



Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

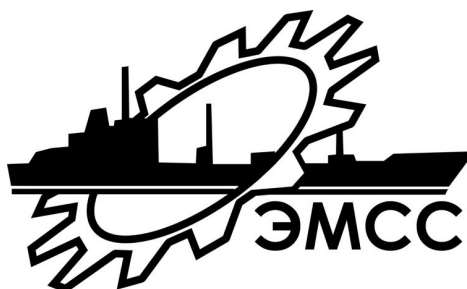
БАЛАНСИРОВКА РОТОРОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы
по дисциплине

**«Организация и технология судоремонта
судов ТСОШ»**

для студентов и магистрантов специальности
7.100302 и 8.100302 «Эксплуатация судовых
энергетических установок» всех форм обучения



Севастополь

2009



УДК 629.12.03

Балансировка роторов. Методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Организация и технология судоремонта судов ТСОШ» для студентов и магистрантов специальности 7.100302 и 8.100302 «Эксплуатация судовых энергетических установок» всех форм обучения/ Сост. А.Г. Андриец. - Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – 20 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам в подготовке к выполнению лабораторной работы по изучению определения и устранения дисбаланса роторов судовых механизмов и оборудования, а также получения практических навыков по выполнению балансировки роторов.

Методические указания утверждены на заседании кафедры энергоустановок морских судов и сооружений, протокол № 13 от 27.06.08 г.

Рецензент: канд. техн. наук, доцент каф. ЭМСС Мальчиков А.И.

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Цель работы.....	4
2. Теоретический раздел	4
3. Порядок выполнения работы	10
4. Содержание отчета о выполненной работе	11
5. Контрольные вопросы.....	12
Библиографический список.....	13
Приложение А. Ротор газотурбонагнетателя дизеля.....	14
Приложение Б. Ротор многоступенчатого компрессора.....	15
Приложение В. Ротор одноступенчатой турбины.....	16
Приложение Г. Роторы многоступенчатой и трехступенчатой турбин	17

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторная работа по дисциплине «Организация и технология судоремонта судов ТСОШ» предназначена для более глубокого изучения студентами динамики и кинематики вращающихся (ротативных) механизмов и оборудования, более глубокого понимания физической сущности процессов, происходящих в судовых ротативных механизмах и оборудовании в процессе эксплуатации, а также для приобретения навыков статической балансировки роторов и обработки полученных данных.

К лабораторной работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности, при выполнении работы необходимо строго соблюдать требования техники безопасности.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение определения и устранения дисбаланса роторов судовых механизмов и оборудования, а также получение практических навыков по статической балансировке роторов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Вибрации валов, дисков, шатунно-поршневых групп ДВС, роторов турбокомпрессоров, паро- и газотурбинных двигателей и электрогенераторов вредны и могут привести к поломкам их узлов и разрушению системы ротор-опоры, возникновению усталостных трещин на корпусах, дисках (турбокомпрессора).

Вибрация – это периодические механические колебания, появляющиеся в результате вращения неуравновешенного тела с определенной амплитудой и частотой.

Допустимый по техническим условиям, коэффициент виброперегрузки у механизмов достигается конструктивными и технологическими путями, и у новых (отремонтированных) ротативных механизмов роторы при вращении находятся в состоянии динамического равновесия и **центр масс ротора находится на оси его вращения**. В этом случае будет равна нулю сумма всех возникающих при вращении центробежных сил инерции:

$$\sum_{i=1}^i \overline{F}_i = 0 \quad (1)$$

и сумма всех моментов этих сил относительно оси вращения:

$$\sum_{i=1}^i \overline{M}_i = 0. \quad (2)$$

Центробежная сила – вектор $\vec{F}_i = m_i \cdot \vec{r}_i \cdot \omega^2$, где m_i – i -тый элемент массы; i – число элементов массы, на которые разбит ротор; $\vec{r}_i$ – радиус-вектор элемента массы ротора; ω – угловая скорость вращения ротора.

Вектор-момент $\vec{M}_i = [\vec{F}_i \times \vec{l}_i]$ – векторное произведение силы $\vec{F}_i$ на вектор $\vec{l}_i$ – кратчайшее расстояние от плоскости А (рисунок 2.1), перпендикулярной оси вращения тела X и проходящей через центр его массы О, до элемента m_i . Вектор-момент $\vec{M}_i$ перпендикулярен плоскости, в которой лежат векторы $\vec{F}_i$, $\vec{l}_i$; он может быть заменён парой сил в плоскости, содержащей эти векторы.

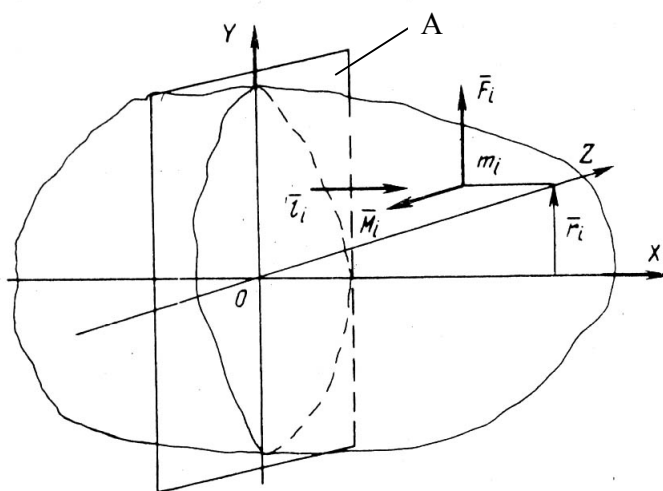


Рисунок 2.1 – Расположение в пространстве момента сил

Пока центр масс О тела вращения находится на оси вращения X, тело (ротор) уравновешено, вибрации нет.

В процессе эксплуатации ротативных машин могут появиться неуравновешенные массы ротора, центр масс ротора смещается от оси вращения, появляется возмущающая сила, создающая вибрацию. Появившаяся возмущающая сила равна центробежной силе неуравновешенной массы и определяется по формуле:

$$F = mr \omega^2 = mr(\pi n/30)^2, \quad (3)$$

где m – неуравновешенная масса, кг;

r – радиус приложения неуравновешенной массы m , равный расстоянию от оси вращения ротора до центра неуравновешенной массы, м;

ω – угловая скорость ротора, $\omega = \pi n/30$;

n – частота вращения ротора, s^{-1} .

Ротор, неуравновешенные массы которого приведены к одной массе, центр тяжести которой не лежит на оси вращения, создающей центробежную

силу при вращении ротора, называется статически неуравновешенным (рисунок 2.2а). Расстояние центра масс 1 (рисунок 2.2.а,б) от оси ротора 2 называется эксцентриситетом масс ротора.

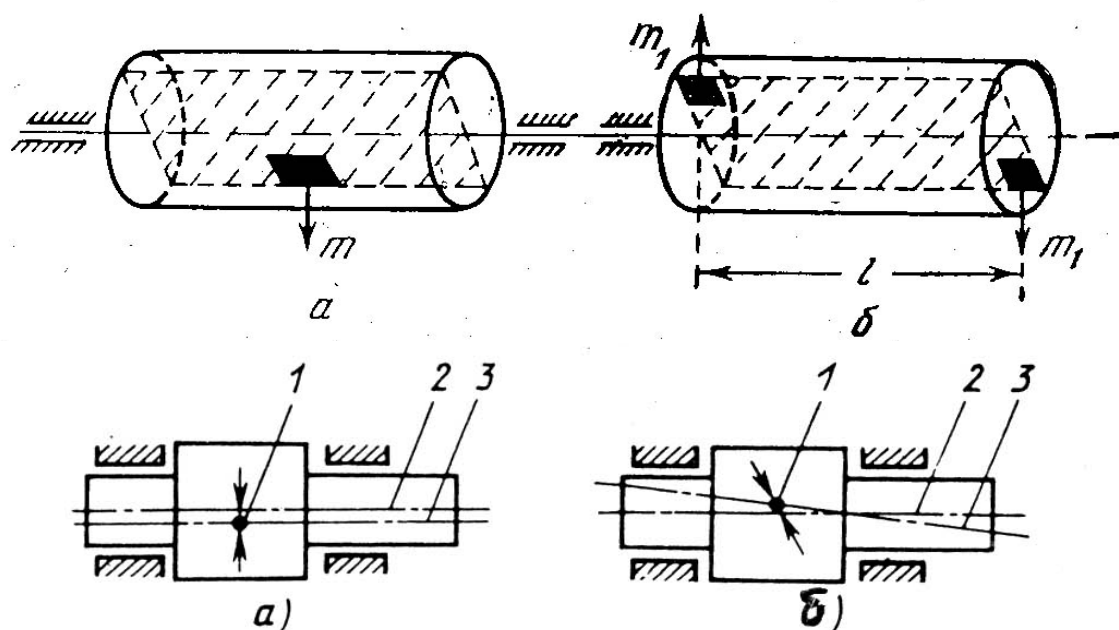


Рисунок 2.2 – Расположение в пространстве неуравновешенных масс

Например, при поломке рабочих лопаток компрессора или турбины, если принять, что неуравновешенная масса (рисунок 2.2а) $m=0,5$ кг находится от оси вращения на расстоянии $r=0,8$ м, то при частоте вращения ротора 25 с^{-1} (1500 об/мин) возмущающая центробежная сила F составит 10000 н (1000 кгс), а при частоте 50 с^{-1} (3000 об/мин) – 40000 н (4000 кгс). Отсюда видно, что дисбаланс ротора только в 0,5 кг при номинальном режиме может вызвать значительную вибрацию.

Статическая балансировка, т.е. определение главного вектора дисбалансов ротора, может производиться и на станках для динамической балансировки, определяющих дисбалансы на вращающемся роторе, что значительно повышает точность балансировки и уменьшает время, затрачиваемое на неё в условиях серийного производства. Этот способ называется статической балансировкой в динамическом режиме и применяется, например, для балансировки дисков ротора компрессора и турбины авиационных двигателей перед их окончательной сборкой для динамической балансировки.

Динамическая неуравновешенность возникает в том случае, когда все неуравновешенные массы приводятся к двум массам (рисунок 2.2б), создающим две центробежные силы, противоположно направленные и не лежащие в одной плоскости, перпендикулярной оси ротора, и следовательно,

создающие пару сил – момент. Такой ротор считается динамически неуравновешенным, а возникающая на роторе пара сил (момент) вызывает на опорных поверхностях (подшипниках) возмущающие силы, которые приводят к вибрации.

На величину амплитуды вибрации влияет массивность и жёсткость подшипников. Одна и та же возмущающая сила, исходящая от ротора и действующая на вкладыш, выводит из равновесия (с большей амплитудой) менее массивный и недостаточно жёсткий корпус подшипника.

Статически сбалансированная вращающаяся масса может быть динамически неуравновешенной, а динамически сбалансированная – приводит к статическому балансу.

Балансировка – это технологический процесс приведения центра масс (центра инерции) ротора к его оси вращения. Это означает приведение (уменьшение) дисбалансов ротора до допустимой величины. Задача сведения дисбалансов к нулю не ставится, так как это возможно только теоретически.

Допустимый дисбаланс ротора назначается, как правило, при разработке и доводке ротативных машин предприятием-изготовителем на основании требований международных стандартов, при этом для повышения их надёжности и ресурса предприятия-изготовители постепенно ужесточают требования к балансировке и уменьшают величину допустимого дисбаланса ротора. Система классов точности балансировки жестких роторов механизмов установлена международным стандартом ИСО 1940-73, который предусматривает 13 степеней точности – с нулевого по двенадцатый.

ГОСТ 22061-76 устанавливает формулы пересчета для определения дисбалансов, а также допустимые дисбалансы при разработке и доводке механизмов.

Допустимый дисбаланс выражают в долях (1...5 %) от веса ротора G и определяют по выражению:

$$mr (\pi n/30)^2 \leq (0,01 \dots 0,05) G, \quad (4)$$

где m – допустимая неуравновешенная масса, кг;

n – частота вращения ротора, s^{-1} .

Кроме этого в ряде случаев назначается периодичность профилактической балансировки: например, для турбокомпрессоров газоперекачивающих агрегатов ТКР-14, ТКР-18 – 500...1000 часов работы, а для ТК-30, ТКР-23 – через 3000 часов.

Динамическая балансировка для определения величины и места расположения неуравновешенной массы производится двумя методами:

- измерением амплитуды и фазы (частоты) колебаний балансируемого ротора на специальных балансировочных стойках при понижении числа оборотов ротора;

- на своих подшипниках в собранном механизме (агрегате) при рабочем числе оборотов. Роторы, имеющие общий вал, на котором установлено несколько рабочих колес, целесообразно балансировать методом раздельно-последовательной балансировки, для чего вначале балансируют вал на собственных подшипниках, после чего вал используют как оправку для последовательной балансировки на нем рабочих колес, при этом начинают с балансировки одного рабочего колеса, затем балансируют присоединенное к нему второе колесо, не изменяя дисбаланса первого, и так далее – до последнего колеса. Таким образом, каждое колесо в составе ротора и сам ротор получают сбалансированными.

В результате динамической балансировки определяются места расположения и величины грузиков, которые, будучи прикреплёнными к балансируемому ротору в соответствующих местах, вызовут в роторе добавочные центробежные силы, равные и противоположные по направлению центробежным силам, создающим неуравновешенность ротора.

Динамическая неуравновешенность по-разному сказывается при балансировке “длинных” и “коротких” роторов (рисунок 2.2), так как длина ротора l является плечом момента пары неуравновешенных сил. При малых значениях $l/d \leq 0,2$ воздействие момента сил незначительно и роторы можно балансировать только статически.

Поршневые машины (ДВС, компрессоры) имеют обычно коленчатые валы, вращающиеся на своих коренных шейках в опорах машины, и шатуны с поршнями, надетые на шатунные шейки. Поршни в таких машинах движутся возвратно-поступательно, шатуны – возвратно-поступательно и вращательно. Поэтому при балансировке коленчатых валов приходится учитывать влияние масс этих присоединённых к коленчатому валу деталей. Такие “присоединённые массы” могут быть специально рассчитаны и надеты в виде технологических втулок на шатунные шейки коленчатых валов при их балансировке. В вычислительное устройство некоторых балансировочных станков можно вводить электрический сигнал, эквивалентный действию этих втулок.

Для определения величины и местоположения корректирующего груза крепят на роторе технологический грузик из пластилина, воска или свинца. Найдя окончательное местоположение технологических грузиков и их величину, необходимо изготовить или подобрать постоянные корректирующие грузики и закрепить их на том же, что и технологические грузики, радиусе, так как уравновешивающая центробежная сила согласно (3) зависит от радиуса расположения грузика от оси вращения ротора. Места для корректирующих грузиков указываются в технологической документации механизма.

Если корректирующая масса (уравновешивающий грузик) по какой-либо причине снимается (или добавляется) не на том радиусе ротора, на котором устанавливались технологические грузики, то делают перерасчет по формуле:

$$m = \frac{P \cdot R}{r},$$

где m – масса искомого уравновешивающего грузика (корректирующая масса);

P – масса технологического грузика, определенная при балансировке;

R – радиус окружности ротора, на которой прикладывался технологический грузик,

r – радиус окружности ротора, на которой снимается (добавляется) корректирующая масса, как правило, он указывается в технической документации механизма.

Постоянный корректирующий грузик необходимо, например для ГТД, закрепить до отказа (с установкой замка) в балансировочной канавке, при этом масса замка должна быть учтена при изготовлении постоянного грузика.

Добавление, перемещение или удаление корректирующих масс может производиться сверлением, фрезерованием, наплавкой металла или пластмассы, наваркой, завинчиванием или вывинчиванием винтов, выжиганием электрической искрой, лучом лазера, электронным пучком, электролизом, электромагнитным наплавом и т.д.

При установке по результатам балансировки на роторе уравновешивающих грузиков особое внимание должно быть уделено правильному и надёжному креплению этих грузиков независимо от конструкции.

Статическая балансировка производится на специальных установках, например, на балансировочных параллелях.

Балансировочные параллели изготавливают из стали Ст. 4 или Ст. 5 с последующей закалкой, поверхность параллелей должна быть тщательно отшлифованной, иметь правильную геометрическую форму, длина параллелей должна позволять сделать 2 оборота шейки вала балансируемого ротора. Ширина рабочей поверхности параллелей должна быть определена из условия отсутствия смятия шейки вала.

Параллели необходимо устанавливать параллельно друг другу (непараллельность не более 1 мм на 1 м длины), поверхности параллелей должны быть в одной горизонтальной плоскости (допускаемый уклон 0,1 мм на 1 м длины).

Шейки вала ротора должны иметь одинаковый диаметр, а их эллипсность и конусность не должны превышать установленных норм. Ротор следует ус-

танавливать так, чтобы его ось была перпендикулярна параллелям, после установки – прокатить по всей длине параллелей для взаимной обкатки поверхностей. Если на валу ротора есть паз под шпонку, его заполняют металлом, так как масса шпонки оказывает влияние на точность балансировки.

Статическая балансировка производится обычно в два этапа:

- 1) балансировка явно выраженной неуравновешенности;
- 2) балансировка неявно выраженной неуравновешенности.

После снятия (добавления) корректирующей массы металла на роторе производят повторную контрольную балансировку с составлением новых графиков, определяющих величину уравнивающего груза и его расположение. Если величина остаточной статической неуравновешенности не превышает допустимую, указанную в технической документации механизма (ротора), то балансировка считается законченной.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 3.1. Изучить теоретический раздел 2 и места установки корректирующих грузиков на роторах механизмов, приведенных в приложениях А, Б, В, Г.
- 3.2. Очистить чистой ветошью поверхности балансировочных параллелей и вал балансируемого ротора.
- 3.3. Выставить параллельно балансировочные параллели, с помощью уровня обеспечить их расположение в горизонтальной плоскости.
- 3.4. Установить балансируемый ротор на параллели так, чтобы ось вращения ротора была перпендикулярна параллелям.
- 3.5. Произвести балансировку явной неуравновешенности ротора, для чего несколько раз повернуть ротор на 90° и отпустить, определить направление тяжелого места – ротор установится тяжелым местом вниз, нанести по этому направлению мелом риску. Провернуть ротор таким образом, чтобы направление (радиус), на котором расположено тяжелое место, оказалось в горизонтальной плоскости. В противоположном относительно тяжелого места направлении закрепить грузик из пластилина такой величины, чтобы балансируемый ротор занял безразличное положение на параллелях: провернуть его несколько раз – каждый раз ротор должен останавливаться в разном (безразличном) положении. Взвесить груз, определить его радиус приложения и вновь закрепить.
- 3.6. Произвести балансировку неявно выраженной неуравновешенности. Для определения оставшегося дисбаланса (его причина – наличие сил трения между валом ротора и поверхностью параллелей) – торцовую поверхность ротора разделить на 6...8 частей через 45 градусов (рисунок 3.1), нанести риски мелом и пронумеровать.

- 3.7. Установить риску № 1 в горизонтальное положение, прикрепить к ней грузик на радиусе r с весом, выводящим ротор из равновесия и поворачивающий его на небольшой угол. Взвесить грузик и занести вес в таблицу 3.1.
- 3.8. Выполнить операцию по п. 3.7 для каждой из рисок № 2...8, устанавливаемых горизонтально на радиусе r , прикрепляя грузик с таким весом, чтобы каждый раз ротор поворачивался на один и тот же небольшой угол. Взвесить подобранные грузики, данные занести в таблицу 3.1.
- 3.9. Построить график согласно рисунку 3.1 и определить тяжелое и легкое места ротора, а также величину неуравновешенной массы по формуле
- $$m = (P_{\max} - P_{\min})/2, \quad (4)$$
- где $P_{\max}$ и $P_{\min}$ – соответственно максимальный и минимальный вес грузиков.

Таблица 3.1

Номер риски	1	2	3	4	5	6	7	8
Вес грузика, кг								

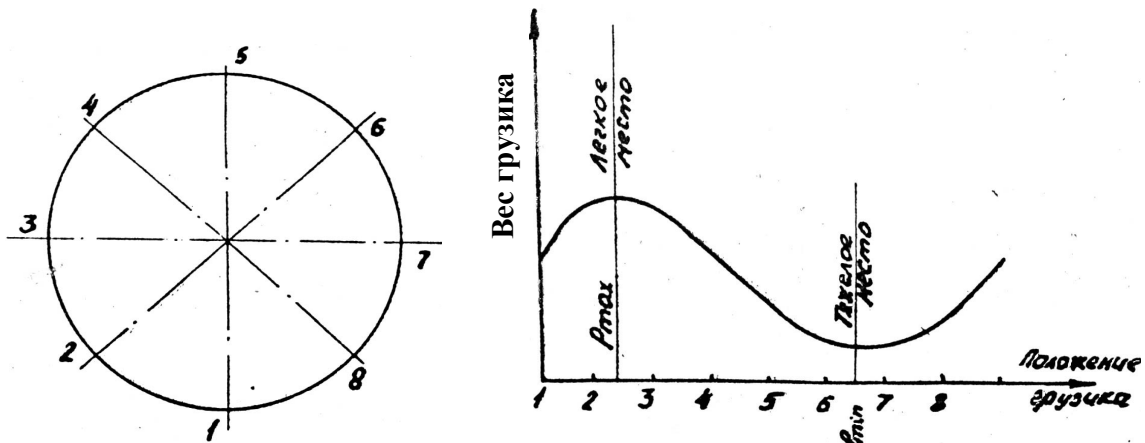


Рисунок 3.1 – Распределение весов грузиков на роторе

- 3.10. Определить и показать на роторе место закрепления или удаления корректирующей массы для неявно выраженной неуравновешенности.
- 3.11. Привести лабораторную установку в исходное положение, сдать инструменты лаборанту.
- 3.12. Предъявить преподавателю результаты, полученные при выполнении работы.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЕ

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- основные формулы и формулировки;
- схему разметки ротора;
- заполненную таблицу размеров и обработки опытных данных – таблица 3.1;
- график обхода грузом радиусов ротора (рисунок 3.1);
- результат определения по формуле (4) дисбаланса неявно выраженной неуравновешенности;
- заключение о результатах статической балансировки ротора.

Отчет должен быть выполнен аккуратно, рисунки – в соответствии с требованиями ЕСКД и правилами черчения.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как первоначально расположены в сбалансированном роторе его центр тяжести и ось вращения?
2. Какие признаки вращающегося ротора указывают на его разбалансировку, появление неуравновешенности?
3. Какой ротор называется статически неуравновешенным?
4. Какой ротор называется динамически неуравновешенным?
5. Какие параметры влияют на величину центробежной силы неуравновешенной массы ротора?
6. Что является задачей балансировки ротора?
7. В каких случаях – при соотношении каких величин пренебрегают динамической неуравновешенностью и выполняют только статическую балансировку ротора?
8. Как, на каком оборудовании производится статическая балансировка?
9. Как, на каком оборудовании производится динамическая балансировка?
10. Как выбирается радиус окружности ротора, на котором прикладываются грузики при балансировке?
11. Как определяется вес корректирующей массы при балансировке явно выраженной неуравновешенности ротора?

12. Как определяется вес корректирующей массы при балансировке неявно выраженной неуравновешенности ротора?

13. Как выполняется перерасчёт корректирующей массы, если она снимается (добавляется) не на радиусе той окружности ротора, на которой производилась балансировка ротора и определялись величины грузиков?

14. Как определяется допустимая неуравновешенность балансируемого ротора, допустимый дисбаланс?

15. Показать места установки (удаления) корректирующих масс на чертежах роторов механизмов, приведенных в приложениях А, Б, В и Г.

16. Какие особенности при балансировке коленчатых валов ДВС?

17. Какими методами производится удаление, добавление или перемещение корректирующих масс?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дизели ряда 6Ч 12/14 и агрегаты /Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1975. – 208 с.

2. Овсянников М.К. Судовые дизельные установки: Справочник/М.К. Овсянников, В.А. Петухов. –Л.: Судостроение, 1985. –257с.

3.Ильянков А.И. Основы сборки авиационных двигателей/А.И. Ильянков, М.Е.Левит. –М.: Машиностроение, 1987.- 288с.

4. Артемов Г.А. Судовые установки с газотурбинными двигателями /Г.А. Артемов, В.М. Горбов, Г.Ф. Романовский. –Николаев: УГМТУ, 1997. – 204 с.

5. Левит М.Е. Балансировка деталей и узлов/М.Е. Левит, В.М. Рыженков. –М.: Машиностроение, 1986. – 345 с.

6. Артемов Г. А. Судові енергетичні установки/ Г.А. Артемов, В.М. Горбов. –Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 356 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное)

Газотурбонагреватель дизеля

При балансировке газотурбонагревателя Н7 (рисунок А.1) системы наддува дизеля 8 ЗД 72/48 АЛ-1 остаточный дисбаланс устранить за счёт удаления металла (корректирующей массы) с поверхности **А** на глубину не более $6 \cdot 10^{-3}$ м (6 мм) и с поверхности **Б** – не более $5 \cdot 10^{-3}$ м (5 мм).

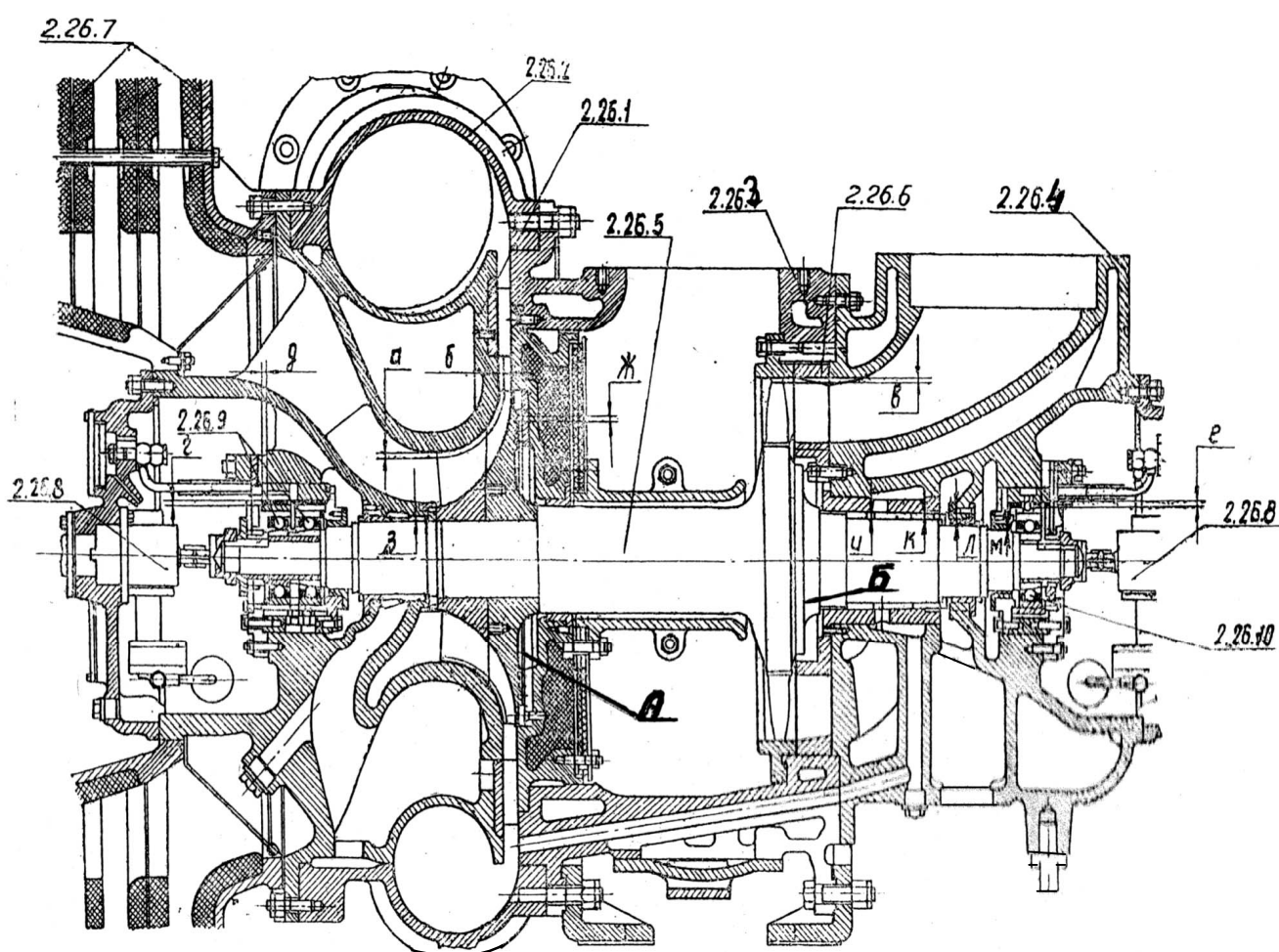


Рисунок А.1 – Газотурбонагреватель дизеля

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное)

Ротор восьмиступенчатого осевого компрессора

При балансировке восьмиступенчатого осевого компрессора (рисунок Б.1) устранение остаточного дисбаланса производится подбором грузиков поз. 21 в соответствии с величиной вычисленной корректирующей массы, при этом остаточный дисбаланс должен быть не более $0,1 \cdot 10^{-3}$ кг·м (100 г·мм) в каждой плоскости коррекции.

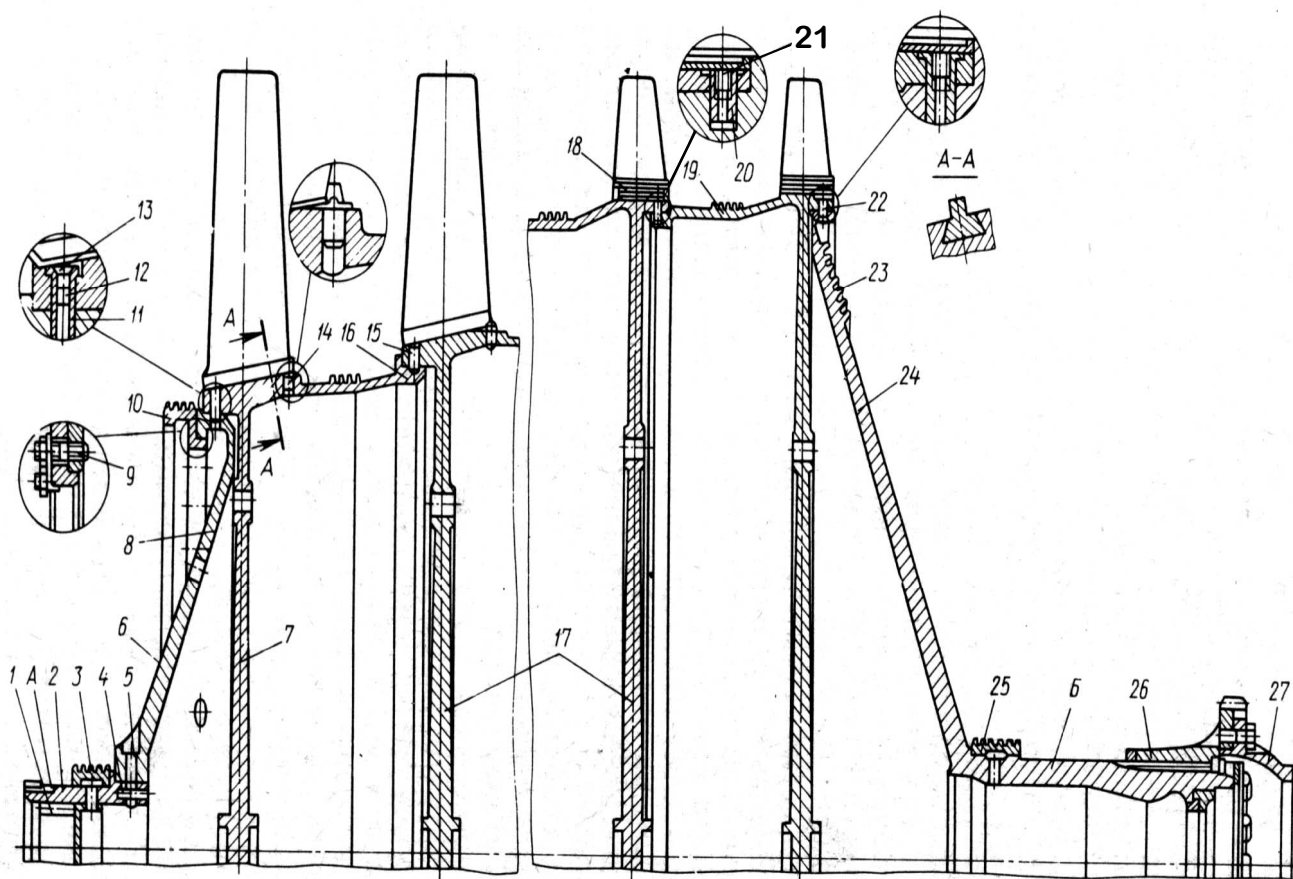


Рисунок Б.1 – Ротор восьмиступенчатого осевого компрессора

ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное)

Ротор одноступенчатой турбины

При балансировке ротора одноступенчатой турбины (рисунок В.1) устранение остаточного дисбаланса производится исходя из вычисленной корректирующей массы, меняя и подбирая балансировочные пальцы поз.10 по массе.

Динамическая балансировка производится при установке наружной обоймы роликового подшипника поз.5 в технологическую обойму до остаточных дисбалансов не более $5 \cdot 10^{-6}$ кг·м (5 г·мм) в каждой плоскости коррекции.

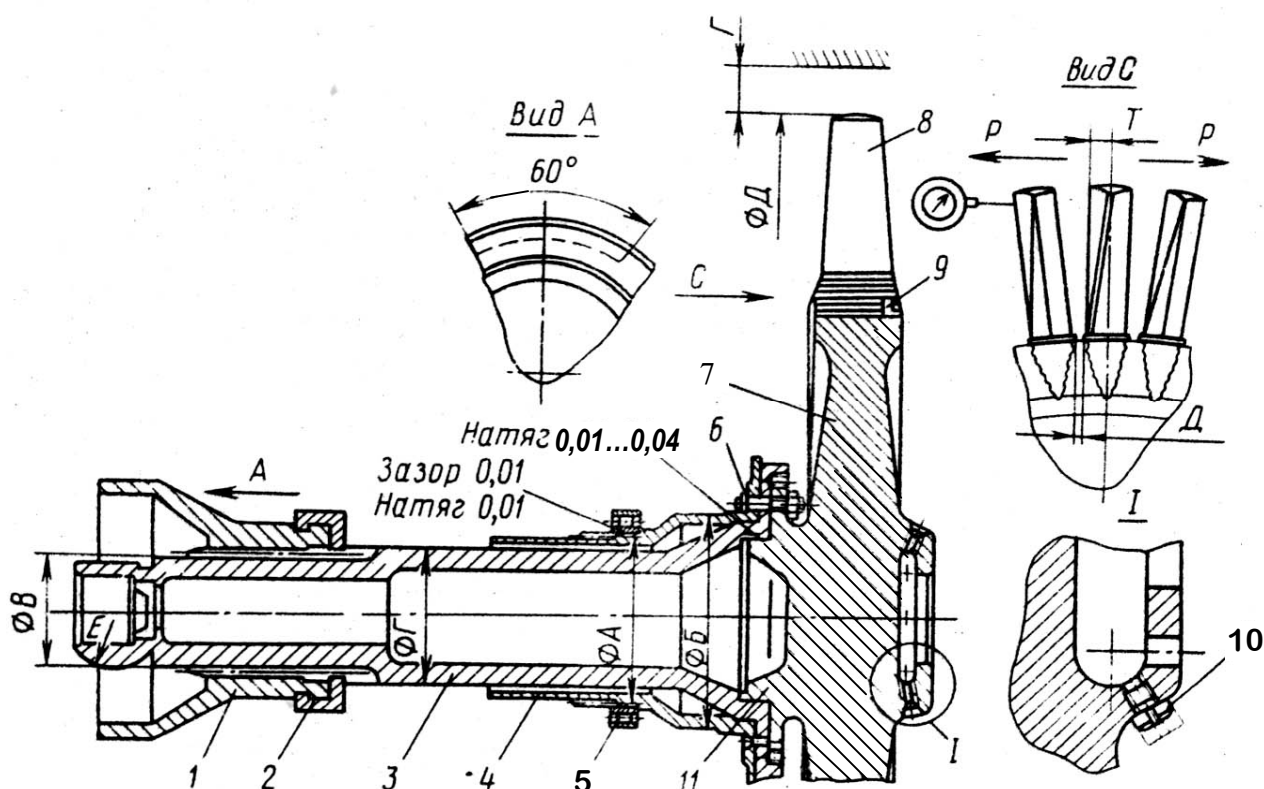


Рисунок В.1 – Ротор одноступенчатой турбины

ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное)

Роторы многоступенчатой и трехступенчатой турбин

При балансировке ротора многоступенчатой турбины (рисунок Г.1) устранение остаточного дисбаланса производить подбором или обработкой балансировочных винтов поз.11,18 в соответствии с величиной вычисленной корректирующей массы.

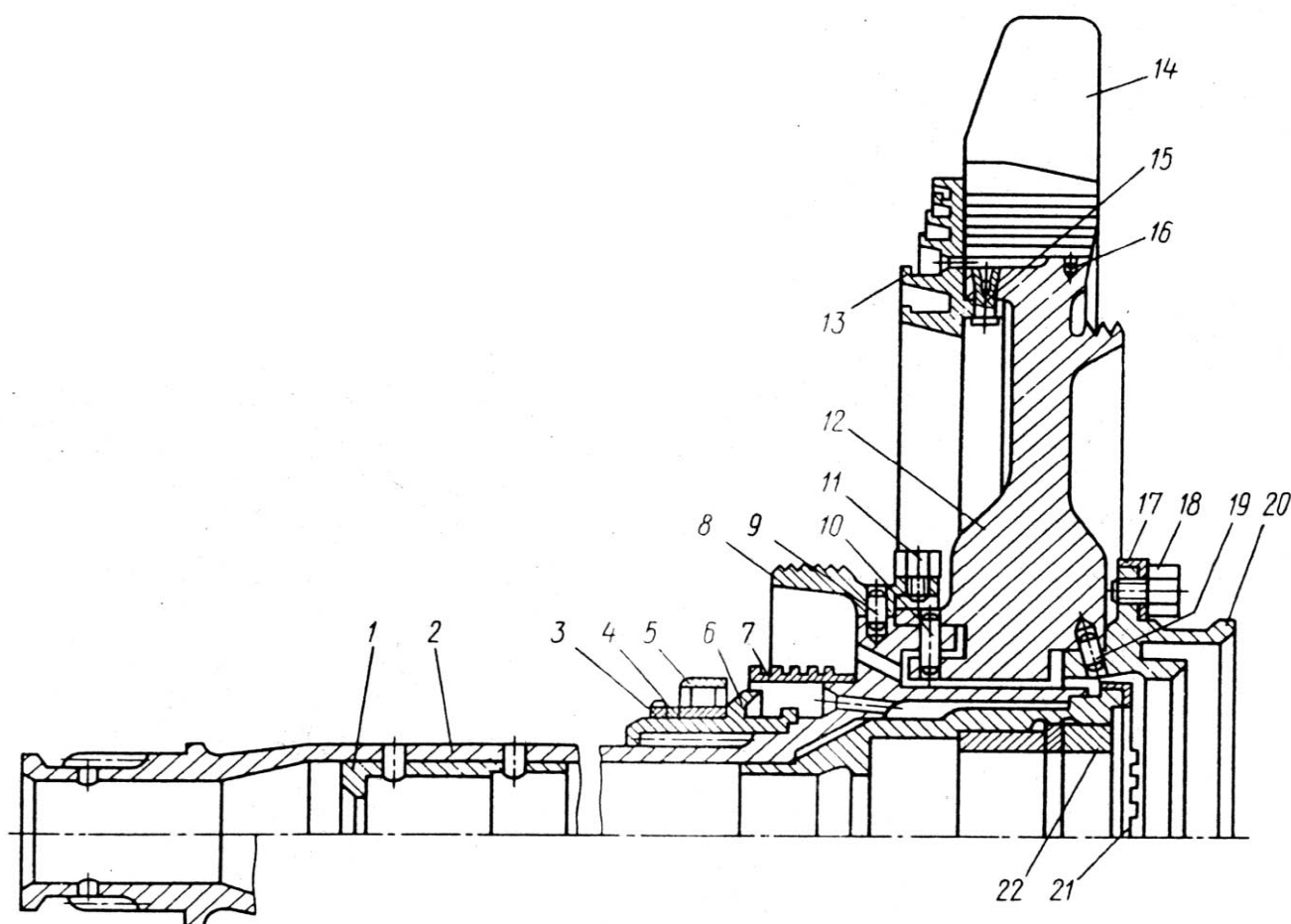


Рисунок Г.1 – Ротор многоступенчатой турбины

При балансировке ротора трехступенчатой турбины (рисунок Г.2) устранение остаточного дисбаланса производить путем снятия материала в местах 2 и 6. Динамическая балансировка всего ротора на технологических подшипниках должна быть выполнена с точностью $0,2 \cdot 10^{-3}$ кг·м (200 г·мм) в каждой плоскости коррекции.

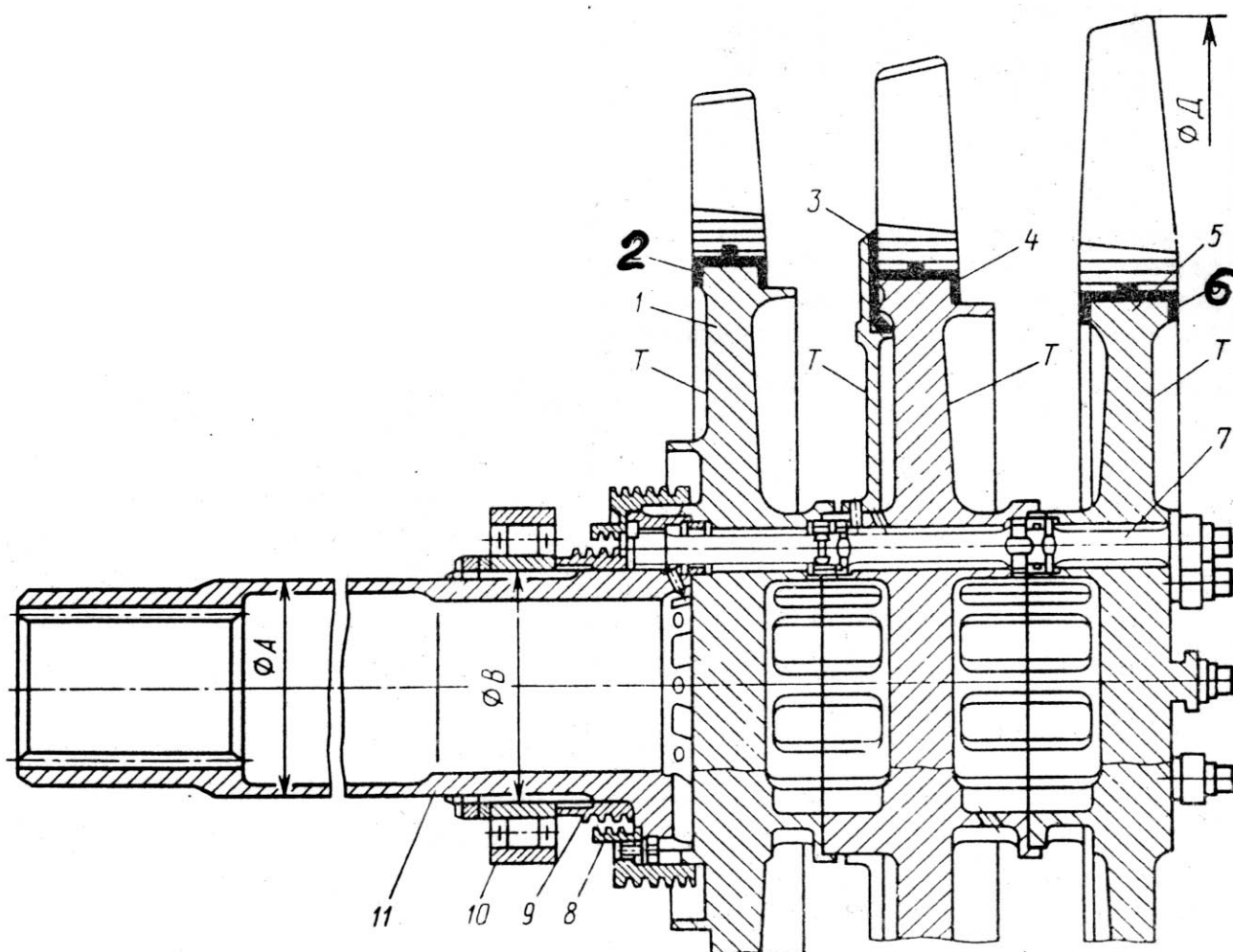


Рисунок Г.2 – Ротор трехступенчатой турбины

Заказ № _____ от « _____ » _____ 200 ____ . Тираж _____ экз.
Изд-во СевНТУ