

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

## **КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ**

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве методических указаний для студентов Самарского университета, обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

Составители: *В.А. Зрелов,*  
*В.С. Мелентьев*

С А М А Р А

Издательство Самарского университета

2022

© Самарский университет, 2022

УДК 629.7.036.54

ББК 06.37

Составители ***В. А. Зрелов, В. С. Мелентьев***

Рецензент д-р техн. наук, проф. В. Б. Б а л я к и н

**Конструктивные схемы турбонасосных агрегатов:** методические указания / *В.А. Зрелов, В.С. Мелентьев*. – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Самарский университет. – Самара: Издательство Самарского университета, 2022. – 1 CD-ROM (0,4 Мб). – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный.

В методических указаниях дано определение конструктивной схемы турбонасосного агрегата (ТНА), описано, как выбрать конструктивную схему ТНА, определяющую компоновку основных узлов ТНА, под заданные параметры. Дана классификация конструктивных схем, указаны их преимущества и недостатки. Показано, как учесть свойства рабочих жидкостей насосов и рабочего тела турбины. Показано развитие компоновки ТНА.

Предназначено для обучающихся по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей».

Подготовлено на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

Минимальные системные требования:

PC, процессор Pentium, 160 МГц; оперативная память 32 Мб;

на винчестере 16 Мб; Microsoft Windows XP/Vista/7;

разрешение экрана 1024x768 с глубиной цвета 16 бит;

DVD-ROM 2-х и выше, мышь; Adobe Acrobat Reader.

УДК 629.7.036.54

ББК 06.37

Редактор И.П. Ведмидская  
Компьютерная вёрстка И.П. Ведмидской

Подписано для тиражирования 24.08.2022.

Объем издания 0,4 Мб.

Количество носителей 1 диск.

Тираж 11 дисков.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

## Содержание

Введение .....	5
1 Конструктивные схемы ТНА .....	6
2 Классификация конструктивных схем ТНА .....	6
3 Выбор конструктивной схемы ТНА.....	13
3.1 Редукторные и безредукторные схемы .....	13
3.2 Расположение турбины относительно опор и насосов.....	15
3.3 Выбор числа опор вала .....	17
3.4 Влияние свойств рабочих жидкостей насосов и рабочего тела турбины на выбор конструктивной схемы .....	18
3.5 Переход к отдельным ТНА.....	19
Заключение .....	20
Список использованных источников .....	21

## ВВЕДЕНИЕ

После проведения гидро-газодинамического проектирования ТНА, в результате которого определяются типы насосов и турбин, частоты их вращения, основные размеры и т.д., переходят к разработке конструкции ТНА.

Первым и наиболее ответственным этапом при разработке конструкции ТНА является выбор его конструктивной схемы (КС).

Цель лабораторной работы:

Дать навыки обоснованного выбора (из всего многообразия возможных конструктивных схем) оптимальной конструктивной схемы проектируемого ТНА.

Задание:

- Проработать материал данного указания;
- Ознакомиться с конструкциями ТНА ряда двигателей и составить их конструктивные схемы;
- Дать анализ положительных и отрицательных свойств конструктивных схем ТНА;
- Предложить, зарисовать и описать обоснованную конструктивную схему проектируемого ТНА.

Отведенные для работы четыре часа распределить согласно рекомендации преподавателя.

За 10-15 минут до окончания занятия необходимо быть готовым к опросу.

## **1 КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ТНА**

Под конструктивной схемой (КС) понимается условное изображение совокупности основных агрегатов ТНА с указанием их типов, числа и взаимного расположения. Условное изображение отдельных элементов ТНА показано на рис. 1. Конструктивные схемы различных ТНА приведены на рис. 2, 3, 4, 5 и 6. Обоснованный выбор (из всего многообразия возможных конструктивных схем) оптимальной конструктивной схемы проектируемого ТНА требует большой эрудиции, знания многих дисциплин и умения оценивать достоинства и недостатки каждого из рассматриваемых вариантов.

Конструктивная схема в значительной степени предопределяет уровень технического совершенства и надежности ТНА. Принятие КС требует знания признаков (свойств) различных конструктивных схем. Окончательный выбор конструктивной схемы сводится к принятию для конкретных исходных данных КС с такими свойствами, при которых наиболее полно реализуются требования к ТНА.

## **2 КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ТНА**

Все многообразие КС ТНА можно классифицировать по определенным признакам:

### **1. По кинематике вращения и типу валопровода:**

- безредукторные;
- редукторные.

В безредукторных ТНА (см. рис. 2, 3, 4) турбина и насосы вращаются с одинаковой частотой. Турбина и оба насоса могут располагаться на одном цельном валу, либо на двух валах (разрезном валу), соединенных шлицевой муфтой или рессорой. В последнем случае каждый вал, как правило, имеет собственные опоры, установленные в своих корпусах.

К безредукторным ТНА следует также отнести и отдельные ТНА, когда каждый из насосов приводится во вращение отдельной турбиной. В этом случае насос с турбиной рассматриваются как одновальный самостоятельный ТНА (см. рис. 6а, б).

Для оптимального согласования частот вращения турбин и насосов применяются редукторы ТНА.

Редуцирование может осуществляться через зубчатую передачу (см. рис.5а), через газовую связь между турбинами, приводящими во вращение различные насосы (см. рис.5б), а также через гидравлическую связь между ступенями насосов (см. рис.5г).

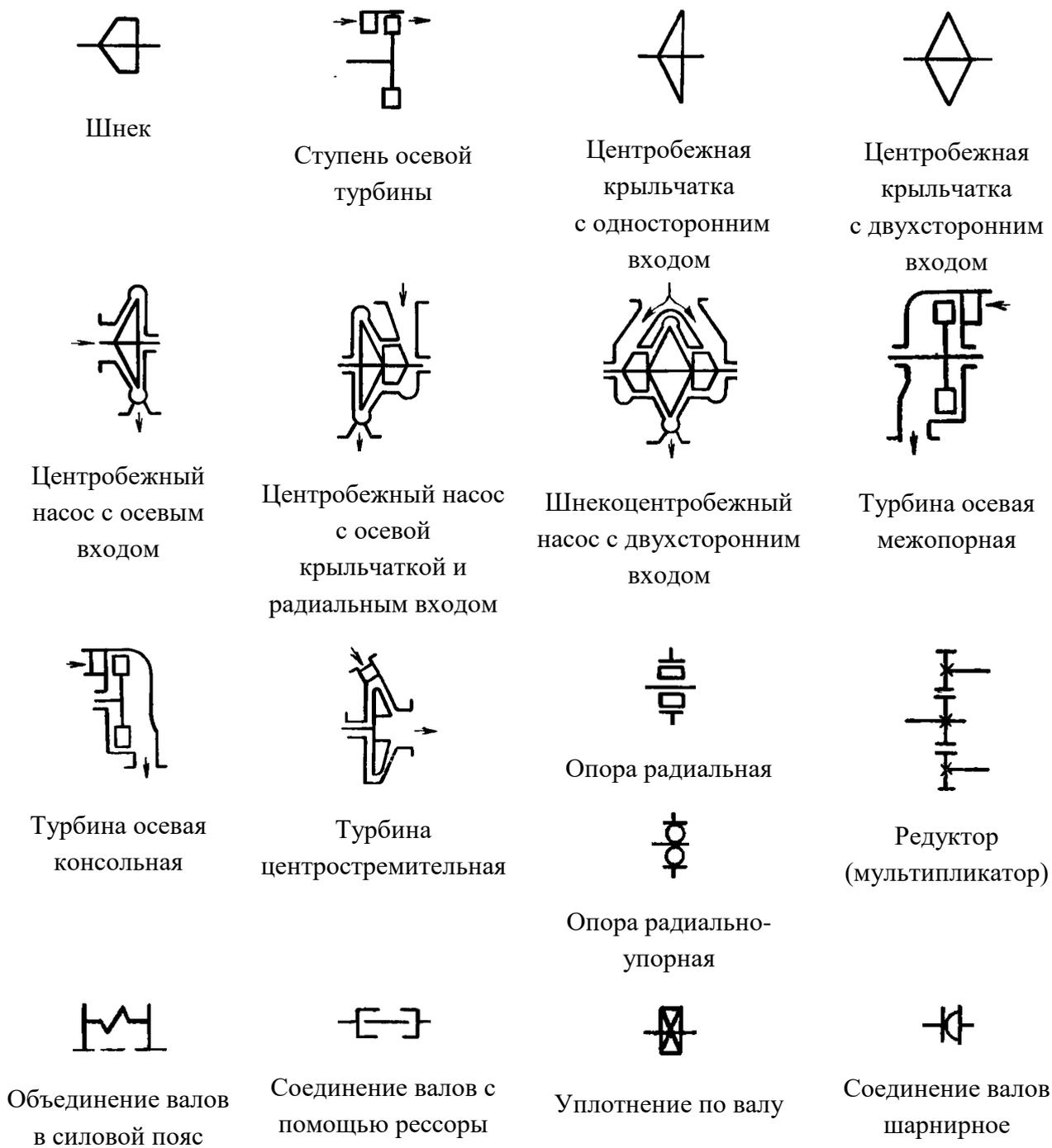
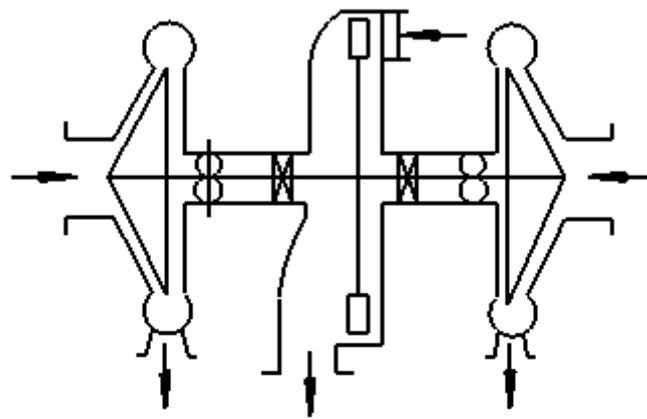
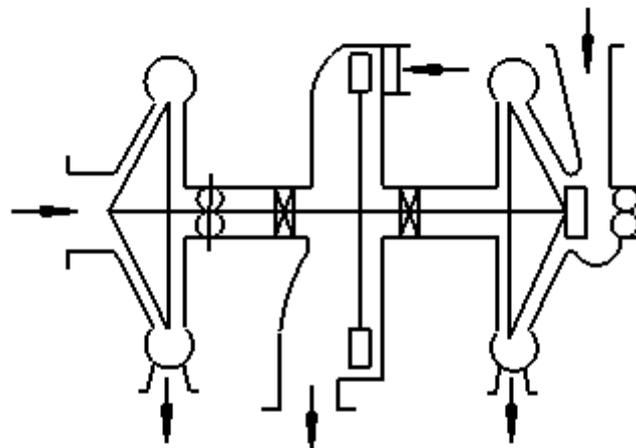


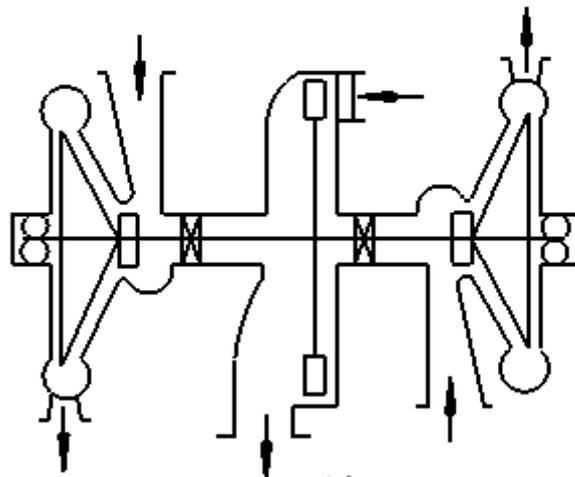
Рис. 1. Условные изображения отдельных элементов в ТНА



*a)*



*б)*



*в)*

Рис. 2. Конструктивные схемы ТНА с межопорным расположением турбины

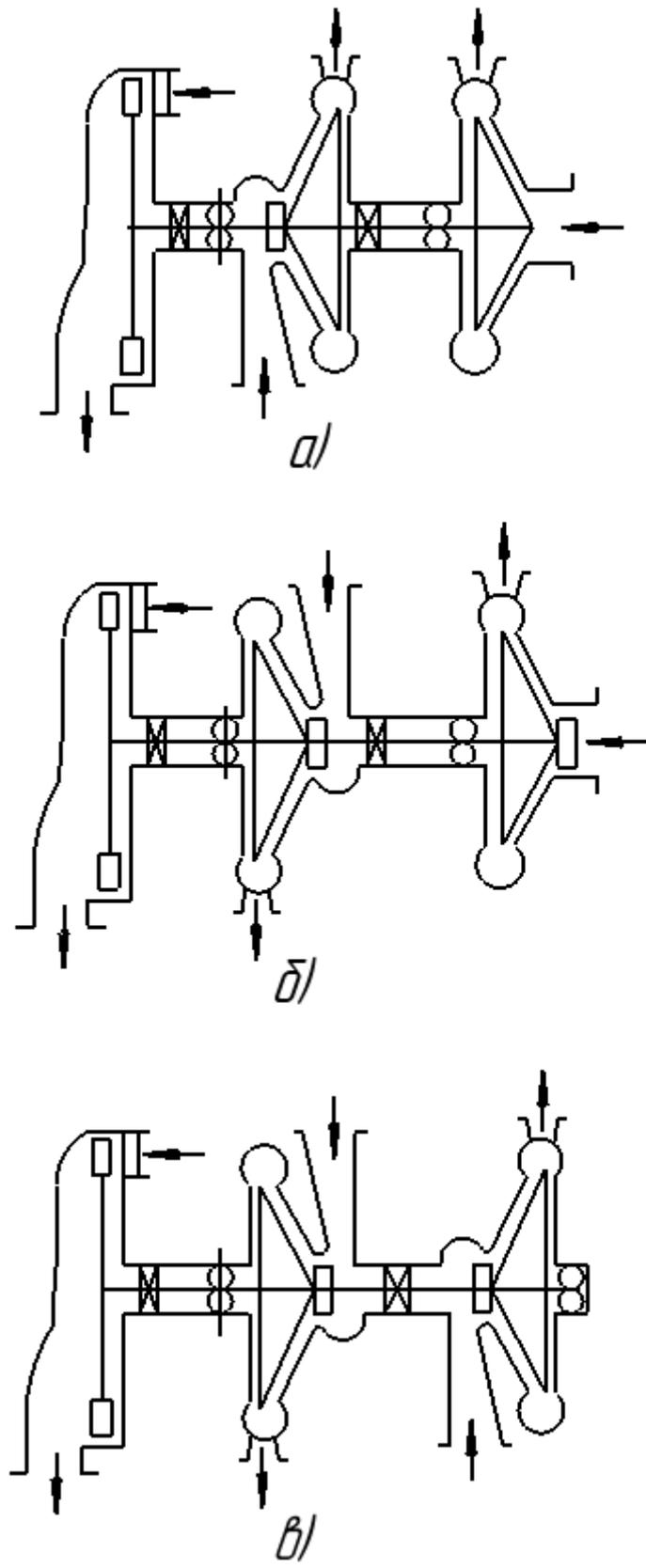


Рис. 3. Конструктивные схемы ТНА с консольным расположением турбины

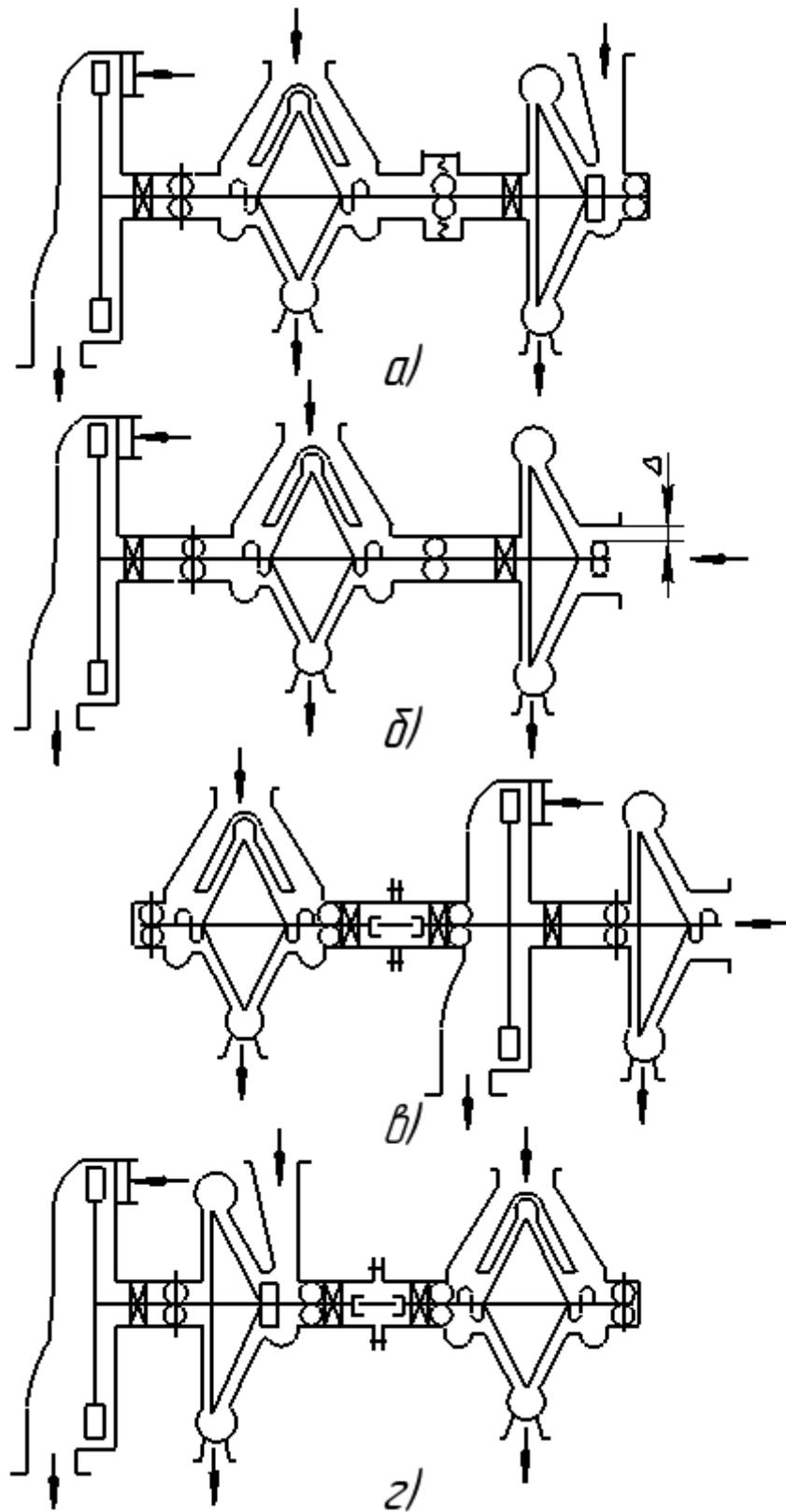


Рис. 4. Конструктивные схемы трехпорных ТНА

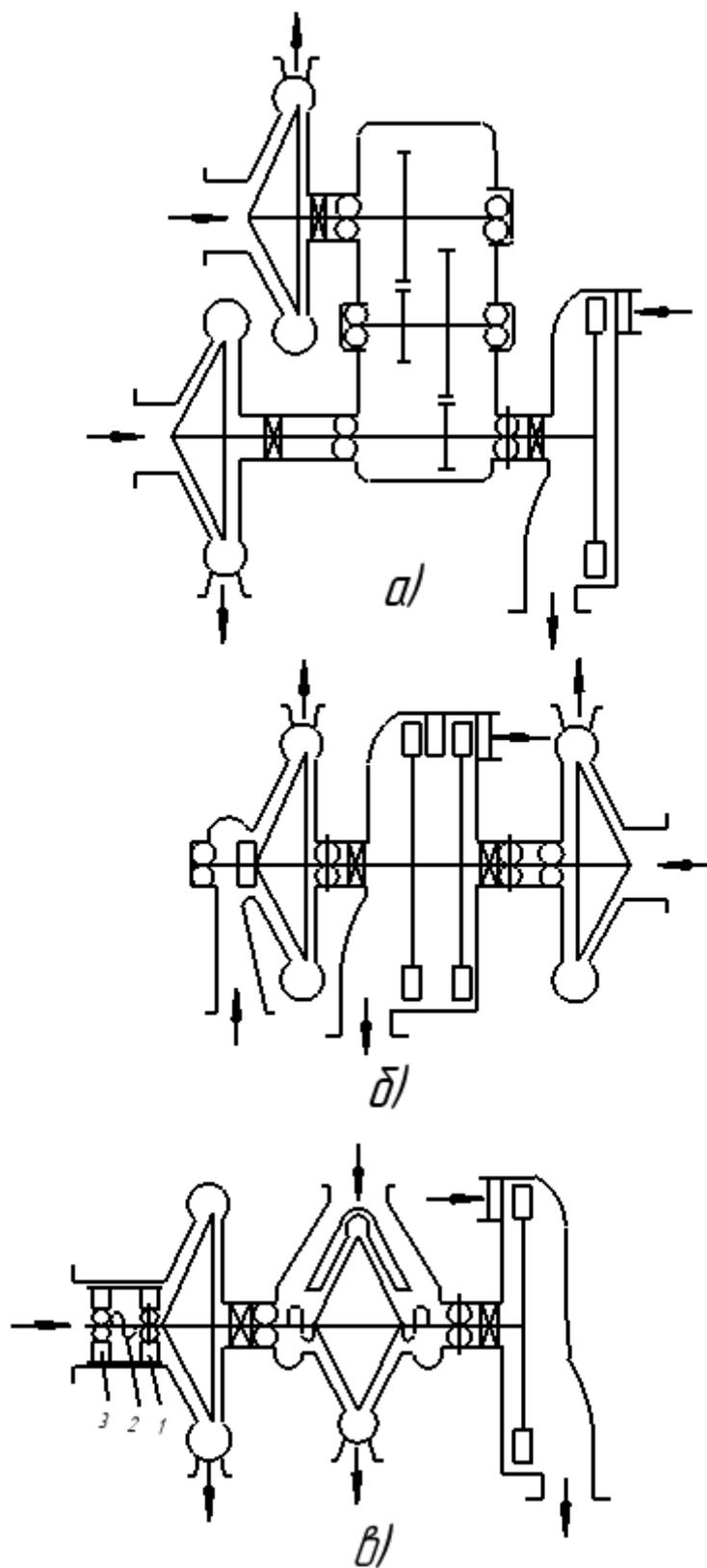


Рис. 5. Конструктивные схемы редукторных ТНА  
 а – редуцирование через зубчатую передачу; б – через газовую связь между турбинами;  
 в – через гидравлическую связь между ступенями насоса.  
 1 – гидротурбина; 2 – шнек; 3 – осевая крыльчатка

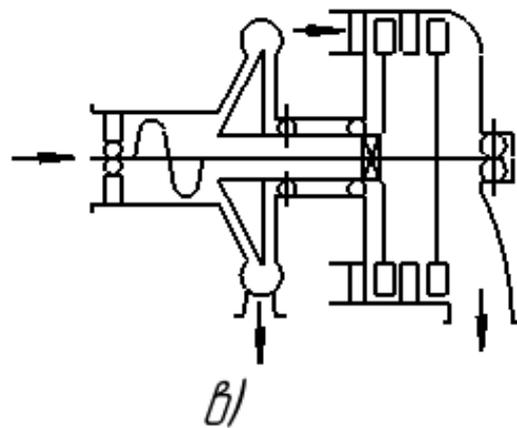
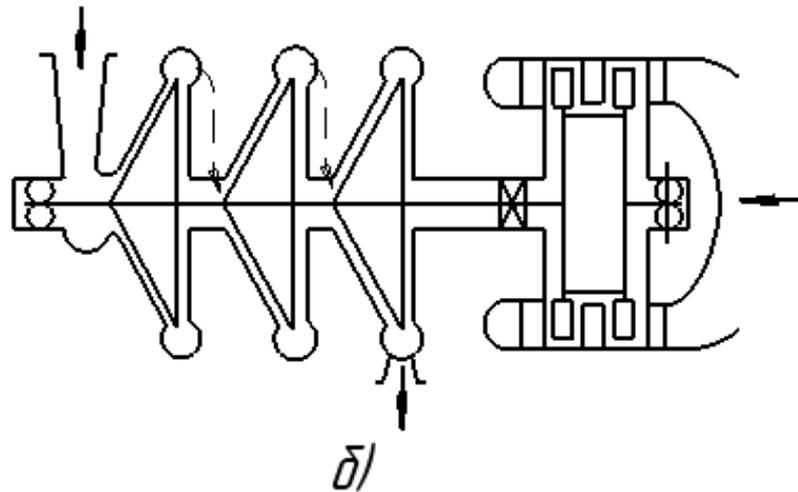
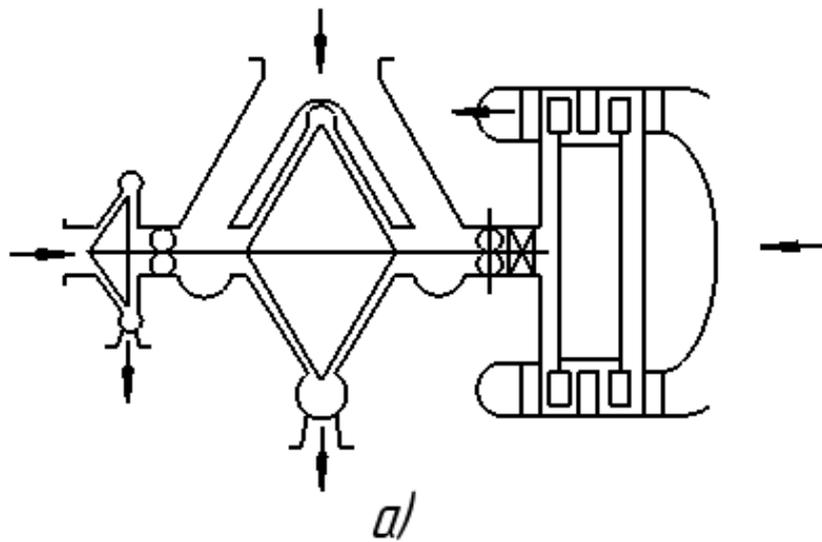


Рис. 6. Конструктивные схемы отдельных ТНА  
 а – ТНА жидкого кислорода ЖРД; б – ТНА жидкого водорода ЖРД; в – двухвальный ТНА.

2. По числу опор вала:
  - схемы с двухопорным валом (рис. 2,3);
  - схемы с трехопорным валом (рис.4а, б).
3. По расположению турбины относительно опор и насосов:
  - межопорное (рис.2);
  - консольное (рис.3,4).

При межопорном расположении рабочее колесо турбины, как правило, располагается между насосами и опорами. При консольном – оба насоса и опоры располагаются с одной стороны от турбины. При этом возможны два варианта расположения насосов относительно турбины:

- насос горючего рядом с турбиной;
- насос окислителя рядом с турбиной.

Выбор варианта зависит от свойств компонентов и рабочего тела турбины, от типа турбины и т.д.

4. По взаимной ориентации входов в насосы и турбину:
  - направления входа в турбину и насос горючего (или окислителя) совпадают (рис.2а,б);
  - направление входа в турбину и насос горючего (рис.2в) (или окислителя) не совпадают;
  - направление входа в насос окислителя и горючего совпадают (рис.3б) или не совпадают (рис.2).

При выборе взаимной ориентации входов в насосы и турбину приходится учитывать свойства компонентов, свойство рабочего тела турбины, условия работы опор и уплотнений, организацию разгрузки ротора ТНА от осевых сил и т.д.

### 3 ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ТНА

#### 3.1 Редукторные и безредукторные схемы.

Выбор редукторной или безредукторной схемы проводится в основном исходя из анализа весовых характеристик надежности ТНА.

Для оценки массы безредукторного ТНА обычно используют следующую зависимость (1):

$$M_{\text{ТНА}} = \frac{k_{\text{ТНА}}}{\omega} \left( \rho_0 \dot{V}_0 H_0^{3/2} + \rho_{\text{Г}} \dot{V}_{\text{Г}} H_{\text{Г}}^{3/2} \right),$$

где  $k_{\text{ТНА}}$  – конструктивный коэффициент, зависящий от схемы ТНА;

$\rho_0, \rho_{\text{Г}}$  – плотность окислителя и горючего, кг/м<sup>3</sup>;

$\dot{V}_0, \dot{V}_{\text{Г}}$  – объемные расходы насосов, м<sup>3</sup>/с;

$H_0, H_{\text{Г}}$  – напоры насосов, Дж/кг;

$\omega$  – скорость вращения ротора, рад/с.

С увеличением угловой скорости  $\omega$  масса ТНА уменьшается.

Однако допустимая угловая скорость вращения насосов лимитируется условием безкавитационной работы и определяется по формуле Руднева (2).

$$\omega = \frac{C_{cp} V_{max} (\Delta h_{cpB})_{доп}^{3/4}}{298 \dot{V}^{1/2}},$$

где  $C_{cp} V_{max}$  – максимальное значение кавитационного коэффициента быстроходности;  
 $(\Delta h_{cpB})_{доп}$  – допускаемый кавитационный запас;  
 $\dot{V}$  – объемный расход рабочей жидкости насоса, м<sup>3</sup>/с.

Если принять приближенно  $(\Delta h_{cpB})_{доп}$  и  $C_{cp} V_{max}$  для насоса горючего и окислителя равными, то отношение максимальных допустимых скоростей вращения насоса горючего и окислителя будет равно:

$$\frac{\omega_{г max}}{\omega_{0 max}} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_г}} \cdot \sqrt{\alpha \cdot k},$$

где  $\alpha$  – средний коэффициент избытка окислителя в камере сгорания;  
 $k$  – стехиометрический коэффициент соотношения компонентов топлива.

В таблице 1 даны отношения  $\omega_{г max} / \omega_{0 max}$  для некоторых компонентов.

Если максимально допустимые скорости вращения насосов горючего и окислителя отличаются незначительно, то применяют безредукторные схемы, если же отличие значительно (в 4...6 раз), то скорость вращения ротора ТНА приходится выбирать по насосу с меньшей  $\omega$ , что приводит к значительному увеличению массы ТНА.

Редукторная схема позволяет выбрать скорости вращения насоса окислителя, насоса горючего и турбины независимо друг от друга.

При этом масса ТНА и его диаметральные размеры могут быть меньше, чем в безредукторной схеме.

Некоторые КС редукторных ТНА приведены на рис.5.

Таблица 1 – Параметры компонентов

Компоненты	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha$	К	$\omega_{г max} / \omega_{0 max}$
Керосин Т-I	830	0,85	3,39	1,84
Жидкий кислород	1140			
Керосин Т-I	830	0,85	5,57	2,53
Азотная кислота	1510			
НДМГ	790	0,8	3,07	2,14
Азотный тетраксид	1470			
Жидкий водород (Н <sub>2ж</sub> )	70	0,65	8,0	4,61
Жидкий кислород (О <sub>2ж</sub> )	1140			
Жидкий водород (Н <sub>2ж</sub> )	70	0,65	11,6	5,95
Жидкий фтор (F <sub>2ж</sub> )	1510			

Так как зубчатые передачи рекомендуется делать со степенью редуцирования  $i = 1/3$  (не более) в одной паре колес, то в случае значительного отличия в угловых скоростях насосов в редукторе устанавливается промежуточный валик с зубчатыми колесами (рис.5а).

С введением редуктора конструкция ТНА усложняется, ухудшается его технологичность, снижается надежность (из-за наличия высокооборотной, высокоточной и охлаждаемой зубчатой передачи). С целью исключения из КС редуктора (мультипликатора) редуцирование оборотов можно обеспечить через газовую связь между турбинами, приводящими во вращение различные насосы (рис.5б) или ступени одного насоса (рис. 5в), либо гидравлическую связь между центробежной крыльчаткой, гидротурбиной и осевой крыльчаткой (рис.5в).

Однако и в этом случае конструктивная схема (несмотря на отсутствие зубчатой передачи) усложняется, и возникают значительные сложности в регулировании и доводке ТНА.

### 3.2 Расположение турбины относительно опор и насосов

На рис. 2 показаны возможные конструктивные схемы ТНА с турбиной, расположенной между насосами и опорами. Основные достоинства таких схем:

- рациональное распределение по валу крутящих моментов. Каждый участок вала слева и справа от турбины передает крутящий момент, необходимый для вращения соответствующего насоса. Это снижает диаметральные размеры вала (а, следовательно, и окружные скорости в контактирующих элементах подшипников и уплотнений) и его вес;
- надежное разделение насосов турбиной, что предотвращает непосредственный контакт рабочих жидкостей;
- взаимная компенсация осевых сил, действующих на крыльчатки насосов (в связи с их симметричным расположением и противоположным направлением входа компонентов в насосы);
- удобство сборки насосов (каждый насос собирается со своей стороны);
- в случае применения а) и б) (рис.2) – значительный кавитационный запас обеих или одного насосов, т.к. входы в насосы загромождены валом.

Если один или оба насоса имеют значительную осевую длину или вес рабочего органа (например, шнекоцентробежную крыльчатку с вынесенным шнеком), то на консолях возникают значительные прогибы. Для исключения контакта приходится увеличивать зазоры между корпусом и рабочим органом, что приводит к значительному снижению КПД насосов. Поэтому в таких случаях целесообразно переходить к схеме б) или в) (рис.2).

Необходимо иметь в виду, что КС с турбиной, расположенной между насосами и опорами, обладают целым рядом недостатков:

- оба насоса расположены рядом с горячей турбиной, что требует надежной теплоизоляции корпусов криогенных насосов и надежного уплотнения полостей турбины и насосов при несовместимости компонентов и рабочего тела турбины. Насос компонента, не совместимого с рабочим телом турбины, необходимо располагать со

стороны выхода из турбины для того, чтобы дожигание просочившегося через уплотнения компонента происходило за, а не перед рабочими лопатками турбины;

- увеличена масса корпуса турбины, за счет того, что обе его части (корпус и крышка) являются несущими (к ним крепятся насосы);
- конструктивная сложность отводящего устройства (выхлопного устройства) турбины. По этой причине такие КС ТНА практически не применяются для двигателей с дожиганием;
- коробление корпуса турбины, особенно в случае парциального подвода газа, приводит к деформации оси посадочных мест под подшипники в насосах, что в свою очередь увеличивает нагрузку на подшипники.

КС с расположением турбины между опорами и насосами, как правило, применяются для двигателей малых тяг.

Консольное расположение турбины.

Для двигателей средних и больших тяг и, особенно для двигателей с дожиганием, как правило, применяются КС с консольным расположением турбины (см. рис.3а,б,в).

Основные преимущества консольной схемы:

- возможность размещения вдали от турбины насоса криогенного или несовместимого с рабочим телом турбины компонента;
- удобство компоновки ТНА на двигателе, особенно в случае двигателя с дожиганием;
- меньшая масса турбины, т.к. выхлопное устройство не нагружено и выполняется в виде тонкостенной оболочки;
- простота отвода газа от турбины.

Однако КС с консольной турбиной обладают и следующими основными недостатками:

- нерациональное распределение крутящего момента по длине вала (участок вала от турбины до первого насоса передает суммарный крутящий момент, и поэтому его диаметр увеличен);
- необходимость надежного разделения полостей насосов горючего и окислителя в связи с их соседним расположением;
- усложнение сборки ТНА;
- расположить консольно, не загромождая вход валом, возможно только один из насосов.

### 3.3 Выбор числа опор вала

Наиболее технологичными являются КС ТНА с двухопорным валом. Осевая фиксация вала относительно корпуса обеспечивается закреплением одной из опор на валу и в корпусе. Внутренне или наружное кольцо второй опоры оставляют не зафиксированным, обеспечивая свободу температурных и силовых перемещений относительно корпуса.

В случае применения шнекоцентробежных крыльчаток с двухсторонним входом, крыльчаток с вынесенными шнеками или осевыми насосами, многоступенчатых насосов и т.д. в одновальном двухопорной КС изгибная жесткость вала становится недопустимо малой и желателен переход к трехопорным валам (рис. 4а,б). Однако, недостатком такой КС является то, что система «вал-опоры» становится статически неопределимой. Это затрудняет сборку ТНА (из-за сложности посадки вала с подшипниками в корпус по трем поверхностям). Этот недостаток устраняется путем введения упругой связи в радиальном направлении между корпусом и одной из опор (рис.4а), либо установкой одной из опор в корпусе или на валу с увеличением радиального зазора (рис.4б), для ограничения прогибов вала.

Малая изгибная жесткость вала и статическая неопределимость системы «вал-опоры» устраняются в случае применения КС с разрезными (двухвальными) ротором (см рис. 4в, г). Вала в этом случае соединяются с помощью рессоры или муфты и допускают осевой перекося в (пределах:  $z^0$  ...).

Основные преимущества таких схем:

- увеличенная изгибная жесткость вала, т.к. каждый из насосов (один совместно с турбиной) установлен на свой двухопорный вал;
- возможность автономной сборки и доводки насосов;
- хорошее разделение насосов горючего и окислителя (каждый расположен в своем корпусе);
- хорошая теплоизоляция насосов с криогенным компонентом (тепловой поток резко уменьшается в местах соединения корпусов и валов);

Недостатками таких конструктивных схем являются:

- большая масса (из-за наличия отдельных корпусов, муфт или рессор) и большие осевые габариты по сравнению с одновальными КС.

### **3.4 Влияние свойств рабочих жидкостей насосов и рабочего тела турбины на выбор КС**

Свойства рабочих жидкостей насосов и рабочего тела турбины влияют на выбор взаимного расположения и взаимной ориентации насосов и турбины.

Насос с криогенной рабочей жидкостью нецелесообразно ставить рядом с горячей турбиной, т.к. тепловой поток от турбины может привести к кавитации на входе в насос и срыву его работы. Если установка такого насоса рядом с турбиной все же необходима, следует ориентировать насос таким образом, чтобы вход в него был удален от турбины. Кроме того, в таком варианте КС необходима теплоизоляция корпуса турбины и насоса. Нежелательна установка рядом с турбиной насоса с рабочей жидкостью, склонной к термическому разложению.

Если рабочие жидкости насосов несовместимы (их контакт приводит к взрыву), то в конструкции ТНА необходимо применить системы уплотнений, предотвращающих контакт не только жидкостей, но и их паров.

Недопустимы так же контакты «сладкого» генераторного газа (рабочего тела турбины) и окислителя и «кислого» генераторного газа и горючего в полостях насосов, подшипников и уплотнений. Их контакт приводит к дожиганию генераторного газа, значительному повышению температуры и, как следствие, разрушению этих узлов.

Допускается контакт вышеуказанных рабочих тел в газовой полости турбины. Однако КС ТНА в этом случае должна быть такой, чтобы дожигание происходило на выходе из турбины, т.к. дожигание на входе в рабочую ступень приводит к разрушению рабочих лопаток.

### 3.5 Переход к отдельным ТНА

В двигателях с тягой в сотни килоньютон и более (в связи со значительными мощностями насосов, часто многоступенчатых) применяют отдельные ТНА, когда каждый из насосов приводится во вращение своей турбиной. Наличие отдельного (независимого) привода обеспечивает каждому насосу высокие энергетические параметры. Применение отдельных ТНА улучшает весовые характеристики и упрощает конструкцию двигательной установки большой тяги.

Основные достоинства отдельных КС ТНА:

- рабочее тело каждой из турбин совместимо с компонентом насоса (турбина насоса окислителя работает на газе с избытком окислителя, турбина насоса горючего – на газе с избытком горючего);
- простота системы уплотнения между турбиной и насосом;
- возможность выполнения ТНА в едином блоке с газогенератором.

На рис. 6в представлена КС мощного перспективного отдельного двухвального ТНА, в котором преднасос приводится во вращение своей турбиной.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Рассмотренные в данных методических указаниях примеры являются базовым уровнем для понимания конструкции ТНА.

Примеры построены таким образом, что позволяют студентам без специальной подготовки получить общие знания о схемах ТНА на уровне курсового проекта.

Руководствуясь методическими указаниями, студенты смогут выбрать конструктивную схему ТНА, определяющую компоновку основных элементов ТНА, под заданные параметры, с анализом их преимуществ и недостатков. Методические указания позволяют учесть свойства рабочих жидкостей насосов и рабочего тела турбины на конструкцию ТНА.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баулин, В.И. Конструкция и проектирование турбонасосных агрегатов: учебное пособие / В.И. Баулин, Ю. М. Никитин. – Москва: Издательство МАИ, 1985. – 74 с.: ил.
2. Добровольский, М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебное пособие / М.В. Добровольский. – Москва: Машиностроение, 1968. – 365 с.: ил.