$ $\left[K^{ВК-УК}\right]_4 = 2{,}05,$

$\left[K^{ВК-УК}\right]_2 = 1{,}63,$ $\left[K^{ВК-УК}\right]_5 = 2{,}34,$

$\left[K^{ВК-УК}\right]_3 = 1{,}84,$ $\left[K^{ВК-УК}\right]_6 = 2{,}50.$

*Коэффициент замещения вспомогательного котла утилизационным котлом* $K^{ВК\text{-}УК}$ больше единицы, а значит, утилизационный котел может полностью заменить вспомогательный котел в процессе эксплуатации.

Рост *коэффициента* $K^{ВК\text{-}УК}$ по мере увеличения дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов показывает, что **эффективность использования** *предлагаемой схемы замещения* **увеличивается** по мере увеличения дедвейта судна.

### 2.5.3. Замещение дизель-генератора валогенератором

*КПД генератора, размещаемого на гребном валу*, $\eta_{ген}$:

$\eta_{ген} = 0{,}85$ – принимается из опыта эксплуатации.

*КПД передачи для генератора, размещаемого на гребном валу*, $\eta_{пер}$:

$\eta_{пер} = 0{,}96$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Мощность, отбираемая от главного двигателя на заданном режиме*, $N^{ОТБ}$:

$$N^{ОТБ} = \frac{N^{ГРЩ}}{\eta_{ген} \cdot \eta_{пер}} = \frac{352{,}20}{0{,}85 \cdot 0{,}96} \approx 431{,}61\,кВт.$$

*Мощность, развиваемая главным двигателем при включении валогенератора на заданном режиме*, $N^{ВГ}$:

$$N^{ВГ} = N_e^{з} + N^{ОТБ} = 7\,739{,}86 + 431{,}61 \approx 8171{,}47\,кВт.$$

*Расход топлива на главном двигателе при выключенном валогенераторе на заданном режиме*, $G_m^{ГД}$:

$$G_m^{ГД} \approx 34{,}74\,т/сут.$$

$\left[G_m^{ГД}\right]_1 = 34{,}74\,т/сут,$ $\left[G_m^{ГД}\right]_4 = 107{,}84\,т/сут,$

$\left[G_m^{ГД}\right]_2 = 68{,}78\,т/сут,$ $\left[G_m^{ГД}\right]_5 = 138{,}69\,т/сут,$

$\left[G_m^{ГД}\right]_3 = 84{,}78\,т/сут,$ $\left[G_m^{ГД}\right]_6 = 151{,}76\,т/сут.$

*Расход топлива на главном двигателе при включенном валогенераторе на заданном режиме*, $G_m^{ГД}{}'$:

$$G_m^{ГД}{}' = 24{,}00 \cdot \frac{g_e^{з} \cdot N^{ВГ}}{1\,000} = 24{,}00 \cdot \frac{0{,}19 \cdot 8\,171{,}47}{1\,000} \approx 36{,}68\,т/сут.$$

$\left[G_m^{ГД}{}'\right]_1 = 36{,}68\,т/сут,$ $\left[G_m^{ГД}{}'\right]_3 = 88{,}66\,т/сут,$

$\left[G_m^{ГД}{}'\right]_2 = 72{,}03\,т/сут,$ $\left[G_m^{ГД}{}'\right]_4 = 112{,}59\,т/сут,$

$$\left[G_m^{ГД}{}'\right]_5 = 144{,}64\ т/сут, \qquad \left[G_m^{ГД}{}'\right]_6 = 158{,}23\ т/сут.$$

*Суммарный расход топлива судовой энергетической установки при выключенном валогенераторе на заданном режиме, $G_m$:*

$$G_m \approx 39{,}98\ т/сут.$$

$$\left[G_m\right]_1 = 39{,}98\ т/сут, \qquad \left[G_m\right]_4 = 119{,}60\ т/сут,$$
$$\left[G_m\right]_2 = 77{,}32\ т/сут, \qquad \left[G_m\right]_5 = 152{,}52\ т/сут,$$
$$\left[G_m\right]_3 = 94{,}53\ т/сут, \qquad \left[G_m\right]_6 = 166{,}04\ т/сут.$$

*Суммарный расход топлива судовой энергетической установки при включенном валогенераторе на заданном режиме, $G_m'$:*

$$G_m' = G_m^{ВК} + G_m^{ГД}{}' = 1{,}81 + 36{,}68 \approx 38{,}49\ т/сут.$$

$$\left[G_m'\right]_1 = 38{,}49\ т/сут, \qquad \left[G_m'\right]_4 = 117{,}30\ т/сут,$$
$$\left[G_m'\right]_2 = 75{,}31\ т/сут, \qquad \left[G_m'\right]_5 = 150{,}27\ т/сут,$$
$$\left[G_m'\right]_3 = 92{,}48\ т/сут, \qquad \left[G_m'\right]_6 = 164{,}07\ т/сут.$$

*Экономия топлива при включении валогенератора на заданном режиме, $\Delta G_m$:*

$$\Delta G_m = \left|G_m' - G_m\right| = \left|38{,}49 - 39{,}83\right| \approx 1{,}49\ т/сут.$$

*Коэффициент замещения дизель-генератора валогенератором, $K^{ДГ\text{-}ВГ}$:*

$$K^{ДГ-ВГ} = \frac{G_m'}{G_m} = \frac{38{,}49}{39{,}98} \approx 0{,}96.$$

$$\left[K^{ДГ-ВГ}\right]_1 = 0{,}96, \qquad \left[K^{ДГ-ВГ}\right]_4 = 0{,}98,$$
$$\left[K^{ДГ-ВГ}\right]_2 = 0{,}97, \qquad \left[K^{ДГ-ВГ}\right]_5 = 0{,}99,$$
$$\left[K^{ДГ-ВГ}\right]_3 = 0{,}98, \qquad \left[K^{ДГ-ВГ}\right]_6 = 0{,}99.$$

*Коэффициент замещения дизель-генератора валогенератором $K^{ДГ\text{-}ВГ}$* меньше единицы, а значит, утилизационный котел может полностью заменить вспомогательный котел в процессе эксплуатации.

Рост *коэффициента $K^{ДГ\text{-}ВГ}$* по мере увеличения дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов показывает, что **эффективность использования** *предлагаемой схемы замещения на судах с большим и малым дедвейтом* **одинакова**.

## 2.5.4. Расчет эффективности замещения

*КПД передачи от фланца отбора мощности главного двигателя к гребному винту, $\eta_{фл}$:*

$\eta_{фл} = 0{,}99$ – принимается из опыта эксплуатации.

*КПД энергетической установки на заданном режиме без использования замещения, $\eta_{мех}'$:*

$$\eta_{мех}' = \frac{3600 \cdot N_e^з \cdot \eta_{фл}}{g_e^з \cdot Q_m^н \cdot N_e^з + G_m^{ДГ} \cdot Q_m^н \cdot \left(\frac{1000,00}{24,00}\right) + G_m^{ВК} \cdot Q_m^н \cdot \left(\frac{1000,00}{24,00}\right)} =$$

$$= \frac{3600 \cdot 7\,739,86 \cdot 0,99}{0,19 \cdot 42\,329,28 \cdot 7\,739,86 + 3,43 \cdot 42\,329,28 \cdot \left(\frac{1000,00}{24,00}\right) + 1,81 \cdot 42\,329,28 \cdot \left(\frac{1000,00}{24,00}\right)} \approx$$

$$\approx 0,39.$$

$[\eta_{мех}']_1 = 0,39,$ $[\eta_{мех}']_4 = 0,34,$

$[\eta_{мех}']_2 = 0,37,$ $[\eta_{мех}']_5 = 0,32,$

$[\eta_{мех}']_3 = 0,35,$ $[\eta_{мех}']_6 = 0,30.$

*КПД энергетической установки на заданном режиме с использованием замещения, $\eta_{мех}''$:*

$$\eta_{мех}'' = \frac{3\,600 \cdot N_e^з \cdot \eta_{фл}}{g_e^з \cdot Q_m^н \cdot N^{ВГ} + \left(1 - K^{ВК-УК}\right) \cdot G_m^{ДГ} \cdot Q_m^н \cdot \left(\frac{1000,00}{24,00}\right)} =$$

$$= \frac{3600,00 \cdot 5514,17 \cdot 0,99}{0,19 \cdot 42\,329,28 \cdot 7\,739,86 + \left(1 - 1,09\right) \cdot 3,43 \cdot 42\,329,28 \cdot \left(\frac{1000,00}{24,00}\right)} \approx$$

$$\approx 0,43.$$

$[\eta_{мех}'']_1 = 0,43,$ $[\eta_{мех}'']_4 = 0,39,$

$[\eta_{мех}'']_2 = 0,41,$ $[\eta_{мех}'']_5 = 0,36,$

$[\eta_{мех}'']_3 = 0,39,$ $[\eta_{мех}'']_6 = 0,35.$

*Суммарные расходы на рейс на заданном режиме без использования замещения, Э′:*

$$Э' = \left(\frac{G_m^{ГД} \cdot Ц_m^{ГД} + G_m^{ДГ} \cdot Ц_m^{ДГ} + G_m^{ВК} \cdot Ц_m^{ВК}}{24,00}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot DST}{V}\right) =$$

$$= \left(\frac{34,74 \cdot 16\,500,00 + 3,43 \cdot 25\,400,00 + 1,81 \cdot 15\,200,00}{24,00}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot 6\,385,00}{15,30}\right) \approx$$

$$\approx 23\,920\,042,91 \text{ руб/рейс}.$$

$[Э']_1 = 23\,920\,042,91$ *руб/рейс*, $[Э']_4 = 70\,593\,782,78$ *руб/рейс*,

$[Э']_2 = 45\,252\,294,04$ *руб/рейс*, $[Э']_5 = 85\,873\,537,16$ *руб/рейс*,

$[Э']_3 = 55\,187\,510,16$ *руб/рейс*, $[Э']_6 = 93\,354\,233,98$ *руб/рейс*.

*Суммарные расходы на рейс на заданном режиме с использованием замещения, Э''*:

$$Э''=\left(\frac{G_m'\cdot Ц_m^{ГД}}{24{,}00}\right)\cdot\left(\frac{2\cdot DST}{V}\right)=\left(\frac{38{,}49\cdot 25\,400{,}00}{24{,}00}\right)\cdot\left(\frac{2\cdot 6\,385{,}00}{15{,}30}\right)\approx$$
$$\approx 22\,087\,795{,}83\ \textit{руб/рейс}.$$

$[Э'']_1 = 22\,087\,795{,}83$ *руб/рейс*, $[Э'']_4 = 67\,311\,332{,}71$ *руб/рейс*,
$[Э'']_2 = 42\,654\,873{,}81$ *руб/рейс*, $[Э'']_5 = 82\,456\,580{,}01$ *руб/рейс*,
$[Э'']_3 = 52\,383\,564{,}42$ *руб/рейс*, $[Э'']_6 = 90\,026\,288{,}74$ *руб/рейс*.

*Экономический эффект, Э*:

$$Э=\left|Э''-Э'\right|=\left|23\,920\,042{,}91-22\,087\,795{,}83\right|\approx 1\,832\,247{,}08\ \textit{руб / рейс}.$$

$[Э]_1 = 1\,832\,247{,}08$ *руб/рейс*, $[Э]_4 = 3\,282\,450{,}07$ *руб/рейс*,
$[Э]_2 = 2\,597\,420{,}23$ *руб/рейс*, $[Э]_5 = 3\,416\,957{,}14$ *руб/рейс*,
$[Э]_3 = 2\,803\,945{,}74$ *руб/рейс*, $[Э]_6 = 3\,327\,945{,}24$ *руб/рейс*.

Увеличение размера *экономического эффекта Э* по мере увеличения дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов показывает, что *использование схем замещения «Вспомогательный котел – Утилизационный котел» и «Дизель-генераторы – Валогенератор» экономически* **наиболее выгодно** для судов с наибольшим дедвейтом:

- *Использование на нефтеналивных судах предлагаемой схемы утилизации тепла выгодно, как по причине экономии топлива, так и по причине снижения расходов на обслуживание и ремонт вспомогательного котла и дизель-генератора*;
- *Использование на нефтеналивных судах предлагаемой схемы утилизации тепла повышает суммарный КПД судовых энергетических установок за счет более рационального использования энергии отработавших газов*.

# 3. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СКОРОСТНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДОВ

## 3.1. Построение ходовой характеристики

### 3.1.1. Расчет сопротивления воды

*Вспомогательный коэффициент, l'*:

$$l' = \frac{L}{\sqrt[3]{W}} = \frac{174{,}00}{\sqrt[3]{44\,938{,}00}} \approx 4{,}89.$$

*Вспомогательный коэффициент, w'*:

$$w' = 1{,}81 + 0{,}32 \cdot \frac{B}{T} + l' \cdot \left(0{,}71 - 0{,}02 \cdot l'\right) =$$

$$= 1{,}81 + 0{,}32 \cdot \frac{32{,}20}{11{,}00} + 4{,}89 \cdot \left(0{,}71 - 0{,}02 \cdot 4{,}89\right) \approx 5{,}87.$$

*Площадь смоченной поверхности корпуса судна, A*:

$$A = w' \cdot \sqrt[3]{W^2} = 5{,}87' \cdot \sqrt[3]{44\,938{,}00^2} \approx 7\,419{,}78\ м^2.$$

*Коэффициент полноты водоизмещения корпуса судна, δ*:

$$\delta = \frac{W}{L \cdot B \cdot T} = \frac{44 \cdot 938{,}00}{174{,}00 \cdot 32{,}20 \cdot 11{,}00} \approx 0{,}73.$$

*Кинематическая вязкость забортной воды, ν*:

$\nu = 1{,}14 \cdot 10^{-6}\ м^2 / с$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Средняя скорость движения судна на заданном режиме, $V^з$*:

$V^з = 7{,}87\ м / с$ – принимается из вышеприведенных таблиц.

*Число Рейнольдса на заданном режиме, $Re^з$*:

$$Re^з = \frac{V^з \cdot L}{\nu} = \frac{7{,}87 \cdot 174{,}00}{1{,}14 \cdot 10^{-6}} \approx 1{,}20 \cdot 10^9.$$

Здесь *число Рейнольдса* – величина, характеризующая переход течения вязкой жидкости вокруг корпуса судна от ламинарного к турбулентному.

*Коэффициент сопротивления трения эквивалентной гладкой пластины на заданном режиме, $\zeta_{m0}{}^з$*:

$$\zeta_{m0}{}^з = \frac{0{,}45}{\lg\left(Re^з\right)^{2{,}58}} = \frac{0{,}45}{\lg\left(1{,}20 \cdot 10^9\right)^{2{,}58}} \approx 1{,}54 \cdot 10^{-3}.$$

*Коэффициент надбавки на шероховатость корпуса судна на заданном режиме, $\Delta\zeta_m{}^з$*:

$\Delta\zeta_m{}^з = 0{,}50 \cdot 10^{-3}$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Коэффициент сопротивления трения судна на заданном режиме*, $\zeta_m^{\,3}$:

$$\zeta_m^{\,3} = \zeta_{m0}^{\,3} + \Delta\zeta_m^{\,3} = 1{,}54 \cdot 10^{-3} + 0{,}50 \cdot 10^{-3} \approx 2{,}04 \cdot 10^{-3}.$$

*Вспомогательный коэффициент*, $k_c$:

$k_c = 1{,}36$ – принимается из таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Значения вспомогательного коэффициента $k_c$

| Отношение $L/T$ | Коэффициент полноты водоизмещения δ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 |
| 20 | 1,1970 | 1,2460 | 1,3060 | 1,3850 |
| 30 | 1,1700 | 1,2200 | 1,2780 | 1,3540 |
| 40 | 1,1390 | 1,1850 | 1,2410 | 1,3110 |
| 50 | 1,0960 | 1,1370 | 1,1870 | 1,2560 |
| 60 | 1,0460 | 1,0810 | 1,1240 | 1,1850 |

*Коэффициент вязкостного сопротивления эквивалентной гладкой пластины на заданном режиме*, $\zeta_{c0}^{\,3}$:

$$\zeta_{c0}^{\,3} = k_c \cdot \zeta_m^{\,3} = 1{,}36 \cdot 2{,}04 \cdot 10^{-3} \approx 2{,}78 \cdot 10^{-3}.$$

*Коэффициент надбавки на выступающие части корпуса судна на заданном режиме*, $\Delta\zeta_c^{\,3}$:

$\Delta\zeta_c^{\,3} = 1{,}00 \cdot 10^{-4}$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Коэффициент вязкостного сопротивления судна на заданном режиме*, $\zeta_c^{\,3}$:

$$\zeta_c^{\,3} = \zeta_{c0}^{\,3} + \Delta\zeta_c^{\,3} = 2{,}78 \cdot 10^{-3} + 1{,}00 \cdot 10^{-4} \approx 2{,}88 \cdot 10^{-3}.$$

*Число Фруда на заданном режиме*, $Fr^3$:

$$Fr^3 = \frac{V^3}{\sqrt{g \cdot L}} = \frac{7{,}87}{\sqrt{9{,}83 \cdot 174{,}00}} \approx 0{,}19.$$

Здесь *число Фруда* – величина, характеризующая условия волнообразования вокруг корпуса судна.

*Вспомогательный коэффициент*, $k_в$:

$k_в = 1{,}29$ – принимается из таблицы 3.2.

Таблица 3.2 – Значения вспомогательного коэффициента $k_в$

| Отношение $B/T$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1,3380 | 1,1880 | 1,0750 | 1,0000 | 0,9440 | 0,9060 |

*Коэффициент волнового сопротивления эквивалентной гладкой пластины на заданном режиме*, $\zeta_{в0}^{\,3}$:

$\zeta_{в0}^{\,3} = 0{,}81$ – принимается из таблицы 3.3.

Таблица 3.3 – Значения коэффициента волнового сопротивления $\zeta_{в0}^{з}$

| Число Фруда *Fr* | Коэффициент полноты водоизмещения δ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,50 | 0,60 | 0,66 | 0,70 | 0,76 | 0,80 |
| 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,03 |
| 0,14 | 0,02 | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,23 | 0,34 |
| 0,18 | 0,12 | 0,22 | 0,30 | 0,38 | 0,56 | 0,75 |
| 0,22 | 0,32 | 0,46 | 0,58 | 0,70 | 0,96 | 1,24 |
| 0,26 | 0,66 | 0,86 | 1,02 | 1,17 | 1,59 | 2,14 |
| 0,30 | 1,21 | 1,46 | 1,70 | 1,96 | 2,80 | 3,14 |

*Коэффициент надбавки на форму обводов корпуса судна на заданном режиме*, $\Delta\zeta_{в0}^{з}$:

$\Delta\zeta_{в0}^{з} = 0{,}16$ – принимается из таблицы 3.4.

Таблица 3.4 – Значения коэффициента надбавки $\Delta\zeta_{в0}^{з}$

| Число Фруда *Fr* | Отношение *L*/*B* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,14 | 0,11 | 0,04 | 0,00 | -0,03 | -0,05 | -0,06 |
| 0,18 | 0,22 | 0,09 | 0,00 | -0,06 | -0,11 | -0,12 |
| 0,22 | 0,33 | 0,14 | 0,00 | -0,10 | -0,17 | -0,20 |
| 0,26 | 0,42 | 0,18 | 0,00 | -0,14 | -0,24 | -0,29 |
| 0,30 | 0,53 | 0,25 | 0,00 | -0,20 | -0,34 | -0,42 |

*Коэффициент волнового сопротивления судна на заданном режиме*, $\zeta_{в}^{з}$:

$$\zeta_{в}^{з} = k_{в} \cdot \left(\zeta_{в0}^{з} + \Delta\zeta_{в}^{з}\right) \cdot 10^{-3} = 1{,}29 \cdot (0{,}81 + 0{,}16) \cdot 10^{-3} \approx 1{,}26 \cdot 10^{-3}.$$

*Полный коэффициент сопротивления судна на заданном режиме*, $\zeta^{з}$:

$$\zeta^{з} = \zeta_{с}^{з} + \zeta_{в}^{з} = 2{,}88 \cdot 10^{-3} + 1{,}26 \cdot 10^{-3} \approx 4{,}14 \cdot 10^{-3}.$$

*Плотность забортной воды*, $\rho$:

$\rho = 1\,024{,}00\ кг/м^3$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Сопротивление забортной воды движению судна на заданном режиме*, $Q^{з}$:

$$Q^{з} = \zeta^{з} \cdot \frac{\rho \cdot \left(V^{з}\right)^2}{2} \cdot A = 4{,}14 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1\,024{,}00 \cdot (7{,}87)^2}{2} \cdot 7\,419{,}78 \approx$$
$$\approx 975\,665{,}22\ Н.$$

$\left[Q^{з}\right]_1 = 975\,665{,}22\ Н$, $\left[Q^{з}\right]_2 = 1\,670\,217{,}01\ Н$,

$$\left[Q^{з}\right]_3 = 2\,170\,073{,}71\,H, \qquad \left[Q^{з}\right]_5 = 2\,918\,128{,}06\,H,$$
$$\left[Q^{з}\right]_4 = 2\,254\,201{,}36\,H, \qquad \left[Q^{з}\right]_6 = 3\,111\,936{,}17\,H.$$

### 3.1.2. Расчет упора гребного винта

*Коэффициент учета влияния волнообразования на скорость движения судна на заданном режиме*, $\Delta\psi^{з}$:

$$\Delta\psi^{з} = \begin{cases} если\ \ Fr > 0{,}20,\ \ то\ \ 0{,}30\cdot\delta\cdot\left(Fr - 0{,}20\right) \\ \qquad если\ \ Fr \le 0{,}20,\ \ то\ \ 0{,}00 \end{cases} \approx 0{,}00.$$

*Коэффициент учета влияния попутного потока на скорость движения судна на заданном режиме*, $\psi^{з}$:

$$\psi^{з} = 0{,}11 + 0{,}16\cdot\delta\cdot\sqrt{\frac{\sqrt[3]{W}}{2\cdot R}} - \Delta\Psi^{з} =$$

$$= 0{,}11 + 0{,}16\cdot 0{,}73\cdot\sqrt{\frac{\sqrt[3]{44\ 938{,}00}}{2\cdot 2{,}40}} - 0{,}00 \approx 0{,}43.$$

*Коэффициент засасывания на заданном режиме*, $t^{з}$:

$$t^{з} = 0{,}60\cdot\psi^{з}\cdot\left(1 + 0{,}67\cdot\psi^{з}\right) = 0{,}60\cdot 0{,}43\cdot\left(1 + 0{,}67\cdot 0{,}43\right) \approx 0{,}33.$$

*Упор гребного винта на заданном режиме*, $P^{з}$:

$$\boxed{P^{з} = \frac{Q^{з}}{x\cdot\left(1 - t^{з}\right)} = \frac{975\,665{,}22}{1{,}00\cdot\left(1 - 0{,}33\right)} \approx 1\,456\,158{,}01\,H.}$$

$$\left[P^{з}\right]_1 = 1\,456\,158{,}01\,H, \qquad \left[P^{з}\right]_4 = 3\,505\,025{,}73\,H,$$
$$\left[P^{з}\right]_2 = 2\,643\,053{,}92\,H, \qquad \left[P^{з}\right]_5 = 4\,399\,681{,}10\,H,$$
$$\left[P^{з}\right]_3 = 3\,506\,561{,}51\,H, \qquad \left[P^{з}\right]_6 = 4\,868\,055{,}70\,H.$$

### 3.1.3. Построение зависимостей

*Коэффициент упора гребного винта на заданном режиме*, $k^{з}$:

$$k^{з} = R\cdot V^{з}\cdot\left(1 - \psi^{з}\right)\cdot 2\cdot\sqrt{\frac{\rho}{P^{з}}} =$$

$$= 2{,}40\cdot 7{,}87\cdot\left(1 - 0{,}43\right)\cdot 2\cdot\sqrt{\frac{1\,024{,}00}{1\,456\,158{,}01}} \approx 0{,}57.$$

*Коэффициент увеличения нагрузки на лопасть гребного винта*, $m$:

$m = 1{,}15$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Коэффициент прочности материала лопасти гребного винта*, $a$:

$a = 0{,}10$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Предельное значение нагрузки на лопасть гребного винта*, $\sigma$:

$\sigma = 31\,000{,}00\ Па$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Дисковое отношение гребного винта* (*условие прочности*), $\theta_1$:

$$\theta_1 \geq \frac{m \cdot P^з \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot R^2 \cdot \sigma} = \frac{1{,}15 \cdot 1\,456\,158{,}01 \cdot 10^{-3}}{3{,}14 \cdot 2{,}40 \cdot 31\,000{,}00} \approx 0{,}0030.$$

*Дисковое отношение гребного винта* (*условие толщины лопасти*), $\theta_2$:

$$\theta_2 \geq 0{,}38 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{a \cdot z}{0{,}18 \cdot R}\right)^2 \cdot \frac{m \cdot P^з \cdot 10^{-3}}{100\,000}} =$$

$$= 0{,}38 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{0{,}10 \cdot 4{,}00}{0{,}18 \cdot 2{,}40}\right)^2 \cdot \frac{1{,}15 \cdot 1\,456\,158{,}01 \cdot 10^{-3}}{100\,000}} \approx 0{,}0911.$$

*Дисковое отношение гребного винта* (*условие отсутствия кавитации*), $\theta_3$:

$$\theta_3 \geq \frac{(1{,}50 + 0{,}35 \cdot z) \cdot P^з \cdot 10^{-3}}{4 \cdot (101\,300 + \rho \cdot g \cdot (T - R - 0{,}10) - 1\,700) \cdot R^2} + \frac{0{,}20}{x} =$$

$$\frac{(1{,}50 + 0{,}35 \cdot 4{,}00) \cdot 1\,456\,158{,}01 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot (101\,300 + 1\,024{,}00 \cdot 9{,}83 \cdot (11{,}00 - 2{,}40 - 0{,}10) - 1\,700) \cdot 2{,}40^2} + \frac{0{,}20}{1{,}00} \approx 0{,}2010.$$

*Дисковое отношение гребного винта*, $\theta$:

$$\theta = \max(\theta_1; \theta_2; \theta_3) = \max(0{,}0030; 0{,}0911, 0{,}2010) \approx 0{,}2010.$$

*Вспомогательные коэффициенты*, $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$:

$C_1 = -0{,}0047$ – принимается из таблицы 3.5,

$C_2 = 0{,}0609$ – принимается из таблицы 3.5,

$C_3 = -0{,}0124$ – принимается из таблицы 3.5,

$C_4 = 0{,}0030$ – принимается из таблицы 3.5.

Таблица 3.5 – Значения вспомогательных коэффициентов $C_1$, $C_2$, $C_3$, $C_4$

| Дисковое отношение $\theta$ | Коэффициент $C_1$ | Коэффициент $C_2$ | Коэффициент $C_3$ | Коэффициент $C_4$ |
|---|---|---|---|---|
| 0,40 | -0,0033 | 0,0561 | -0,0081 | 0,0016 |
| 0,55 | -0,0027 | 0,0588 | -0,0076 | 0,0004 |
| 0,70 | -0,0013 | 0,0513 | -0,0027 | -0,0005 |

*Относительная поступь гребного винта на заданном режиме*, $\lambda^з$:

$$\lambda^з = C_1 + C_2 \cdot (k^з)^1 + C_3 \cdot (k^з)^2 + C_4 \cdot (k^з)^3 =$$

$$= -0{,}0047 + 0{,}0609 \cdot (0{,}57)^1 - 0{,}0124 \cdot (0{,}57)^2 + 0{,}0030 \cdot (0{,}57)^3 \approx 0{,}09.$$

*КПД гребного винта на заданном режиме*, $\eta^з$:

$$\lambda^з = C_5 + C_6 \cdot (k^з)^1 + C_7 \cdot (k^з)^2 + C_8 \cdot (k^з)^3 =$$

$$= 0{,}0661 + 0{,}7821 \cdot (0{,}57)^1 - 0{,}3189 \cdot (0{,}57)^2 + 0{,}0497 \cdot (0{,}57)^3 \approx 0{,}88.$$

*Вспомогательные коэффициенты*, $C_5$, $C_6$, $C_7$, $C_8$:

$C_5 = 0{,}0661$ – принимается из таблицы 3.6,

$$C_6 = 0{,}7821 \text{ – принимается из таблицы 3.6,}$$
$$C_7 = -0{,}3189 \text{ – принимается из таблицы 3.6,}$$
$$C_8 = 0{,}0497 \text{ – принимается из таблицы 3.6.}$$

Таблица 3.6 – Значения вспомогательных коэффициентов $C_5$, $C_6$, $C_7$, $C_8$

| Дисковое отношение $\theta$ | Коэффициент $C_5$ | Коэффициент $C_6$ | Коэффициент $C_7$ | Коэффициент $C_8$ |
|---|---|---|---|---|
| 0,40 | 0,0475 | 0,7615 | -0,3060 | 0,0470 |
| 0,55 | 0,0090 | 0,7686 | -0,2570 | 0,0301 |
| 0,70 | 0,0097 | 0,7396 | -0,2708 | 0,0371 |

*Частота вращения гребного винта на заданном режиме*, $n^з$:

$$n^з = \frac{15 \cdot V^з \cdot \left(1 - \psi^з\right)}{\pi \cdot \lambda^з \cdot R} \approx \frac{15 \cdot 7{,}87 \cdot \left(1 - 0{,}43\right)}{3{,}14 \cdot 0{,}09 \cdot 2{,}40} \approx 104{,}41\, об/мин.$$

$$\left[n^з\right]_1 = 104{,}41\, об/мин, \qquad \left[n^з\right]_4 = 69{,}41\, об/мин,$$
$$\left[n^з\right]_2 = 94{,}28\, об/мин, \qquad \left[n^з\right]_5 = 74{,}67\, об/мин,$$
$$\left[n^з\right]_3 = 81{,}89\, об/мин, \qquad \left[n^з\right]_6 = 75{,}09\, об/мин.$$

*Мощность, подведенная к гребному винту на заданном режиме*, $N^{ГВ}$:

$$N^{ГВ} = \frac{P^з \cdot V^з \cdot \left(1 - \psi^з\right)}{\eta^з} \approx \frac{1\,456\,158{,}01 \cdot 7{,}87 \cdot \left(1 - 0{,}43\right)}{0{,}88 \cdot 1\,000} \approx 7\,430{,}23\, кВт.$$

*Мощность, снятая с главного двигателя на заданном режиме*, $N^{ГД}$:

$$N^{ГД} = \frac{N^{ГВ}}{\eta_{мех}} \approx \frac{7430{,}23}{0{,}94} \approx 7739{,}82\, кВт.$$

$$\left[N^{ГД}\right]_1 = 7\,739{,}23\, кВт, \qquad \left[N^{ГД}\right]_4 = 20\,144{,}51\, кВт,$$
$$\left[N^{ГД}\right]_2 = 14\,018{,}78\, кВт, \qquad \left[N^{ГД}\right]_5 = 24\,086{,}91\, кВт,$$
$$\left[N^{ГД}\right]_3 = 16\,332{,}17\, кВт, \qquad \left[N^{ГД}\right]_6 = 24\,939{,}12\, кВт.$$

По результатам проведенных вычислений строится *ходовая характеристика* (рисунок 3.7) – зависимость скорости хода судна от чистоты вращения главного двигателя, работающего на гребной винт.

### 3.1.4. Использование численных методов

*Для построения ходовой характеристики могут быть использованы современные* **численные методы**, *позволяющие моделировать работу гребного винта в потоке жидкости за корпусом нефтеналивного судна на различных эксплуатационных режимах.*

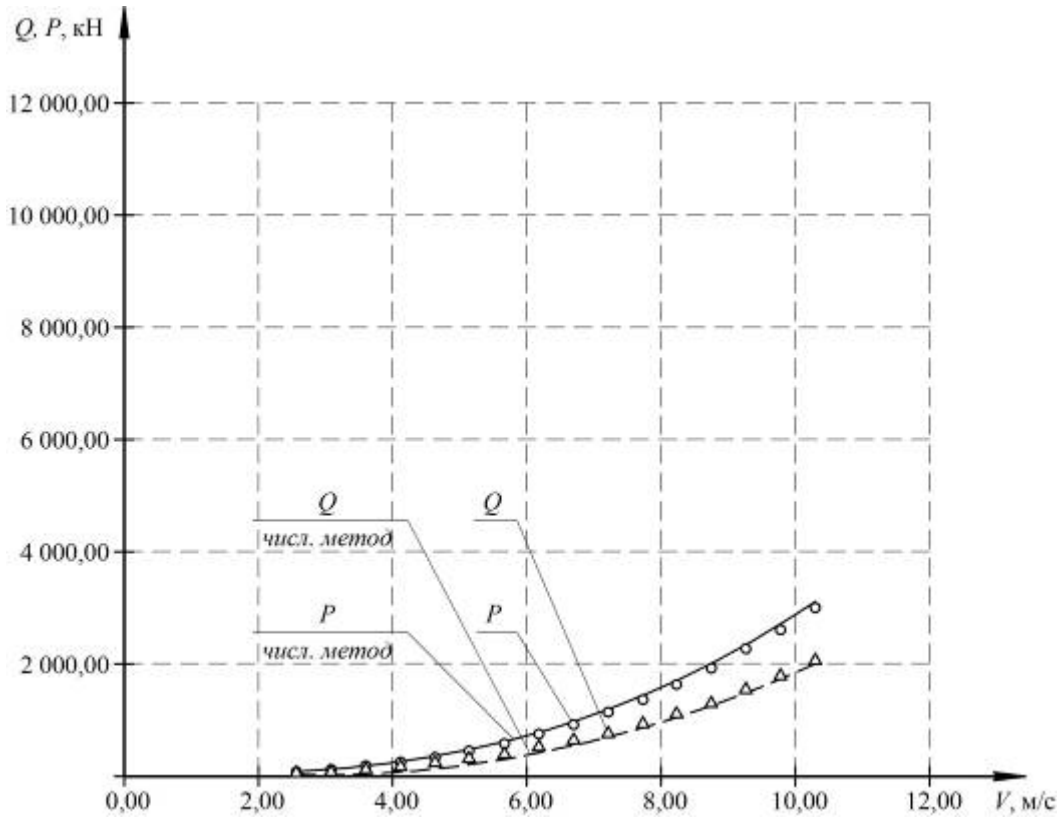



Рисунок 3.1 – Зависимость сопротивления *Q* и упора гребного винта *P* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [1] дедвейтом 40 120 т

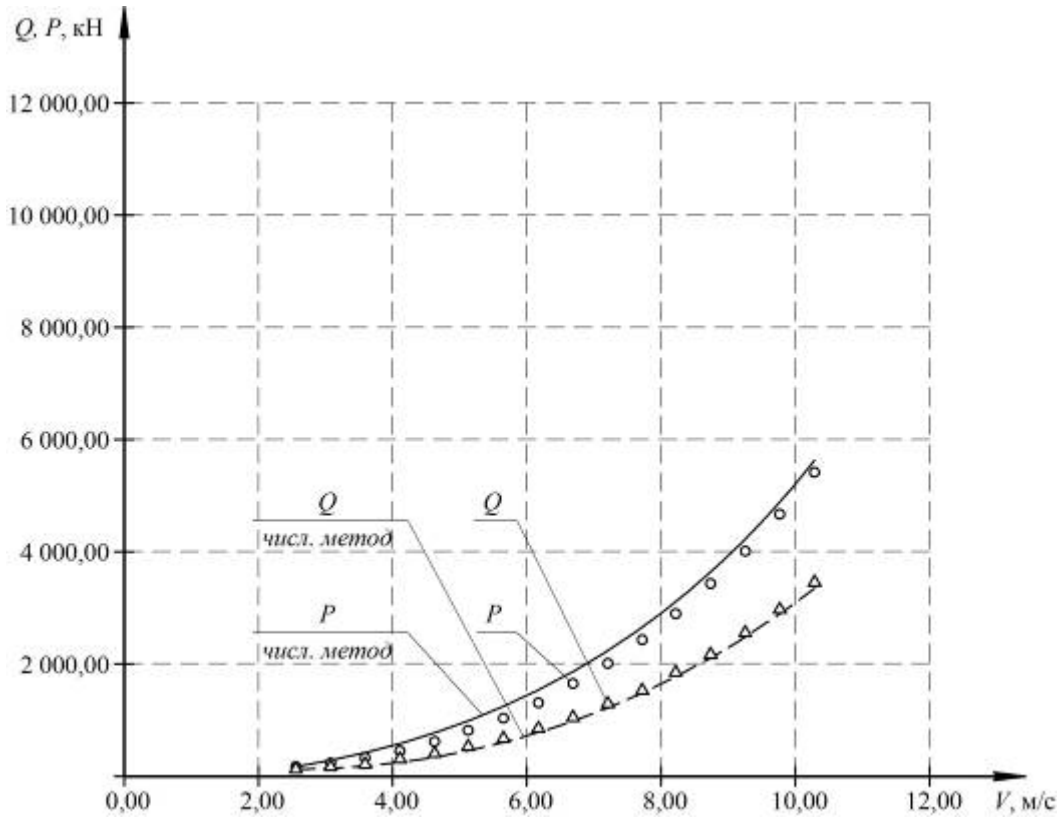



Рисунок 3.2 – Зависимость сопротивления *Q* и упора гребного винта *P* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [2] дедвейтом 94 918 т

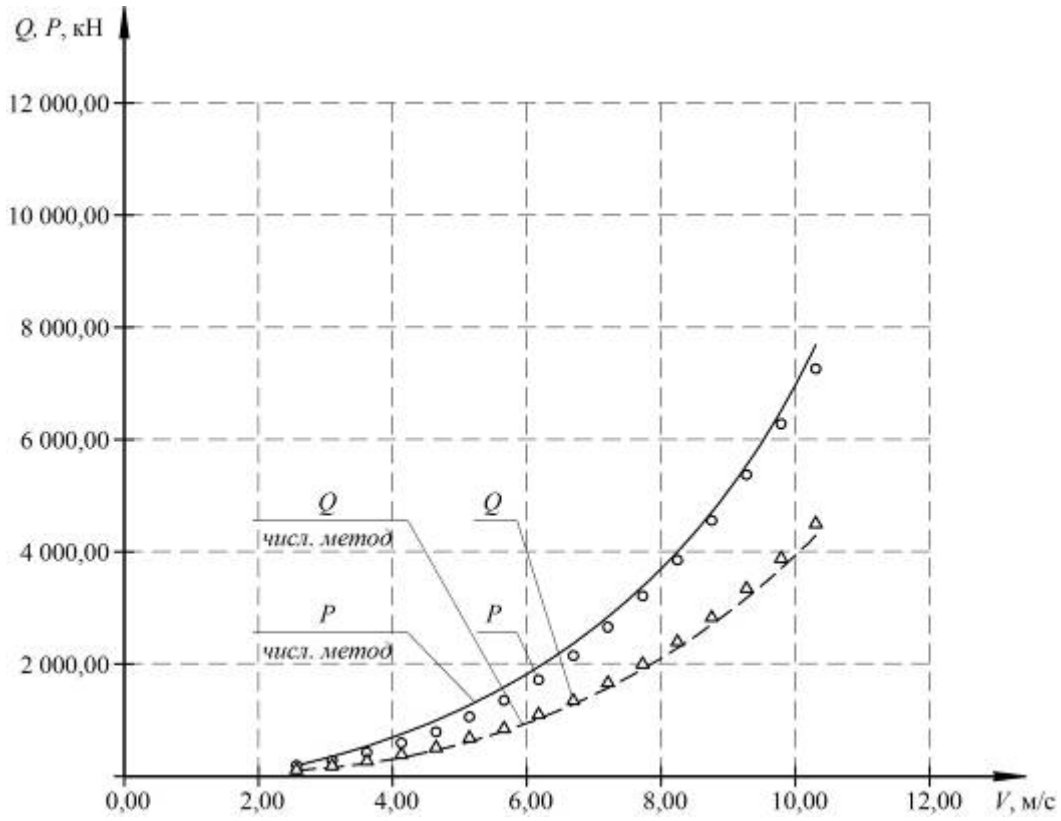



Рисунок 3.3 – Зависимость сопротивления *Q* и упора гребного винта *P* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [3] дедвейтом 152 852 т

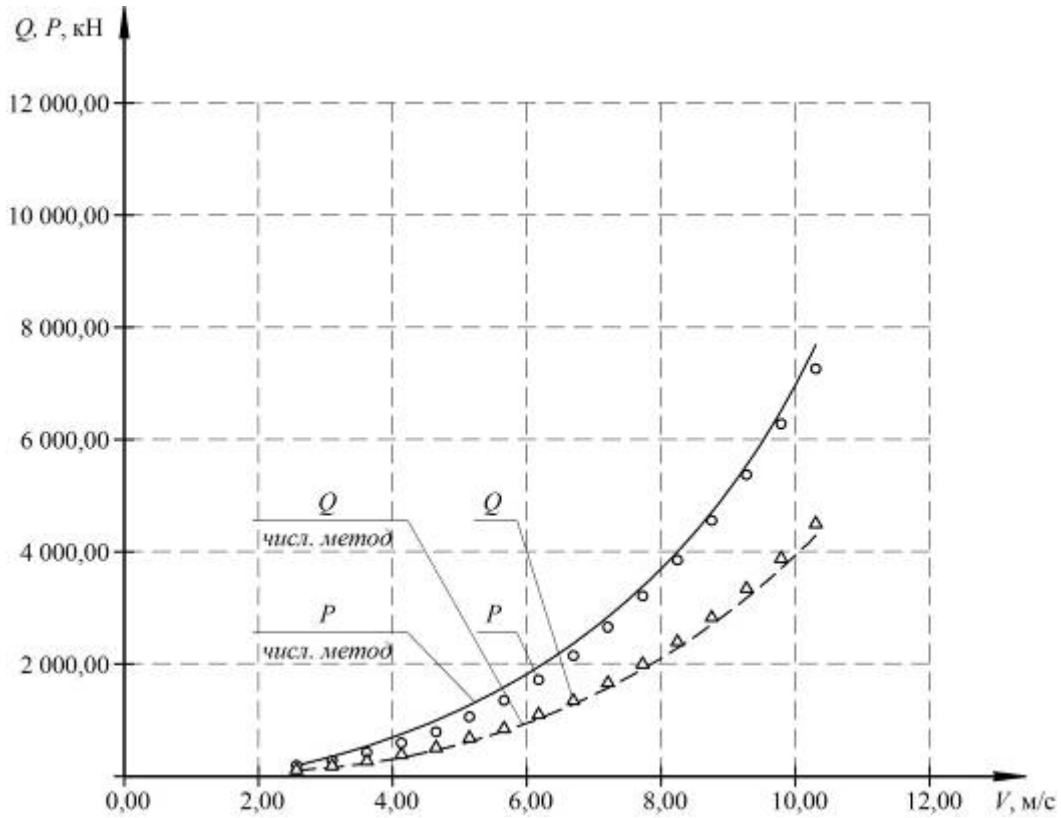



Рисунок 3.4 – Зависимость сопротивления *Q* и упора гребного винта *P* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [4] дедвейтом 185 091 т

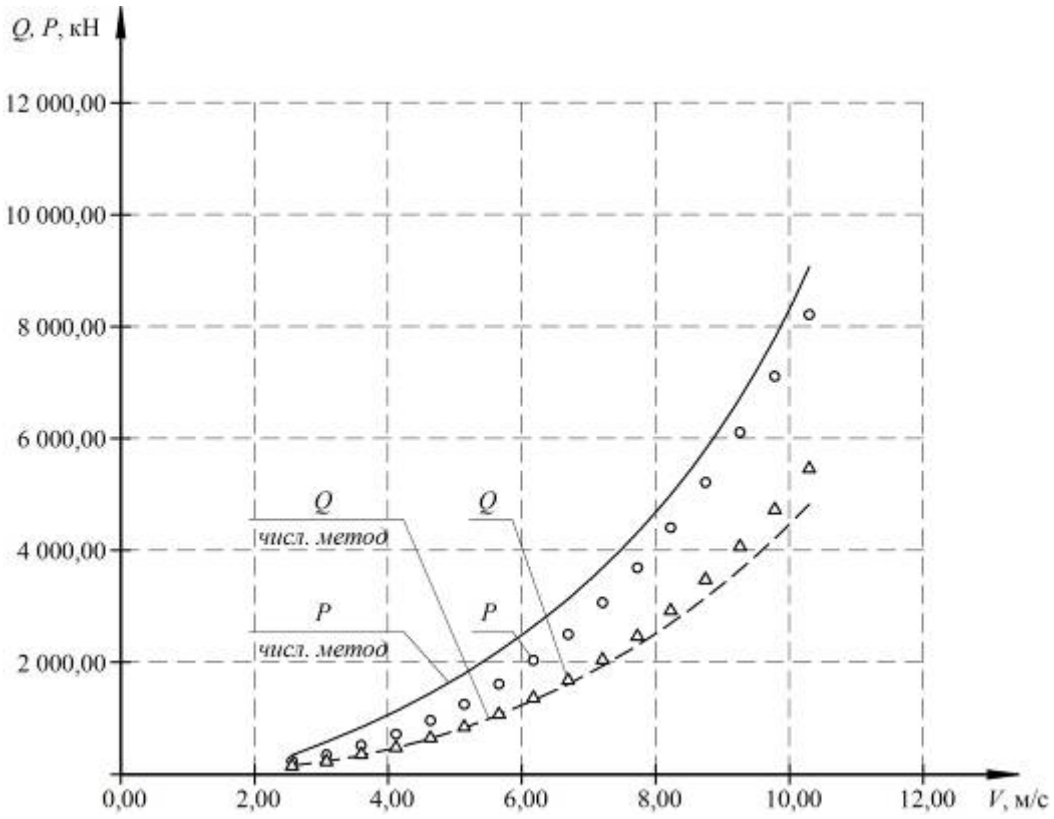



Рисунок 3.5 – Зависимость сопротивления *Q* и упора гребного винта *P* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [5] дедвейтом 259 999 т

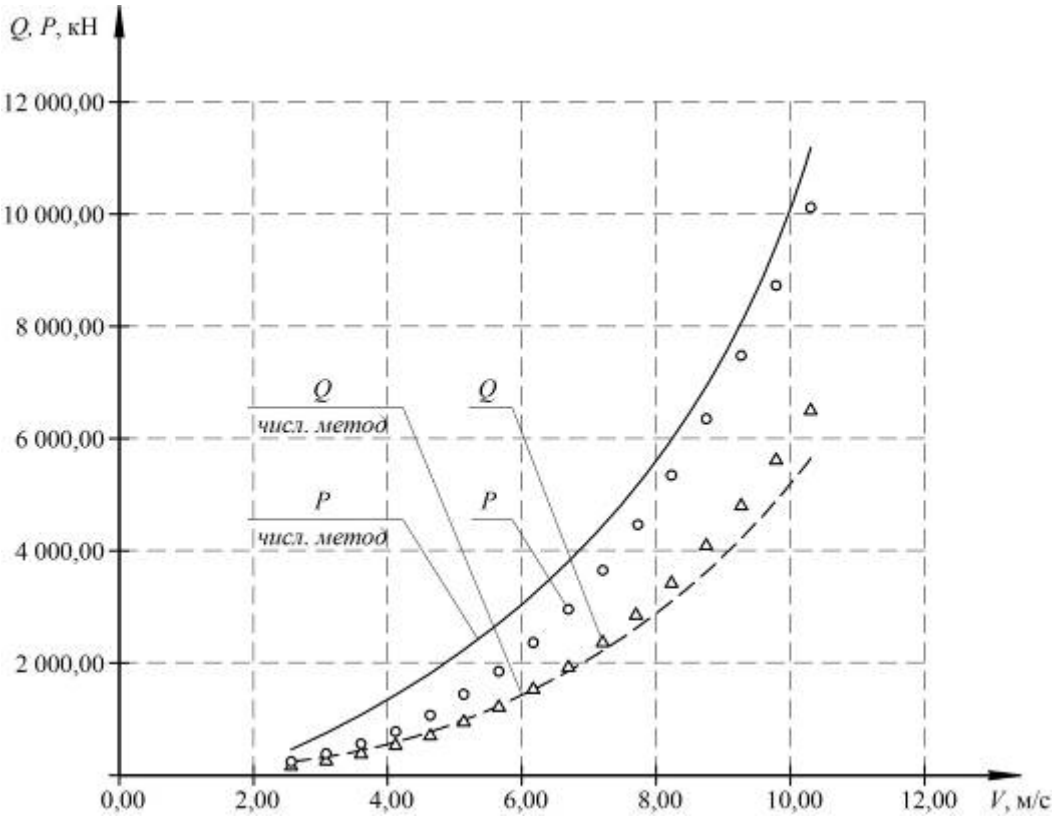



Рисунок 3.6 – Зависимость сопротивления *Q* и упора гребного винта *P* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [6] дедвейтом 317 441 т

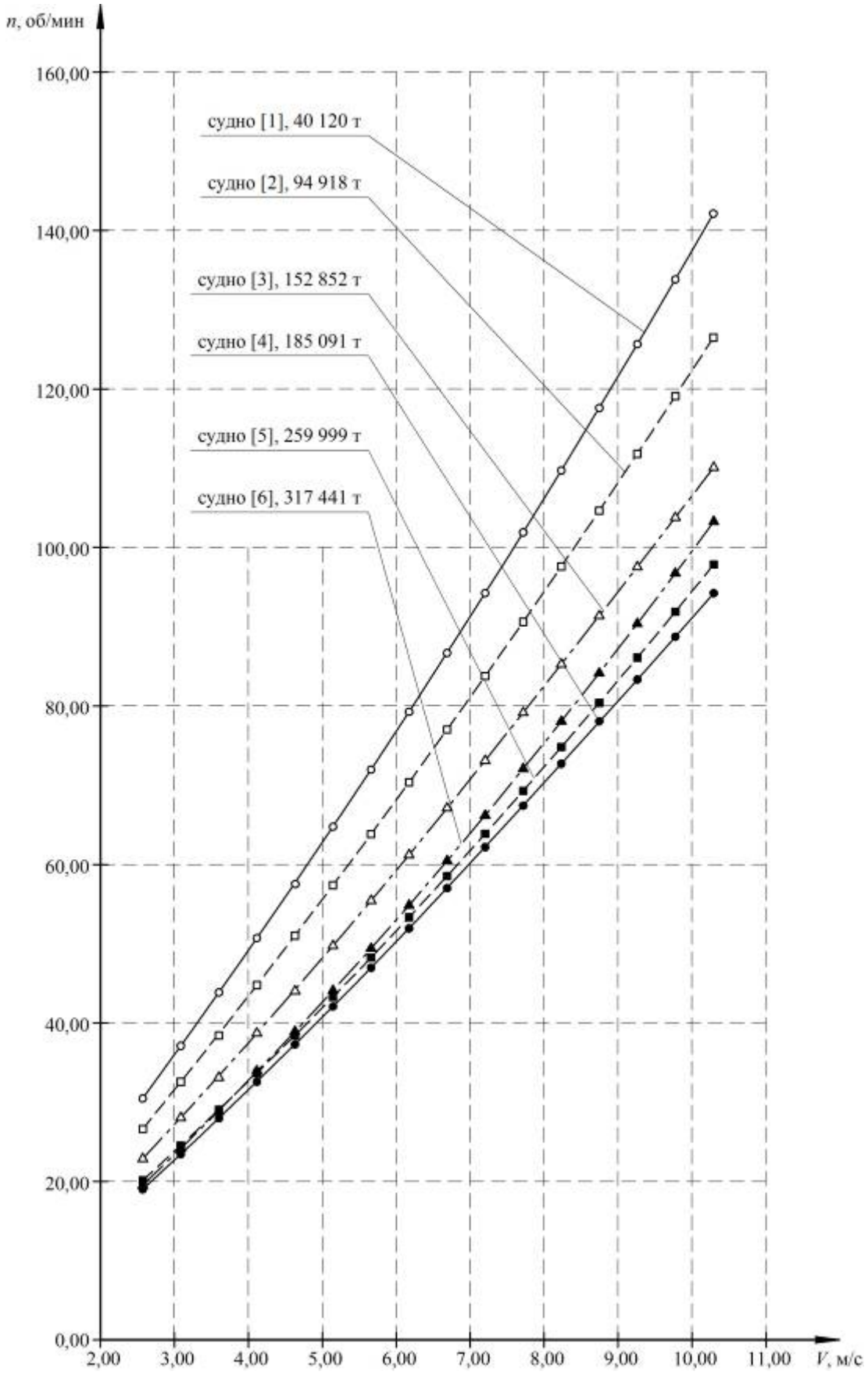



Рисунок 3.7 – Зависимость скорости движения *V* от частоты вращения главного двигателя *n*, работающего на гребной винт для нефтеналивных судов различного дедвейта

*Решение данной прикладной задачи связано с множеством трудностей, проявляющихся в многообразии физических явлений, сопровождающих процесс гидродинамического взаимодействия гребного винта и корпуса*. Несмотря на то, что эти явления имеют различную физическую природу, они глубоко взаимосвязаны и поэтому крайне сложны для точного математического описания. По этой причине методы решения данной задачи, как в отечественной, так и в зарубежной практике до недавнего времени являлись в основном полуэмпирическими, базирующимися на натурном моделировании и приближенных расчетных методиках.

*Появление систем автоматизации проектирования и систем инженерного анализа, реализующих численные методы решения уравнений движения вязкой жидкости, открыло новое направление в подходах к анализу гидродинамического взаимодействия гребного винта и корпуса*. Долгое время это направление не ассоциировалось с возможностью получения практических результатов, как из-за серьезных математических сложностей, так и по причине недостаточной производительности компьютеров. Сегодня эти проблемы успешно решены и ассортимент современных программных комплексов, анализирующих различные аспекты гидродинамики гребного винта и корпуса, на мировом рынке достаточно велик.

*Одним из таких программных комплексов является пакет ANSYS Fluent 6.3*, в котором моделирование обтекания рассматриваемых нефтеналивных судов потоком жидкости осуществляется при помощи алгоритмов, основанных:

- *На системе уравнений Навье-Стокса*:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial t} + \upsilon_x \cdot \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial x} + \upsilon_y \cdot \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial y} + \upsilon_z \cdot \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial z} = F_x - \dfrac{1}{\rho} \cdot \dfrac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \left( \dfrac{\partial^2 \upsilon_x}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 \upsilon_x}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2 \upsilon_x}{\partial z^2} \right) \\ \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial t} + \upsilon_x \cdot \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial x} + \upsilon_y \cdot \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial y} + \upsilon_z \cdot \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial z} = F_y - \dfrac{1}{\rho} \cdot \dfrac{\partial P}{\partial y} + \nu \cdot \left( \dfrac{\partial^2 \upsilon_y}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 \upsilon_y}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2 \upsilon_y}{\partial z^2} \right), \\ \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial t} + \upsilon_x \cdot \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial x} + \upsilon_y \cdot \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial y} + \upsilon_z \cdot \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial z} = F_z - \dfrac{1}{\rho} \cdot \dfrac{\partial P}{\partial z} + \nu \cdot \left( \dfrac{\partial^2 \upsilon_z}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 \upsilon_z}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2 \upsilon_z}{\partial z^2} \right) \end{cases}$$

- *На уравнении неразрывности*:

$$\frac{\partial \upsilon_x}{\partial x} + \frac{\partial \upsilon_y}{\partial y} + \frac{\partial \upsilon_z}{\partial z} = 0,$$

где $\upsilon_x$, $\upsilon_y$, $\upsilon_z$ – проекции скорости частицы жидкости на координатные оси $X$, $Y$, $Z$; $F_x$, $F_y$, $F_z$ – проекции равнодействующей всех объемных сил, действующих на частицу жидкости, на координатные оси $X$, $Y$, $Z$; $\rho$ – плотность жидкости; $P$ – гидростатическое давление в данной точке жидкости; $\nu$ – кинематическая вязкость жидкости.

*Кинематическая вязкость жидкости может быть найдена из выражения*:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho},$$

где $\mu$ – динамическая вязкость жидкости.

*Совместное использование системы уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности дает возможность получить замкнутую систему уравнений*, результатом решения которой являются значения проекций скоростей потока $\upsilon_x$, $\upsilon_y$, $\upsilon_z$, а также величин гидростатического давления для любой, произвольно взятой точки жидкости.

*Для моделирования турбулентного течения система уравнений Навье-Стокса, а также уравнение неразрывности могут быть усреднены по методу Рейнольдса*, сущность которого заключается в замене истинных значений параметров движения вязкой жидкости их осредненными значениями.

*В результате проведения вышеописанных математических операций система уравнений Навье-Стокса может быть преобразована к виду*:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial t} + \upsilon_x \cdot \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial x} + \upsilon_y \cdot \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial y} + \upsilon_z \cdot \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial z} = F_x - \dfrac{1}{\rho} \cdot \dfrac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \nabla^2 \upsilon_x - \tau_{Rx} \\ \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial t} + \upsilon_x \cdot \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial x} + \upsilon_y \cdot \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial y} + \upsilon_z \cdot \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial z} = F_y - \dfrac{1}{\rho} \cdot \dfrac{\partial P}{\partial y} + \nu \cdot \nabla^2 \upsilon_y - \tau_{Ry} \\ \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial t} + \upsilon_x \cdot \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial x} + \upsilon_y \cdot \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial y} + \upsilon_z \cdot \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial z} = F_z - \dfrac{1}{\rho} \cdot \dfrac{\partial P}{\partial z} + \nu \cdot \nabla^2 \upsilon_z - \tau_{Rz}, \end{cases}$$

где $\tau_{Rx}$, $\tau_{Ry}$, $\tau_{Rz}$ – напряжения Рейнольдса определяемые из выражения:

$$\begin{cases} \tau_{Rx} = \dfrac{\partial\left(\upsilon_x^2\right)}{\partial x} + \dfrac{\partial\left(\upsilon_y \cdot \upsilon_x\right)}{\partial y} + \dfrac{\partial\left(\upsilon_z \cdot \upsilon_x\right)}{\partial z} \\ \tau_{Ry} = \dfrac{\partial\left(\upsilon_x \cdot \upsilon_y\right)}{\partial x} + \dfrac{\partial\left(\upsilon_y^2\right)}{\partial y} + \dfrac{\partial\left(\upsilon_z \cdot \upsilon_y\right)}{\partial z}. \\ \tau_{Rz} = \dfrac{\partial\left(\upsilon_x \cdot \upsilon_z\right)}{\partial x} + \dfrac{\partial\left(\upsilon_y \cdot \upsilon_z\right)}{\partial y} + \dfrac{\partial\left(\upsilon_z^2\right)}{\partial z} \end{cases}$$

*Появление напряжений Рейнольдса в системе уравнений Навье-Стокса продиктовано тем, что между разными участками турбулентного потока происходит обмен количеством движения, обусловленный перемешиванием частиц жидкости.* Перенос количества движения вызывает дополнительное торможение либо ускорение отдельных масс жидкости, т.е. приводит к возникновению турбулентных напряжений.

$$\tau_R = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{3} \cdot \upsilon_x^2 - 2 \cdot \mu_t \cdot \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial x} & -\mu_t \cdot \left( \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial x} + \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial y} \right) & -\mu_t \cdot \left( \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial x} + \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial z} \right) \\ -\mu_t \cdot \left( \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial y} + \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial x} \right) & \dfrac{1}{3} \cdot \upsilon_y^2 - 2 \cdot \mu_t \cdot \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial y} & -\mu_t \cdot \left( \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial y} + \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial z} \right) \\ -\mu_t \cdot \left( \dfrac{\partial \upsilon_x}{\partial z} + \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial x} \right) & -\mu_t \cdot \left( \dfrac{\partial \upsilon_y}{\partial z} + \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial y} \right) & \dfrac{1}{3} \cdot \upsilon_z^2 - 2 \cdot \mu_t \cdot \dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial z} \end{pmatrix},$$

*Согласно формуле Буссинеска значения напряжений Рейнольдса могут быть представлены в виде вышеприведенного тензора*.

*Для замыкания системы уравнений*, состоящей из модифицированной системы уравнений Навье-Стокса, уравнения неразрывности, а также ранее приведенного тензора, может быть использовано уравнение переноса кинетической энергии и ее диссипации в рамках *двухпараметрической k-ε модели турбулентности*.

*В соответствии с данной моделью турбулентная вязкость жидкости может быть определена через соотношение*:

$$\mu_t = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon},$$

где $k$ – кинетическая энергия пульсации скорости потока в данной точке жидкости; $\varepsilon$ – скорость диссипации энергии пульсаций в данной точке жидкости; $C_\mu$ – эмпирическая константа модели (таблица 3.7).

*Кинетическая энергия пульсации скорости потока в данной точке жидкости определяется на основе уравнения*:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(\upsilon \cdot k) = \frac{1}{\rho} \cdot \nabla((\mu + \frac{\mu_t}{\xi_k}) \cdot \nabla k) + \frac{S}{\rho} - \varepsilon,$$

где $\xi_k$ – эмпирическая константа модели (таблица 3.7).

*Скорость диссипации энергии пульсаций в данной точке жидкости определяется на основе уравнения*:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\upsilon \cdot \varepsilon) = \frac{1}{\rho} \cdot \nabla((\mu + \frac{\mu_t}{\xi_\varepsilon}) \cdot \nabla k) + \frac{\varepsilon}{k} \cdot \left( C_1 \cdot \frac{S}{\rho} - C_2 \cdot \varepsilon \right),$$

где $C_1$, $C_2$, $\xi_\varepsilon$ – эмпирические константы модели (таблица 3.7).

*Вспомогательная функция S определяется на основе уравнения*:

$$S = \mu_t \cdot \frac{\partial \upsilon_i}{\partial x_j} \cdot \left( \frac{\partial \upsilon_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \upsilon_j}{\partial x_i} \right).$$

Таблица 3.7 – Значения коэффициентов *k-ε* модели турбулентности

| Коэффициент $\xi_k$ | Коэффициент $\xi_\varepsilon$ | Коэффициент $C_\mu$ | Коэффициент $C_1$ | Коэффициент $C_2$ |
|---|---|---|---|---|
| 1,00 | 1,30 | 0,09 | 1,44 | 1,92 |

*Совокупность вышеприведенных выражений формирует* **замкнутую математическую модель**, *позволяющую рассчитать, как это уже было сказано ранее, значения проекций скоростей потока, а также величин гидростатического давления для любой, произвольно взятой точки жидкости*.

*Для привязки математической модели к конкретной* **физической (инженерной) задаче** *взаимодействия гребного винта и корпуса судна, должна быть определена расчетная область – область пространства, в которой непосредственно решается задача, а также заданы начальные и граничные условия*.

*Начальные условия* – значения физических параметров жидкости в расчетной области в начальный момент времени. Необходимость задания начальных условий вытекает из нестационарного характера системы уравнений Навье-Стокса.

*Граничные условия* – значения физических параметров жидкости на границах расчетной области. Фактически, граничные условия определяют связь физических процессов в расчетной области с физическими процессами вне ее.

*Расчетная область* – заполненная жидкостью область пространства, ограничена плоскостями расчетной сетки, параллельными координатным плоскостям и поверхностями корпуса судна, лежащими в жидкости. Граничные условия, заданные на внешних границах расчетной области, не обязательно точно выполняются в процессе решения задачи. Например, в процессе моделирования обтекания корпуса судна на всех внешних границах расчетной области задаются параметры невозмущенного набегающего потока. Однако все возмущения, образовавшиеся в расчетной области в результате обтекания корпуса (волны разрежения-сжатия), свободно пересекают внешние границы, т. е. выходят из расчетной области. Естественно на этих участках границы расчетной области параметры потока отличаются от заданных граничных условий. Условия, заданные на поверхностях корпуса судна при решении задачи выполняются точно.

*Для нахождения искомого* **численного решения** *задачи* (рисунки 3.8, 3.9) *взаимодействия гребного винта и корпуса судна непрерывная нестационарная математическая модель,* **дискретизируется** *как по пространству, так и по времени*.

*Дискретизация по пространству заключается в том, что вся расчетная область покрывается* **расчетной сеткой***, состоящей из тетраэдрических расчетных ячеек, соединенных друг с другом в узловых точках.* Сущность дискретизации по пространству заключается в том, что значения физических переменных, определяющих поток жидкости, рассчитываются и хранятся только в центрах расчетных ячеек, а на гранях этих ячеек рассчитываются потоки массы, импульса, энергии, необходимые для расчета этих значений.

*Дискретизация по времени заключается в том, что для каждой расчетной ячейки расчетной сетки определяется допустимый максимальный* **шаг по времени***, зависящий как от значений физических переменных, определяющих поток жидкости, так и от шага дискретизации по пространству в этой ячейке*. Далее определяется минимальный из определенных таким образом шагов по времени для всех ячеек расчетной сетки в расчетной области и с этим шагом, одинаковым для всех ячеек, выполняется переход (расчет параметров) к следующему моменту времени.

*В качестве* **критерия***,* **определяющего нахождение решения** *задачи взаимодействия гребного винта и корпуса судна, может быть выбрано установление по времени некоторой* **целевой функции** – *интегральной характеристики рассчитанной для всей совокупности расчетных элементов и слабо зависящей от флуктуации значений искомой величины в одном или нескольких расчетных элементах*.

*В качестве критерия, определяющего достижение необходимой точности решения, может быть использовано установление сеточной сходимости* – уровня дискретизации, при которой решение задачи перестает значимо зависеть от частоты расчетной сетки.

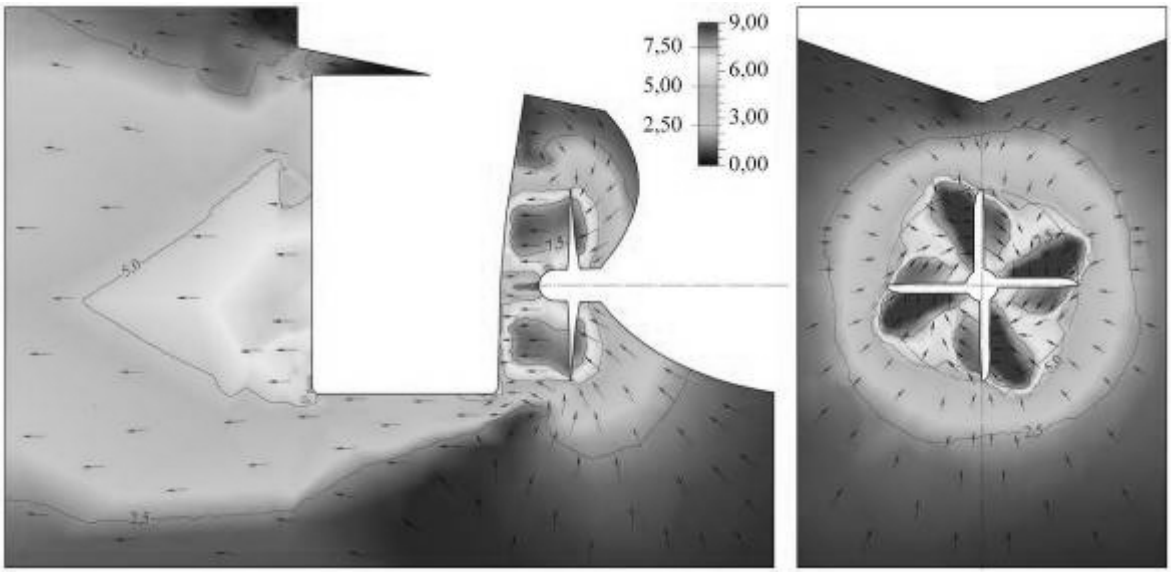



Рисунок 3.8 – Распределение скоростей жидкости (единицы измерения – м/с) за корпусом нефтеналивного судна [1] дедвейтом 40 120 т ($V$ = 0,00 м/с, $n$ = 104,00 об/мин)

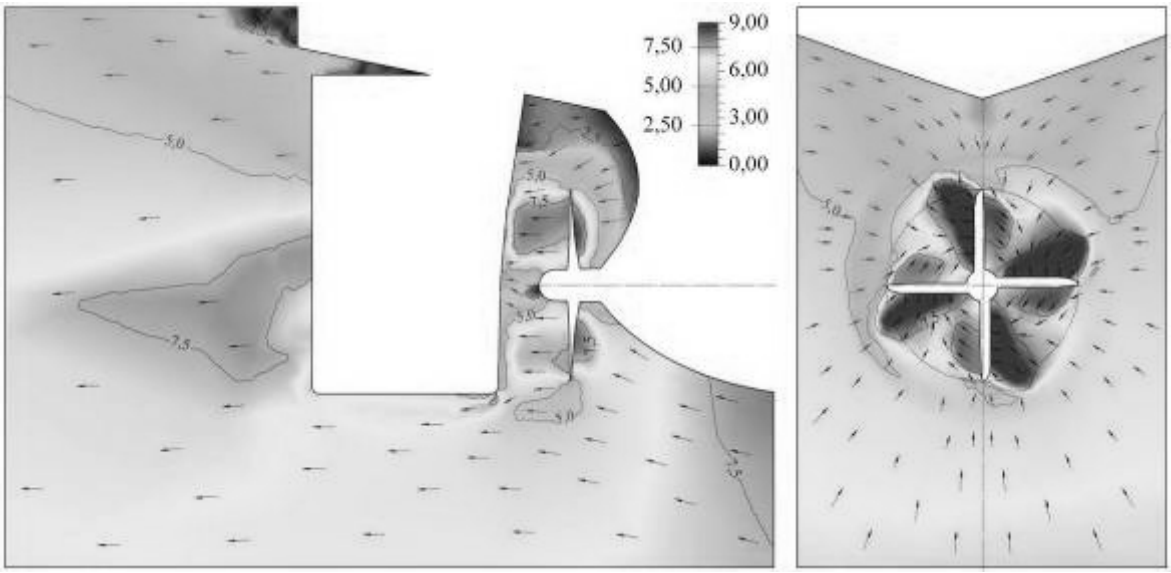



Рисунок 3.9 – Распределение скоростей жидкости (единицы измерения – м/с) за корпусом нефтеналивного судна [1] дедвейтом 40 120 т ($V$ = 7,87 м/с, $n$ = 104,00 об/мин)

*В результате использования численных методов* может быть получена зависимость частоты вращения гребного винта $n$ от скорости хода судна $V$:

$$[n]_1 = 0{,}0002 \cdot ([\mathrm{V}]_1)^4 - 0{,}0080 \cdot ([\mathrm{V}]_1)^3 + 0{,}1856 \cdot ([\mathrm{V}]_1)^2 + 5{,}1486 \cdot ([\mathrm{V}]_1)^1 + 0{,}9028.$$

$$[n]_2 = 0{,}0002\cdot([V]_2)^4 - 0{,}0090\cdot([V]_2)^3 + 0{,}2206\cdot([V]_2)^2 + 4{,}0753\cdot([V]_2)^1 + 1{,}7458.$$
$$[n]_3 = 0{,}00004\cdot([V]_3)^4 - 0{,}0033\cdot([V]_3)^3 + 0{,}1233\cdot([V]_3)^2 + 3{,}9918\cdot([V]_3)^1 + 0{,}2675.$$
$$[n]_4 = 0{,}00004\cdot([V]_4)^4 - 0{,}0029\cdot([V]_4)^3 + 0{,}1124\cdot([V]_4)^2 + 3{,}3132\cdot([V]_4)^1 + 0{,}2772.$$
$$[n]_5 = 0{,}00003\cdot([V]_5)^4 - 0{,}0024\cdot([V]_5)^3 + 0{,}1098\cdot([V]_5)^2 + 3{,}4016\cdot([V]_5)^1 + 0{,}4937.$$
$$[n]_6 = 0{,}00004\cdot([V]_6)^4 - 0{,}0035\cdot([V]_6)^3 + 0{,}1537\cdot([V]_6)^2 + 3{,}1217\cdot([V]_6)^1 + 0{,}4422.$$

## 3.2. Расчет экономических показателей

### 3.2.1. Заявка топлива на рейс

*Расход топлива главным двигателем за рейс на заданном режиме*, $B_m^{ГД}$:

$$B_m^{ГД} = 1{,}15\cdot\frac{2\cdot DST}{24{,}00\cdot V}\cdot G_m^{ГД} = 1{,}15\cdot\frac{2\cdot 6\,385{,}00}{24{,}00\cdot 15{,}30}\cdot 34{,}76 \approx 1\,389{,}53\ т.$$

$$\left[B_m^{ГД}\right]_1 = 1\,389{,}53\ т, \qquad \left[B_m^{ГД}\right]_2 = 2\,715{,}10\ т,$$
$$\left[B_m^{ГД}\right]_3 = 3\,346{,}93\ т, \qquad \left[B_m^{ГД}\right]_5 = 5\,304{,}02\ т,$$
$$\left[B_m^{ГД}\right]_4 = 4\,312{,}85\ т, \qquad \left[B_m^{ГД}\right]_6 = 5\,803{,}78\ т.$$

*Время стоянки с грузовыми операциями*, $t_{ст}'$:

$t_{ст}' = 2{,}00\ сут$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Время стоянки без грузовых операций*, $t_{ст}''$:

$t_{ст}'' = 2{,}00\ сут$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Число работающих дизель-генераторов во время стоянки с грузовыми операциями*, $i^{ДГ}{}'$:

$i^{ДГ}{}' = 2{,}00\ сут$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Число работающих дизель-генераторов во время стоянки без грузовых операций*, $i^{ДГ}{}''$:

$i^{ДГ}{}'' = 2{,}00\ сут$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Расход топлива на дизель-генераторе во время стоянки с грузовыми операциями*, $G_m^{ДГ}{}'$:

$$G_m^{ДГ}{}' = 24{,}00\cdot g^{ДГ}\cdot\frac{1{,}17\cdot N^{ГРЩ} + N_{мех}^{ДГ}\cdot i^{ДГ}{}'}{1\,000} =$$
$$= 24{,}00\cdot 0{,}39\cdot\frac{1{,}17\cdot 352{,}20 + 18{,}54\cdot 2{,}00}{1\,000} \approx 4{,}15\ т/сут.$$

*Расход топлива на дизель-генераторе во время стоянки без грузовых операций*, $G_m^{ДГ}{}''$:

$$G_m^{ДГ}{}'' = 24{,}00\cdot g^{ДГ}\cdot\frac{1{,}17\cdot N^{ГРЩ} + N_{мех}^{ДГ}\cdot i^{ДГ}{}''}{1\,000} =$$

$$= 24{,}00 \cdot 0{,}39 \cdot \frac{1{,}17 \cdot 352{,}20 + 18{,}54 \cdot 1{,}00}{1\,000} \approx 3{,}43\ т/сут.$$

*Расход топлива дизель-генератором за рейс на заданном режиме,* $B_m^{ДГ}$:

$$B_m^{ДГ} = 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} \cdot G_m^{ДГ} + t_{ст}' \cdot G_m^{ДГ}{}' + t_{ст}'' \cdot G_m^{ДГ}{}'' =$$

$$= 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} \cdot 3{,}43 + 2{,}00 \cdot 4{,}15 + 2{,}00 \cdot 3{,}43 \approx 154{,}42\ т.$$

$\left[B_m^{ДГ}\right]_1 = 154{,}42\ т,$ $\left[B_m^{ДГ}\right]_4 = 317{,}55\ т,$

$\left[B_m^{ДГ}\right]_2 = 234{,}32\ т,$ $\left[B_m^{ДГ}\right]_5 = 355{,}13\ т,$

$\left[B_m^{ДГ}\right]_3 = 264{,}36\ т,$ $\left[B_m^{ДГ}\right]_6 = 365{,}89\ т.$

*Мощность вспомогательного котла во время стоянки с грузовыми операциями,* $N^{ВК}{}'$:

$N^{ВК}{}' = 696{,}59\ кВт$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Мощность вспомогательного котла во время стоянки без грузовых операций,* $N^{ВК}{}''$:

$N^{ВК}{}'' = 197{,}37\ кВт$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Расход топлива на вспомогательном котле во время стоянки с грузовыми операциями,* $G_m^{ВК}{}'$:

$$G_m^{ВК}{}' = 24{,}00 \cdot \frac{N^{ВК}{}' \cdot g^{ВК}}{1\,000} = 24{,}00 \cdot \frac{696{,}59 \cdot 0{,}33}{1\,000} \approx 5{,}43\ т/сут.$$

*Расход топлива на вспомогательном котле во время стоянки без грузовых операций,* $G_m^{ВК}{}''$:

$$G_m^{ВК}{}'' = 24{,}00 \cdot \frac{N^{ВК}{}'' \cdot g^{ВК}}{1\,000} = 24{,}00 \cdot \frac{197{,}37 \cdot 0{,}33}{1\,000} \approx 1{,}54\ т/сут.$$

*Расход топлива вспомогательным котлом за рейс на заданном режиме,* $B_m^{ВК}$:

$$B_m^{ВК} = 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} \cdot G_m^{ВК} + t_{ст}' \cdot G_m^{ВК}{}' + t_{ст}'' \cdot G_m^{ВК}{}'' =$$

$$= 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} \cdot 1{,}81 + 2{,}00 \cdot 5{,}43 + 2{,}00 \cdot 1{,}54 \approx 52{,}25\ т.$$

$\left[B_m^{ВК}\right]_1 = 52{,}25 т,$ $\left[B_m^{ВК}\right]_4 = 135{,}98\ т,$

$\left[B_m^{ВК}\right]_2 = 93{,}81\ т,$ $\left[B_m^{ВК}\right]_5 = 157{,}70\ т,$

$\left[B_m^{ВК}\right]_3 = 109{,}26\ т,$ $\left[B_m^{ВК}\right]_6 = 163{,}27\ т.$

*Заявка топлива на рейс,* $B_m$:

$$B_m = B_m^{ГД} + B_m^{ДГ} + B_m^{ВК} = 1\,389{,}53 + 154{,}42 + 52{,}25 \approx 1\,596{,}21\ т.$$

$\left[B_m\right]_1 = 1\,596{,}21\ т,$ $\left[B_m\right]_2 = 3\,043{,}23\ т,$

$\left[B_m\right]_3 = 3\,720{,}55\ т,$ $\left[B_m\right]_5 = 5\,816{,}86\ т,$

$\left[B_m\right]_4 = 4\,766{,}38\ т,$ $\left[B_m\right]_6 = 6\,332{,}94\ т.$

### 3.2.2. Заявка масла на рейс

*Удельный расход цилиндрового масла главным двигателем*, $g_{цил}$:

$g_{цил} = 0{,}60\ г/(кВт \cdot ч)$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Удельный расход циркуляционного масла главным двигателем*, $g_{црк}$:

$g_{црк} = 0{,}04\ т/сут$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Заявка цилиндрового масла на рейс*, $B_{м(цил)}$:

$$B_{м(цил)} = g_{цил} \cdot \frac{2 \cdot DST}{V} \cdot N_e^з = 0{,}60 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{15{,}30} \cdot 7\,739{,}86 \approx 7{,}75\ т.$$

$\left\lfloor B_{м(цил)} \right\rfloor_1 = 7{,}75\ т,$ $\left\lfloor B_{м(цил)} \right\rfloor_4 = 20{,}17\ т,$

$\left\lfloor B_{м(цил)} \right\rfloor_2 = 13{,}86\ т,$ $\left\lfloor B_{м(цил)} \right\rfloor_5 = 23{,}07\ т,$

$\left\lfloor B_{м(цил)} \right\rfloor_3 = 16{,}14\ т,$ $\left\lfloor B_{м(цил)} \right\rfloor_6 = 23{,}89\ т.$

*Заявка циркуляционного масла на рейс*, $B_{м(црк)}$:

$$B_{м(црк)} = g_{црк} \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} = 0{,}04 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} \approx 0{,}90\ т.$$

$\left\lfloor B_{м(црк)} \right\rfloor_1 = 0{,}90\ т,$ $\left\lfloor B_{м(црк)} \right\rfloor_4 = 0{,}90\ т,$

$\left\lfloor B_{м(црк)} \right\rfloor_2 = 0{,}91\ т,$ $\left\lfloor B_{м(црк)} \right\rfloor_5 = 0{,}94\ т,$

$\left\lfloor B_{м(црк)} \right\rfloor_3 = 0{,}91\ т,$ $\left\lfloor B_{м(црк)} \right\rfloor_6 = 0{,}91\ т.$

### 3.2.3. Заявка воды на рейс

*Численность членов экипажа*, $i_{эк}$:

$i_{эк} = 25{,}00\ чел$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Заявка питьевой воды на рейс*, $B_{в(пит)}$:

$$B_{в(пит)} = 60{,}00 \cdot i_{эк} \cdot \left( \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} + t_{ст}' + t_{ст}'' \right) \cdot 1{,}15 =$$

$$60{,}00 \cdot 25{,}00 \cdot \left( \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} + 2{,}00 + 2{,}00 \right) \cdot 1{,}15 \approx 66{,}89\ т.$$

$\left\lfloor B_{в(пит)} \right\rfloor_1 = 66{,}89\ т,$ $\left\lfloor B_{в(пит)} \right\rfloor_4 = 66{,}89\ т,$

$\left\lfloor B_{в(пит)} \right\rfloor_2 = 66{,}12\ т,$ $\left\lfloor B_{в(пит)} \right\rfloor_5 = 64{,}27\ т,$

$\left\lfloor B_{в(пит)} \right\rfloor_3 = 66{,}12\ т,$ $\left\lfloor B_{в(пит)} \right\rfloor_6 = 64{,}27\ т.$

*Заявка мытьевой масла на рейс, $B_{в(мыт)}$:*

$$B_{в(мыт)} = 40{,}00 \cdot i_{эк} \cdot \left( \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} + t_{ст}' + t_{ст}'' \right) \cdot 1{,}15 =$$

$$40{,}00 \cdot 25{,}00 \cdot \left( \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} + 2{,}00 + 2{,}00 \right) \cdot 1{,}15 \approx 44{,}59\ т.$$

$$\lfloor B_{в(мыт)} \rfloor_1 = 44{,}59\ т, \qquad \lfloor B_{в(мыт)} \rfloor_4 = 44{,}59\ т,$$

$$\lfloor B_{в(мыт)} \rfloor_2 = 44{,}08\ т, \qquad \lfloor B_{в(мыт)} \rfloor_5 = 42{,}84\ т,$$

$$\lfloor B_{в(мыт)} \rfloor_3 = 44{,}08\ т, \qquad \lfloor B_{в(мыт)} \rfloor_6 = 42{,}84\ т.$$

## 3.2.4. Годовые доходы и расходы

*На основе ходовой характеристики, полученной в результате использования численных методов, может быть рассчитана частота вращения главного двигателя, n:*

$$n^{12\,уз} = 0{,}0002 \cdot (12{,}00)^4 - 0{,}0080 \cdot (12{,}00)^3 + 0{,}1856 \cdot (12{,}00)^2 +$$
$$+ 5{,}1486 \cdot (12{,}00)^1 + 0{,}9028 \approx 79{,}74\ об/мин,$$

$$n^{13\,уз} = 0{,}0002 \cdot (13{,}00)^4 - 0{,}0080 \cdot (13{,}00)^3 + 0{,}1856 \cdot (13{,}00)^2 +$$
$$+ 5{,}1486 \cdot (13{,}00)^1 + 0{,}9028 \approx 87{,}34\ об/мин,$$

$$n^{14\,уз} = 0{,}0002 \cdot (14{,}00)^4 - 0{,}0080 \cdot (14{,}00)^3 + 0{,}1856 \cdot (14{,}00)^2 +$$
$$+ 5{,}1486 \cdot (14{,}00)^1 + 0{,}9028 \approx 95{,}09\ об/мин,$$

$$n^{15\,уз} = 0{,}0002 \cdot (15{,}00)^4 - 0{,}0080 \cdot (15{,}00)^3 + 0{,}1856 \cdot (15{,}00)^2 +$$
$$+ 5{,}1486 \cdot (15{,}00)^1 + 0{,}9028 \approx 103{,}02\ об/мин,$$

$$n^{16\,уз} = 0{,}0002 \cdot (16{,}00)^4 - 0{,}0080 \cdot (16{,}00)^3 + 0{,}1856 \cdot (16{,}00)^2 +$$
$$+ 5{,}1486 \cdot (16{,}00)^1 + 0{,}9028 \approx 111{,}13\ об/мин,$$

$$n^{17\,уз} = 0{,}0002 \cdot (17{,}00)^4 - 0{,}0080 \cdot (17{,}00)^3 + 0{,}1856 \cdot (17{,}00)^2 +$$
$$+ 5{,}1486 \cdot (17{,}00)^1 + 0{,}9028 \approx 119{,}47\ об/мин.$$

*Эффективная мощность главного двигателя, $N_e$:*

$$N_e^{12\,уз} = N_e^{з} \cdot \left( \frac{n^{12\,уз}}{n^{з}} \right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left( \frac{79{,}74}{104{,}00} \right)^3 \approx 3\,488{,}11\ кВт,$$

$$N_e^{13\,уз} = N_e^{з} \cdot \left( \frac{n^{13\,уз}}{n^{з}} \right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left( \frac{87{,}34}{104{,}00} \right)^3 \approx 4\,583{,}86\ кВт,$$

$$N_e^{14\,уз} = N_e^{з} \cdot \left( \frac{n^{14\,уз}}{n^{з}} \right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left( \frac{95{,}09}{104{,}00} \right)^3 \approx 5\,916{,}50\ кВт,$$

$$N_e^{15\,уз} = N_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{15\,уз}}{n^{з}}\right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left(\frac{103{,}02}{104{,}00}\right)^3 \approx 7\,522{,}42\ кВт,$$

$$N_e^{16\,уз} = N_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{16\,уз}}{n^{з}}\right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left(\frac{111{,}13}{104{,}00}\right)^3 \approx 9\,444{,}19\ кВт,$$

$$N_e^{17\,уз} = N_e^{з} \cdot \left(\frac{n^{17\,уз}}{n^{з}}\right)^3 = 7\,739{,}86 \cdot \left(\frac{119{,}47}{104{,}00}\right)^3 \approx 11\,732{,}31\ кВт.$$

*Относительная эффективная мощность главного двигателя, $n_e$:*

$$n_e^{12\,уз} = \frac{N_e^{12\,уз}}{N_e^{з}} = \frac{3\,488{,}11}{7\,739{,}86} \approx 0{,}45, \qquad n_e^{15\,уз} = \frac{N_e^{15\,уз}}{N_e^{з}} = \frac{7\,522{,}42}{7\,739{,}86} \approx 0{,}97,$$

$$n_e^{13\,уз} = \frac{N_e^{13\,уз}}{N_e^{з}} = \frac{4\,583{,}86}{7\,739{,}86} \approx 0{,}59, \qquad n_e^{16\,уз} = \frac{N_e^{16\,уз}}{N_e^{з}} = \frac{9\,444{,}19}{7\,739{,}86} \approx 1{,}22,$$

$$n_e^{14\,уз} = \frac{N_e^{14\,уз}}{N_e^{з}} = \frac{5\,916{,}50}{7\,739{,}86} \approx 0{,}76, \qquad n_e^{17\,уз} = \frac{N_e^{17\,уз}}{N_e^{з}} = \frac{11\,732{,}31}{7\,739{,}86} \approx 1{,}52.$$

*Количество рейсов, совершаемое судном в год, К:*

$$K^{12\,уз} = \frac{TME}{\frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V^{12\,уз}} + t_{cm}' + t_{cm}''} = \frac{360{,}00}{\frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 12{,}00} + 2{,}00 + 2{,}00} \approx 7{,}00\ шт,$$

$$K^{13\,уз} = \frac{TME}{\frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V^{13\,уз}} + t_{cm}' + t_{cm}''} = \frac{360{,}00}{\frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 13{,}00} + 2{,}00 + 2{,}00} \approx 8{,}00\ шт,$$

$$K^{14\,уз} = \frac{TME}{\frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V^{14\,уз}} + t_{cm}' + t_{cm}''} = \frac{360{,}00}{\frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 14{,}00} + 2{,}00 + 2{,}00} \approx 8{,}00\ шт,$$

$$K^{15\,уз} = \frac{TME}{\frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V^{15\,уз}} + t_{cm}' + t_{cm}''} = \frac{360{,}00}{\frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}00} + 2{,}00 + 2{,}00} \approx 9{,}00\ шт,$$

$$K^{16\,уз} = \frac{TME}{\frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V^{16\,уз}} + t_{cm}' + t_{cm}''} = \frac{360{,}00}{\frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 16{,}00} + 2{,}00 + 2{,}00} \approx 9{,}00\ шт,$$

$$K^{17\,уз} = \frac{TME}{\frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V^{17\,уз}} + t_{cm}' + t_{cm}''} = \frac{360{,}00}{\frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 17{,}00} + 2{,}00 + 2{,}00} \approx 10{,}00\ шт.$$

*Годовой расход топлива на главный двигатель, $B_m^{ГД}$:*

$$\left(B_m^{ГД}\right)^{12\,уз} = \frac{K^{12\,уз} \cdot g_e^{12\,уз} \cdot N_e^{12\,уз}}{V^{12\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{7{,}00 \cdot 0{,}1999 \cdot 3\,488{,}11}{12{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 4\,934{,}06\ т,$$

$$\left(B_m^{ГД}\right)^{13\,уз} = \frac{K^{13\,уз} \cdot g_e^{13\,уз} \cdot N_e^{13\,уз}}{V^{13\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{8{,}00 \cdot 0{,}1954 \cdot 4\,583{,}86}{13{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 6\,686{,}35\ т,$$

$$\left(B_m^{ГД}\right)^{14\,уз} = \frac{K^{14\,уз} \cdot g_e^{14\,уз} \cdot N_e^{14\,уз}}{V^{14\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{8{,}00 \cdot 0{,}1913 \cdot 5\,916{,}50}{14{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 7\,845{,}17\ т,$$

$$\left(B_m^{ГД}\right)^{15\,уз} = \frac{K^{15\,уз} \cdot g_e^{15\,уз} \cdot N_e^{15\,уз}}{V^{15\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{9{,}00 \cdot 0{,}1875 \cdot 7\,522{,}42}{15{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 10\,265{,}80\ т,$$

$$\left(B_m^{ГД}\right)^{16\,уз} = \frac{K^{16\,уз} \cdot g_e^{16\,уз} \cdot N_e^{16\,уз}}{V^{16\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{9{,}00 \cdot 0{,}1840 \cdot 9\,444{,}19}{16{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 11\,855{,}97\ т,$$

$$\left(B_m^{ГД}\right)^{17\,уз} = \frac{K^{17\,уз} \cdot g_e^{17\,уз} \cdot N_e^{17\,уз}}{V^{17\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{10{,}00 \cdot 0{,}1807 \cdot 11\,732{,}31}{17{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 15\,126{,}32\ т.$$

*Годовой расход топлива на дизель-генератор*, $B_m^{ДГ}$:

$$\left(B_m^{ДГ}\right)^{12уз} = K^{12уз} \cdot g^{ДГ} \cdot N^{ДГ} \cdot \frac{2 \cdot DST}{V^{12уз}} = 7{,}00 \cdot 0{,}39 \cdot 370{,}73 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{12{,}00} \approx 1063{,}23\,т,$$

$$\left(B_m^{ДГ}\right)^{13уз} = K^{13уз} \cdot g^{ДГ} \cdot N^{ДГ} \cdot \frac{2 \cdot DST}{V^{13уз}} = 8{,}00 \cdot 0{,}39 \cdot 370{,}73 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{13{,}00} \approx 1121{,}65\,т,$$

$$\left(B_m^{ДГ}\right)^{14уз} = K^{14уз} \cdot g^{ДГ} \cdot N^{ДГ} \cdot \frac{2 \cdot DST}{V^{14уз}} = 8{,}00 \cdot 0{,}39 \cdot 370{,}73 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{14{,}00} \approx 1041{,}54\,т,$$

$$\left(B_m^{ДГ}\right)^{15уз} = K^{15уз} \cdot g^{ДГ} \cdot N^{ДГ} \cdot \frac{2 \cdot DST}{V^{15уз}} = 9{,}00 \cdot 0{,}39 \cdot 370{,}73 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{15{,}00} \approx 1093{,}61\,т,$$

$$\left(B_m^{ДГ}\right)^{16уз} = K^{16уз} \cdot g^{ДГ} \cdot N^{ДГ} \cdot \frac{2 \cdot DST}{V^{16уз}} = 9{,}00 \cdot 0{,}39 \cdot 370{,}73 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{16{,}00} \approx 1025{,}26\,т,$$

$$\left(B_m^{ДГ}\right)^{17уз} = K^{17уз} \cdot g^{ДГ} \cdot N^{ДГ} \cdot \frac{2 \cdot DST}{V^{17уз}} = 10{,}00 \cdot 0{,}39 \cdot 370{,}73 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{17{,}00} \approx 1072{,}17\,т.$$

*Годовой расход цилиндрового масла на главный двигатель*, $B_м^{ГД}$:

$$\left(B_{м}^{ГД}\right)^{12\,уз} = \frac{K^{12\,уз} \cdot g_{цил} \cdot n_{e}^{12\,уз}}{V^{12\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{7{,}00 \cdot 0{,}60 \cdot 0{,}45}{12{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 3{,}83\ т,$$

$$\left(B_{м}^{ГД}\right)^{13\,уз} = \frac{K^{13\,уз} \cdot g_{цил} \cdot n_{e}^{13\,уз}}{V^{13\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{8{,}00 \cdot 0{,}60 \cdot 0{,}59}{13{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 5{,}31\ т,$$

$$\left(B_{м}^{ГД}\right)^{14\,уз} = \frac{K^{14\,уз} \cdot g_{цил} \cdot n_{e}^{14\,уз}}{V^{14\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{8{,}00 \cdot 0{,}60 \cdot 0{,}76}{14{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 6{,}36\ т,$$

$$\left(B_{м}^{ГД}\right)^{15\,уз} = \frac{K^{15\,уз} \cdot g_{цил} \cdot n_{e}^{15\,уз}}{V^{15\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{9{,}00 \cdot 0{,}60 \cdot 0{,}97}{15{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 8{,}49\ т,$$

$$\left(B_{м}^{ГД}\right)^{16\,уз} = \frac{K^{16\,уз} \cdot g_{цил} \cdot n_{e}^{16\,уз}}{V^{16\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{9{,}00 \cdot 0{,}60 \cdot 1{,}22}{16{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 9{,}99\ т,$$

$$\left(B_{м}^{ГД}\right)^{17\,уз} = \frac{K^{17\,уз} \cdot g_{цил} \cdot n_{e}^{17\,уз}}{V^{17\,уз}} \cdot 0{,}0019 \cdot DST =$$

$$= \frac{10{,}00 \cdot 0{,}60 \cdot 1{,}22}{17{,}00} \cdot 0{,}0019 \cdot 6\,385{,}00 \approx 12{,}98\ т.$$

*Годовые расходы, X*:

$$X^{12уз} = \left(B_{т}^{ГД}\right)^{12уз} \cdot Ц_{т}^{ГД} + \left(B_{м}^{ГД}\right)^{12уз} \cdot Ц_{м}^{ГД} + \left(B_{т}^{ДГ}\right)^{12уз} \cdot Ц_{т}^{ДГ} + K^{12уз} \cdot H \approx 161{,}36\ млн.\ руб,$$

$$X^{13уз} = \left(B_{т}^{ГД}\right)^{13уз} \cdot Ц_{т}^{ГД} + \left(B_{м}^{ГД}\right)^{13уз} \cdot Ц_{м}^{ГД} + \left(B_{т}^{ДГ}\right)^{13уз} \cdot Ц_{т}^{ДГ} + K^{13уз} \cdot H \approx 199{,}43\ млн.\ руб,$$

$$X^{14уз} = \left(B_{т}^{ГД}\right)^{14уз} \cdot Ц_{т}^{ГД} + \left(B_{м}^{ГД}\right)^{14уз} \cdot Ц_{м}^{ГД} + \left(B_{т}^{ДГ}\right)^{14уз} \cdot Ц_{т}^{ДГ} + K^{14уз} \cdot H \approx 216{,}63\ млн.\ руб,$$

$$X^{15уз} = \left(B_{т}^{ГД}\right)^{15уз} \cdot Ц_{т}^{ГД} + \left(B_{м}^{ГД}\right)^{15уз} \cdot Ц_{м}^{ГД} + \left(B_{т}^{ДГ}\right)^{15уз} \cdot Ц_{т}^{ДГ} + K^{15уз} \cdot H \approx 265{,}64\ млн.\ руб,$$

$$X^{16уз} = \left(B_{т}^{ГД}\right)^{16уз} \cdot Ц_{т}^{ГД} + \left(B_{м}^{ГД}\right)^{16уз} \cdot Ц_{м}^{ГД} + \left(B_{т}^{ДГ}\right)^{16уз} \cdot Ц_{т}^{ДГ} + K^{16уз} \cdot H \approx 290{,}32\ млн.\ руб,$$

$$X^{17уз} = \left(B_{т}^{ГД}\right)^{17уз} \cdot Ц_{т}^{ГД} + \left(B_{м}^{ГД}\right)^{17уз} \cdot Ц_{м}^{ГД} + \left(B_{т}^{ДГ}\right)^{17уз} \cdot Ц_{т}^{ДГ} + K^{17уз} \cdot H \approx 353{,}32\ млн.\ руб.$$

*Годовые доходы, Y*:

$$Y^{12\,уз} = K^{12\,уз} \cdot G \cdot A \approx 115{,}04\ млн.\ руб,$$

$$Y^{13\,уз} = K^{13\,уз} \cdot G \cdot A \approx 131{,}47\ млн.\ руб,$$

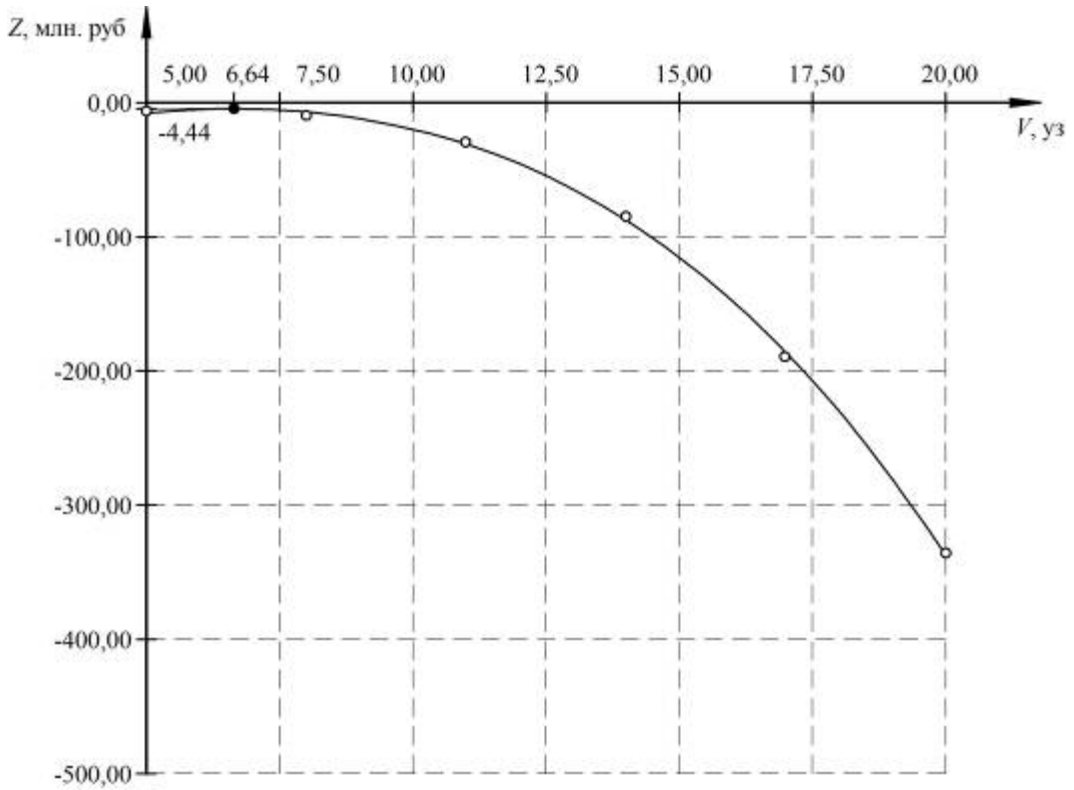



Рисунок 3.10 – Зависимость годовой прибыли *Z* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [1] дедвейтом 40 120 т

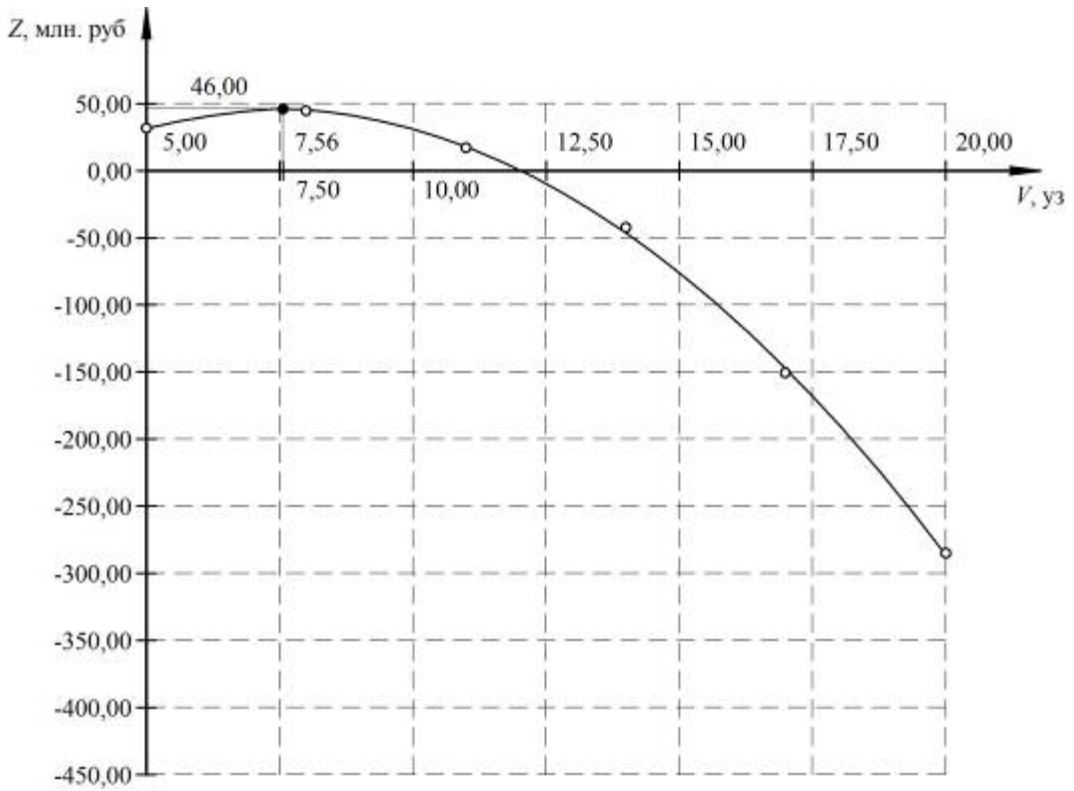



Рисунок 3.11 – Зависимость годовой прибыли *Z* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [2] дедвейтом 94 918 т

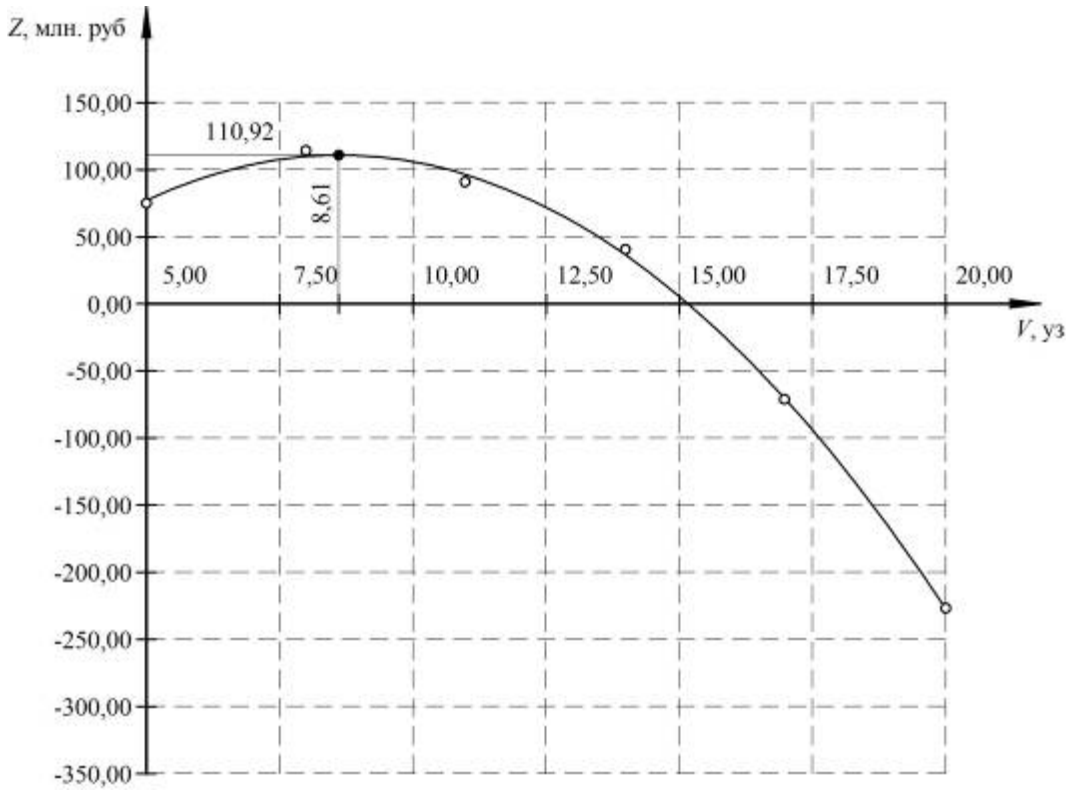



Рисунок 3.12 – Зависимость годовой прибыли *Z* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [3] дедвейтом 152 852 т

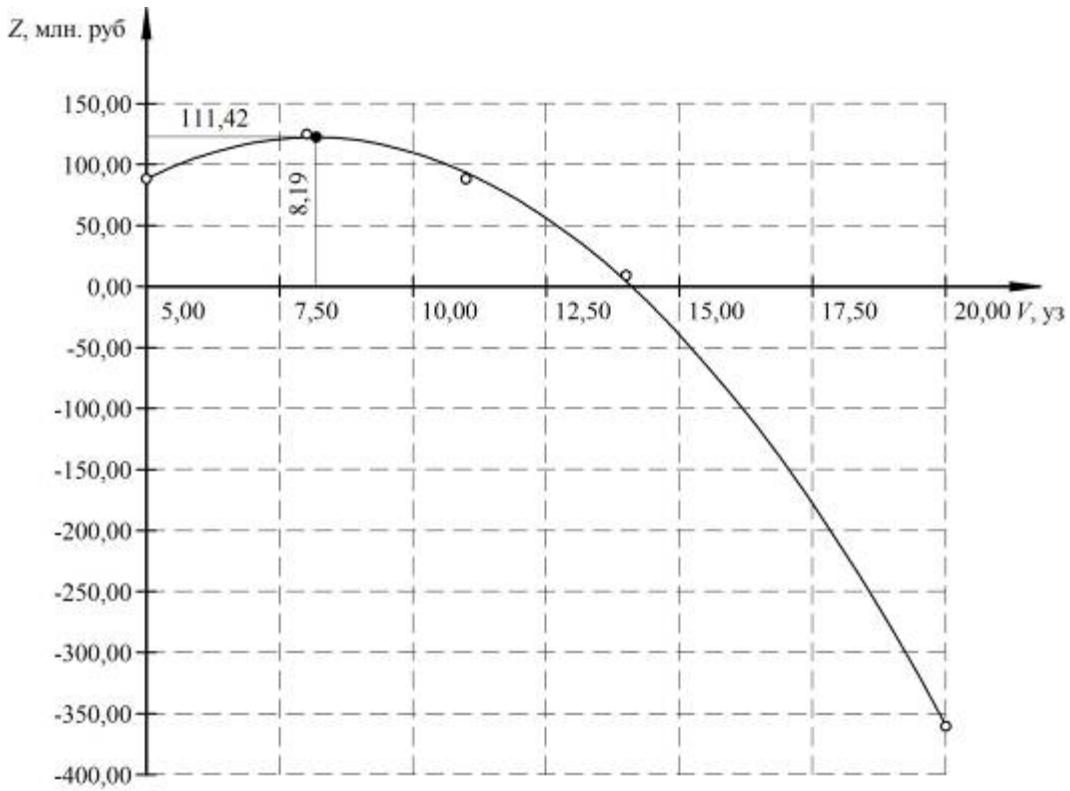



Рисунок 3.13 – Зависимость годовой прибыли *Z* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [4] дедвейтом 185 091 т

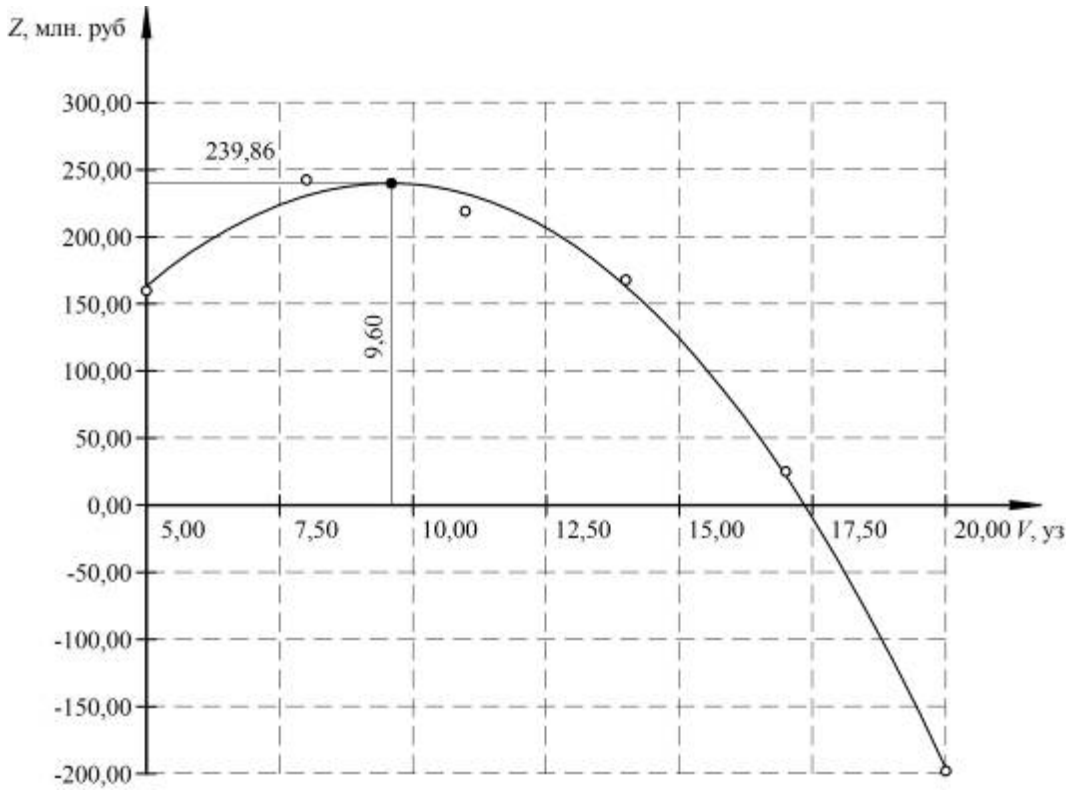



Рисунок 3.14 – Зависимость годовой прибыли *Z* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [5] дедвейтом 259 999 т

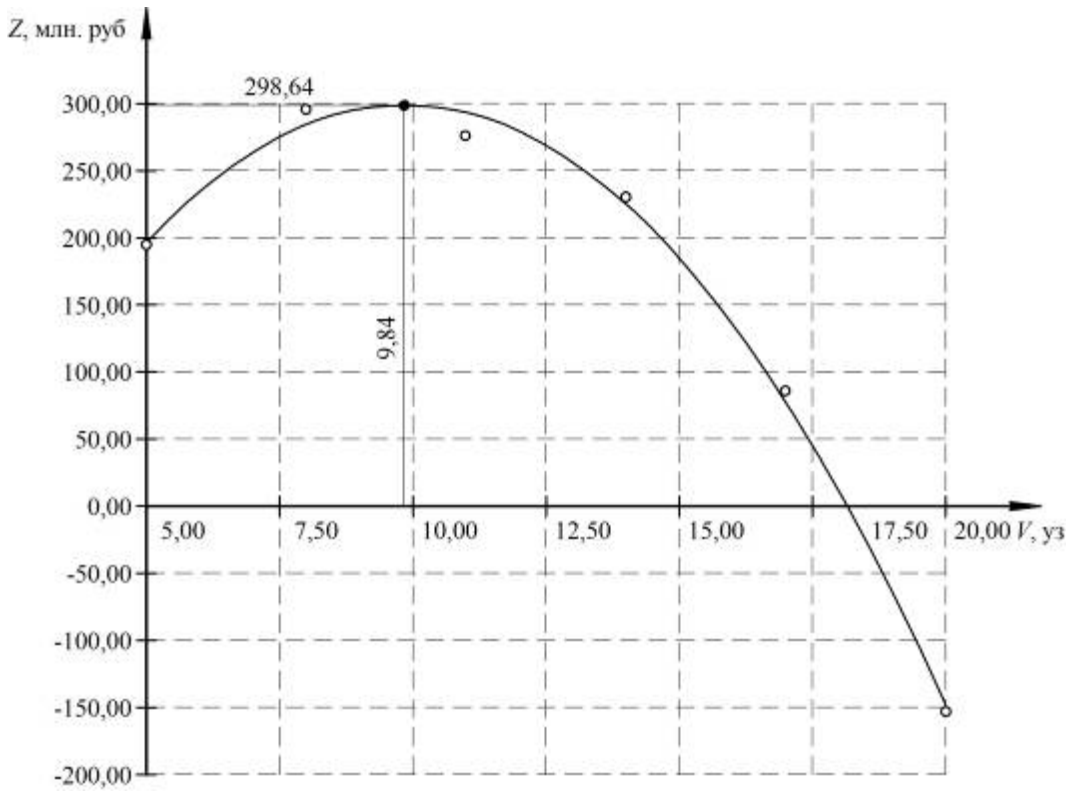



Рисунок 3.15 – Зависимость годовой прибыли *Z* от скорости движения *V* для нефтеналивного судна [6] дедвейтом 317 441 т

$$Y^{14\,уз} = K^{14\,уз} \cdot G \cdot A \approx 131{,}47\ млн.\ руб,$$
$$Y^{15\,уз} = K^{15\,уз} \cdot G \cdot A \approx 147{,}90\ млн.\ руб,$$
$$Y^{16\,уз} = K^{16\,уз} \cdot G \cdot A \approx 147{,}90\ млн.\ руб,$$
$$Y^{17\,уз} = K^{17\,уз} \cdot G \cdot A \approx 164{,}34\ млн.\ руб.$$

*Годовая прибыль*, *Z*:

$$Z^{12\,уз} = Y^{12\,уз} - X^{12\,уз} = 115{,}04 - 161{,}36 \approx -46{,}32\ млн.\ руб,$$
$$Z^{13\,уз} = Y^{13\,уз} - X^{13\,уз} = 131{,}47 - 199{,}43 \approx -67{,}96\ млн.\ руб,$$
$$Z^{14\,уз} = Y^{14\,уз} - X^{14\,уз} = 131{,}47 - 216{,}63 \approx -85{,}16\ млн.\ руб,$$
$$Z^{15\,уз} = Y^{15\,уз} - X^{15\,уз} = 147{,}90 - 265{,}64 \approx -117{,}74\ млн.\ руб,$$
$$Z^{16\,уз} = Y^{16\,уз} - X^{16\,уз} = 147{,}90 - 290{,}32 \approx -142{,}41\ млн.\ руб,$$
$$Z^{17\,уз} = Y^{17\,уз} - X^{17\,уз} = 164{,}34 - 353{,}32 \approx -188{,}98\ млн.\ руб,$$

По результатам проведенных вычислений строится *диаграмма годовой прибыли* (рисунки 3.10–3.15).

*Оптимальная скорость движения судна*, $V^{опт}$:

$V^{опт} = 6{,}64\ уз$ – принимается по графику.

$$\left[V^{опт}\right]_1 = 6{,}64\ уз, \qquad \left[V^{опт}\right]_4 = 8{,}19\ уз$$
$$\left[V^{опт}\right]_2 = 7{,}56\ уз, \qquad \left[V^{опт}\right]_5 = 9{,}60\ уз,$$
$$\left[V^{опт}\right]_3 = 8{,}61\ уз, \qquad \left[V^{опт}\right]_6 = 9{,}84\ уз.$$

*Оптимальная частота вращения главного двигателя*, $n^{опт}$:

$n^{опт} = 51{,}32\ об/мин$ – принимается по графику.

$$\left[n^{опт}\right]_1 = 51{,}32\ об/мин, \qquad \left[n^{опт}\right]_4 = 59{,}32\ об/мин,$$
$$\left[n^{опт}\right]_2 = 59{,}26\ об/мин, \qquad \left[n^{опт}\right]_5 = 57{,}36\ об/мин,$$
$$\left[n^{опт}\right]_3 = 58{,}31\ об/мин, \qquad \left[n^{опт}\right]_6 = 58{,}42\ об/мин.$$

Увеличение размера *годовой прибыли Z* по мере увеличения дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов показывает, что *для перевозки нефти и нефтепродуктов экономически* **наиболее выгодно** использовать суда с наибольшим дедвейтом:

- *Вне зависимости от дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов наибольший экономический эффект достигается при частоте вращения главного двигателя в интервале от 50 до 60 об/мин*;
- *В зависимости от дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов величина экономического эффекта растет по мере увеличения скорости движения судна*

# 4. АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДОВ

## 4.1. Особенности эксплуатации

### 4.1.1. Подготовка к действию

*Одним из наиболее ответственных этапов в процессе эксплуатации судовой энергетической установки является* **подготовка** *ее* **к действию**. Последовательность подготовительных операций и качество их выполнения во многом определяют состояние элементов судовой энергетической установки, их долговечность, расходы на техническое обслуживание и ремонт. В конечном итоге от этого зависит длительность эксплуатационного периода судна.

Неправильные действия обслуживающего персонала по исполнению подготовительных операций могут привести к значительному ухудшению технического состояния судовой энергетической установки, вплоть до возникновения аварийных ситуаций. Поэтому подготовка и ввод в действие судовой энергетической установки в каждом случае должны проводиться в строгом соответствии с инструкциями завода-строителя, а при их отсутствии необходимо руководствоваться РД 31.21.30-97 «Правила технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций».

*Для предотвращения аварийных ситуаций* **перед вводом** *судовой энергетической установки в действие, необходимо убедиться в том, что*:

- Все соединения собраны и надежно закреплены;
- Проведены необходимые регулировочные работы;
- Рейка топливного насоса высокого давления установлена в положение нулевой подачи;
- Все штатные контрольно-измерительные приборы установлены, соединены с контролируемой средой и не имеют повреждений;
- При прокачке маслом при открытых картерных щитах смазка поступает ко всем подшипникам и другим точкам смазки;
- Защитные крышки, щиты и кожухи установлены и надежно закреплены;
- Трубопроводы топливной, масляной, водяной и воздушной систем, а также рабочие полости главного двигателя, топливных и масляных фильтров, теплообменных аппаратов и вспомогательные механизмов не имеют пропусков рабочих сред.

**Основная цель** *подготовительных операций заключается в обеспечении равномерного прогревания главного двигателя и подачи смазки ко всем трущимся поверхностям*. В противном случае, при недостаточном прогревании элементов главного двигателя, теплонапряженность этих элементов с различными массогабаритными показателями значительно увеличится, особенно при

наличии высоких температурных градиентов. Все это может привести к появлению трещин, задиров, интенсификации коррозионного износа.

*Для поддержания надежного технического состояния судовой энергетической установки в процессе подготовки и ввода ее в действие используется* **комплекс мероприятий***, среди которых главенствующее значение имеет заблаговременная подготовка масляной, топливной, охлаждающей и воздушной систем.*

*Подготовка* **масляной системы**:

- Проверить уровень масла в масляных цистернах, маслосборниках, сервомоторах и лубрикаторах, регуляторе частоты вращения, корпусе упорного подшипника, цистерне смазки распределительного вала;
- Убедиться в исправности устройств автоматического поддержания уровня масла в вышеперечисленных емкостях;
- Перед проворачиванием главного двигателя подать масло ко всем точкам ручной смазки и смазки лубрикаторами;
- Подготовить к работе масляные фильтры и маслоохладители;
- При температуре масла ниже рекомендованной его необходимо подогреть. Температура масла при прогреве не должна превышать +45 °С;
- Подготовить к работе и пустить масляные насосы главного двигателя, редуктора, газотурбонагнетателей. Проверить действие средств автоматизированного управления масляными насосами;
- Выпустить из системы воздух;
- Убедиться в наличии показаний всех контрольно-измерительных приборов системы, а также в наличии потока в смотровых стеклах;
- Прокачивание маслом производить в течение всего времени подготовки главного двигателя.

*Подготовка* **системы водяного охлаждения**:

- Подготовить к работе охладители и подогреватели воды;
- Проверить уровень воды в расширительной цистерне контура пресной воды, в цистернах систем охлаждения поршней и форсунок;
- Подготовить к работе и пустить насосы пресной воды охлаждения цилиндров, поршней, форсунок. Проверить действие средств автоматизированного управления насосами. Довести давление воды до рабочего;
- Выпустить из системы воздух;
- Прокачку пресной водой производить в течение всего времени подготовки главного двигателя;
- Прогреть охлаждающую пресную воду имеющимися средствами до температуры около +45 °С на входе. Темп прогревания должен быть по возможности медленным;
- Для проверки системы забортной воды пустить насосы забортной воды, проверить систему, включая работу регуляторов температуры воды и масла. Остановить насосы и вновь запустить их непосредственно перед пуском главного двигателя.

*Подготовка* **топливной системы**:

- Спустить отстой из расходных топливных цистерн;
- Проверить уровень топлива в расходных топливных цистернах;
- Подготовить к работе топливные фильтры, регулятор вязкости, подогреватели топлива, расходомеры;
- Подготовить к работе и пустить топливоподкачивающий насос и насос охлаждения форсунок;
- После подъема давления до рабочего убедиться в отсутствии воздуха в системе;
- Если возможен пуск главного двигателя на высоковязком топливе, обеспечить постепенный прогрев топливной системы путем включения обогревающих устройств и непрерывной циркуляции подогреваемого топлива;
- Если возможен пуск главного двигателя на маловязком топливе необходимо заранее подготовиться к переводу его на высоковязкое топливо, включив обогрев расходных и отстойных цистерн.

*Подготовка* **систем пуска**, **продувки**, **наддува**, **выпуска:**

- Проверить давление воздуха в пусковых баллонах, продуть из баллонов конденсат, масло;
- Подготовить к работе и пустить компрессор, убедиться в его нормальной работе;
- Продуть пусковой трубопровод при закрытом стопорном клапане главного двигателя;
- Спустить воду, масло, топливо из ресивера продувочного воздуха, впускного и выпускного коллекторов, подпоршневых полостей, воздушных полостей воздухоохладителей, газовых и воздушных полостей газотурбонагнетателей.

*В комплексе мероприятий по подготовке и вводу в действие судовой энергетической установки важное значение занимают действия по подготовке валопровода.*

*Подготовка* **валопровода**:

- Убедиться в отсутствии посторонних предметов на валопроводе, а также в том, что тормоз валопровода отжат;
- Подготовить к работе дейдвудный подшипник, обеспечив его смазку и охлаждение;
- Проверить уровень масла в опорных и упорных подшипниках, проверить исправность и подготовить к работе смазывающие и охлаждающие устройства подшипников;
- Проверить действие разобщительных муфт валопровода, для чего произвести несколько включений и выключений. Разобщительные муфты оставить в выключенном положении.

*В зависимости от мощности судовой энергетической установки* **продолжительность подготовительных операций** *может колебаться от 0,50*

*до 6,00 ч.* Особое значение имеет режим подготовки для судовых энергетических установок с мощными главными двигателями.

### 4.1.2. Ввод в действие

*После проведения подготовительных операций производятся* **пробные пуски** *судовой энергетической установки и, в случае успешного их завершения, осуществляется непосредственный* **ввод установки в действие**.

*Проведение* **проворачивания** *и* **пробных пусков**:

- Провернуть главный двигатель валоповоротным устройством на 2-3 оборота коленчатого вала, а затем сжатым воздухом при открытых индикаторных кранах. В процессе проворачивания главный двигатель необходимо прокачивать смазочным маслом;
- Произвести пробные пуски главного двигателя на топливе на передний и задний ход. При пробных пусках главный двигатель необходимо прокачивать смазочным маслом и охлаждающей водой;
- Проворачивание и пробные пуски необходимо производить:
  - в установках без разобщительных муфт – только с разрешения вахтенного помощника капитана;
  - в установках с разобщительной муфтой – при отключенной муфте;
- Перед соединением валоповоротного устройства с главным двигателем необходимо убедиться:
  - рычаг на посту управления главным двигателем находится в положении "СТОП";
  - клапаны на пусковых баллонах и трубопроводе пускового воздуха закрыты;
  - на постах управления горит индикатор "Валоповоротное устройство соединено";
  - индикаторные клапаны открыты;
- При проворачивании главного двигателя валоповоротным устройством следует тщательно прослушивать двигатель, редуктор, гидромуфты. Убедиться в отсутствии в цилиндрах воды, масла, топлива. Во время проворачивания необходимо следить по показаниям амперметра за нагрузкой электродвигателя валоповоротного устройства. При превышении предельного значения силы тока либо при резком ее колебании немедленно остановить валоповоротное устройство и устранить неисправность;
- Проворачивание главного двигателя сжатым воздухом необходимо производить при открытых индикаторных клапанах, спускных кранах ресивера продувочного воздуха и выпускного коллектора. Убедиться в том, что двигатель нормально набирает обороты, ротор газотурбонагнетателя вращается свободно, нет ненормальных шумов;
- Пробные пуски главного двигателя на топливе следует производить при закрытых индикаторных клапанах. Убедиться в исправности сис-

тем пуска и реверса, работе всех цилиндров, отсутствии посторонних шумов и стуков, поступлении масла к подшипникам;

- По окончанию подготовки главного двигателя к действию следует поддерживать давление и температуру воды, смазочного и охлаждающего масла, давление пускового воздуха в баллонах в пределах, рекомендуемых инструкцией по эксплуатации.

*Непосредственный* **ввод в действие**:

- Операции по вводу главного двигателя в действие должны выполняться в последовательности, предусмотренной заводской инструкцией по эксплуатации;
- При вводе в действие за 15…20 минут до дачи хода с ходового мостика в машинное отделение должно быть передано соответствующее предупреждение. За это время должны быть выполнены окончательные операции по подготовке энергетической установки к действию (выполнены необходимые переключения в системах). О готовности установки к даче хода вахтенный механик обязан доложить на мостик;
- После ввода в действие следует избегать длительной работы главного двигателя на холостом ходу, так как это приводит к усиленному загрязнению цилиндров и проточных частей двигателя;
- После ввода в действие необходимо проверить показания контрольно-измерительных приборов главного двигателя. Убедиться в отсутствии ненормальных шумов, стуков и вибрации. Проверить работу лубрикаторов смазки цилиндров.

*Для стабилизации температурных градиентов вывод судовой энергетической установки на полную мощность регламентируется специальным графиком*, утвержденным соответствующей службой компании-судовладельца.

При отсутствии специальных указаний завода-строителя начальная нагрузка главного двигателя при пуске без предварительного прогрева не должна превышать 25…30% от номинальной, а частота вращения должна соответствовать малому ходу.

### 4.1.3. Вывод из действия

*Вывод судовой энергетической установки из действия производится в обратной последовательности*. При этом основным условием является обеспечение равномерного изменения температурных полей главного двигателя, предотвращение повышенных износов деталей цилиндрово-поршневой группы и заклинивания поршней, предотвращение закоксовывания топливной аппаратуры и повышенного нагарообразования. Для очистки топливной системы от остатков тяжелого топлива, обладающего повышенной коксуемостью, необходимо заблаговременно перевести главный двигатель на дизельное топливо.

## 4.2. Причины нарушения режима работы

## 4.2.1. Элементы главного двигателя

*Основными элементами, определяющими* **работоспособность главного двигателя** *судовой энергетической установки, являются*:

- *Топливная аппаратура*:
  - Насосы высокого давления;
  - Форсунки;
- *Цилиндрово-поршневая группа*:
  - Крышки цилиндров;
  - Втулки цилиндров;
  - Поршни;
- *Подшипники и клапаны*.

*Важнейшими причинами отказов вышеперечисленного оборудования являются* **трещины**, **износ** *и эрозионные разрушения.*

### Топливные насосы высокого давления

*Причиной отказов отдельных узлов и элементов топливных насосов высокого давления являются*:

- Трещины (60…75% отказов);
- Механические поломки (11…12% отказов);
- Отказы износового происхождения (7…12% отказов).

*Основными узлами, определяющими уровень эксплуатационной надежности топливных насосов высокого давления, являются*:

- Втулки (50 % отказов);
- Плунжерные пары (27% отказов);
- Всасывающие клапаны (25% отказов);
- Нагнетательные клапаны (21% отказов);
- Плунжеры (21% отказов).

*Наименее надежным элементом плунжерной пары являются втулки*.

В процессе эксплуатации *плунжерной пары* и ее элементов имеют место задиры, деформация плоскости трения, заклинивание, выкрашивание, а также трещины, возникающие вследствие усталостных явлений в металле при наличии температурных напряжений, неоднородности металла, некачественной сборки и дефектов технического характера. Выработка контактных поверхностей происходит вследствие комплексного воздействия размельчения отдельных участков контакта, абразивного и окислительного износа.

Долговечность *клапанов* определяется техническим состоянием следующих элементов: седла, перемычки, корпуса, хвостовика. При этом доля отказов для клапанов различного функционального назначения неодинакова. Так, отказы нагнетательных клапанов по причине выхода из строя седла составляют 45%, а всасывающих – 30%, по причине выхода из строя корпусов – от 20% до 38% соответственно. В процессе работы этих узлов и их элементов имеют место поломки посадочных мест, обрывы головки, заклинивание, коррозионное разъедание и трещины.

Основными дефектами, лимитирующими ресурс *плунжерных пар*, являются износы прецизионных поверхностей золотниковой части плунжера и втулки. В среднем около 80% плунжерных пар бракуется по причине износа этих поверхностей и потери гидравлической плотности ниже допустимого уровня.

## Форсунки

*Наименее надежным элементом форсунок являются распылители*.

К характерным дефектам распылителя относят повреждения уплотнительного торца, зависание иглы, потеря плотности, повреждения торцевой поверхности иглы, распрессовка сопел, а также износ сопловых отверстий по диаметру. Из указанных дефектов примерно половина приходится на повреждение уплотнительного торца.

По данным зарубежных специалистов примерно 75% распылителей бракуется вследствие чрезмерного изнашивания распыляющих отверстий, остальные 25% бракуются вследствие изнашивания запорного конуса распылителя.

*Топливная аппаратура относится к наиболее ответственным узлам судовых энергетических установок. Ее отказы, вследствие рассмотренных выше причин, могут привести к внезапному выходу из строя главного двигателя. Поэтому в процессе эксплуатации топливной аппаратуры необходимо вести постоянный контроль технического состояния ее отдельных элементов*.

## Крышки цилиндров

*Причиной отказов крышек цилиндров являются*:

- Трещины сварных швов (67% отказов);
- Пропуски газов (19% отказов);
- Водотечность (9% отказов);
- Образование свищей (5% отказов).

*Крышки цилиндров во многом определяют надежность работы судовой энергетической установки*. В процессе работы они воспринимают значительные тепловые потоки и большие давления горячих газов, что приводит к возникновению существенных тепловых и механических напряжений. Кроме того, крышки цилиндров испытывают и большие монтажные напряжения от затяжки шпилек. Совокупное воздействие этих причин способствует образованию трещин в крышках цилиндров. Количество отказов, связанных с трещинообразованием может составлять порядка 40%.

Причиной *водотечности* крышек цилиндров являются частые перегрузки главных двигателей. Зачастую трещины в крышках появляются в районе отверстия пускового воздуха или форсунки. Очевидно, это связано с резкими изменениями температуры стенок крышки при пусках и реверсах главного двигателя. После пуска главного двигателя температура отдельных областей крышки может значительно возрасти за очень короткий период времени, а при остановке за тот же период снизится на такую же величину. Образование трещин в местах перехода цилиндрической поверхности крышки к донышку

является следствием нарушения режима охлаждения из-за загрязнения. В процессе отложения различных примесей, которые поступают с водой, происходит ухудшение теплоотдачи от стенок крышки, а это приводит к деформации поверхности донышка.

Причинами образования *трещин* в крышках цилиндров являются: несоблюдение установленных зазоров, выкрашивание контактных поверхностей между верхней и нижней частями крышки, попадание грязи, раковины на сопрягаемых поверхностях, а также высокий уровень температурных напряжений в огневой частя днища крышки.

*Для повышения ресурса крышек цилиндров необходимо регулярно проводить тщательный контроль качества воды и технического состояния охлаждающих поверхностей.*

## Втулки

*Причиной отказов цилиндровых втулок являются*:

- Наработки (39% отказов);
- Натиры (26% отказов);
- Износ (25% отказов);
- Наличие лаковой пленки (10%);
- Отказы износового происхождения (7…12%).

Наличие задиров, а также повышенного и неравномерного износа является следствием воздействия горячих газов и трения поршневых колец. Коррозионные, эрозионные, а также разрушения кавитационного происхождения возникают из-за смывания охлаждаемой водой наружной поверхности втулок. Наличие трещин в цилиндровых втулках является следствием больших температурных напряжений из-за значительного перепада температур между огневой поверхностью втулки и поверхностью охлаждения. Чаще всего трещины появляются на верхнем посадочном бурте и могут привести к попаданию воды в цилиндр, а также к обрыву втулки по фланцу в процессе работы главного двигателя. Образование трещин под опорными фланцами втулок является следствием недостаточной жесткости остова судовой энергетической установки.

Причинами появления *трещин* и задиров втулок являются: нарушение температурного режима цилиндра, малое количество подаваемого масла, а также отклонение геометрических параметров втулок.

Причинами интенсивного *износа* втулок являются: поломка или повышенный износ поршневых колец, чрезмерная подача цилиндровой смазки.

Причинами появления *задиров* втулок являются: несоответствие структуры металла колец и втулки, нарушение режима смазки, а также неисправность топливной аппаратуры. Задиры деталей цилиндрово-поршневой группы и их повышенный износ – характерные дефекты практически всех судовых дизельных энергетических установок. В их основе лежит микрозадир, представляющий собой разрыв масляной пленки на малой площади зеркала цилиндра, которая не восстанавливается в течение нескольких ходов поршня.

Чрезмерная подача цилиндровой смазки приводит к образованию *нагара* на поршне в районе масляных штуцеров. Из-за трения слоя нагара о стенки втулки происходит ее местная выработка, прорыв газов под кольца, перегрев втулки со всеми вытекающими последствиями.

*Для повышения ресурса цилиндровых втулок необходимо постоянно контролировать дозировку цилиндровой смазки, при каждом подъеме крышки или выпускного клапана устранять нагар, следить за состоянием маслоразводящих канавок, «разделывать» полосы местной выработки втулки с помощью камня.*

## Поршни

*Причиной отказов поршней являются*:

- Трещины (19…67% отказов);
- Прогорание (29…48% отказов);
- Обрывы фланцев маслопроводов (12…16% отказов);
- Отказы язвенного происхождения (5…8% отказов).

Поршни судовых энергетических установок работают в наиболее напряженных условиях. Днище поршней представляет собой часть камеры сгорания и, таким образом, подвергается с одной стороны воздействию высоких температур, а с другой – давлению со стороны газов.

*Из всех деталей цилиндрово-поршневой группы главных двигателей отказы поршней являются наиболее опасными, так как могут привести к тяжелым авариям и, как следствие, к длительному выходу из строя судовой энергетической установки*.

Дефектами поршней являются: выгорание и растрескивание металла днища, повреждение, а также износ компрессорных колец и их канавок, отложение нагара и кокса в поршневых канавках, а также на поверхности головки поршня, износы и задиры тронка.

Причинами *прогорания донышка поршня* являются: не совершенство конструкции, некачественный распыл, вследствие износа сопловых отверстий или неправильной установки сопел, отложения нагара и накипи с охлаждающей стороны.

Как правило, выгорание сопровождается появлением *трещин*. Чаще всего трещины возникают в районе отверстий для прохода масла к центру днища во втулкообразном приливе. Сквозные трещины возникают по первой кольцевой канавке. В ряде поршней в районе выхлопных окон, вследствие высоких температурных напряжений, различных перепадов температур и низкого качества металла происходит ографичивание этого металла. В результате появляются микротрещины, происходит выдувание и унос части металла под действием струи газов, обладающих высокой скоростью и давлением, в систему выпуска.

*Основными мерами по снижению количества отказов и продлению срока службы узлов судовой энергетической установки являются: своевременное техническое обслуживание, качественная эксплуатация с соблюдением всех необходимых мер, недопущение перегрузки главного двигателя, его пра-*

*вильный пуск и остановка, постоянный контроль за параметрами и немедленное принятие мер при их отклонении от нормы*.

### 4.2.2. Элементы газотурбонагнетателя

*Основными элементами, определяющими* **работоспособность газотурбонагнетателя** *судовой энергетической установки, являются*:

- *Газовая турбина*:
  - Проточная часть;
  - Сопловой аппарат;
  - Рабочие лопатки;
- *Центробежный компрессор*:
  - Проточная часть;
  - Лопаточный диффузор;
  - Рабочее колесо;
- *Ротор, подшипники, клапаны и уплотнения*.

*Важнейшей причиной отказов вышеперечисленного оборудования являются* **трещины.**

#### Газовая турбина

*Причиной отказов отдельных узлов и элементов газовых турбин являются*:

- Трещины (60…75% отказов).

*Основными узлами, определяющими уровень эксплуатационной надежности газовых турбин, являются*:

- Сопловой аппарат и рабочие лопатки (65 % отказов);
- Корпус газовыпускной части (40% отказов);
- Подшипники скольжения (5% отказов).

*Основной причиной выхода из строя газовой турбины являются трещины*.

Образование и развитие *трещин* – результат совокупного влияния масляных и шламовых отложений в полости охлаждения газовой турбины, а также больших нагрузок по среднему индикаторному давлению при сравнительно низкой частоте вращения главного двигателя. Также появление трещин может происходить, как из-за естественного старения, так и из-за неравномерной затяжки крепежных болтов во время заводской сборки.

На лопатках соплового аппарата газовой турбины трещины возникают в основном на их внутренней части и являются следствием скрытых дефектов изготовления, а также ошибок, допускаемых в процессе выполнения сборочных операций. Лопатки соплового аппарата и рабочие лопатки, по сравнению с другими узлами газовой турбины, наиболее подвержены отрывам и разрывам, появлению трещин, загибов, искривлений и вырывов кромок в результате попадания в проточную часть обломков поршневых колец, стаканов выпускных клапанов, а также защитных решеток.

Причиной выхода из строя лопаток соплового аппарата и рабочих лопаток газовых турбин могут быть *явления вибрационного* и *усталостного ха-*

*рактера*, являющиеся следствием колебаний температуры газа и пускового воздуха при частых реверсах главного двигателя. При этом могут возникнуть и резонансные напряжения в лопатках газовой турбины, особенно при работе газотурбонагнетателя на неустойчивых режимах, в результате чего возможны *вырывы* и *выкрашивания* – прежде всего, на выходных кромках.

*Для повышения ресурса газовых турбин необходимо периодически осуществлять промывку водой их проточной части. Во время промывки пары и мелкие капли воды, проходя через цилиндр главного двигателя, поступают в проточную часть турбины, очищая ее сопловый и лопаточный аппараты от отложений масла и топлива, что существенно увеличивает длительность безаварийной работы турбины*.

## Центробежный компрессор

*Причиной отказов отдельных узлов и элементов центробежных компрессоров является* **помпаж**.

*Явление помпажа связано с уменьшением расхода воздуха через компрессор*. По достижении минимально допустимого на данном эксплуатационном режиме расхода воздуха на передних кромках лопаток рабочего колеса происходит срыв потока воздуха. Это приводит к резкому локальному понижению давления и обратному направлению движения воздуха. Срыв потока сначала происходит на одной лопатке, затем переходит на соседние, перемещаясь от одного канала к другому. Работа компрессора становится неустойчивой, поток на выходе пульсирует: возникает вибрация лопаток и корпуса газотурбонагнетателя, что приводит к обрыву лопаток, повреждению проточной части компрессора, лабиринтовых уплотнений и подшипников.

В эксплуатационных условиях *помпаж возникает при загрязнении масляными отложениями лопаточного диффузора, выходной улитки центробежного компрессора, проточной части газовой турбины, а также при отложении масла на лопатках рабочего колеса компрессора и воздухозаборной сетке*. Также помпаж может возникать при закоксовывании продувочных окон и выпускного клапана главного двигателя, а также при уменьшении сечения его выхлопного тракта.

*Для повышения ресурса центробежных компрессоров необходимо периодически осуществлять промывку водой их проточной части. Во время промывки частицы воды, подаваемой во всасывающий патрубок компрессора, заносятся с воздухом в его проточную часть, и там механически отделяют отложения от стенок проточной части, что существенно увеличивает длительность безаварийной работы компрессора*.

## Подшипники ротора

*Причиной отказов подшипников ротора газотурбонагнетателя является их повреждение или преждевременный выход из строя.*

Повреждения подшипников ротора происходят из-за плохого качества смазочного масла, ненормальных условий смазывания, некачественного про-

ведения сборочных операций, а также из-за длительной работы газотурбонагнетателя при повышенной вибрации. Эта вибрация может возникнуть в результате неуравновешенности ротора при больших отложениях нагаров на рабочих лопатках или при механических повреждениях последних.

Ухудшение качества смазочного масла происходит вследствие загрязнения и закупорки масляными отложениями канала, служащего для подачи уплотняющего воздуха. В результате в лабиринтовые уплотнения прорываются газы. Также ухудшение качества смазочного масла происходит из-за загрязнения фильтров разгрузочных каналов.

*Для повышения ресурса подшипников ротора газотурбонагнетателя необходимо постоянно осуществлять контроль их состояния и, в первую очередь, следить за поступлением уплотняющего воздуха, предотвращающего прорыв газов в лабиринтовые уплотнения.*

## 4.3. Контроль технического состояния

### 4.3.1. Элементы главного двигателя

*Контроль технического состояния элементов главного двигателя производится на основании данных о величине и динамике изменения*:

- Параметров рабочего процесса и показателей контрольно-измерительных приборов, а также при появлении ненормальных шумов, стуков и вибрации;
- Состояния рабочих поверхностей, зазоров, нагаров, отложений, определенных во время осмотров без разборки или при частичной разборке узлов.

*Основные показания контрольно-измерительных приборов, которые необходимо периодически контролировать в процессе эксплуатации главного двигателя*:

- Частота вращения двигателя;
- Уровень масла в сточных, напорных цистернах и лубрикаторах;
- Температура и давление масла, идущего на смазку элементов двигателя и охлаждение поршней;
- Уровень охлаждающей воды в расширительной цистерне;
- Температура и давление воды, охлаждающей цилиндры, поршни, охладители масла, воды и воздуха;
- Уровень и температура топлива в расходных цистернах;
- Давление топлива после топливоподкачивающего насоса;
- Температура топлива перед топливными насосами;
- Температура охлаждающей воды, топлива и масла на входе в форсунки и на выходе из них;
- Давление воздуха в пусковых баллонах;
- Давление воздуха в системе управления двигателем;
- Давление и температура наддувочного воздуха;

- Сопротивление фильтров воздухоохладителей;
- Температура выпускных газов по цилиндрам;
- Температура узлов трения: подшипников двигателя и упорного подшипника;
- Температура патрубков подвода воздуха к пусковым клапанам цилиндров двигателя;
- Наличие масляного потока в смотровых стеклах.

*Помимо систематического контроля вышеприведенных параметров главного двигателя необходимо периодически осуществлять углубленный контроль его технического состояния* с применением специализированных приборов: индикаторов, максиметров, торсиометров, расходомеров, а также различной диагностической аппаратуры.

*Ответственные детали и элементы главного двигателя необходимо периодически подвергать дефектоскопическому контролю*.

*Важным элементом контроля технического состояния главного двигателя является его* **индицирование**. *Индицирование главного двигателя должно производиться*:

- Периодически, но не реже одного раза в месяц;
- При обнаружении ненормальностей в работе отдельных цилиндров;
- После регулировки или замены топливных насосов, форсунок, ремонта или замены узлов цилиндрово-поршневой группы;
- После перехода на другой сорт топлива;
- При значительном изменении осадки судна, резком увеличении сопротивления движению судна в результате обрастания или повреждении корпуса, при повреждении гребного винта.

*Индикаторные диаграммы должны сниматься при установившемся режиме работы главного двигателя*. Во время индицирования главного дизеля органы, управляющие подачей топлива в цилиндры, должны быть неподвижны. В этом случае при съемке диаграмм допускается колебание частоты вращения вала, вызванное качкой или волнением, не более 2,50% среднего значения. При индицировании главного двигателя, управляемого через однорежимный или всережимный регулятор, необходимо следить за устойчивостью нагрузки по индексам топливных насосов или положению других органов, управляющих цикловой подачей топлива.

*Проверку равномерности распределения нагрузки по цилиндрам следует производить*:

- По среднему индикаторному давлению, если главный двигатель оборудован индикаторными кранами и имеются средства для измерения среднего индикаторного давления;
- По максимальному давлению в цилиндрах и температуре выпускных газов за цилиндрами, если имеются индикаторные краны, но нет средств для измерения среднего индикаторного давления;

- По температуре выпускных газов за цилиндрами и падению частоты вращения вала при поочередном отключении цилиндров, если нет индикаторных кранов.

*В случае отклонения параметров рабочего процесса и удельного расхода топлива за пределы, указанные в инструкции по эксплуатации, должны быть выяснены причины и при необходимости произведена регулировка главного двигателя.*

### 4.3.2. Элементы газотурбонагнетателя

*Контроль технического состояния элементов газотурбонагнетателя производится на основании данных о величине и динамике изменения*:

- Параметров рабочего процесса и показателей контрольно-измерительных приборов, а также при появлении ненормальных шумов, стуков и вибрации;
- Состояния рабочих поверхностей, зазоров и отложений, определенных во время осмотров без разборки или при частичной разборке узлов.

*Основные показания контрольно-измерительных приборов, которые необходимо периодически контролировать в процессе эксплуатации газотурбонагнетателя*:

- Частота вращения газотурбонагнетателя;
- Уровень масла в циркуляционной цистерне;
- Температура и давление масла, идущего на смазку подшипников газовой турбины и центробежного компрессора;
- Температура и давление воды, охлаждающей проточную часть газовой турбины;
- Сопротивление фильтров центробежного компрессора;
- Температура выпускных газов перед и после газовой турбины;
- Температура узлов трения: подшипников газотурбонагнетателя.

*Помимо систематического контроля вышеприведенных параметров газотурбонагнетателя необходимо периодически осуществлять углубленный контроль его технического состояния* с применением специализированной диагностической аппаратуры.

*Важным элементом контроля технического состояния газотурбонагнетателя является оценка износа его подшипников.*

*Уровень износа подшипников определяется с помощью метода* **виброакустического анализа***, который также позволяет определить: статический и динамический дисбаланс ротора, трещины и износ рабочих лопаток, наличие внутри газотурбонагнетателя инородных тел.*

Недостатком метода виброакустического анализа является высокий уровень помех, вследствие воздействия окружающих условий, а также стороннего шума, связанного с уровнем посадки подшипников, качеством монтажа, способом смазки. Использование ультразвука в диапазоне рабочих частот свыше 20 кГц позволяет несколько улучшить качество работы метода, так

как на таких частотах из-за высокого коэффициента демпфирования колебаний влияние вышеописанных помех существенно снижается.

*Другим методом оценки уровня износа подшипников является метод* **радиоиндикаторного анализа**. Сущность метода заключается в том, что элементы подшипников, подверженных износу, облучаются нейтронами, в результате чего часть ядер металла превращается в радиоактивные изотопы. В процессе износа частицы металла вместе с изотопами попадают в смазку. Измерение радиоактивности смазки позволяет судить о степени износа подшипников.

Недостатком метода радиоиндикаторного анализа является его высокая стоимость.

*Методом оценки общего состояния газотурбонагнетателя является метод* **эндоскопического анализа**. Сущность метода заключается в том, что идентификация неисправностей газотурбонагнетателя осуществляется с помощью специального оптического прибора – эндоскопа, вводимого через разнообразные технологические отверстия.

Недостатком метода эндоскопического анализа является его высокая стоимость, а также ограниченность доступа эндоскопа, вследствие жесткости его рабочей части.

*Другим методом оценки общего состояния газотурбонагнетателя является метод* **термодинамического анализа**. Сущность метода заключается в измерении и сравнении с «эталонными» показателями основных термодинамических параметров: температуры и давления. Степень засорения воздушного фильтра центробежного компрессора оценивается по перепаду давлений перед фильтром и после него. Общее техническое состояние центробежного компрессора оценивается по частоте вращения компрессора, КПД компрессора, массовому расходу воздуха, степени повышения давления, разности температур и давлений воздуха на входе в компрессор и на выходе из него. Общее техническое состояние газовой турбины оценивается по частоте вращения турбины, КПД турбины, степени падения давления, разности температур и давлений газов на входе в турбину и на выходе из нее.

Недостатком метода является необходимость измерения большого числа параметров, характеризующих работу газотурбонагнетателя в реальном масштабе времени, что требует установки большого числа датчиков и соответствующей коммутирующей аппаратуры.

*Кроме того, методом оценки общего технического состояния газотурбонагнетателя является* **анализ частоты вращения двух газотурбонагнетателей**, работающих совместно. Сущность метода заключается в том, что загрязнение проточной части газотурбонагнетателя, износ подшипников, поломка рабочих колес, а также изменение взаимозависимых параметров (температуры и давления выхлопных газов) отражается на частоте вращения газотурбонагнетателя. Для обнаружения неисправностей в двух газотурбонагнетателях измеряется разность частоты их вращения. Равенство частоты вращения свидетельствует об исправности, а появление разности частот – о поломке одного из агрегатов. Одновременно измеряется абсолютная частота вращения,

так как неисправности могут появиться в обоих газотурбонагнетателях одновременно.

Недостатком метода является то, что при его использовании нельзя идентифицировать конкретную неисправность.

### 4.3.3. Элементы валопровода

*Валопровод является важнейшей частью энергетического комплекса судна, поэтому его надёжность весьма важна в повседневной эксплуатации*.

Отказ валопровода может привести к серьёзным последствиям вплоть до гибели судна.

*Валопровод постоянно подвержен воздействию внешних нагрузок*:

- Крутящий момент от главного двигателя;
- Упор гребного винта;
- Вес гребного винта, валопровода и деталей прикреплённых к ним.

Также *на валопровод воздействуют и другие нагрузки*:

- Гидродинамические силы при работе гребного винта;
- Силы, возникающие из-за неуравновешенности гребного винта;
- Силы, возникающие из-за остаточной деформации корпуса судна;
- Силы, возникающие из-за расцентровки частей валопровода;
- Силы, возникающие из-за волнения моря;
- Продольные, поперечные, крутильные колебания;
- Удары лопастей гребного винта о лёд.

*Наибольшее количество отказов приходится на гребные валы и вкладыши дейдвудных подшипников*.

*Причины низкой надёжности валопроводов и дейдвудных устройств*:

- Снижение прочности валопроводов в местах концентраций напряжений и появление усталостных трещин в результате воздействия переменных гидродинамических усилий;
- Электрохимическая коррозия незащищённых участков валопроводов: снижается усталостная прочность и происходит разрушение вала;
- Дополнительные напряжения, связанные с изменением условия работы опор: интенсивный износ дейдвудных подшипников, упругая деформация корпуса судна;
- Крутильные колебания и вибрация валопровода;
- Неудовлетворительная уравновешенность главного двигателя и гребного винта;
- Продольные колебания коленчатого вала и валопровода.

*Наиболее уязвимые части валопровода* – вкладыши рамовых подшипников.

### 4.3.4. Элементы гребного винта

*Гребной винт является важнейшим элементом судна.*

Его отказ может привести к потере хода, управляемости, а в некоторых случаях – к гибели судна.

*Основные виды отказов гребных винтов фиксированного шага*:

- Коррозионно-усталостные трещины и изломы;
- Кавитационно-эрозионные износы поверхностей лопастей;
- Химическая и электрохимическая эрозия;
- Поломки и остаточные пластические деформации из-за импульсных нагрузок;
- Остаточные деформации и хрупкие изломы из-за повышенных гидродинамических нагрузок;
- Повреждения деталей фланцевых соединений винтов со съёмными лопастями;

*Причины отказов гребных винтов фиксированного шага*:

- Дефекты проектирования: ошибки при оценке показателей прочности, ошибки при выборе материала;
- Дефекты технологии производства: ошибки в технологическом изготовлении на первоначальной стадии производства, отклонения от технологических режимов;
- Неправильная техническая эксплуатация: нарушение правил и норм технической эксплуатации.

*По характеру появления различают постоянные и внезапные отказы*.

Гребной винт в реальных условиях технической эксплуатации работает как неремонтируемое изделие в нерегулярном режиме, а его отказы обычно происходят в море – далеко от ремонтных баз. В этом случае возрастает роль планового ремонтно-профилактического обслуживания, которое может регулярно проводиться в периоды докования.

Другой особенностью гребных винтов, является то, что они эксплуатируются до предельного состояния, которое для цельнолитых конструкций наступает при: поломке большей части лопасти или больших остаточных деформациях; достижении заданной наработки или окончании заданного срока службы. Следует отметить, что предельное состояние винтов наступает обычно при окончании срока службы судна.

Значительно ухудшает эксплуатационные качества винтов кавитация, а также процессы химической и электрохимической эрозии.

*Поскольку, отказы гребного винта возникают внезапно, в открытом море – они представляют серьёзную угрозу безопасности плавания судна. Значит, в период между докованиями судна гребной винт должен обладать высокой степенью надёжности – быть, практически, безотказным*.

# 5. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕНАЛИВНЫХ СУДОВ

## 5.1. Образование экологически вредных веществ

### 5.1.1. Источники загрязнения

*Эксплуатация нефтеналивных судов неизбежно связана с возникновением и решением разнообразных экологических проблем.*

*Как и все другие судна, нефтеналивные суда являются источником повышенной экологической опасности для окружающей среды*, и, следовательно, еще на этапе проектирования широко применяются методы по предотвращению их экологически опасной эксплуатации: недопущению или минимизации количества вредных веществ, выбрасываемых в окружающую среду.

*В процессе эксплуатации нефтеналивные суда находятся в непрерывной взаимосвязи с окружающей средой*: для работы судовых энергетических установок и обслуживающих систем потребляют забортную воду и воздух, сбрасывают в атмосферу выпускные газы, а в гидросферу – воду из теплообменных аппаратов и нефтесодержащие воды.

Таким образом, *несмотря на обилие существующих средств и методов защиты окружающей среды, нефтеналивные суда продолжают оставаться источником теплового, шумового вибрационного и химико-биологического загрязнения*.

Вследствие несовершенства судовых энергетических установок, обслуживающих систем, технологических процессов (хранения, подготовки, использования горюче-смазочных веществ), конструкции механизмов и устройств, нарушений правил технической эксплуатации, а иногда и в результате аварий или гибели судов загрязнение окружающей среды может достигать катастрофических масштабов. В результате изменяются санитарно-гигиенические условия жизнедеятельности человека, отравляется флора и фауна.

**Источниками загрязнения** *окружающей среды при эксплуатации нефтеналивных судов являются*:

- *Судовые энергетические установки*:
  - Выпускные газы дизельных двигателей и котельных установок;
  - Сбросы топлива, масла и других нефтесодержащих вод;
- *Перевозимые грузы*:
  - Аварийные разливы при проведении грузовых операций;
- *Судовые экипажи*:
  - Сбросы твердых и пищевых отходов;
  - Сбросы хозяйственно-фекальных сточных вод.

*Качественная и количественная стороны загрязнения окружающей среды нефтеналивными судами определяются*:

- Типом и назначением судна;
- Видом перевозимого груза;
- Типом и мощностью судовой энергетической установки;
- Сортом используемого топлива;
- Степенью автоматизация энергетической установки.

### 5.1.2. Загрязнение выпускными газами

*Одними из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды являются* **газообразные вещества**, *выбрасываемые вместе с выпускными газами энергетических установок нефтеналивных судов.*

*Выпускные газы судовых энергетических установок содержат около 200 компонентов, среди которых наибольший объем занимают*:

- Газы: азот $N_2$, кислород $O_2$, водород $H_2$;
- Вода: водяной пар $H_20$;
- Окислы углерода $CO_x$: оксид углерода $CO$, углекислый газ $CO_2$;
- Окислы азота $NO_x$: оксид азота $NO$, диоксид азота $NO_2$, тетраоксид диазота $N_2O_4$, пентаоксид диазота $N_2O_5$;
- Окислы серы $SO_x$: оксид серы $SO$, сернистый газ $SO_2$;
- Углеводородные соединения: 3,4-бензо(α)пирен $C_{20}H_{12}$;
- Альдегиды: акролеин $C_3H_4O$, формальдегид $CH_20$;
- Твердые частицы: сажа $C$.

Азот $N_2$, кислород $O_2$, водород $H_2$ и водяной пар $H_20$ представляют собой продукты полного сгорания топлива, которые способствуют образованию «парникового» эффекта и кислотных дождей. Окислы углерода, азота и серы участвуют в образовании фотохимических реакций смога, а также способствуют задымлению атмосферы. Углеводородные соединения и сажа являются сильными канцерогенами, приводящими к ухудшению состояния здоровья людей, а также к появлению у них хронических заболеваний.

*Концентрация вредных веществ в выпускных газах энергетических установок нефтеналивных судов зависит от*:

- Типа главных и вспомогательных двигателей;
- Сорта используемого топлива;
- Температуры и давления газов в цилиндре двигателя;
- Состава рабочей смеси в цилиндре двигателя;
- Режима работы двигателей;

*Образование окислов азота* $NO$, $NO_2$, $N_2O_4$ *и* $N_2O_5$ сопровождает рабочий процесс любой судовой энергетической установки, если температура этого процесса выше 1500 °С. В таких условиях атомы азота становятся химически активными из-за потери электронов. Смесь топлива и воздуха переходит в полуплазменное состояние. Одновременно с процессом образования ионизированных атомов и молекул идет захват свободных электронов этими атома-

ми и молекулами. В конце рабочего процесса поток свободных электронов уходит через стенку камеры сгорания и создаются условия образования химически активного азота.

*Образование оксида углерода CO* происходит в результате неполного сгорания топлива, вызванной нарушениями в работе топливной аппаратуры судовой энергетической установки.

*Образование окислов серы SO и $SO_2$* происходит в процессе сгорания топлива с высоким содержанием серы. Окисление серы в оксид серы и сернистый газ происходит с выделением теплоты, что способствует выработке полезной энергии в судовой энергетической установке. Однако выбрасываемые соединения являются опасными веществами для окружающей среды. При температуре ниже 110 °С оксид серы, соединяясь с парами воды, образует химически активную серную кислоту $H_2S0_4$., способствующую ускоренному износу деталей цилиндрово-поршневой группы.

*Углекислый газ $CO_2$* является конечным газообразным веществом, выбрасываемым в составе выпускных газов судовой энергетической установки. Наряду с азотом $N_2$, кислородом $O_2$, водородом $H_2$ и водяным паром $H_20$ углекислый газ активно участвует в разрушении озонового слоя и создании «парникового» эффекта.

## 5.2. Расчет выброса выпускных газов

### 5.2.1. Главный двигатель

*Эффективная мощность главного двигателя на заданном режиме*, $N_e^{ГД}$:

$$N_e^{ГД} = N_e^{з} = 7\,739{,}86\ кВт.$$

Таблица 4.1 – Удельные выбросы вредных веществ $g_{SO}$, $g_{CO}$, $g_{NO}$, $g_C$

| Эффективная мощность двигателя $N_e$, кВт | Удельный выброс окислов серы $SO_x$ $g_{so}$, г/(кВт·ч) | Удельный выброс оксида углерода $CO_x$ $g_{CO}$, г/(кВт·ч) | Удельный выброс окислов азота $NO_x$ $g_{NO}$, г/(кВт·ч) | Удельный выброс сажи $C$ $g_C$, г/(кВт·ч) |
|---|---|---|---|---|
| 1 000 | 1,22 | 5,39 | 8,46 | 0,36 |
| 5 000 | 1,54 | 6,59 | 9,74 | 0,54 |
| 10 000 | 3,29 | 8,09 | 12,24 | 0,72 |
| 15 000 | 6,54 | 9,59 | 15,74 | 0,84 |
| 20 000 | 11,29 | 11,09 | 20,24 | 0,92 |
| 25 000 | 17,54 | 12,59 | 25,74 | 0,94 |

*Удельный выброс окислов серы главным двигателем на заданном режиме*, $g_{SO}^{ГД}$:

$$g_{SO}^{ГД} = 2{,}31\,г/(кВт \cdot ч)$$ – принимается из таблицы 4.1.

*Удельный выброс оксида углерода главным двигателем на заданном режиме*, $g_{CO}^{ГД}$:

$$g_{CO}^{ГД} = 7{,}41\,г/(кВт \cdot ч)$$ – принимается из таблицы 4.1.

*Удельный выброс окислов азота главным двигателем на заданном режиме*, $g_{NO}^{ГД}$:

$$g_{NO}^{ГД} = 10{,}98\,г/(кВт \cdot ч)$$ – принимается из таблицы 4.1.

*Удельный выброс сажи главным двигателем на заданном режиме*, $g_{C}^{ГД}$:

$$g_{C}^{ГД} = 0{,}64\,г/(кВт \cdot ч)$$ – принимается из таблицы 4.1.

*Выброс окислов серы главным двигателем на заданном режиме*, $G_{SO}^{ГД}$:

$$G_{SO}^{ГД} = \frac{24{,}00 \cdot N_e^{ГД} \cdot g_{SO}^{ГД}}{1\,000\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 2{,}31}{1\,000\,000} \approx 0{,}43\,т/сут.$$

*Выброс оксида углерода главным двигателем на заданном режиме*, $G_{CO}^{ГД}$:

$$G_{CO}^{ГД} = \frac{24{,}00 \cdot N_e^{ГД} \cdot g_{CO}^{ГД}}{1\,000\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 7{,}41}{1\,000\,000} \approx 1{,}38\,т/сут.$$

*Выброс окислов азота главным двигателем на заданном режиме*, $G_{NO}^{ГД}$:

$$G_{NO}^{ГД} = \frac{24{,}00 \cdot N_e^{ГД} \cdot g_{NO}^{ГД}}{1\,000\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 10{,}98}{1\,000\,000} \approx 2{,}04\,т/сут.$$

*Выброс сажи главным двигателем на заданном режиме*, $G_{C}^{ГД}$:

$$G_{C}^{ГД} = \frac{24{,}00 \cdot N_e^{ГД} \cdot g_{C}^{ГД}}{1\,000\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 7\,739{,}86 \cdot 2{,}31}{1\,000\,000} \approx 0{,}12\,т/сут.$$

*Суммарный выброс вредных веществ главным двигателем на заданном режиме*, $G_{врд}^{ГД}$:

$$\boxed{G_{врд}^{ГД} = G_{SO}^{ГД} + G_{CO}^{ГД} + G_{NO}^{ГД} + G_{C}^{ГД} = 0{,}43 + 1{,}38 + 2{,}04 + 0{,}12 \approx 3{,}97\,т/сут.}$$

$$\left[G_{врд}^{ГД}\right]_1 = 3{,}97\,т/сут, \qquad \left[G_{врд}^{ГД}\right]_4 = 21{,}21\,т/сут,$$

$$\left[G_{врд}^{ГД}\right]_2 = 10{,}39\,т/сут, \qquad \left[G_{врд}^{ГД}\right]_5 = 31{,}34\,т/сут,$$

$$\left[G_{врд}^{ГД}\right]_3 = 13{,}85\,т/сут, \qquad \left[G_{врд}^{ГД}\right]_6 = 33{,}90\,т/сут.$$

*Выброс окислов серы главным двигателем за рейс на заданном режиме*, $B_{SO}^{ГД}$:

$$B_{SO}^{ГД} = 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} \cdot G_{SO}^{ГД} = 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} \cdot 0{,}43 \approx 17{,}17\,т.$$

*Выброс оксида углерода главным двигателем за рейс на заданном режиме*, $B_{CO}^{ГД}$:

$$B_{CO}^{ГД} = 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} \cdot G_{CO}^{ГД} = 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} \cdot 1{,}38 \approx 55{,}06\,т.$$

*Выброс окислов азота главным двигателем за рейс на заданном режиме*, $B_{NO}^{ГД}$:

$$B_{NO}{}^{ГД} = 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} \cdot G_{NO}^{ГД} = 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} \cdot 2{,}04 \approx 81{,}59\ т.$$

*Выброс сажи главным двигателем за рейс на заданном режиме*, $B_C{}^{ГД}$:

$$B_C{}^{ГД} = 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} \cdot G_C^{ГД} = 1{,}15 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} \cdot 0{,}12 \approx 4{,}77\ т.$$

*Суммарный выброс вредных веществ главным двигателем за рейс на заданном режиме*, $B_{врд}{}^{ГД}$:

$$\boxed{B_{врд}{}^{ГД} = B_{SO}{}^{ГД} + B_{CO}{}^{ГД} + B_{NO}{}^{ГД} + B_C{}^{ГД} = 17{,}17 + 55{,}06 + 81{,}59 + 4{,}77 \approx 158{,}59\ т.}$$

$\left[B_{врд}^{ГД}\right]_1 = 158{,}59\ т,$ $\left[B_{врд}^{ГД}\right]_4 = 848{,}16\ т,$

$\left[B_{врд}^{ГД}\right]_2 = 415{,}41\ т,$ $\left[B_{врд}^{ГД}\right]_5 = 1\,253{,}30\ т,$

$\left[B_{врд}^{ГД}\right]_3 = 554{,}02\ т,$ $\left[B_{врд}^{ГД}\right]_6 = 1\,355{,}64\ т.$

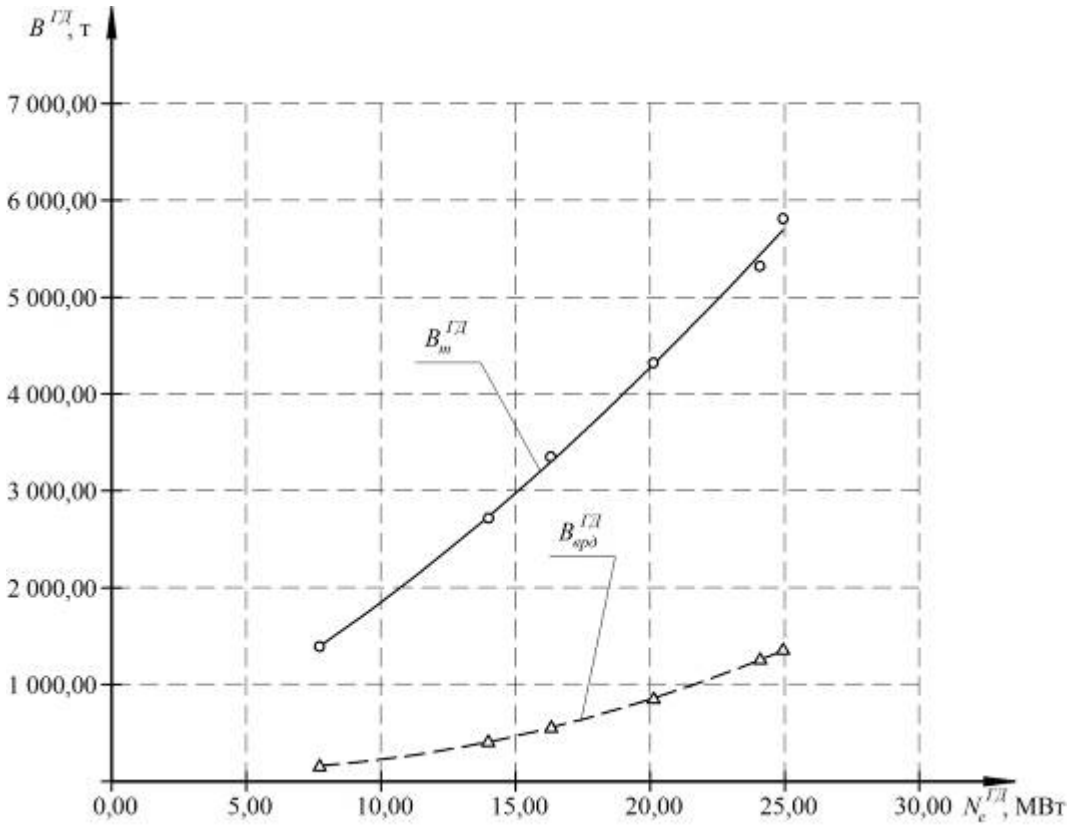



Рисунок 4.1 – Зависимость суммарного выброса вредных веществ $B_{врд}{}^{ГД}$ и расхода топлива $B_m{}^{ГД}$ главными двигателями от их мощности $N_e^{ГД}$

*Относительный выброс вредных веществ главным двигателем за рейс на заданном режиме*, $U^{ГД}$:

$$\boxed{U^{ГД} = \frac{B_{врд}^{ГД}}{B_m^{ГД}} = \frac{158{,}59}{1389{,}53} \approx 0{,}11.}$$

$\left[U^{ГД}\right]_1 = 0{,}11,$ $\left[U^{ГД}\right]_2 = 0{,}15,$

$\left[U^{ГД}\right]_3 = 0{,}16,$ $\left[U^{ГД}\right]_5 = 0{,}23,$

$\left[U^{ГД}\right]_4 = 0{,}20,$ $\left[U^{ГД}\right]_6 = 0{,}22.$

По результатам проведенных вычислений строится *график выброса вредных веществ главными двигателями* (рисунок 4.1) – зависимость суммарных выбросов вредных веществ главными двигателями от их мощности.

### 5.2.2. Дизель-генераторы

*Эффективная мощность дизель-генератора на заданном режиме*, $N_e^{ДГ}$:

$$N_e^{ДГ} = N^{ДГ} = 370{,}73\ кВт.$$

*Удельный выброс окислов серы дизель-генератором на заданном режиме*, $g_{SO}^{ДГ}$:

$$g_{SO}^{ДГ} = 1{,}26\ г/(кВт \cdot ч)$$ – принимается из таблицы 4.1.

*Удельный выброс оксида углерода дизель-генератором на заданном режиме*, $g_{CO}^{ДГ}$:

$$g_{CO}^{ДГ} = 5{,}20\ г/(кВт \cdot ч)$$ – принимается из таблицы 4.1.

*Удельный выброс окислов азота дизель-генератором на заданном режиме*, $g_{NO}^{ДГ}$:

$$g_{NO}^{ДГ} = 8{,}31\ г/(кВт \cdot ч)$$ – принимается из таблицы 4.1.

*Удельный выброс сажи дизель-генератором на заданном режиме*, $g_C^{ДГ}$:

$$g_C^{ДГ} = 0{,}33\ г/(кВт \cdot ч)$$ – принимается из таблицы 4.1.

*Выброс окислов серы дизель-генератором на заданном режиме*, $G_{SO}^{ДГ}$:

$$G_{SO}^{ДГ} = \frac{24{,}00 \cdot N_e^{ДГ} \cdot g_{SO}^{ДГ}}{1\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 370{,}73 \cdot 1{,}26}{1\,000} \approx 11{,}17\ кг/сут.$$

*Выброс оксида углерода дизель-генератором на заданном режиме*, $G_{CO}^{ДГ}$:

$$G_{CO}^{ДГ} = \frac{24{,}00 \cdot N_e^{ДГ} \cdot g_{CO}^{ДГ}}{1\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 370{,}73 \cdot 5{,}20}{1\,000} \approx 46{,}27\ кг/сут.$$

*Выброс окислов азота дизель-генератором на заданном режиме*, $G_{NO}^{ДГ}$:

$$G_{NO}^{ДГ} = \frac{24{,}00 \cdot N_e^{ДГ} \cdot g_{NO}^{ДГ}}{1\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 370{,}73 \cdot 8{,}31}{1\,000} \approx 73{,}96\ кг/сут.$$

*Выброс сажи дизель-генератором на заданном режиме*, $G_C^{ДГ}$:

$$G_C^{ДГ} = \frac{24{,}00 \cdot N_e^{ДГ} \cdot g_C^{ДГ}}{1\,000} = \frac{24{,}00 \cdot 370{,}73 \cdot 0{,}33}{1\,000} \approx 2{,}97\ кг/сут.$$

*Суммарный выброс вредных веществ дизель-генератором на заданном режиме*, $G_{врд}^{ДГ}$:

$$\boxed{G_{врд}^{ДГ} = \frac{G_{SO}^{ДГ} + G_{CO}^{ДГ} + G_{NO}^{ДГ} + G_C^{ДГ}}{1000} = \frac{11{,}17 + 46{,}27 + 73{,}96 + 2{,}97}{1000} \approx 0{,}13\ т/сут.}$$

$\left[G_{врд}^{ДГ}\right]_1 = 0{,}13\ т/сут,$ $\left[G_{врд}^{ГД}\right]_2 = 0{,}21\ т/сут,$

$$\left[G_{врд}^{ГД}\right]_3 = 0{,}23\ т/сут, \qquad \left[G_{врд}^{ГД}\right]_5 = 0{,}33\ т/сут,$$

$$\left[G_{врд}^{ГД}\right]_4 = 0{,}28\ т/сут, \qquad \left[G_{врд}^{ГД}\right]_6 = 0{,}34\ т/сут.$$

*Выброс окислов серы дизель-генератором за рейс на заданном режиме,* $B_{SO}{}^{ГД}$:

$$B_{SO}{}^{ДГ} = \left(1{,}10 \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} + i^{ДГ}{}' \cdot t_{ст}{}' + i^{ДГ}{}'' \cdot t_{ст}{}''\right) \cdot G_{SO}^{ДГ} =$$

$$= \left(1{,}10 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} + 2{,}00 \cdot 2{,}00 + 1{,}00 \cdot 2{,}00\right) \cdot 11{,}17 \approx 494{,}38\ кг.$$

*Выброс оксида углерода дизель-генератором за рейс на заданном режиме,* $B_{CO}{}^{ГД}$:

$$B_{CO}{}^{ДГ} = \left(1{,}10 \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} + i^{ДГ}{}' \cdot t_{ст}{}' + i^{ДГ}{}'' \cdot t_{ст}{}''\right) \cdot G_{CO}^{ДГ} =$$

$$= \left(1{,}10 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} + 2{,}00 \cdot 2{,}00 + 1{,}00 \cdot 2{,}00\right) \cdot 46{,}27 \approx 2\,047{,}57\ кг.$$

*Выброс окислов азота дизель-генератором за рейс на заданном режиме,* $B_{NO}{}^{ГД}$:

$$B_{NO}{}^{ДГ} = \left(1{,}10 \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} + i^{ДГ}{}' \cdot t_{ст}{}' + i^{ДГ}{}'' \cdot t_{ст}{}''\right) \cdot G_{NO}^{ДГ} = .$$

$$= \left(1{,}10 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} + 2{,}00 \cdot 2{,}00 + 1{,}00 \cdot 2{,}00\right) \cdot 73{,}96 \approx 3\,273{,}24\ кг.$$

*Выброс сажи дизель-генератором за рейс на заданном режиме,* $B_C{}^{ГД}$:

$$B_C{}^{ДГ} = \left(1{,}10 \cdot \frac{2 \cdot DST}{24{,}00 \cdot V} + i^{ДГ}{}' \cdot t_{ст}{}' + i^{ДГ}{}'' \cdot t_{ст}{}''\right) \cdot G_C^{ДГ} =$$

$$= \left(1{,}10 \cdot \frac{2 \cdot 6\,385{,}00}{24{,}00 \cdot 15{,}30} + 2{,}00 \cdot 2{,}00 + 1{,}00 \cdot 2{,}00\right) \cdot 2{,}97 \approx 131{,}32\ кг.$$

*Суммарный выброс вредных веществ дизель-генератором за рейс на заданном режиме,* $B_{врд}{}^{ДГ}$:

$$\boxed{B_{врд}{}^{ДГ} = \frac{B_{SO}{}^{ДГ} + B_{CO}{}^{ДГ} + B_{NO}{}^{ДГ} + B_C{}^{ДГ}}{1000} = \frac{494{,}38 + 2\,047{,}57 + 3\,273{,}24 + 131{,}32}{1000} \approx 5{,}95\ т.}$$

$$\left[B_{врд}^{ДГ}\right]_1 = 5{,}95\ т, \qquad \left[B_{врд}^{ДГ}\right]_4 = 12{,}39\ т,$$

$$\left[B_{врд}^{ДГ}\right]_2 = 9{,}19\ т, \qquad \left[B_{врд}^{ДГ}\right]_5 = 14{,}48\ т,$$

$$\left[B_{врд}^{ДГ}\right]_3 = 10{,}39\ т, \qquad \left[B_{врд}^{ДГ}\right]_6 = 14{,}93\ т.$$

*Относительный выброс вредных веществ дизель-генератором за рейс на заданном режиме,* $U^{ДГ}$:

$$U^{ДГ} = \frac{B_{врд}^{ДГ}}{B_m^{ДГ}} = \frac{5{,}95}{154{,}42} \approx 0{,}04.$$

$$\left[U^{ДГ}\right]_1 = 0{,}04, \qquad \left[U^{ДГ}\right]_4 = 0{,}04,$$
$$\left[U^{ДГ}\right]_2 = 0{,}04, \qquad \left[U^{ДГ}\right]_5 = 0{,}04,$$
$$\left[U^{ДГ}\right]_3 = 0{,}04, \qquad \left[U^{ДГ}\right]_6 = 0{,}04.$$

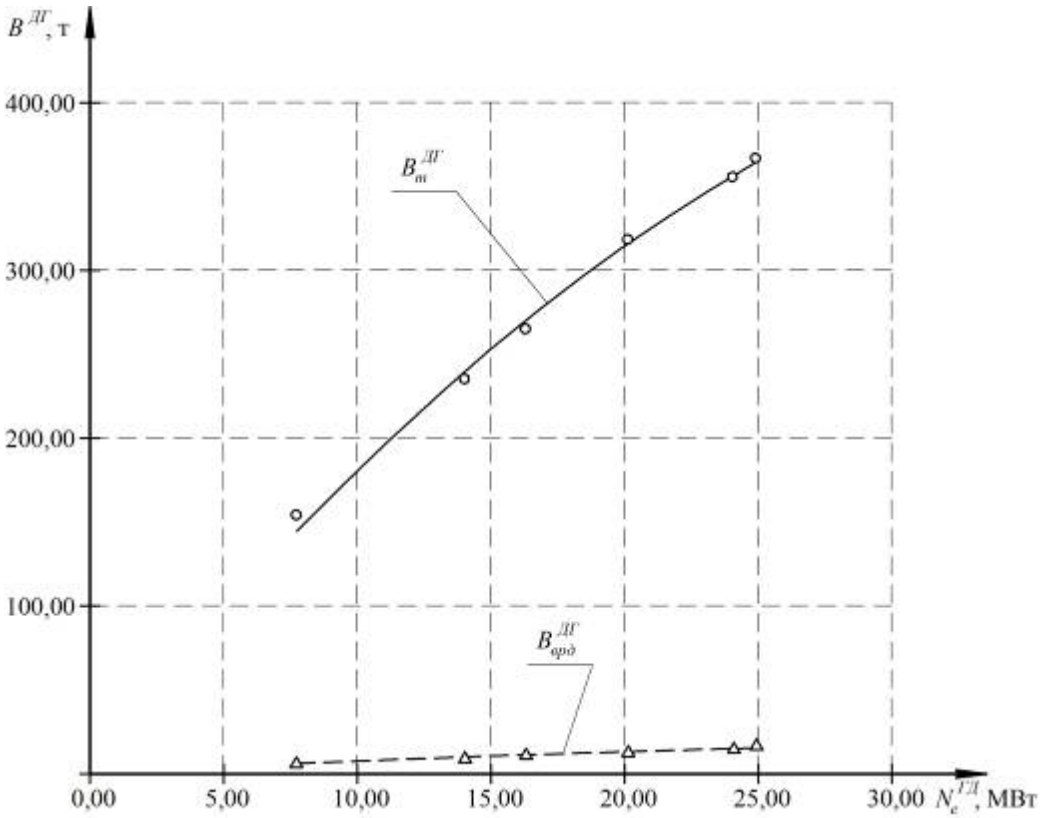



Рисунок 4.2 – Зависимость суммарного выброса вредных веществ $B_{врд}^{ГД}$ и расхода топлива $B_m^{ГД}$ дизель-генераторами от мощности главных двигателей $N_e^{ГД}$

По результатам проведенных вычислений строится *график выброса вредных веществ дизель-генераторами* (рисунок 4.2) – зависимость суммарных выбросов вредных веществ дизель-генераторами от мощности главных двигателей.

### 5.2.3. Вспомогательный котел

*Процентное содержание серы в топливе*, $S_m$:

$S_m = 1{,}90\,\%$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Процентное содержание золы в топливе*, $A_m$:

$A_m = 0{,}10\,\%$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Коэффициент нейтрализации окислов серы в топке вспомогательного котла*, $\gamma_{топ}^{ВК}$:

$\gamma_{топ}^{ВК} = 0{,}02$ – принимается из опыта эксплуатации.

Здесь *коэффициент нейтрализации окислов серы* – отношение объема окислов серы, связанных летучими частицами золы, к общему объему окислов серы, образовавшихся в топке вспомогательного котла.

*Коэффициент выброса золы из топки вспомогательного котла*, $\chi_{топ}^{ВК}$:

$$\chi_{топ}^{ВК} = 0{,}01$$ – принимается из опыта эксплуатации.

Здесь *коэффициент выброса золы* – отношение объема золы, уносимой с дымовыми газами, к общему объему золы, образовавшейся в топке вспомогательного котла.

*Выброс окислов серы вспомогательным котлом за рейс на заданном режиме*, $B_{SO}^{ВК}$:

$$B_{SO}^{ВК} = 0{,}02 \cdot S_т \cdot B_т^{ВК} \cdot \left(1 - \gamma_{топ}^{ВК}\right) = 0{,}02 \cdot 1{,}90 \cdot 52{,}25 \cdot \left(1 - 0{,}02\right) \approx 1{,}95\ т.$$

*Потери теплоты, вследствие механической неполноты сгорания топлива в топки вспомогательного котла*, $q_{мех}^{ВК}$:

$$q_{мех}^{ВК} = 0{,}00$$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Потери теплоты, вследствие химической неполноты сгорания топлива в топки вспомогательного котла*, $q_{хим}^{ВК}$:

$$q_{хим}^{ВК} = 0{,}50$$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Коэффициент неполноты сгорания топлива в топке вспомогательного котла*, $\varepsilon_{топ}^{ВК}$:

$$\varepsilon_{топ}^{ВК} = 0{,}65$$ – принимается из опыта эксплуатации.

Здесь *коэффициент неполноты сгорания топлива* – отношение объема теплоты, потерянной вследствие химической неполноты сгорания топлива и обусловленной наличием в продуктах сгорания оксида углерода, к общему объему теплоты потерянной в топке вспомогательного котла.

*Низшая теплотворная способность 1 кг топлива*, $Q_т^н$:

$$Q_т^н = 39{,}85\ МДж/кг$$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Выход оксида углерода при сжигании топлива в топке вспомогательного котла*, $C_{CO}^{ВК}$:

$$C_{CO}^{ВК} = q_{хим}^{ВК} \cdot \varepsilon_{топ}^{ВК} \cdot Q_т^н = 0{,}50 \cdot 0{,}65 \cdot 39{,}85 \approx 12{,}95\ т.$$

*Выброс оксида углерода вспомогательным котлом за рейс на заданном режиме*, $B_{CO}^{ВК}$:

$$B_{CO}^{ВК} = \frac{C_{CO}^{ВК} \cdot B_т^{ВК} \cdot \left(1 - q_{мех}^{ВК}\right)}{100} = \frac{12{,}95 \cdot 52{,}25 \cdot \left(1 - 0{,}00\right)}{100} \approx 6{,}77\ т.$$

*Коэффициент образования окислов азота в топке вспомогательного котла*, $\beta_{топ}^{ВК}$:

$$\beta_{топ}^{ВК} = 0{,}09$$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Выброс окислов азота вспомогательным котлом за рейс на заданном режиме*, $B_{NO}^{ВК}$:

$$B_{NO}^{ВК} = \frac{B_т^{ВК} \cdot Q_т^н \cdot \beta_{топ}^{ВК}}{100} = \frac{52{,}25 \cdot 39{,}85 \cdot 0{,}09}{100} \approx 1{,}87\ т.$$

*Эффективность золоуловителей вспомогательного котла, $\eta_{зол}^{ВК}$:*

$\eta_{зол}^{ВК} = 85{,}00\,\%$ – принимается из опыта эксплуатации.

*Выброс сажи вспомогательным котлом за рейс на заданном режиме, $B_C^{ВК}$:*

$$B_C^{ВК} = A_m \cdot B_m^{ВК} \cdot \chi_{топ}^{ВК} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{зол}^{ВК}}{100}\right) = 0{,}10 \cdot 52{,}25 \cdot 0{,}01 \cdot \left(1 - \frac{85}{100}\right) \approx 0{,}01\,т.$$

*Суммарный выброс вредных веществ вспомогательным котлом за рейс на заданном режиме, $B_{врд}^{ВК}$:*

$$B_{врд}^{ВК} = B_{SO}^{ВК} + B_{CO}^{ВК} + B_{NO}^{ВК} + B_C^{ВК} = 1{,}95 + 6{,}77 + 1{,}87 + 0{,}01 \approx 10{,}59\ т.$$

$\left[B_{врд}^{ВК}\right]_1 = 10{,}59\ т,$ $\left[B_{врд}^{ВК}\right]_4 = 27{,}84\ т,$

$\left[B_{врд}^{ВК}\right]_2 = 19{,}02\ т,$ $\left[B_{врд}^{ДГ}\right]_5 = 32{,}42\ т,$

$\left[B_{врд}^{ВК}\right]_3 = 22{,}37\ т,$ $\left[B_{врд}^{ДГ}\right]_6 = 33{,}63\ т.$

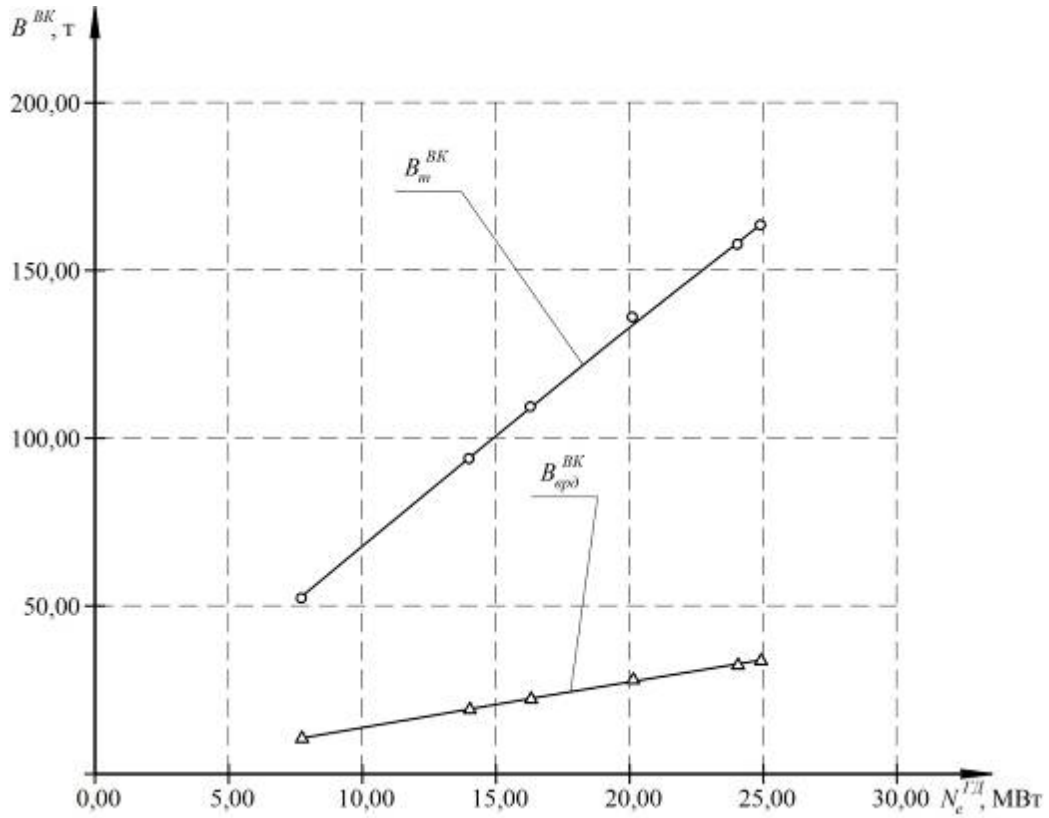



Рисунок 4.3 – Зависимость суммарного выброса вредных веществ $B_{врд}^{ВК}$ и расхода топлива $B_m^{ВК}$ вспомогательными котлами от мощности главных двигателей $N_e^{ГД}$

*Относительный выброс вредных веществ вспомогательным котлом за рейс на заданном режиме, $U^{ВК}$:*

$$U^{ВК} = \frac{B_{врд}^{ВК}}{B_m^{ВК}} = \frac{10{,}59}{52{,}25} \approx 0{,}20.$$

$$\left[U^{ВК}\right]_1 = 0{,}20, \qquad \left[U^{ВК}\right]_4 = 0{,}20,$$
$$\left[U^{ВК}\right]_2 = 0{,}20, \qquad \left[U^{ВК}\right]_5 = 0{,}21,$$
$$\left[U^{ВК}\right]_3 = 0{,}20, \qquad \left[U^{ВК}\right]_6 = 0{,}21.$$

По результатам проведенных вычислений строится *график выброса вредных веществ вспомогательными котлами* (рисунок 4.3) – зависимость суммарных выбросов вредных веществ вспомогательными котлами от мощности главных двигателей.

### 5.2.4. Суммарный выброс

*Суммарный выброс вредных веществ судовой энергетической установкой за рейс на заданном режиме*, $B_{врд}$:

$$B_{врд} = B_{врд}^{Гд} + B_{врд}^{ДГ} + B_{врд}^{ВК} = 158{,}59 + 5{,}95 + 10{,}59 \approx 175{,}13\ т.$$

$$\left\lfloor B_{врд}\right\rfloor_1 = 175{,}13, \qquad \left\lfloor B_{врд}\right\rfloor_4 = 888{,}39,$$
$$\left\lfloor B_{врд}\right\rfloor_2 = 443{,}62, \qquad \left\lfloor B_{врд}\right\rfloor_5 = 1300{,}19,$$
$$\left\lfloor B_{врд}\right\rfloor_3 = 586{,}78, \qquad \left\lfloor B_{врд}\right\rfloor_6 = 1404{,}20.$$

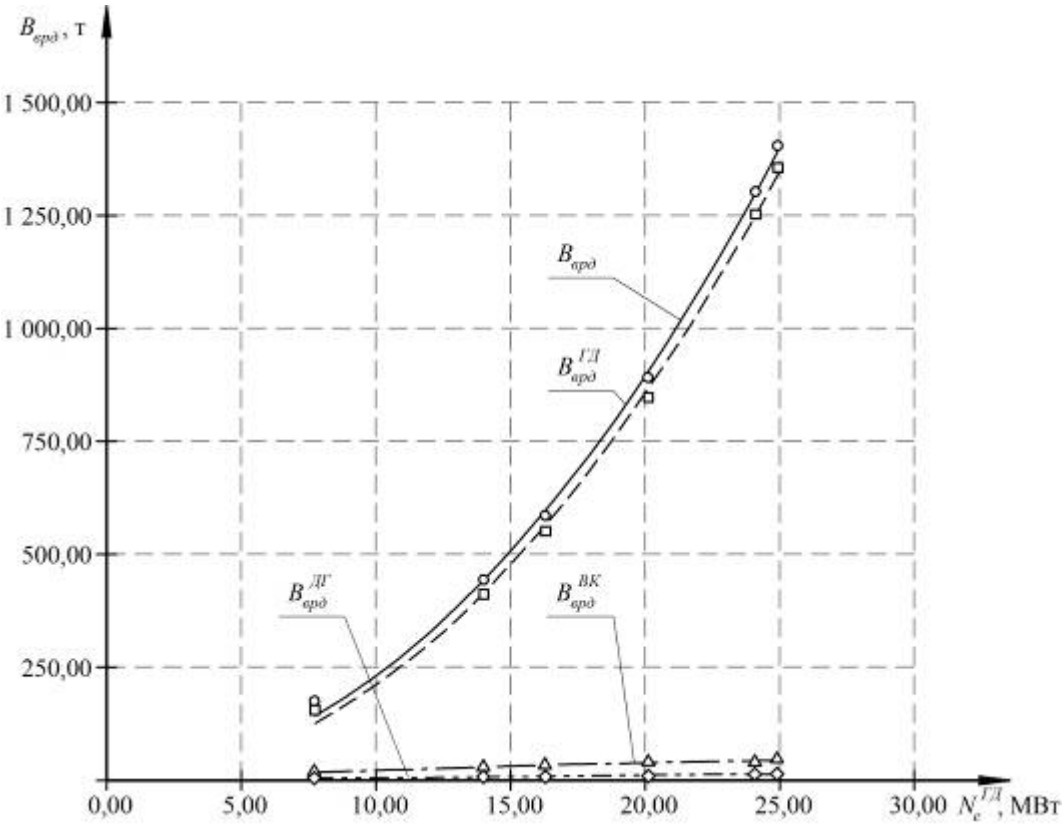



Рисунок 4.4 – Зависимость суммарного выброса вредных веществ $B_{врд}$ судовыми энергетическими установками от мощности их главных двигателей $N_e^{ГД}$

По результатам проведенных вычислений строится *график суммарного выброса вредных веществ* (рисунок 4.4) – зависимость суммарных выбросов вредных веществ судовыми энергетическими установками от мощности их главных двигателей.

Рост *суммарного выброса вредных веществ* $B_{врд}$ по мере увеличения дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов показывает, что **наибольшее загрязнение** *оказывают главные двигатели судовых энергетических установок*. Степень загрязнения, производимого главными двигателями, стремительно увеличивается по мере увеличения мощности энергетических установок. *Загрязнение, производимое вспомогательными котлами и дизель-генераторами,* **намного меньше** *загрязнения производимого главными двигателями* и незначительно увеличивается по мере увеличения дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов.

## 5.3. Защита от выброса выпускных газов

### 5.3.1. Нормативы выбросов

*В связи с растущим загрязнением атмосферы контролю за объемом выбросов выпускных газов энергетическими установками нефтеналивных судов придается особо важное значение. В целях ограничения объемов выброса с 15 мая 2005 г. введено в действие* **Приложение 6 «Предотвращение загрязнения атмосферы с судов» Международной Конвенции МАРПОЛ 73/78***, подтвержденное требованиями ИМО.*

*В соответствии с Приложением 6 Международной Конвенции МАРПОЛ 73/78 содержание вредных веществ в выпускных газах не должно превышать следующих значений*:

- Окислы азота $NO_x$: 1000…1500 *ppm*;
- Окислы серы $SO_x$: 30…900 *ppm*;
- Оксид углерода *CO*: 20…150 *ppm*;
- Гидрокарбоны: 20…100 *ppm*;
- Летучие органические соединения: 20…100 *ppm*;
- Несгоревшие частицы: 20…100 мг/м$^3$;

### 5.3.2. Средства защиты

*К настоящему моменту известно несколько основных* **способов снижения объема выбросов** *вредных веществ вместе с выпускными газами энергетических установок нефтеналивных судов.*

#### Обработка топлива

Одним из способов снижения объема выбросов вредных веществ является *обработка топлива с целью обеспечения его полного и интенсивного сгорания*. Для этого применяются смеси высоковязких топлив с пресной водой в виде *во-*

*дотопливных эмульсий* и *присадок*, улучшающих сгорание топлив. Согласно данному способу топливо с введенной водой подвергается гомогенизации с целью получения стабильной водотопливной эмульсии. Для обеспечения эффективного сгорания эмульсии ее распыление осуществляется в два этапа: при истечении через сопловые отверстия форсунки; под действием микровзрывов капель, происходящих вследствие вскипания последних. После первой фазы распыления каждая капля эмульсии представляет собой структурную систему, внутри которой находится одна или несколько глобул воды. В камере сгорания такая система подвергается подогреву. Под действием сил поверхностного натяжения система удерживаются в первоначальном виде. Температура кипения воды ниже температуры кипения топлива, поэтому по мере увеличения температуры капли, удерживаемая в топливе глобула воды, в результате вскипания преодолеет силы поверхностного натяжения находящейся вокруг нее топливной оболочки и взорвется, разбрызгивая эту оболочку на мельчайшие частицы. При этом резко увеличивается дисперсность распыления топлива, что обеспечивает быстрое испарение топливных частиц, интенсивное и полное сгорание топлива. Кроме того, практически полностью предотвращается образование окиси углерода, снижается образование окислов азота и существенно уменьшается образование твердых частиц неполного сгорания топлива.

Использование многофункциональных присадок также обеспечивает снижение образования вредных для окружающей среды веществ. В этом случае интенсификация процесса сгорания топлива достигается действием присадок, работающих в качестве донорно-акцепторных веществ в процессе окисления углеводородов.

## Увлажнение воздуха

Другим способом снижения объема выбросов вредных веществ является *увлажнение рабочего тела с целью снижения температуры его сгорания*. При этом снижение выбросов вредных веществ обусловлено тем, что водяной пар, обладая высокой теплоемкостью, отбирает на парообразование большое количество теплоты и таким образом снижает температуру в камере сгорания. Скорость реакций образования окислов азота находится в прямой функции от температуры. Поэтому, чем больше водяного пара в смеси газов в цилиндре, тем меньше будет температура в зоне сгорания топлива, тем меньше образуется окислов азота. Недостатком данного способа является то, что при этом уменьшится полезная работа цикла, так как тепловая энергия, аккумулированная водяным паром, отводится из цилиндра с выпускными газами.

## Нейтрализация вредных веществ

Еще одним способом снижения объема выбросов вредных веществ является *нейтрализация вредных веществ путем очистки продуктов сгорания в специализированных устройствах*.

Одной из разновидностей данного способа является *подача выпускных газов судовой энергетической установки в специальное очистительное устройство* (рисунок 4.5).

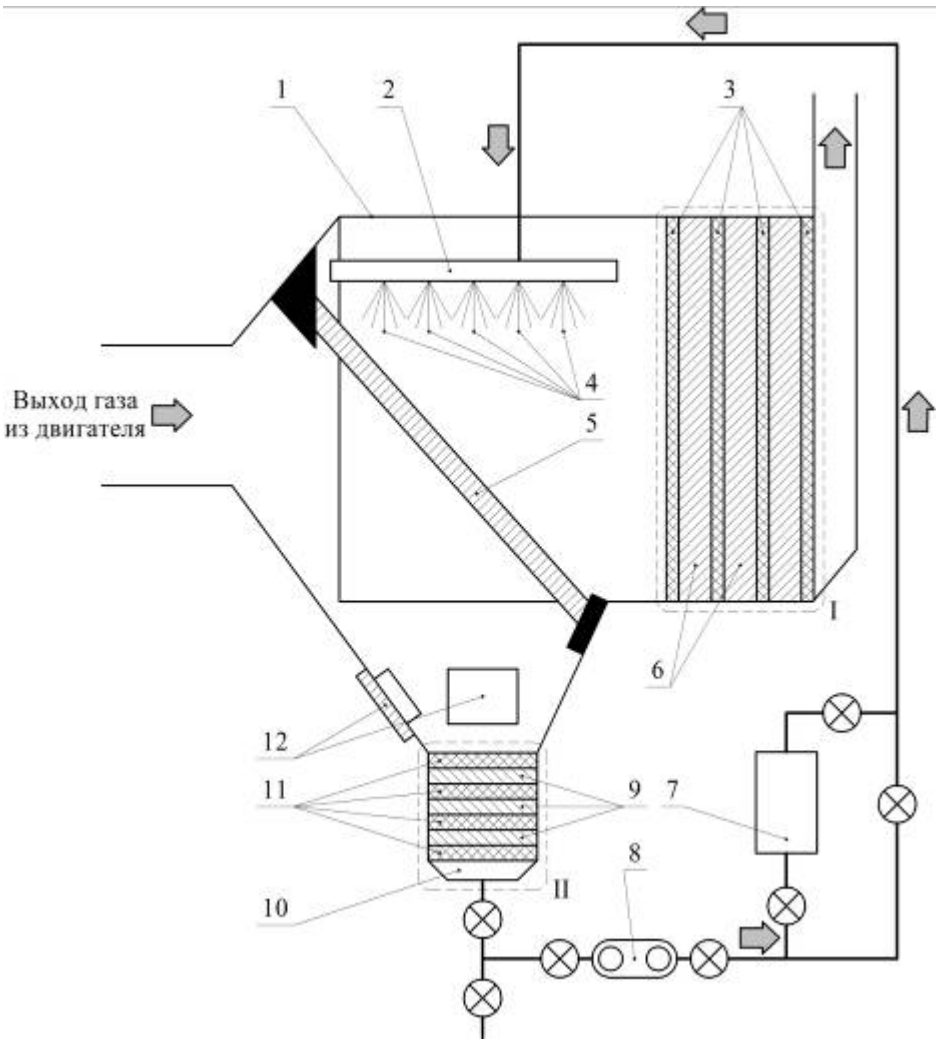



Рисунок 4.5 – Очистительное устройство для нейтрализации выпускных газов: I – нейтрализующий пакет для газа; II – нейтрализующий пакет для воды; 1 – корпус; 2 – орошающее устройство; 3, 11 – сетчатые перегородки; 4 – сопловые отверстия; 5 – противоточная перегородка; 6, 9 – нейтрализующие элементы; 7 – охладитель; 8 – насос; 10 – емкость для очищенной воды; 12 – боковой люк

В корпусе данного устройства размещены: очистительная орошаемая проточная перегородка, орошающее устройство, нейтрализующие пакеты для газа и воды, а также циркуляционная система с охладителем и насосом. Нейтрализация экологически опасных веществ и очистка от сажи выпускных газов производятся во время работы судовой энергетической установки непрерывно. Сажа удаляется с помощью противоточной перегородки, состоящей из набора гофрированных полос, которые располагаются внахлест так, чтобы газ, поднимаясь, проходил через эту перегородку. При этом перегородка орошается водой, поступающей под давлением через сопловые отверстия. Сажа смывается с перегородки водой и скапливается над нейтрализующим

пакетом для воды. Очищенный от сажи газ поступает к нейтрализующему пакету для газа. По конструктивному исполнению нейтрализующие пакеты для газа и воды одинаковы. Каждый пакет представляет собой вертикально расположенные элементы между сетчатыми перегородками. Нейтрализующие элементы состоят из пористого синтетического или керамического материала. Каждый из элементов пропитывается щелочным веществом, который и вступает в реакцию с кислыми продуктами, поступающими вместе с очищенными от сажи выпускными газами. В результате последовательного протекания химических реакций:

$$H_2O + NO_x \rightarrow HNO_3,$$

$$HNO_3 + (\textit{щелочь}) \rightarrow (Ca)NaNO_4 + H_2O.$$

Происходит очищение выпускных газов от вредных веществ.

Другой разновидностью данного способа является *рециркуляция части газов из выпускной системы на всасывание центробежного компрессора газотурбонагнетателя*. При этом уменьшается концентрация кислорода в камере сгорания, возрастают теплоемкость и газовая постоянная рабочего тела и, как следствие, уменьшается температура газов в цилиндре при сгорании топлива. Оба фактора обусловливают уменьшение количества окислов азота, образующихся в цилиндре. Однако перепуск газов ведет к снижению коэффициента избытка воздуха при сгорании, поэтому такой способ имеет ограниченное применение.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

*По результатам проведенного исследования можно сделать следующие* **выводы**:

- Увеличение размера экономического эффекта по мере увеличения дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов показывает, что использование схем замещения «Вспомогательный котел – Утилизационный котел» и «Дизель-генераторы – Валогенератор» тем более экономически выгодно, чем больше дедвейт судна:
  - Использование предлагаемой схемы утилизации тепла выгодно, как по причине экономии топлива (на ходовом режиме вспомогательный котел замещается утилизационным, а дизель-генератор – валогенератором), так и по причине снижения расходов на обслуживание и ремонт вспомогательного котла и дизель-генератора (после замещения вспомогательный котел и дизель-генератор использоваться не будут, однако им необходимо постоянное техническое обслуживание);
  - Использование предлагаемой схемы утилизации тепла повышает суммарный КПД судовой энергетической установки за счет более рационального использования энергии отработавших газов;
- Увеличение размера годовой прибыли по мере увеличения дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов показывает, что перевозка нефти и нефтепродуктов тем более экономически выгодна, чем больше дедвейт суда:
  - Вне зависимости от дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов наибольший экономический эффект достигается при частоте вращения главного двигателя в интервале от 50 до 60 об/мин;
  - В зависимости от дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов величина экономического эффекта существенно возрастает (рост расходов доходов значительно опережает рост расходов) по мере увеличения скорости движения судна (судно может за один и тот же промежуток времени сделать больше рейсов, а значит перевезти большее количество груза);
- Анализ суммарного выброса вредных веществ, производимого судовыми энергетическими установками нефтеналивных судов, показывает, что наибольшее загрязнение оказывают главные двигатели. Степень загрязнения, производимого главными двигателями, существенно возрастает по мере увеличения мощности судовых энергетических установок. Загрязнение, производимое вспомогательными котлами и дизель-генераторами, намного меньше загрязнения производимого главными двигателями и незначительно увеличивается по мере увеличения дедвейта рассматриваемых нефтеналивных судов.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ


1. Башуров Б.П., Носенко С.Е., Шарик В.В. Эксплуатационные качества элементов судового энергетического комплекса. Часть 1. – Новороссийск: РИО НГМА, 2005.
2. Башуров Б.П., Носенко С.Е., Шарик В.В. Эксплуатационные качества элементов судового энергетического комплекса. Часть 2. – Новороссийск: РИО НГМА, 2005.
3. Башуров Б.П. Техническая эксплуатация энергетических установок судовых транспортных средств. Учебное пособие. – Новороссийск: РИО НГМА, 2001.
4. Башуров Б.П. Эксплуатационная надежность и контроль технического состояния элементов судовых энергетических установок. Учебное пособие. – Новороссийск: РИО НГМА, 2001.
5. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта. – М.: Транспорт, 2005.
6. Пахомов Ю.А. Судовые энергетические установки с двигателями внутреннего сгорания. – М.: ТрансЛит, 2007.
7. Васькевич Ф.А. Двигатели внутреннего сгорания. Теория, эксплуатация, обслуживание. Учебное пособие. – Новороссийск: РИО НГМА, 2004.
8. Васькевич Ф.А. Эксплуатация судовых силовых установок. Практическое пособие по эксплуатации судовых энергетических установок танкеров. – Новороссийск: РИО НГМА, 2004.
9. Самсонов В.И., Худов Н.И. Двигатели внутреннего сгорания морских судов. – М.: Транспорт, 1990.
10. Артемов Г.А., Волошин Ю.В., Захаров Ю.В., Шквар А.Я. Судовые энергетические установки. – Л.: Судостроение, 1987.
11. Захаров Г.В. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок. – М.: ТрансЛит, 2009.
12. Камкин С.В., Возницкий И.В., Большаков В.Ф. Эксплуатация судовых дизельных энергетических установок. – М.: Транспорт, 1996.
13. Камкин С.В., Лемещенко А.Л., Пунда А.С. Повышение экономичности судовых дизелей. – СПб.: Судостроение, 1992.
14. Гогин А.Ф., Кивалкин Е.Ф., Богданов А.А. Судовые дизели: основы теории, устройство и эксплуатация. – М.: Транспорт, 1988.
15. Гаврилов В.С., Камкин С.В., Шмелев В.П. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок. – М.: Транспорт, 1985.
16. Возницкий И.В., Камкин С.В., Шмелев В.П., Осташенков В.Ф. Рабочие процессы судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1979.
17. Шишкин В.А. Анализ неисправностей и предотвращение повреждений судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1986.

18. Кондратьев Н.Н. Отказы и дефекты судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1985.
19. Маренков А.М. Обнаружение и устранение дефектов судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1975.
20. Камкин С.В. Газообмен и наддув судовых дизелей. – Л.: Судостроение, 1972.
21. Родионов Н.Н. Современные танкеры. – Л.: Судостроение, 1980.
22. Врублевская Л.И. Устройство и гидромеханика корабля. – Горький: ГИИВТ, 1984.
23. Анфимов В.Н., Сиротина Г.Н., Чижов А.М. Устройство и гидромеханика судна. – Л.: Судостроение, 1974.
24. Анфимов В.Н., Ваганов Г.И., Павленко В.Г. Судовые тяговые расчеты. – М.: Транспорт, 1970.
25. РД 31.21.30-97. Правила технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций.
26. Официальный сайт судостроительного предприятия *BRODOSPLIT-BRODOGRADILIŠTE d.o.o.*, www.brodosplit.hr.
27. Официальный сайт судостроительного предприятия *HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES MIPO Dockyard*, www.hhi.co.kr.
28. Официальный сайт судостроительного предприятия *KAVASAKI SHIPBUILDING CORPORATION KOBE Shipyard*, www.kawasakizosen.co.jp.
29. Официальный сайт машиностроительного предприятия *MAN Diesel & Turbo SE*, www.mandieselturbo.com.
30. Официальный сайт машиностроительного предприятия *ASEA Brown BOVERI Power Systems* , www.abb.com.