

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

---

**Кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания  
и установок**

**ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ 40 ДМ (12 ДРН 23/30)  
ПО ВИНТОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ**

**Методические указания  
к лабораторным работам 2.1—2.5**

**Санкт-Петербург  
1995**



Методические указания предназначены для студентов Санкт-Петербургского Государственного морского технического университета факультета корабельной энергетики и автоматики дневного, вечернего и заочного отделений, обучающихся по специальностям "Двигатели внутреннего сгорания", "Судовые энергетические установки" и "Судовое энергетическое оборудование", выполняющих лабораторные работы по дисциплинам "Теория ДВС" и "Судовые ДВС".

Указаны цели и задачи исследования, дается описание двигателя и экспериментального стенда, излагаются содержание и порядок выполнения работ, а также основные требования к составлению отчета и перечень контрольных вопросов.

ГОРДЕЕВ

Петр Андреевич

КОПТЕВ

Константин Николаевич

ПЛОТНИКОВ

Вадим Алексеевич

# ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ 40ДМ (12ДРН 23/30) ПО ВИНТОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

Методические указания  
к лабораторным работам 2.1-2.5

Ответственный редактор канд. техн. наук, доц. В. К. Румб

Редактор Т. А. Канн

## І. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Учебно-экспериментальная установка с дизелем 40ДМ (І2ДРН 23/30) по составу оборудования и применяемых измерительных приборов и устройств полностью соответствует требованиям, предъявляемым к аналогичным стендам в НИИ и на заводах отрасли, что позволяет выполнять на ней различные теплотехнические и другие виды научных исследований.

Основная цель настоящего испытания – получение зависимостей основных параметров и показателей рабочего процесса двухтактного корабельного дизеля І2ДРН 23/30 при работе на режимах винтовой характеристики, анализ полученных результатов и выявление общих закономерностей изучаемых явлений, сопоставление полученных параметров и показателей рабочего процесса с данными завода-изготовителя и составление заключения о техническом состоянии дизеля.

Выполнение лабораторных работ состоит из следующих этапов.

1. Ознакомление с конструкцией, техническими данными и контрольными показателями работы исследуемого дизеля, с составом оборудования, измерительными приборами и устройствами экспериментальной установки.

2. Ознакомление с методикой проведения стендовых испытаний дизеля, режимами винтовой характеристики, с методикой обработки экспериментальных данных.

3. Участие в стендовых испытаниях и измерениях, в обработке данных протокола испытаний и других материалов, составление таблиц и графиков изменения параметров и показателей рабочего процесса дизеля.

4. Ознакомление с методикой записи и обработка индикаторных диаграмм дизеля.

5. Анализ полученных результатов, сопоставление их с техническими данными и контрольными показателями работы дизеля, а также с данными учебной и технической литературы,

формулировка выводов и заключения о результатах проведенного исследования и о техническом состоянии дизеля.

6. Составление отчета о лабораторных работах и подготовка к их защите.

## 2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И ТРЕБОВАНИЯ К СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Лабораторные работы 2.1-2.5 выполняются последовательно.

Сначала, проработав настоящие методические указания, студент составляет первую часть отчета о лабораторных работах 2.1 и 2.2. После защиты этих работ студент допускается к выполнению лабораторных работ 2.3-2.5 на экспериментальной установке в лаборатории ДВС. На базе полученных экспериментальных данных составляются отчеты о лабораторных работах 2.3-2.5, после чего студент готовится к защите всех лабораторных работ.

Представляемые к защите отчеты о всех работах должны быть оформлены с учетом требований ЕСКД и ГОСТ 7.32.81 на сброшюрованных и пронумерованных листах А4-го формата. Титульный лист отчета должен иметь в верхней части надпись "Санкт-Петербургский морской технический университет" и ниже "Кафедра судовых ДВС и ДУ", а в нижней части - штамп с указанием шифра, фамилий и инициалов студента и преподавателя, даты выполнения и название отчета: "Испытание двигателя 40ДМ (12ДРН 23/30) по винтовой характеристике".

Содержание отчетов о лабораторных работах 2.1-2.5 должно включать в себя следующие разделы.

### Лабораторная работа 2.1. ЦЕЛЬ, ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

2.1.1. Цель испытания.

2.1.2. Объект испытания. (Приводится краткое описание конструкции двигателя, его технические данные и контрольные показатели.)



2.1.3. Экспериментальная установка. (Приводится схема экспериментальной установки и ее краткое описание с перечнем оборудования и измерительных приборов.)

## Лабораторная работа 2.2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ И ОБРАБОТКИ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

2.2.1. Винтовая характеристика двигателя. (Дается определение исследуемой характеристики, приводится таблица режимов работы двигателя.)

2.2.2. Порядок проведения испытания.

2.2.3. Методика обработки результатов испытания. (Приводятся расчетные формулы для определения основных параметров и показателей рабочего процесса исследуемого дизеля.)

## Лабораторная работа 2.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ. ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

2.3.1. Протокол испытания дизеля 40 ДМ. (Приводится копия общего протокола испытания двигателя, где для каждого исследуемого режима винтовой характеристики указываются средние значения по двум измерениям параметров в ходе испытаний.)

2.3.2. Дается расфигуровка значений температур, зарегистрированных на ленте самописца ЭПП-09МЗ. Для каждого режима винтовой характеристики приводятся осредненные значения температур, зафиксированных на ленте самописца.

2.3.3. Обрабатываются результаты испытания и проводятся расчеты эффективных параметров и показателей. Составляются таблицы подсчитываемых параметров и показателей по формулам раздела 7 (см. параграф 7.1) с использованием данных пп.2.3.1, 2.3.2. При этом определяются и рассчитываются следующие параметры и показатели:  $N_e, P_e, M_{кр}, G_T, q_c, q_e, G_v, q_v, \alpha_z, \varphi_k$ ;  $Q_T, Q_e, Q_w, Q_r, Q_{нб}; q_T, q_e, q_w, q_r, q_{нб}; q'_T, q'_e, q'_w, q'_r, q'_{нб}$ .

2.3.4. Строятся графики изменения основных параметров и показателей дизеля на режимах винтовой характеристики в зависимости от частоты вращения. Графики представляются на отдельных листах миллиметровой бумаги с обязательным обозначением шкал для всех параметров и показателей п.2.3.3.



## Лабораторная работа 2.4. ОБРАБОТКА ИНДИКАТОРНЫХ ДИАГРАММ. ИНДИКАТОРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

2.4.1. Обработываются индикаторные диаграммы, приводятся таблицы группирования ординат и расчетные (см. пп. 7.1.21-7.1.26) значения индикаторных параметров и показателей (осредненные по двум измерениям):  $p_i$ ,  $p_z$ ,  $\Delta p / \Delta \varphi$ ,  $\varphi_z$ ,  $\eta_m$ ,  $\eta_i$ ,  $q_i$ ,  $N_i$ ,  $N_{\text{мех}}$ .

2.4.2. Строятся графики изменения индикаторных параметров и показателей по п. 2.4.1 в зависимости от частоты вращения.

## Лабораторная работа 2.5. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ И АГРЕГАТОВ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ

2.5.1. Обработка результатов испытания. По осредненным значениям измерений составляются таблицы параметров и показателей с использованием данных пп. 2.3.1, 2.3.2 и расчетных зависимостей, приводимых в разделе 7 (см. параграф "Параметры и показатели системы и агрегатов воздухоснабжения"):  $p_k^I$ ,  $p_k'$ ,  $p_k$ ,  $p_{гс}$ ,  $p_g'$ ,  $\Delta p_n$ ,  $\Delta p_T$ ;  $T_k^I$ ,  $T_k'$ ,  $T_k$ ,  $T_{гс}$ ,  $\Delta T_{тн}$ ,  $\Delta T_T$ ,  $\Delta T_{пн}$ ;  $\pi_k$ ,  $\pi_T$ ,  $\eta_k$ ,  $\eta_T$ ,  $\eta_{тн}$ ;  $N_{тн}$ ,  $\bar{N}_k$ ,  $\bar{N}_T$ ,  $u_2$ ,  $\bar{c}_m$ ;  $\pi_{пн}$ ,  $\eta_{пн}$ ,  $N_{пн}$ ,  $\eta_{vпн}$ ;  $\Delta T_{ох}$ ,  $\eta_{ох}$ ,  $\eta_z$ .

2.5.2. Графики изменения параметров и показателей системы и агрегатов воздухоснабжения представляются для всех параметров по п. 2.5.1 в зависимости от частоты вращения.

### Анализ результатов испытаний

На базе таблиц пп. 2.3.3, 2.4.1, 2.5.1 и графиков пп. 2.3.4, 2.4.2 и 2.5.2 дается по каждой лабораторной работе анализ полученных результатов, оцениваются закономерности изменения эффективных и индикаторных показателей, параметров и показателей системы и агрегатов наддува, делается их сопоставление с данными литературных источников, прослеживаются взаимосвязи отдельных параметров и показателей.

По итогам анализа даются заключения о наиболее интересных и важных результатах и оценка технического состояния



двигателя. В конце отчетов на отдельных листах приводятся перечень использованной литературы и содержание с указанием страниц по имеющимся разделам и параграфам.

### 3. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЯ

#### 3.1. Описание конструкции двигателя I2ДРН 23/30

Двигатель 40ДМ (обозначение по ГОСТ I2ДРН 23/30) является V-образным двенадцатицилиндровым реверсивным двухтактным двигателем с прямоточно-клапанной продувкой и двухступенчатой системой наддува с промежуточным охлаждением воздуха (рис.3.1 и 3.2).

Блок-картер двигателя представляет собой стальную сварную конструкцию V-образной формы, разделенную поперечными стойками (балками) на шесть секций. Снизу блок-картер закрыт тонкостенным поддоном (ванной). Фундаментной рамы дизель не имеет. Коленчатый вал подвешен к блок-картеру на семи стальных подвесках, которые закреплены болтами на поперечных балках блока. Стальные точкостенные вкладыши коренных подшипников залиты свинцовистой бронзой. Средний из семи коренных подшипников является установочным и отличается от остальных большей длиной и наличием упорных буртиков.

Чугунные вставные втулки цилиндров "мокрого" типа охлаждаются в верхней части водой, а в районе продувочных окон - воздухом. Каждая втулка крепится к крышке цилиндра шестью шпильками, ввернутыми в верхний бурт втулки, и в сборе с крышкой вставляется в гнездо блока цилиндров. Такая конструкция обеспечивает разгрузку газового стыка втулки, уплотняемого кольцевой красно-медной прокладкой.

Крышки цилиндров - составные, состоят из чугунного днища и алюминиевой верхней части. Каждая крышка в сборе со втулкой крепится к блоку цилиндров четырьмя шпильками. Через 8 перепускных отверстий в днище крышки в полость охлаждения крышки поступает вода из втулки цилиндра. В крышке размещены форсунка, четыре выпускных клапана и пусковой клапан с индикаторным вентилем. Сверху крышки цилиндров закры-



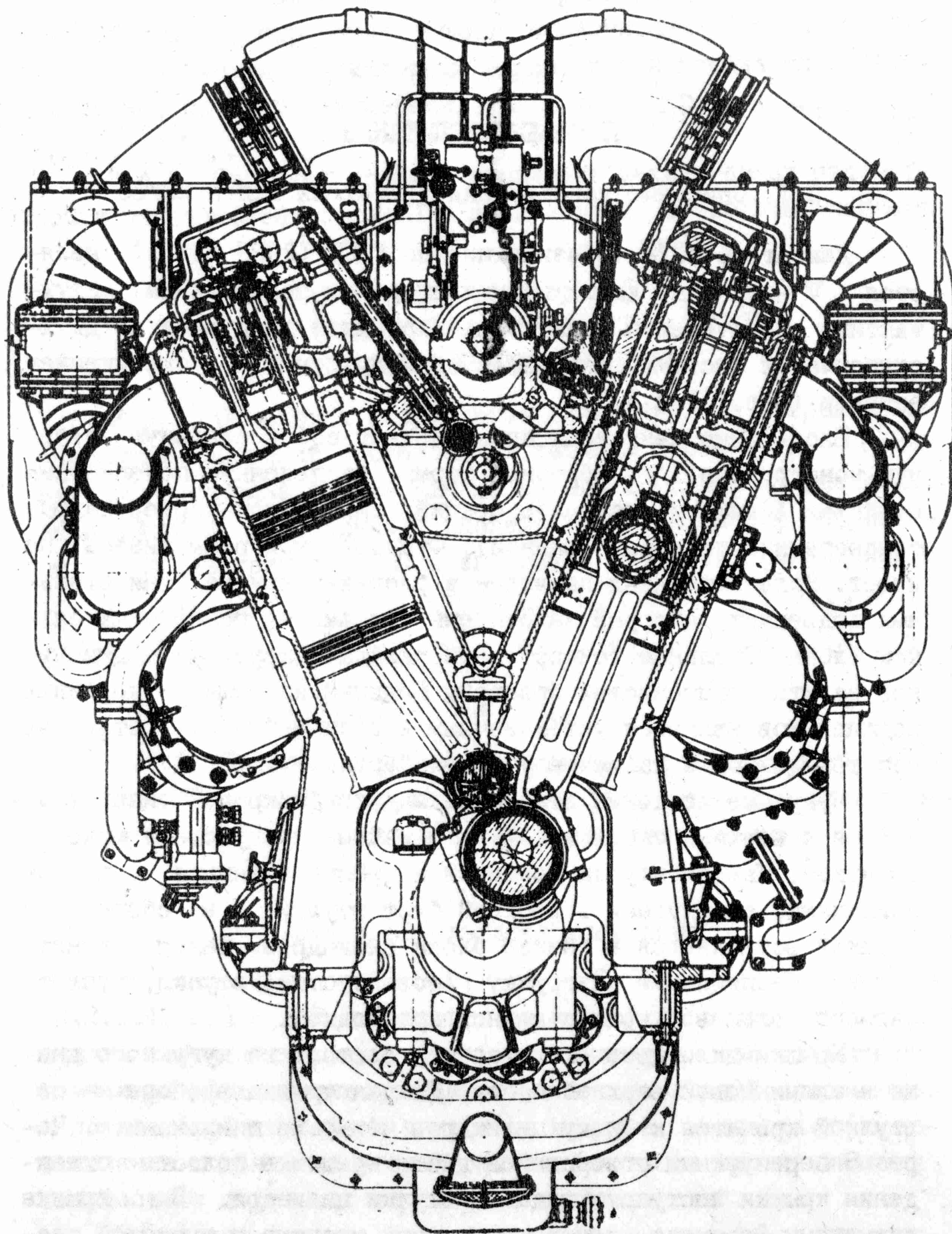


Рис.3.1. Поперечный разрез дизеля

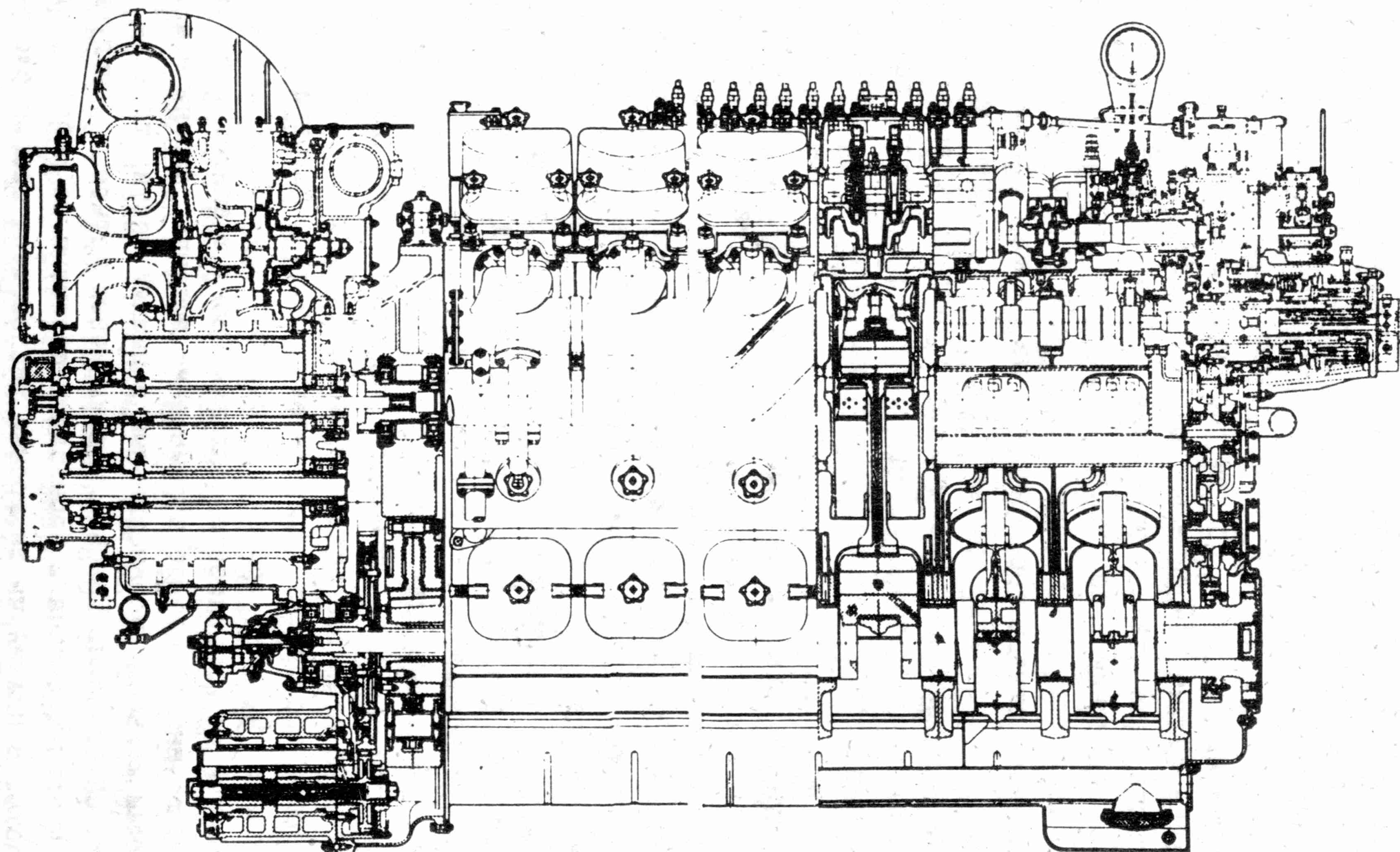


Рис.3.2. Продольный разрез дизеля



ваются колпаками, предотвращающими разбрызгивание масла, смазывающего распределительный механизм.

Коленчатый вал изготовлен из легированной стали. Поверхности шеек вала подвергаются азотированию. Угол заклинки шести кривошипов вала равен  $60^\circ$ . Кривошипы работают в следующем порядке: 1-5-3-4-2-6. Все шейки коленчатого вала имеют внутренние расточки, причем расточки шатунных шеек выполнены эксцентрично относительно рабочей поверхности. В теле коленчатого вала сделаны отверстия, через которые масло из коренных подшипников поступает в шатунные, минуя внутренние полости шеек вала. На носовом конце коленчатого вала закреплена шлицевая втулка торсионного вала привода объемного нагнетателя и установлен антивибратор, предназначенный для уменьшения напряжений, возникающих в коленчатом вале вследствие крутильных колебаний. На кормовом конце вала расположены фланец отбора мощности и шестерня привода распределительного вала.

Шатунный механизм (каждого из шести колен) состоит из главного и прицепного шатунов, соединенных между собой пальцем, установленным в проушинах нижней головки главного шатуна. Изготовлены шатуны из высококачественной легированной стали. Стержни шатунов имеют двутавровое сечение с утолщением в средней части для масляного канала. В верхние головки обоих шатунов и в нижнюю головку прицепного шатуна запрессованы стальные втулки с тонкослойной заливкой свинцовистой бронзой. Разъемная нижняя головка главного шатуна имеет тонкостенные стальные вкладыши шатунного подшипника, залитые свинцовистой бронзой. Отъемная крышка нижней головки крепится к стержню главного шатуна четырьмя шатунными болтами.

Поршни состоят из трех основных частей: головки из высокопрочного чугуна, тронка из перлитного чугуна и вставки, выполненной из алюминиевого сплава. Тронк крепится к головке с помощью винтов. Осевое перемещение вставки ограничивается пружинным кольцом, установленным в нижней части тронка с внутренней стороны. Головка поршня имеет четыре чугунных уплотнительных кольца с бронзовыми поясками на рабочей поверхности. В нижней части тронка расположены два маслосъемных кольца, которые одновременно препятствуют протеканию воздуха из ресивера через продувочные окна в картер двигателя. Поршневой палец плавающего типа изготовлен из легированной



стали и установлен в стальных, залитых свинцовистой бронзой втулках, запрессованных во вставку поршня. Поршни охлаждаются маслом, поступающим из верхних головок шатунов. Перетекание масла в полость между вставкой и днищем головки поршня осуществляется через пустотелый цилиндрический ползун, плотно прижатый пружиной к верхней головке шатуна.

Семиопорный распределительный вал расположен в развале блоков цилиндров и приводится во вращение шестеренчатой передачей от кормового конца коленчатого вала. Кулачные шайбы (по две на каждую пару цилиндров) выполнены из углеродистой стали, имеют цементированную и закаленную рабочую поверхность и насажены на вал в горячем состоянии на шпонках. Механизм привода выпускных клапанов помимо распределительного вала включает в себя стойки с рычагами (коромыслами), траверсы с гидротолкателями и толкателя со штангами.

Блочный двенадцатиплунжерный топливный насос высокого давления (ТНВД) установлен в развале двигателя над распределительным валом и имеет в своем корпусе собственный кулачковый вал. Этот ТНВД — золотникового типа с регулированием подачи топлива по началу и концу. Топливо из расходной цистерны поступает через сетчатый фильтр грубой очистки к шестеренному топливоподкачивающему насосу реверсивного типа (имеющему два комплекта всасывающих и нагнетательных клапанов). Шестерни насоса приводятся во вращение от носового конца коленчатого вала. От топливоподкачивающего насоса топливо подается под давлением около 0,4–0,5 МПа через войлочный фильтр тонкой очистки к ТНВД и далее под высоким давлением к форсункам, установленным в центре каждой крышки цилиндра. Форсунки закрытого типа отрегулированы на давление начала подъема иглы, равное 31,4 МПа. Распылители форсунок имеют по 7 сопловых отверстий диаметром 0,4 мм.

Агрегаты воздухообеспечения дизеля расположены на носовом торце двигателя и состоят из двух свободновращающихся газотурбонагнетателей (по одному на каждый блок цилиндров) и приводного объемного нагнетателя. Газотурбонагнетатели (турбокомпрессоры) марки I2TK используются в качестве первой ступени сжатия воздуха. Воздух сжимается в центробежном компрессоре, колесо которого приводится во вращение осевой одноступенчатой газовой турбиной, работающей за счет энергии выпускных газов дизеля. Газы, отработавшие в цилиндрах каж-



дого блока дизеля, подводятся к турбине по двум ветвям разделенного выхлопного коллектора. Верхняя ветвь соединена с 1-м, 2-м, 3-м цилиндрами блоков, а нижняя ветвь — с 4-м, 5-м и 6-м. В качестве нагнетателя второй ступени сжатия воздуха используется приводной реверсивный объемный нагнетатель роторнолопастного типа. Между двумя ступенями сжатия расположен воздухоохладитель. Приводной нагнетатель имеет винтовые трехлопастные роторы, изготовленные из алюминиевого сплава. Роторы приводятся во вращение через одноступенчатый зубчатый мультипликатор от носового конца коленчатого вала. Передача включает в себя упругую шестерню, торсионные валы и упругую резинометаллическую муфту. Для сохранения требуемого направления потока воздуха при реверсировании дизеля на входе и выходе приводного нагнетателя установлены золотники, перемещаемые сервомоторами.

Масляная система дизеля обеспечивает подачу масла к трущимся поверхностям, охлаждение трущихся поверхностей, охлаждение поршней двигателя, работу гидравлической системы управления дизелем.

Реверсивный масляный насос шестереночного типа имеет нагнетательную и откачивающую секции, выполненные в одном корпусе. Насос расположен в нижней части носового торца двигателя и приводится во вращение от упругой шестерни привода объемного нагнетателя воздуха. Нагнетательная секция насоса засасывает масло из цистерны и подает его через сетчатый фильтр грубой очистки к трущимся поверхностям дизеля, в частности, к коренным подшипникам коленчатого вала, далее по сверлениям в вале — к шатунным подшипникам и по отверстиям вдоль стержней шатунов — на смазку головных подшипников и на охлаждение поршней. Откачивающей секцией насоса масло забирается из поддона (ванны) картера двигателя и направляется через терморегулятор и маслоохладитель в цистерну. В зависимости от температуры масла терморегулятор может перепускать его в цистерну мимо охладителя. На цистерне установлен центробежный фильтр тонкой очистки масла, через который проходит часть масла, подаваемого нагнетательной секцией насоса.

Система охлаждения дизеля включает в себя контур пресной воды, предназначенный для охлаждения втулок и крышек цилиндра, выпускных коллекторов и газовых турбин двигателя, и контур забортной воды, предназначенный для охлаждения проду-



вочного воздуха (в воздухоохладителе), масла (в маслоохладителе) и пресной воды (в водяном охладителе). Одинаковые по устройству центробежные насосы обоих контуров установлены на носовом торце двигателя и приводятся в действие от упругой шестерни мультипликатора объемного нагнетателя воздуха. Радиальные лопатки колес и конструкция корпусов обеспечивают одинаковую работу насосов при любом направлении вращения колес. Замкнутый контур пресной воды содержит терморегулятор, который в зависимости от температуры выходящей из дизеля воды направляет ее либо в водо-водяной охладитель, либо мимо охладителя к насосу.

Пуск дизеля производится сжатым воздухом под давлением около 3–4 МПа. Пусковые клапаны установлены только на шести цилиндрах двигателя (на цилиндрах блока главных шатунов). Воздухораспределитель связан с кулачковым валом ТНВД.

Реверсивное устройство гидропневматического типа расположено на кормовом торце дизеля. Это устройство позволяет перемещать распределительный вал, вал воздухораспределителя, вал ТНВД и золотники приводного нагнетателя воздуха из положения, соответствующего работе дизеля на ход "вперед", в положение, соответствующее работе на ход "назад", или наоборот. Такое перемещение осуществляется поворотом вала воздухораспределителя и ТНВД на угол  $60^\circ$  относительно коленчатого вала дизеля в направлении их предыдущего вращения и распределительного вала на угол  $36^\circ$  против направления его предыдущего вращения.

Пост управления дизелем установлен на его кормовом торце. Механизм поста (штурвал и сектор управления рейками ТНВД) обеспечивает необходимую последовательность и согласованность пуска, остановки и реверсирования, а также дает возможность изменять частоту вращения дизеля во всем рабочем диапазоне и производить экстренную остановку двигателя.

На дизеле установлен всережимный изодромный регулятор частоты вращения центробежного типа с масляным сервомотором и собственной масляной системой. Регулятор автоматически поддерживает заданную частоту вращения коленчатого вала, изменяя подачу топлива в цилиндры в соответствии с изменением нагрузки. Изменение частоты вращения производится посредством изменения затяжки пружины регулятора. Изменение подачи топлива в цилиндры производится за счет перемещения реек



ТНВД сервомотором регулятора. Регулятор расположен в носовой части развала цилиндров двигателя и приводится во вращение от распределительного вала.

При увеличении частоты вращения дизеля выше максимально допустимой ( $870 \pm 10 \text{ мин}^{-1}$ ) срабатывает предельный регулятор, выводящий рейки ТНВД на нулевую подачу и останавливающий двигатель. Предельный регулятор установлен в кормовой части развала цилиндров, над реверсирующим устройством. Пуск дизеля возможен только после взвода рычага предельного регулятора.

### 3.2. Основные технические данные дизеля 40ДМ

Дизель 40ДМ предназначен к установке на судах для работы на гребной винт.

В лаборатории ДВС МТУ установлен дизель правой модели (коленчатый вал при работе двигателя на ход "вперед" вращается по часовой стрелке, если смотреть на дизель со стороны фланца отбора мощности).

Число цилиндров дизеля .....	12
Диаметр цилиндра .....	230 мм
Ход поршня главного шатуна .....	300 мм
Ход поршня прицепного шатуна .....	304,3 мм
Номинальная частота вращения .....	$750 \text{ мин}^{-1}$
Номинальная мощность при номинальной частоте вращения .....	1618 кВт (2200 л.с.)
Максимальная частота вращения .....	$780 \text{ мин}^{-1}$
Максимальная мощность при максимальной частоте вращения .....	1839 кВт (2500 л.с.)
Среднее эффективное давление:	
на номинальной мощности .....	0,866 МПа (8,83 кгс/см <sup>2</sup> )
на максимальной мощности .....	0,952 МПа (9,70 кгс/см <sup>2</sup> )
Средняя скорость поршня:	
при номинальной частоте вращения .....	7,5 м/с
при максимальной частоте вращения .....	7,8 м/с
Минимальная устойчивая частота вращения при работе по винтовой характеристике .....	$300 \text{ мин}^{-1}$

## Масса:

дизеля с навешенными вспомогательными агрегатами без воды и масла .....	9750 кг
воды в дизеле .....	150 кг
масла в дизеле .....	160 кг

## Габариты:

длина .....	3725 мм
ширина .....	1730 мм
высота .....	2190 мм

## 3.3. Фазы газораспределения холодного дизеля

Начало открытия выпускных клапанов  $\varphi_{овк} = 90^\circ$  до НМТ.  
 Конец закрытия выпускных клапанов  $\varphi_{звк} = 52^\circ$  после НМТ.  
 Начало открытия (конец закрытия) продувочных окон  $\varphi_{опо} = \varphi_{зпо} = 46^\circ$  до (после) НМТ.

## 3.4. Контрольные показатели работы дизеля на номинальной мощности

Температура выпускных газов по отдельным цилиндрам не выше .....	793 К (520°C)
Разность температур газов по отдельным цилиндрам не более .....	100 К
Температура охлаждающей воды:	
на выходе из дизеля не выше .....	358 К (85°C)
на входе в дизель не ниже .....	333 К (60°C)
Температура циркуляционного масла:	
на выходе из дизеля не выше .....	358 К (85°C)
на входе в дизель не ниже .....	318 К (45°C)
Максимальное давление газов в цилиндрах $P_z$ не выше .....	10,8 МПа (110 кгс/см <sup>2</sup> )
Разность максимальных давлений $P_z$ по отдельным цилиндрам не более .....	0,78 МПа (8 кгс/см <sup>2</sup> )
Давление масла на смазку подшипников коленчатого вала не ниже .....	0,42 МПа (4,3 кгс/см <sup>2</sup> )
Давление продувочного воздуха (избыточное) около .....	0,1 МПа (1,0 кгс/см <sup>2</sup> )



Давление выпускных газов на выходе из турбокомпрессоров не выше .....	0,016 МПа (120 мм рт.ст.)
Удельный эффективный расход топлива около .....	238 г/кВт·ч (175 г/л.с·ч.)
Удельный эффективный расход воздуха около .....	7,89 кг/кВт·ч (6,8 кг/л.с·ч.)

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис.4.1 (вклейка), где римскими цифрами обозначено основное оборудование стенда, а арабскими цифрами – номера точек измерения в соответствии с протоколом испытания дизеля 40ДМ (см. табл.6.1 на вклейке).

Для выполнения теплотехнических испытаний дизеля стенд оборудован следующими приборами и устройствами.

Гидравлический тормоз типа Л-149 (XIII) обеспечивает нагрузку двигателя и измерение крутящего момента на коленчатом валу. Подача воды в гидротормоз осуществляется не из водопроводной сети, в которой возможны существенные колебания давления воды, а из цистерны постоянного уровня (XXIII). Для изменения нагрузки служит клапан (XXX).

Торцовые расходомерные диафрагмы (XIV а,б), установленные на входе воздуха в каждый из двух газотурбонагнетателей дизеля (II а,б), предназначены для измерения количества воздуха, поступающего в двигатель.

Весы ВЦП-25 (XV) позволяют измерить количество топлива, потребляемого дизелем в единицу времени. Отключение двигателя от расходной цистерны (XXIV) и перевод топливоподающей системы на питание из емкости, стоящей на весах, осуществляется двумя трехходовыми кранами (XVI а,б). Следует помнить, что переключение кранов (XVI а,б) должно выполняться быстро и четко, причем во время измерения расхода кран (XVI а) должен обеспечивать прием топлива только из емкости, на весах, а кран (XVI б) – возврат всего избыточного топлива из ТНВД (XXVI) в емкость на весах. Сразу после окончания измерения кран (XVI а) переключается на питание дизеля топливом из расходной цистерны (XXIV), а кран (XVI б) переключается на возврат избыточного топлива в цистерну (XXIV) только

после заполнения до определенной отметки емкости на весах. Время расходования определенного заданного количества топлива (навески топлива) измеряется секундомером (ХУП а) с точностью до 0,1 с.

Мерная цистерна (ХУШ) и запорный клапан за ней служат для определения объемным способом расхода забортной воды на охлаждение двигателя. Время заполнения цистерны водой, выходящей из контура забортной воды дизеля, измеряется секундомером (ХУП б) с точностью до 0,1 с.

Мерная цистерна (ХІХ) и секундомер (ХУП в) позволяют измерить объемный проток масла через двигатель.

Электропневматический индикатор давления МАИ-2 (ХХ) с мембранным одноконтakтным датчиком, установленным на шестом главном цилиндре дизеля, и отметчиком ВМТ на ободке муфты предназначен для снятия стробоскопических развернутых индикаторных диаграмм. Индикаторные диаграммы позволяют определить среднее индикаторное давление  $p_i$ , оценить величину механического КПД дизеля на исследуемом режиме работы, получить данные о других показателях, характеризующих процесс в цилиндре: о величине давления сжатия  $p'_c$ , о максимальном давлении сгорания  $p_z$ , об угле начала горения топлива  $\varphi_{нг}$  в градусах п.к.в. до ВМТ, скорости повышения давления  $\Delta p / \Delta \varphi$  и т.п.

Дифференциальные U-образные манометры используются для измерения перепадов давления в расходомерных диафрагмах 8, 9, разрежения на входе в газотурбонагнетатели І0, ІІ, перепада давления в воздухоохладителе І5, противодавления за газовыми турбинами 55, разрежения в картере дизеля 58.

Стрелочные манометры высокого класса точности применены для измерения давлений воздуха за газотурбонагнетателями І2, І3, в ресивере двигателя І4 и давлений газа в выхлопных коллекторах перед газовыми турбинами 42, 43, 53, 54.

С помощью термопар и двух потенциометров МКД-50М измеряются температуры выхлопных газов за каждым из двенадцати цилиндров 33-38, 44-49, в выхлопных коллекторах перед газовыми турбинами 39, 40, 50, 51 и за газовыми турбинами 41, 52.

Термопары высокой точности, соединенные с электронным автоматическим потенциометром ЗПП-09 МЗ, применяются для автоматической регистрации на ленте самописца следующих температур: воздуха перед турбонагнетателями І6, воздуха за тур-



бонагнетателями I7, I8, воздуха после воздухоохладителя I9, воздуха в ресивере двигателя 20, пресной воды на входе в двигатель 27, пресной воды на выходе из двигателя 28, заборной воды на входе в воздухоохладитель 23, заборной воды на входе в маслоохладитель 24, заборной воды на входе в водо-водяной охладитель 25, заборной воды на выходе из системы охлаждения 26, масла на входе в двигатель 3I, масла на выходе из двигателя 32.

Неконтактные измерительные устройства 29, 30 в сочетании с электронно-счетным частотомером ЧЗ-33 позволяют определить число оборотов роторов свободновращающихся турбонагнетателей.

Барометр (XXI) и термометр (XXII) служат для определения параметров окружающей среды.

Штатные дистанционные контрольные приборы, расположенные на приборном щите двигателя 60, позволяют оценить температуры пресной воды на входе и выходе системы охлаждения, давления и температуры масла на входе и выходе системы смазки.

Фотоэлектрический датчик импульсов 59 и электронно-счетный частотомер ЧЗ-33 служат для точного измерения числа оборотов коленчатого вала и применяются в дополнение к штатному тахометру I двигателя типа ТМС-1000, установленному на дизеле в районе поста управления.

## 5. ВИНТОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДВИГАТЕЛЯ

Под винтовой характеристикой двигателя понимается следующая зависимость между эффективной мощностью и частотой вращения вала двигателя

$$N_e = C n^3,$$

где  $C$  — постоянный коэффициент, определяемый по приведенной формуле при подстановке в нее значений номинальной мощности и частоты вращения двигателя.

Зная номинальную мощность и частоту дизеля 40ДМ ( $N_e = 1618$  кВт и  $n = 750$  мин<sup>-1</sup>), нетрудно подсчитать для любого промежуточного значения мощности соответствующее значение частоты вращения. Учитывая связь между мощностью и показа-

ниями гидравлического тормоза (см. п.7.1.1), можно найти значения нагрузки на тормозе  $P_T$  для каждого исследуемого режима работы двигателя. Результаты такого расчета для семи значений мощности (10, 20, 40, 60, 80, 100 и 113,5%  $N_e$ ) даны в табл.5.1. При выполнении испытания по данным этой таблицы устанавливаются требуемые режимы работы двигателя, причем необходимая частота вращения достигается изменением натяжения пружины регулятора (изменением подачи топлива в цилиндры), а соответствующая нагрузка устанавливается путем изменения протока воды через гидротормоз. Установка частоты вращения и нагрузки двигателя для каждого режима должна производиться с максимальной тщательностью и точностью для получения точек именно винтовой характеристики.

Таблица 5.1

## Винтовая характеристика дизеля 40ДМ

Номер режима	$N_e$ , %	$N_e$ , кВт	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$P_T$ , кгс*
1	10	161,8	348	223
2	20	323,6	439	354
3	40	647,2	553	562
4	60	970,8	633	737
5	80	1294,4	696	893
6	100	1618,1	750	1036
7	113,5	1838,7	780	1131

\* Градуировка шкалы гидротормоза выполнена в единицах МНГСС.



## 6. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ

До начала нагружения двигатель прогревается на холостом ходу в течение 30–40 мин (в зависимости от времени года) до стабилизации значений температур масла и воды. Перед началом испытаний преподаватель распределяет студентов по рабочим местам для выполнения следующих операций:

- 1) регистрации бригадиром показаний гидротормоза, контроля и управления работой;
- 2) измерения частоты вращения коленчатого вала двигателя и роторов турбонагнетателей;
- 3) индицирования двигателя;
- 4) измерения расхода топлива;
- 5) измерения расхода забортной воды;
- 6) работы на самописце ЭП;
- 7) измерения давлений воздуха и газов;
- 8) измерения температур выхлопных газов;
- 9) ведения протокола испытаний и подсчета величин  $N_e$ ,

$G_T$  и  $q_e$ .

После прогрева двигателя до номинальных температур масла и воды устанавливается первый исследуемый режим работы. Через 5–10 мин после установки требуемой частоты вращения и нагрузки двигатель приходит в установившееся тепловое состояние на данном режиме, о чем свидетельствует стабилизация температур, отмечаемых на ленте ЭП-09 МЗ.

При установившемся тепловом состоянии двигателя производятся измерения всех регистрируемых при испытании величин. Все студенты начинают измерения одновременно, по сигналу бригадира. Снятые с приборов показания записываются каждым наблюдателем в свой черновой протокол, и по завершении измерений результаты сразу же сообщаются ведущему общий протокол испытаний двигателя. Образец общего протокола испытаний двигателя 40ДМ дан в табл. 6.1 на вклейке. Номера граф в общем протоколе испытаний соответствуют номерам мест измерений на двигателе. После того как все регистрируемые величины для данного режима внесены в общий протокол, бригадир дает сигнал к повторным (контрольным) измерениям на том же режиме работы дизеля.

Два измерения на одном режиме делаются с целью исключения случайных ошибок. По окончании контрольных измерений и

внесении их результатов в общий протокол двигатель переводится на следующий режим. На новом режиме ход работы повторяется. Таким образом, в результате испытаний двигателя на шести режимах ( $N_e = (10-100)\% N_{e\text{ ном}}$ ) производится двенадцать измерений величин, вносимых в общий протокол.

Подлинник протокола, в который помимо результатов измерений вносятся фамилии студентов, участвовавших в работе, подшивается в журнал эксплуатации дизеля 40ДМ и хранится на кафедре ДВС и ДУ.

Для обработки результатов испытания двигателя студенты должны иметь следующий исходный материал:

- 1) копию общего протокола испытания;
- 2) индикаторные диаграммы (12 шт.);
- 3) ленту автоматического регистратора температур воздуха, воды и масла (13 точек замеров на ленте потенциометра).

При расшифровке записи температур следует иметь в виду, что номера точек на ленте самописца с I по 13 соответствуют следующим номерам измерений по схеме установки (см. рис.4.1 на вклейке):

- I - 16 - температура воздуха перед ТН;
- 2 - 17 - температура воздуха после ТН правого блока;
- 3 - 19 - температура воздуха после охладителя;
- 4 - 20 - температура воздуха в ресивере;
- 5 - 27 - температура пресной воды на входе в двигатель;
- 6 - 28 - температура пресной воды на выходе из двигателя;
- 7 - 23 - температура забортной воды на входе в систему;
- 8 - 24 - температура забортной воды на входе в маслоохладитель;
- 9 - 25 - температура забортной воды на входе в водоохладитель;
- 10 - 26 - температура забортной воды на выходе из системы;
- 11 - 31 - температура масла на входе в двигатель;
- 12 - 32 - температура масла на выходе из двигателя;
- 13 - 18 - температура воздуха после ТН левого блока.

Отсчет температур ведется от левого края диаграммы.

Масштаб температур определяется следующим образом: для всех точек диаграмм, кроме 2 и 13, полная ширина диаграмм со-



ответствует  $100^{\circ}\text{C}$ ; для точек 2 и 13 (номера измерений 17 и 18) ширина диаграммы равна  $200^{\circ}\text{C}$ .

## 7. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

### 7.1. Расчетные формулы. Эффективные показатели

#### 7.1.1. Эффективная мощность двигателя (кВт)

$$N_e = k_T P_T n_T = 2,0816 \cdot 10^{-3} P_T n_T,$$

где  $k_T = 2,0816 \cdot 10^{-3}$  – постоянная гидравлического тормоза;  $P_T$  – нагрузка по шкале гидротормоза, кгс;  $n_T = n$  – частота вращения ротора гидротормоза, равная частоте вращения коленчатого вала дизеля,  $\text{мин}^{-1}$ .

Постоянная  $k_T$  оценивается в процессе тарирования шкалы тормоза. Ее значение зависит от величины плеча рычага тарировочного устройства  $l_T$  и определяется из известной взаимосвязи мощности, момента и частоты вращения вала (кВт):

$$N_e = \frac{2\pi l_T P_T n_T \cdot 10^{-3}}{60} = \frac{M_T n_T \cdot 10^{-3}}{9,5493},$$

где  $P_T$  – нагрузка (сила), Н;  $l_T$  – плечо рычага, м;  $M_T = P_T' l_T$  – момент на валу, Н·м.

Гидравлический тормоз экспериментальной установки с дизелем 40ДМ тарировался устройством с плечом рычага  $l_T = 2,027$  м. Шкала тормоза отградуирована в кгс. С учетом того, что  $1 \text{ кгс} = 9,8067 \text{ Н}$  и  $P_T' = 9,8067 P_T$ , получим (кВт)

$$N_e = \frac{9,8067 \cdot 2,027 \cdot 10^{-3}}{9,5493} P_T n_T = 2,0816 \cdot 10^{-3} P_T n_T.$$

#### 7.1.2. Среднее эффективное давление (МПа)

$$P_e = 0,4011 \frac{N_e}{n} = 0,835 \cdot 10^{-3} P_T.$$

Формула получена в результате подстановки данных дизеля 40ДМ в общее выражение (МПа)

$$P_e = \frac{N_e}{13,09 \cdot D^2 \sin z}.$$

## 7.1.3. Крутящий момент на валу двигателя (Н·м)

$$M_{кр} = M_T = 9549,3 \frac{N_e}{n} = 19,878 P_T.$$

## 7.1.4. Часовой расход топлива (кг/ч)

$$G_T = \frac{\Delta G_T \cdot 3600}{\Delta \tau_T},$$

где  $\Delta G_T$  – навеска топлива, т.е. заранее заданная масса топлива (кг), время расходования которой измеряется;  $\Delta \tau_T$  – время расходования  $\Delta G_T$  (кг) топлива, с.

## 7.1.5. Цикловая подача топлива в один цилиндр (г/цикл)

$$q_c = \frac{G_T \cdot 1000}{60 \cdot i \cdot n \cdot z} = 1,3889 \frac{G_T}{n}.$$

## 7.1.6. Удельный эффективный расход топлива (г/кВт·ч)

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} 1000.$$

## 7.1.7. Эффективный КПД двигателя

$$\eta_e = \frac{3600}{g_e 10^{-3} Q_H} = \frac{84,295}{g_e},$$

где  $Q_H = 42707$  – низшая теплота сгорания топлива среднего состава, кДж/кг.

## 7.1.8. Расход воздуха (кг/ч):

– газотурбонагнетателем правого блока цилиндров

$$G_{вп} = 299,0 \sqrt{\Delta h_{п} \rho_v};$$

– газотурбонагнетателем левого блока цилиндров

$$G_{вл} = 300,15 \sqrt{\Delta h_{л} \rho_v};$$

– суммарный на двигатель

$$G_v = G_{вп} + G_{вл},$$

где  $\Delta h_{п}$  и  $\Delta h_{л}$  – перепады давления в расходомерных диафрагмах турбонагнетателей правого и левого блоков цилиндров соответственно, измеряемые водяными дифференциальными манометрами, мм вод.ст.;  $\rho_v = \frac{P_0}{287 \cdot T_0}$  – плотность воздуха перед тор-



цовыми расходомерными диафрагмами,  $\text{кг/м}^3$ , причем  $P_0$  - давление окружающей среды, Па;  $T_0$  - температура окружающей среды, К;  $R = 287$  - газовая постоянная, Дж/кг·К.

Если давление окружающей среды измерено в единицах, отличных от паскалей, то учитываются следующие соотношения единиц:

$$1 \text{ кгс/см}^2 = 9,8067 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт.ст.} = 133,322 \text{ Па};$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}.$$

7.1.9. Удельный расход воздуха ( $\text{кг/кВт}\cdot\text{ч}$ )

$$q_b = \frac{G_b}{N_e}.$$

7.1.10. Суммарный коэффициент избытка воздуха

$$\alpha_\Sigma = \frac{G_b}{14,33 G_T},$$

где  $14,33 = \mu_b L_0$  - теоретически необходимое количество воздуха (кг) для сгорания 1 кг топлива, причем  $\mu_b = 28,97$  - молекулярная масса воздуха, кг/моль;  $L_0 = 0,495$  - теоретически необходимое количество воздуха, моль/кг.

7.1.11. Коэффициент избытка продувочного воздуха

$$\varphi_k = \frac{V_k}{V_s} = \frac{G_b}{60 V_s n i z \rho_k} = \frac{G_b}{8,974 n \rho_k},$$

где  $\rho_k = \frac{P_k}{287 T_k}$  - плотность воздуха в ресивере двигателя,  $\text{кг/м}^3$ , причем  $P_k = P_0 + \Delta P_k = P_0 + 9,8067 \cdot 10^4 \cdot \Delta p_k$  - давление продувочного воздуха в ресивере, Па;  $T_k = t_k + 273$  - температура продувочного воздуха в ресивере, К;  $\Delta p_k$  и  $t_k$  - измеряемые в ходе испытания избыточное давление в ресивере,  $\text{кгс/см}^2$ , и температура продувочного воздуха,  $^\circ\text{C}$ .

7.1.12. Часовой расход выхлопных газов ( $\text{кг/ч}$ )

$$G_r = G_b + G_T.$$

7.1.13. Расход забортной воды ( $\text{кг/ч}$ )

$$G_w = \frac{\Delta V_w \rho_w 3600}{\Delta \tau_w},$$

где  $\Delta V_w$  – мерный объем заборной воды, л;  $\rho_w = 1,00$  – плотность воды (принято), кг/л;  $\Delta \tau_w$  – время заполнения мерного объема  $\Delta V_w$  заборной водой, с.

7.I.I4. Количество теплоты, вносимое в двигатель с топливом (кДж/ч):

$$Q_T = Q_H G_T = 42707 \cdot G_T.$$

7.I.I5. Количество теплоты, преобразованное в полезную работу (кДж/ч)  $Q_e = 3600 N_e$ .

7.I.I6. Количество теплоты, отводимое с охлаждающей заборной водой (кДж/ч)

$$Q_w = G_w c_w (t''_w - t'_w),$$

где  $c_w = 4,1868$  – массовая теплоемкость заборной воды (принято), кДж/кг·К;  $t'_w$  – измеренная температура заборной воды на входе в систему охлаждения, °С;  $t''_w$  – измеренная температура заборной воды на выходе из системы охлаждения, °С.

Количество теплоты  $Q_w$  может быть разбито на три слагаемых, а именно: на частные количества теплоты, сообщаемые заборной воде в воздухоохладителе  $Q_{wb}$ , в маслоохладителе  $Q_{wm}$  и в водо-водяном охладителе  $Q_{wg}$ . Последнее слагаемое представляет собой теплоту, отводимую пресной водой от стенок втулок цилиндров, крышек, коллекторов и турбонагнетателей. Слагаемые  $Q_w$  могут быть определены по следующим формулам:

– количество теплоты, отводимое от наддувочного воздуха (кДж/ч)

$$Q_{wb} = \bar{c}_{pb} G_b \Delta T_{ox},$$

где  $\bar{c}_{pb} = 1,005$  – ориентировочное значение массовой изобарной теплоемкости воздуха (принято), кДж/кг·К;  $G_b$  и  $\Delta T_{ox}$  – см. в пп. 7.I.8 и 7.I.28 соответственно;

– количество теплоты, отводимое водой в охладителях масла и пресной воды

$$(Q_{wm} + Q_{wg}) \approx Q_w - Q_{wb}.$$

7.I.I7. Количество теплоты, уносимое уходящими газами (кДж/ч)

$$Q_r \approx \bar{c}_{pg} G_g T'_{gc} - \bar{c}_{pb} G_b T_o,$$



где  $\bar{c}_{pg} \approx 1,047$  и  $\bar{c}_{pg} \approx 1,005$  – ориентировочные значения средних массовых изобарных теплоемкостей уходящих газов и входящего в двигатель воздуха, кДж/кг К;  $T'_{гс} = \frac{t'_{гп} + t'_{гк}}{2} + 273$  и  $T_0 = t_0 + 273$  – средняя температура уходящих газов за газовыми турбинами и температура атмосферного воздуха перед двигателем, К.

7.1.18. Остаточный член теплового баланса (кДж/ч)

$$Q_{нд} = Q_T - (Q_e + Q_w + Q_r).$$

7.1.19. Составляющие удельного теплового баланса двигателя (кДж/кВт·ч)

$$q_e = \frac{Q_e}{N_e} = 3600; \quad q_T = \frac{Q_T}{N_e}; \quad q_w = \frac{Q_w}{N_e}; \quad q_r = \frac{Q_r}{N_e}; \quad q_{нд} = \frac{Q_{нд}}{N_e}.$$

7.1.20. Составляющие относительного теплового баланса двигателя (%)

$$q'_T = 100\%; \quad q'_e = \frac{Q_e}{Q_T} = 100 \eta_e; \quad q'_w = \frac{Q_w}{Q_T} 100; \\ q'_r = \frac{Q_r}{N_e} 100; \quad q'_{нд} = \frac{Q_{нд}}{N_e} 100.$$

### Индикаторные показатели

7.1.21. Среднее индикаторное давление  $p_i$ , максимальное давление сгорания  $p_z$ , скорость нарастания давления  $\Delta p / \Delta \varphi$  и угол достижения максимального давления (отсчитанный от ВМТ)  $\varphi_z$  определяются по указаниям параграфа 7.2. По осредненным значениям  $p_i$  на каждом режиме рассчитываются индикаторные показатели и мощность механических потерь по следующим формулам.

7.1.22. Механический КПД  $\eta_m = p_e / p_i$ .

7.1.23. Индикаторный КПД двигателя  $\eta_i = \eta_e / \eta_m$ .

7.1.24. Удельный индикаторный расход топлива (г/кВт·ч)

$$g_i = g_e \eta_m.$$

7.1.25. Индикаторная мощность двигателя (кВт)

$$N_i = N_e / \eta_m.$$

## 7.I.26. Мощность механических потерь (кВт)

$$N_{\text{мех}} = N_i - N_e.$$

Показатели системы и агрегатов воздухообеспечения

## 7.I.27. Давления по газоздушному тракту (Па):

- разрежение на входе в турбоагрегат (ТА)

$$P'_0 = P_0 - 9,8067 \cdot \Delta P_{\text{ос}},$$

где  $P_0$  - давление окружающей среды (см. п. 7.I.8) и  $\Delta P_{\text{ос}} = \frac{\Delta P_{\text{оп}} + \Delta P_{\text{ол}}}{2}$  - среднее значение потерь давления на

входе в ТА по замерам на правом и левом ТА, мм. вод. ст.;

- давление воздуха за ТА (перед воздухоохладителем)

$$P_K^I = P_0 + 9,8067 \cdot 10^4 \Delta P_K^I,$$

где  $\Delta P_K^I = (\Delta P_{\text{кп}}^I + \Delta P_{\text{кл}}^I) / 2$ ;  $\Delta P_{\text{кп}}^I$ ;  $\Delta P_{\text{кл}}^I$  - избыточные давления за правым и левым ТА, кгс/см<sup>2</sup>;

- давление за воздухоохладителем (ВО)

$$P'_K = P_K^I - 9,8067 \Delta P_{\text{ох}},$$

где  $\Delta P_{\text{ох}}$  - сопротивление ВО, мм вод. ст.;

- давление наддува в продувочном ресивере

$$P_K = P_0 + 9,8067 \cdot 10^4 \Delta P_K,$$

где  $\Delta P_K$  - избыточное давление в ресивере, кгс/см<sup>2</sup> (см. также п. 7.I.II);

- среднее давление газов перед газовой турбиной (ГТ)

$$P_{\text{Гс}} = P_0 + 9,8067 \cdot 10^4 \left( \frac{\Delta P_{\text{Г1п}} + \Delta P_{\text{Г2п}} + \Delta P_{\text{Г1л}} + \Delta P_{\text{Г2л}}}{4} \right),$$

где  $\Delta P_{\text{Гп}}$ ,  $\Delta P_{\text{Гл}}$  - избыточные давления в выпускных коллекторах перед ГТ правого и левого блоков, кгс/см<sup>2</sup>;

- давление выпускных газов за ГТ

$$P'_Г = P_0 + 9,8067 \cdot 10^{-6} \rho_{\text{тж}} \Delta P'_0,$$

где  $\rho_{\text{тж}} \approx 2,6 \text{ г/см}^3$  - плотность тяжелой жидкости в дифманометре



метре;  $\Delta p'_0$  — избыточное давление за ГТ в мм ст. тяжелой жидкости;

— средние перепады давлений на продувку цилиндра и в ГТ:

$$\Delta p_{\text{п}} = (p_{\text{к}} - p_{\text{гс}}); \quad \Delta p_{\text{т}} = (p_{\text{гс}} - p'_r).$$

7.1.28. Температуры по газоздушному тракту:

— средняя температура воздуха за ТН

$$t_{\text{к}}^{\text{I}} = \frac{t_{\text{кп}}^{\text{I}} + t_{\text{кл}}^{\text{I}}}{2},$$

где  $t_{\text{кп}}^{\text{I}}$ ,  $t_{\text{кл}}^{\text{I}}$  — замеренные температуры воздуха за ТН правого и левого блоков двигателя;

— повышение температуры воздуха в ТН  $\Delta T_{\text{ТН}} = (t_{\text{к}}^{\text{I}} - t_0)$ ,  $t_0$  — температура перед ТН;

— перепад температур воздуха в ВО  $\Delta T_{\text{ох}} = (t_{\text{к}}^{\text{I}} - t'_k)$ , где  $t'_k$  — температура за ВО;

— повышение температуры воздуха в приводном нагнетателе

$$\Delta T_{\text{пн}} = (t_{\text{к}} - t'_k),$$

где  $t_{\text{к}}$  — температура воздуха в продувочном ресивере (см. также п.7.1.11);

— средняя температура выхлопных газов перед ГТ, К

$$T_{\text{гс}} = 273 + \left( \frac{t_{\text{г1п}} + t_{\text{г2п}} + t_{\text{г1л}} + t_{\text{г2л}}}{4} \right),$$

где  $t_{\text{гп}}$ ,  $t_{\text{гл}}$  — измеренные температуры газов в коллекторах правого и левого блоков;

— средний перепад температур в ГТ

$$\Delta T_{\text{с}} = T_{\text{гс}} - (t'_r + 273),$$

где  $t'_r$  — замеренная температура газов за ГТ.

7.1.29. Параметры и показатели турбонагнетателя:

— степень повышения давления в компрессоре (К) ТН

$$\pi_{\text{к}} = \frac{p_{\text{к}}^{\text{I}}}{p'_0};$$

— адиабатная работа компрессора, кДж/кг:

$$l_{\text{ак}} = 1,005 T_0 (\pi_{\text{к}}^{0,286} - 1);$$

- КПД  $\eta_k$

$$\eta_k = \frac{l_{ak}}{1,005 \cdot \Delta T_{TH}} ;$$

- средняя суммарная мощность ТН, кВт:

$$N_{TH} = \frac{l_{ak} G_{bc}}{\eta_k \cdot \eta_{mk}} ,$$

где  $G_{bc} = G_b / 3600$ , кг/с - секундный расход воздуха на двигатель;  $G_b$  - суммарный, часовой расход воздуха в двигателе, кг/ч (см. п. 7.1.8);  $\eta_{mk} \sim 0,95-0,98$  - механический КПД ТН;

- относительная мощность двух ТН  $\delta_{TH} = N_{TH} / N_i$  ;

- степень понижения давления в ГТ  $\pi_T = p_{гс} / p'_T$  ;

- адиабатная работа ГТ, кДж/кг

$$l_{at} \approx \frac{\kappa_T}{\kappa_T - 1} R_T T_{гс} \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi_T} \right)^{\frac{\kappa_T - 1}{\kappa_T}} \right] ,$$

где можно принимать  $R_T \sim R = 0,287$  кДж/(кг·К),  $\kappa_T \sim 1,34-1,38$ ;

- средний расход газов через две ГТ, кг/с

$$G_{гт} = G_{bc} + \frac{G_T}{3600} ,$$

где  $G_T$ , кг/ч - часовой расход топлива (см. п. 7.1.4);

- приближенное значение КПД ГТ

$$\eta_T = \frac{N_{TH}}{G_{гт} l_{at}} ;$$

- приближенное значение КПД ТН

$$\eta_{TH} = \eta_k \eta_{mk} \eta_T ;$$

- окружная скорость на наружном диаметре рабочего колеса компрессора, м/с

$$u_2 = \frac{\pi n_{TH} D_k}{60} ,$$

где  $D_k = 0,34$  м - диаметр колеса компрессора;  $n_{TH} = (n_{THП} + n_{THЛ}) / 2$  - средняя частота вращения, об/мин;  $n_{THП} = 6n'_{THП}$  ;  $n_{THЛ} = 6n'_{THЛ}$  ;  $n'_{THП}$  ,  $n'_{THЛ}$  - численные значения измерений числа оборотов правого и левого ТН по частотомеру;



- коэффициенты напора компрессора и ГТ

$$\bar{H}_k = \frac{2000 \tau_{ак}}{u_2^2} ; \quad \bar{H}_T = \frac{2000 \tau_{ат}}{u_T^2} ,$$

где  $u_T$  определяется при  $D_T = 0,31$  м;

- приближенное значение коэффициента расхода компрессора

$$\bar{C}_m = c_1 / u_2 ,$$

где  $c_1 = G_{вс} / (2 \rho'_0 f_1 \tau)$  - секундный расход воздуха на оба компрессора, кг/с;  $\rho'_0 = \frac{P'_0}{287 T_0}$  - плотность воздуха на входе в компрессор;  $f_1 = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_0^2)$  - площадь поперечного сечения на входе в рабочее колесо К, м<sup>2</sup>;  $D_0 = 0,075$ ;  $D_1 = 0,185$  м - диаметр ступицы и наружный диаметр на входе в рабочее колесо К.

7.1.30. Параметры и показатели приводного нагнетателя:

- степень повышения давления в приводном нагнетателе (ПН)

$$\pi_{пн} = P_k / P'_k ;$$

- адиабатная работа ПН, кДж/кг

$$l_{апн} = 1,005 (t'_k + 273) (\pi_{пн}^{0,286} - 1) ,$$

где  $t'_k$  - температура на входе ПН, за В0;

- КПД приводного нагнетателя

$$\eta_{пн} = \frac{l_{апн}}{1,005 \Delta T_{пн}} ,$$

где  $\Delta T_{пн}$  - повышение температуры воздуха в ПН (см.п.7.1.28);

- мощность, затрачиваемая на привод ПН, кВт

$$N_{пн} = \frac{G_{вс} l_{апн}}{\eta_{пн} \eta_{мпн}} ,$$

где  $\eta_{мпн} \sim 0,94-0,96$  - механический КПД ПН;

- относительная мощность ПН  $\delta_{пн} = N_{пн} / N_i$  ;

- относительный адиабатный КПД ПН

$$\eta_0 = \frac{l_{апн}}{0,287 T'_k (\pi_{пн} - 1)} ;$$





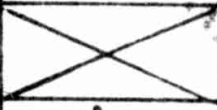
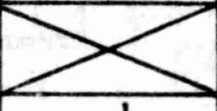
Подлинная диаграмма имеет следующие масштабы: по оси абсцисс 1 мм соответствует 1° п.к.в.; по оси ординат 1 мм соответствует 0,0781 МПа (может быть уточнен по тарировочным прямым, отмеченным на одной из диаграмм).

Определение среднего индикаторного давления по развернутой индикаторной диаграмме производится методом гармонического анализа. Сущность метода изложена в упомянутом выше учебном пособии П.А.Гордеева. Обработка диаграммы ведется следующим образом.

Осредняя по точкам, проводят линию давления, атмосферную линию и перпендикулярную ей линию ВМТ. Приняв линию ВМТ за базовую, нулевую ординату, производят разбивку диаграммы двадцатью четырьмя равноотстоящими ординатами (через 15° п.к.в.), причем нумерация ординат ведется в сторону линии расширения, как показано на рис.7.1. Определение коэффициентов разложения кривой  $p=f(\varphi^0_{пкв})$  в ряд Фурье производится по методу Рунге - Эмде с помощью таблицы группирования ординат (табл.7.1). Заполнение таблицы и расчеты по ней ведутся следующим образом.

Таблица 7.1

Группирование ординат для определения по развернутой индикаторной диаграмме

y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>	y <sub>7</sub>	y <sub>8</sub>	y <sub>9</sub>	y <sub>10</sub>	y <sub>11</sub>								
y <sub>23</sub>	y <sub>22</sub>	y <sub>21</sub>	y <sub>20</sub>	y <sub>19</sub>	y <sub>18</sub>	y <sub>17</sub>	y <sub>16</sub>	y <sub>15</sub>	y <sub>14</sub>	y <sub>13</sub>								
a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>	a <sub>8</sub>	a <sub>9</sub>	a <sub>10</sub>	a <sub>11</sub>								
a <sub>11</sub>	a <sub>10</sub>	a <sub>9</sub>	a <sub>8</sub>	a <sub>7</sub>			<div><math>b_6 = a_6</math></div> <div><math>\Sigma_1</math></div> <div><math>B_1 = \frac{1}{12} \Sigma_1</math></div>											
b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>							b <sub>6</sub>							
sin 15	sin 30	sin 45	sin 60	sin 75	sin 90													
C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>														
C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub>			<div><math>d_3 = C_3</math></div> <div><math>\Sigma_2</math></div> <div><math>B_2 = \frac{1}{12} \Sigma</math></div> <div><math>P_i = m_p \frac{\pi}{2} (B_1 + \frac{\lambda}{2} B_2),</math></div>														
d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>										d <sub>3</sub>							
sin 30	sin 60	sin 90																

Измеряя ординаты диаграммы, записывают их в 1-ю и 2-ю строки таблицы группирования в масштабе диаграммы (мм). Третья строка является разностью 1-й и 2-й строк (вычитание ведется по столбцам таблицы). Строка 4-я численно равна 3-й, но записана в указанном порядке. Строка 5-я дает суммы по столбцам

3-й и 4-й строк. В строке 6 находят произведение сумм  $b_i$  на синус соответствующего угла. Суммируя все произведения 6-й строки, находят  $\Sigma_1$  и далее  $b_1 = \frac{1}{12} \Sigma_1$ . Строка 7-я дает разности по столбцам 3-й и 4-й строк. Строка 8-я равна 7-й, но записывается в соответствующем порядке. Строка 9-я дает суммы по столбцам 7-й и 8-й строк. В 10-й строке записываются произведения сумм  $d_i$  на синусы углов, указанных в табл. 7.1.

Суммируя все произведения 10-й строки, находят  $\Sigma_2$  и далее  $b_2 = \frac{1}{12} \Sigma_2$ .

Среднее индикаторное давление (МПа) находится по формуле

$$P_i = m_p \frac{\pi}{2} \left( b_1 + \frac{\lambda}{2} b_2 \right),$$

где  $m_p$  — масштаб диаграммы по оси давления, МПа/мм<sup>\*</sup>;  $\lambda = \frac{R}{L_{ш}} = 0,246$  — отношение радиуса мотыля к длине главного шатуна двигателя 40ДМ.

7.2.2. Определение давлений в характерных точках индикаторной диаграммы.

Абсолютные давления в характерных точках индикаторной диаграммы  $P_{зпо}$ ,  $P_{звк}$ ,  $P_{овк}$ ,  $P_{опо}$ , ..., определяемые при соответствующих углах  $\varphi_{зпо}$ ,  $\varphi_{звк}$ ,  $\varphi_{овк}$ ,  $\varphi_{опо}$  (см. параграф 3.3), а также давление в начале горения  $P'_c$  и максимальное давление сгорания  $P_z$  (МПа), определяются по формуле

$$P_j = m_p y_j + P_0,$$

где  $y_j$  — ордината, измеренная в миллиметрах при соответствующем угле п.к.в. ( $I^0_{п.к.в.} - I$  мм) относительно ВМТ (см. рис. 7.1);  $m_p$  — масштаб по оси ординат, МПа/мм;  $P_0$  — атмосферное давление, МПа. Средняя скорость нарастания давления при сгорании (МПа/град) находится по формуле (см. рис. 7.1)

---

\* Масштаб давления зависит от жесткости применяемой пружины пишущего узла индикатора и при замене пружины может отличаться от указанного.



$$\frac{\Delta p}{\Delta \varphi} = \frac{p_z - p'_c}{\varphi_z + \varphi_{нг}}$$

По формулам раздела 7 на базе материалов испытания двигателя (протокола испытания, копии протокола испытания с осредненными данными, индикаторных диаграмм, ленты автоматического регистратора температур) определяются параметры и показатели рабочего процесса двигателя I2ДРН 23/30 на режимах винтовой характеристики. Результаты расчетов желательно сгруппировать в отдельные таблицы так, чтобы использовать их для построения графиков, указанных в пп. 2.3.4, 2.4.2 и 2.5.2.

Как уже отмечалось, на каждом исследуемом режиме выполняется по два последовательных измерения всех контролируемых величин. Разумеется, на одном и том же установившемся режиме работы двигателя значения параметров, зафиксированных при первом и втором измерениях не могут существенно отличаться одно от другого. Вот почему необходимо следить за тем, чтобы под осреднение не попали случайные существенные отклонения параметров, вызванные либо ошибками измерения, либо неточностями расчетов. При обнаружении таких ошибок необходимо выяснить их причину и внести исправления. Наиболее наглядно ошибки проявляются при построении графиков, поэтому строить их рекомендуется параллельно с выполнением расчетов.

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ 2.1-2.5

1. Дайте краткую техническую характеристику испытуемого двигателя, назовите его обозначение по ГССТ.

2. Каковы значения номинальной и максимальной мощности двигателя, номинального и максимального значений среднего эффективного давления, при каких значениях частоты вращения они достигаются?

3. Оцените уровень форсирования рабочего процесса двигателя по обобщенным показателям  $\chi_{pe}$  и  $\chi_{pe} \bar{c}_m$  и сопо-

ставьте их с аналогичными показателями современных четырехтактных двигателей с близкими  $D$  и  $S$ .

4. Какая система продувки применена на двигателе 40ДМ? Назовите ее достоинства и недостатки.

5. Почему на двигателе применяется комбинированная система наддува? Назовите достоинства и недостатки этой системы наддува.

6. Как осуществляется пуск двигателя?

7. Как выполняется реверс двигателя?

8. Дайте краткую техническую характеристику топливоподающей системы двигателя.

9. Как осуществляется ручное и автоматическое управление двигателем, какие защитные устройства применяются на нем?

10. Какое нагрузочное устройство применяется в экспериментальной установке, как изменяется нагрузка?

11. Почему для питания гидротормоза используется система проточной воды с цистернами постоянного уровня?

12. Дайте техническую характеристику систем водяного охлаждения двигателя, назовите основные элементы и расскажите, как измеряется расход забортной воды.

13. Назовите основные элементы топливоподающей системы двигателя и укажите их на схеме экспериментальной установки.

14. Какова последовательность выполнения операций при измерении расхода топлива?

15. Как измеряется расход воздуха на двигатель, какие приборы и устройства используются при этом?

16. Дайте техническую характеристику масляной системы двигателя, назовите температуры масла на входе и выходе, покажите на схеме экспериментальной установки основное оборудование, измерительное устройство и приборы.

17. Какие приборы применяются на экспериментальной установке для измерения давлений: продувочного воздуха ( $\Delta p_k$ ,  $\Delta p'_k$ ), выхлопных газов ( $\Delta p_r$ ,  $\Delta p'_o$ ), перепадов давлений в расходомерных диафрагмах ( $\Delta h$ )?

18. Как измеряются и записываются температуры воздуха, воды, масла?

19. Укажите на схеме экспериментальной установки расположение термопар для измерения температур выхлопных газов.

20. Какова цель теплотехнических испытаний двигателя?

21. Что принято понимать под винтовой характеристикой?



22. Как рассчитываются точки винтовой характеристики?

23. Как устанавливается требуемый режим работы двигателя по нагрузке и частоте вращения?

24. Как определить, что двигатель пришел в установившееся тепловое состояние?

25. Почему дублируются измерения на каждом исследуемом режиме работы двигателя?

26. Как измерить температуру по записям на ленте ЭП-09 МЗ?

27. Как на базе экспериментальных данных определяется эффективная мощность двигателя  $N_e$ , среднее эффективное давление  $p_e$ , крутящий момент  $M_{кр}$ ?

28. Дайте определение среднего эффективного давления  $p_e$ .

29. Как на базе экспериментальных данных определяются часовая  $G_T$  и удельный эффективный расход топлива  $g_e$ ?

30. Как подсчитывается средняя цикловая подача топлива  $g_{ц}$ ?

31. Как определяется и что характеризует эффективный КПД двигателя  $\eta_e$ ?

32. Почему во всех расчетах используется значение низшей теплотворной способности топлива  $Q_H$ ?

33. Как определяется механический КПД двигателя  $\eta_m$ ?

34. Как подсчитать удельный индикаторный расход топлива  $g_i$ ?

35. Что характеризует индикаторный КПД двигателя  $\eta_i$ ?

36. Какие конкретные потери оцениваются мощностью механических потерь  $N_{мех}$ ?

37. Как определяется удельный расход воздуха  $g_b$ ?

38. Что характеризует суммарный коэффициент избытка воздуха  $\alpha_\Sigma$ , какие сомножители входят в  $\alpha_\Sigma$ ?

39. Дайте определение коэффициента избытка продувочного воздуха  $\phi_k$ , поясните его смысл по формуле.

40. Что понимают под адиабатным КПД компрессора?

41. Почему мощности нагнетателей  $N_{тн}$  и  $N_{пн}$  отнесены к индикаторной мощности двигателя  $N_i$ ; как используются  $\delta_{тн}$  и  $\delta_{пн}$  при оценке  $\eta_m$ ?

42. Как определяется количество теплоты, вносимой в двигатель с топливом?

43. Как определяется количество теплоты, преобразованное в полезную работу?

44. Как рассчитывается расход забортной воды на исследуемом режиме работы двигателя?

45. Как подсчитывается массовый расход выхлопных газов?

46. Как рассчитывается количество теплоты, уносимое уходящими газами?

47. Как определяется количество теплоты, отводимое с охлаждающей забортной водой, какие составляющие включает в себя  $Q_w$ ?

48. Какие тепловые потери вошли в остаточный член теплового баланса двигателя?

49. Какие формы представления теплового баланса использовались при обработке результатов испытания двигателя?

50. Почему несколько отличаются между собой абсолютные значения параметров, характеризующие работу правого и левого блоков цилиндров двигателя?

51. С какой целью измеряются температуры выхлопных газов за цилиндрами (в выхлопных патрубках), каковы наибольшие отклонения температур в отдельных цилиндрах от их средних значений, на каких режимах работы они наблюдаются?

52. Каким прибором и как выполняется запись развернутой индикаторной диаграммы в координатах  $p-\varphi$ ?

53. Что представляет собой чувствительный элемент датчика индикатора МАИ, где установлен датчик?

54. Каким методом выполняется определение среднего индикаторного давления  $p_i$  по развернутой индикаторной диаграмме?

55. Как по развернутой индикаторной диаграмме определить давления в характерных точках рабочего цикла и при любом произвольном положении угла п.к.в.?

56. Дайте определение среднего индикаторного давления  $p_i$ .

57. Что характеризуют индикаторные показатели двигателя  $p_i$ ,  $N_i$ ,  $q_i$ ,  $\eta_i$ ; как они изменяются при работе двигателя на режимах винтовой характеристики?

58. Как изменяется мощность механических потерь  $N_{\text{мех}}$ , механический КПД  $\eta_m$  и механический КПД собственно двигателя  $\eta_m^g$  на режимах винтовой характеристики?

59. Какой математической закономерности подчиняется зависимость  $N_e = f(n)$  при работе двигателя по винтовой характеристике, для какого типа судов характерна эта зависимость?



60. Какова закономерность кривой среднего эффективного давления  $p_e$  и кривой крутящего момента  $M_{кр}$  при работе двигателя по винтовой характеристике?

61. Как изменяется часовой расход топлива  $G_T$  цикловая подача топлива в один цилиндр  $q_{ц}$  и удельный эффективный расход топлива  $q_e$  на режимах винтовой характеристики?

62. Поясните взаимосвязь кривых  $q_e = f(n)$  и  $\eta_e = f(n)$ , а также кривых  $q_i = f(n)$  и  $\eta_i = f(n)$ .

63. Как изменяется расход воздуха на двигатель  $G_b$ , удельный расход воздуха  $q_b$ , суммарный коэффициент избытка воздуха  $\alpha_\Sigma$  и коэффициент избытка продувочного воздуха  $\varphi_k$ ?

64. Как изменяется давление  $p_k$  и температура  $T_k$  воздуха в продувочном ресивере двигателя?

65. С какой целью применяется промежуточное охлаждение наддувочного воздуха, как изменяется  $\Delta T_{ох}$  на режимах винтовой характеристики?

66. По зависимостям  $N_{тн}$ ,  $\delta_{тн}$ ,  $N_{пн}$ ,  $\delta_{пн}$  охарактеризуйте работу агрегатов продувки – наддува исследуемого двигателя.

67. Как изменяется среднее давление  $p_{гс}$  и средняя температура  $T_{гс}$  выхлопных газов перед турбинами, давление  $p'_0$  и температура  $T'_0$  за газовыми турбинами?

68. Какова наибольшая величина максимального давления сгорания  $p_z$ , каков характер зависимости  $p_z = f(n)$ ?

69. По данным таблицы и графикам дайте характеристику статей относительного теплового баланса двигателя на режимах винтовой характеристики.

70. Дайте краткую оценку технического состояния испытанного двигателя, уровня его основных параметров и показателей.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цели и задачи лабораторных работ .....	3
2. Последовательность выполнения лабораторных работ и требования к составлению отчета .....	4
3. Объект испытания .....	7
3.1. Описание конструкции двигателя I2ДРН 23/30...	7
3.2. Основные технические данные дизеля 40ДМ .....	14
3.3. Фазы газораспределения холодного дизеля .....	15
3.4. Контрольные показатели работы дизеля на номинальной мощности .....	15
4. Экспериментальная установка .....	16
5. Винтовая характеристика двигателя .....	18
6. Порядок проведения испытания .....	20
7. Методика обработки результатов испытания .....	22
7.1. Расчетные формулы. Эффективные показатели ...	22
7.2. Обработка индикаторной диаграммы .....	31
8. Контрольные вопросы и задания к лабораторным работам 2.1-2.5 .....	34



