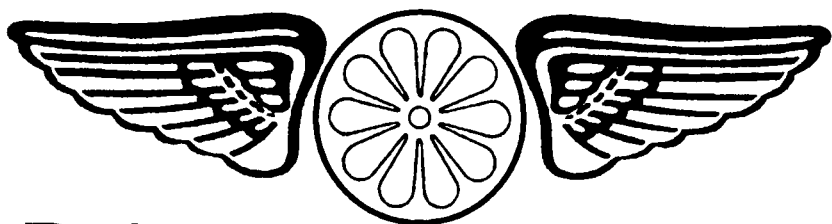


В. БОРОДИН



Pulsorreactores.com

**ПУЛЬСИРУЮЩИЕ  
ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫЕ  
ДВИГАТЕЛИ  
ЛЕТАЮЩИХ МОДЕЛЕЙ  
САМОЛЕТОВ**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО ДОСААФ  
МОСКВА — 1958**

В этой книге обобщаются достижения советских и зарубежных авиамodelистов по конструированию и эксплуатации авиамodelьных пульсирующих воздушно-реактивных двигателей (ПуВРД) и установке их на летающие модели самолетов.

Значительное внимание уделяется разбору конструкции этих двигателей

и технологии изготовления.

Кроме того, приводится элементарная теория малогабаритных ПуВРД и излагаются методы определения основных параметров.

Книга рассчитана на авиамodelистов-спортсменов, инструкторов, руководителей авиамodelьных кружков и широкий круг молодежи.

*Харьковская типоофсетная фабрика*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение . . . . .	3
Глава 1. Принцип действия авиамodelьного ПуВРД . . . . .	5
Глава 2. Элементарная теория авиамodelьного ПуВРД . . . . .	10
Глава 3. Конструкции элементов авиамodelьных ПуВРД . . . . .	27
Глава 4. Конструкции и основные данные авиамodelьных ПуВРД . . . . .	52
Глава 5. Изготовление авиамodelьных ПуВРД . . . . .	61
Глава 6. Эксплуатация авиамodelьных ПуВРД . . . . .	67
Глава 7. Установка авиамodelьных ПуВРД на летающие модели самолетов . . . . .	72
Глава 8. Авиамodelьные ПуВРД и кордовые реактивные модели зарубежных спортсменов . . . . .	90

Вячеслав Александрович Бородин

## ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ЛЕТАЮЩИХ МОДЕЛЕЙ САМОЛЕТОВ

Редакторы *Е. В. Ефремова, Э. П. Смирнов*  
Художественный редактор *Г. Л. Ушаков*  
Технический редактор *Р. Б. Хазен*  
Корректор *Р. М. Рыкунина*

Г-40641. Сдано в набор 20/VI-67 г. Подписано к печати 17/VII 68 г.  
Изд. № 1/4574. Зак. 7-1537. Бумага 84 × 108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>, типографская № 3.  
Тираж 30 000 экз. Цена 18 коп. Объем физ. п. л. 3,25, усл. п. л. 5,51.  
Уч.-изд. л. 5,175. Издательство ДОСААФ, Москва, Б-66,  
Ново-Рязанская ул., д. 26.

Типоофсетная фабрика Комитета по печати при Совете Министров УССР.  
Харькоз, ул. Энгельса, 11.

## ВВЕДЕНИЕ

Одно из важнейших достижений советского авиа-моделизма — разработка и применение малогабаритных пульсирующих воздушно-реактивных двигателей (ПуВРД) как силовых установок для летающих моделей самолетов. Наши авиамоделисты имеют достаточно большой опыт по их конструированию, постройке и эксплуатации, что подтверждается успехами, достигнутыми на всесоюзных и международных соревнованиях по реактивным летающим моделям.

В дальнейшем авиамодельные ПуВРД могут получить большее распространение как силовые установки для всех классов летающих моделей не только для кордовых скоростных, но и для моделей свободного полета, радиоуправляемых, гоночных, пилотажных, воздушного боя, вертолетов и ракет. Наряду с авиамодельными ПуВРД, возможно, получат развитие и распространение в авиа-моделизме малогабаритные турбореактивные двигатели весом не более 400—500 г, а также реактивные двигатели других специальных схем.

Использование в авиамоделизме реактивных двигателей вызвано стремлением увеличить скорость полета моделей и, кроме того, связано с оригинальностью силовой установки. Применение малогабаритных ПуВРД расширило технический кругозор спортсменов и оказало значительное влияние на развитие авиамодельной техники. В настоящее время малогабаритные ПуВРД прочно заняли свое место в авиамоделизме.

В 1948 г. были завершены работы по созданию надеж-

но работающих конструкций авиамodelьных ПуВРД, а в 1949 г. установлены первые рекорды моделей с этими двигателями.

В 1949 г. летающая модель конструкции М. Шарова и А. Анисимова (Ленинград) с ПуВРД конструкции А. Анисимова показала скорость полета на корде 110 км/час.

В 1950 г. реактивная модель В. Попеля, Р. Садовского и В. Давыдова (Ленинград) с двигателем конструкции В. Давыдова установила два всесоюзных рекорда: дальности полета — 3000 м и продолжительности — 14 мин. 15 сек.

В 1951 г. на Всесоюзных состязаниях авиамodelистов в Москве было зафиксировано три всесоюзных рекорда по реактивным моделям: дальности — 16 км, продолжительности — 31 мин. и высоты полета — 600 м. Эти рекорды были установлены летающей моделью конструкции Э. Смирнова (Ленинград) с ПуВРД конструкции А. Анисимова.

В 1952 г. реактивная модель В. Попеля (Ленинград) установила новый рекорд продолжительности полета.

В 1953 г. кордовая реактивная модель типа «Летающее крыло», построенная М. Васильченко (Москва), показала скорость полета, равную 264,776 км/час. Эта скорость полета модели на корде была зафиксирована в качестве абсолютного мирового рекорда.

В 1955 г. на Международных соревнованиях, проходивших в Чехословакии, мастер спорта И. Иванников установил новый рекорд скорости полета кордовой реактивной модели, равный 275,004 км/час. В 1958 г. его модель летала уже со скоростью 301 км/час и был зафиксирован новый абсолютный мировой рекорд.

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АВИАМОДЕЛЬНОГО ПуВРД

ПуВРД имеет следующие основные элементы: входной участок  $a — в$  (рис. 1) (в дальнейшем входную часть будем называть головкой 1), заканчивающийся клапанной решеткой, состоящей из диска 6 и клапанов 7; камеру сгорания 2, участок  $в — г$ ; реактивное сопло 3, участок  $г — д$ ; выхлопную трубу 4, участок  $д — е$ .

Входной канал головки 1 имеет конфузорный  $a — б$  и диффузорный  $б — в$  участки. В начале диффузорного участка устанавливается топливная трубка 8 с регулировочной иглой 5.

Воздух, проходя через конфузорную часть, увеличивает свою скорость, вследствие чего давление на этом участке, согласно закону Бернулли, падает. Под действием пониженного давления из трубки 8 начинает подсасываться топливо, которое затем подхватывается струей воздуха, разбивается ею на более мелкие частички и испаряется. Образовавшаяся карбюрированная смесь, проходя диффузорную часть головки, несколько поджимается за счет уменьшения скорости движения и в окончательно перемешанном виде через входные отверстия клапанной решетки поступает в камеру сгорания.

Первоначально топливно-воздушная смесь, заполнившая объем камеры сгорания, воспламеняется с помощью

электрической свечи, в крайнем случае с помощью открытого очага пламени, подводимого к обрезу выхлопной трубы, т. е. к сечению  $e — e$ . Когда двигатель выйдет на рабочий режим, вновь поступающая в камеру сгорания топливно-воздушная смесь воспламеняется не от постороннего источника, а от горячих газов. Таким образом, электрическая свеча или другой источник пламени необходимы лишь в период запуска двигателя.

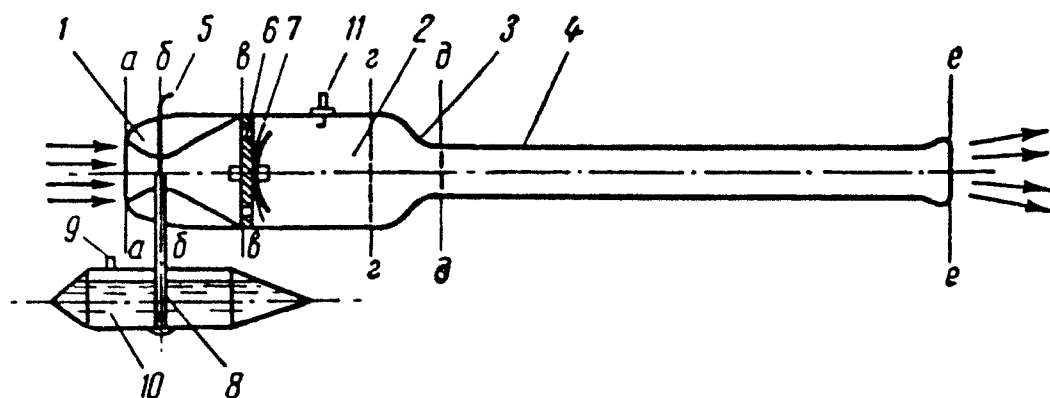


Рис. 1. Принципиальная схема ПуВРД:

1 — головка; 2 — камера сгорания; 3 — реактивное сопло; 4 — выхлопная труба; 5 — регулировочная игла; 6 — диск клапанной решетки; 7 — клапан; 8 — топливная трубка; 9 — заливная горловина; 10 — топливный бачок; 11 — запальная свеча

Образовавшиеся в процессе сгорания топливно-воздушной смеси газы резко повышают давление в камере сгорания, и пластинчатые клапаны клапанной решетки закрываются, а газы устремляются в открытую часть камеры сгорания в сторону выхлопной трубы. В некоторый момент давление и температура газов достигают своего максимального значения. В этот период скорость истечения газов из реактивного сопла и тяга, развиваемая двигателем, также максимальны.

Под действием повышенного давления в камере сгорания горячие газы движутся в виде газового «поршня», который, проходя через реактивное сопло, приобретает максимальную кинетическую энергию. По мере выхода основной массы газов из камеры сгорания давление в ней начинает падать.

Газовый «поршень», двигаясь по инерции, создает за собой разрежение. Это разрежение начинается от клапанной решетки и по мере движения основной массы газов в сторону выхода распространяется на всю длину рабочей

трубы двигателя, т. е. до сечения  $e - e$ . В результате этого под действием более высокого давления в диффузорной части головки пластинчатые клапаны открываются и камера сгорания наполняется очередной порцией топливно-воздушной смеси.

С другой стороны, разрежение, распространившееся до обреза выхлопной трубы, приводит к тому, что скорость части газов, двигающихся по выхлопной трубе в сторону выхода, падает до нуля, а затем получает обратное значение, — газы в смеси с подсосанным воздухом начинают двигаться в сторону камеры сгорания. К этому времени камера сгорания наполнилась очередной порцией топливно-воздушной смеси и движущиеся в обратном направлении газы (волна давления) несколько поджимают ее и воспламеняют.

Таким образом, в рабочей трубе двигателя в процессе его работы происходит колебание газового столба: в период повышенного давления в камере сгорания газы движутся в сторону выхода, в период пониженного давления — в сторону камеры сгорания. И чем интенсивнее колебания газового столба в рабочей трубе, тем глубже величина разрежения в камере сгорания, тем больше в нее поступит топливно-воздушной смеси, что, в свою очередь, приведет к повышению давления, а следовательно, и к увеличению тяги, развиваемой двигателем за цикл.

После того как воспламенилась очередная порция топливно-воздушной смеси, цикл повторяется. На рис. 2 схематично показана последовательность работы двигателя за один цикл:

— заполнение камеры сгорания свежей смесью при открытых клапанах в период запуска  $a$ ;

— момент воспламенения смеси  $b$  (образовавшиеся при сгорании газы расширяются, давление в камере сгорания возрастает, клапаны закрываются и газы устремляются через реактивное сопло в выхлопную трубу);

— продукты сгорания в своей основной массе в виде газового «поршня» движутся к выходу и создают за собой разрежение, клапаны открываются и происходит наполнение камеры сгорания свежей смесью  $в$ ;

— в камеру сгорания продолжает поступать свежая смесь  $г$  (основная масса газов — газовый «поршень» — покинула выхлопную трубу, и разрежение распространилось до обреза выхлопной трубы, через который начина-

ется всасывание части остаточных газов и чистого воздуха из атмосферы);

— заканчивается наполнение камеры сгорания свежей смесью  $\delta$  (клапаны закрываются и со стороны выхлопной трубы по направлению к клапанной решетке движется столб остаточных газов и воздуха, поджимающий смесь);

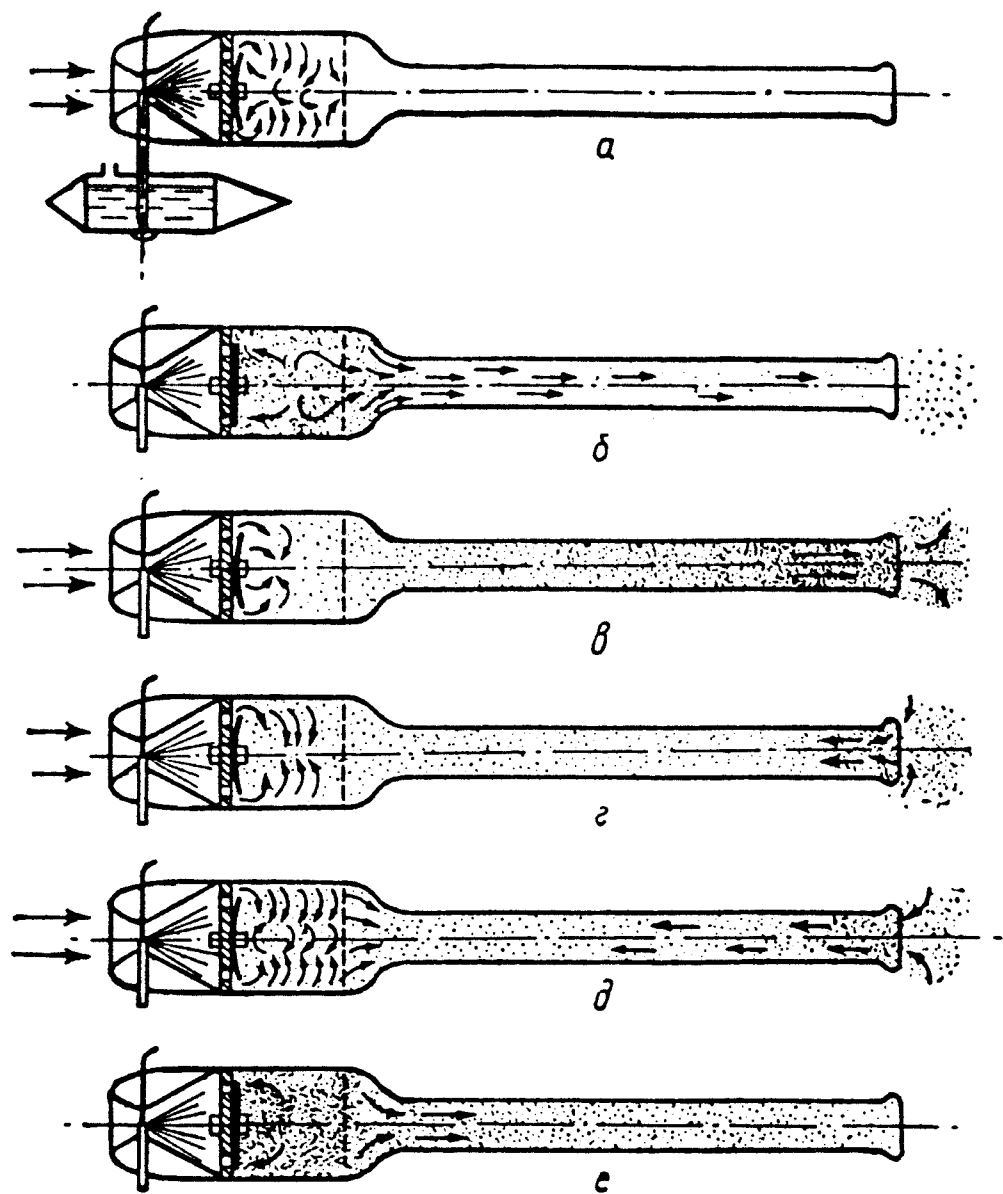


Рис. 2. Принципиальная схема работы ПуВРД

— в камере сгорания происходит воспламенение и сгорание смеси  $e$  (газы устремляются через реактивное сопло в выхлопную трубу и цикл повторяется).

Вследствие того что давление в камере сгорания меняется от какого-то максимального значения, больше атмосферного, до минимального, меньше атмосферного, скорость истечения газа из двигателя тоже непостоянна



в течение цикла. В момент наибольшего давления в камере сгорания скорость истечения из реактивного сопла также наибольшая. Затем, по мере выхода основной массы газов из двигателя, скорость истечения падает до нуля и далее направлена уже в сторону клапанной решетки.

В зависимости от изменения скорости истечения и массы газов за цикл меняется и тяга двигателя.

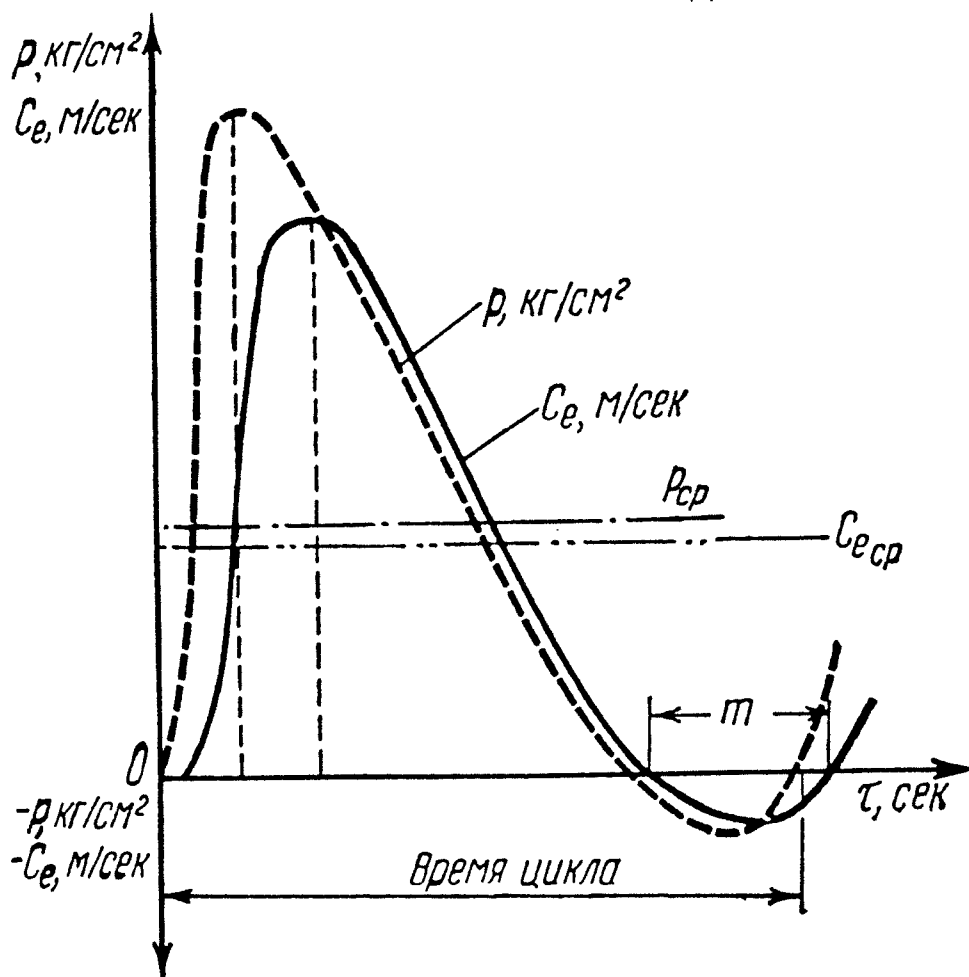


Рис. 3. Характер изменения давления и скорости истечения газа за цикл в ПуВРД с длинной выхлопной трубой

На рис. 3 показан характер изменения давления  $p$  и скорости истечения газа  $C_e$  за цикл в ПуВРД с длинной выхлопной трубой. Из рисунка видно, что скорость истечения газа, с некоторым сдвигом по времени, изменяется в соответствии с изменением давления и достигает своего максимума примерно при максимальном значении давления. В период, когда давление в рабочей трубе ниже атмосферного, скорость истечения и тяга — отрицательны (участок  $m$ ), так как газы движутся по выхлопной трубе в сторону камеры сгорания.

В результате того что газы, двигаясь по выхлопной трубе, образуют разрежение в камере сгорания, ПуВРД может работать на месте при отсутствии скоростного напора.

## Глава 2

### ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ АВИАМОДЕЛЬНОГО ПуВРД

#### Тяга, развиваемая двигателем

Тяга, развиваемая реактивным двигателем (в том числе и пульсирующим), определяется вторым и третьим законами механики.

Тяга за один цикл ПуВРД изменяется от максимальной — положительной величины до минимальной — отрицательной. Такое изменение тяги за цикл обусловлено принципом действия двигателя, т. е. тем, что параметры газа — давление, скорость истечения и температура — в течение цикла непостоянны. Поэтому, переходя к определению силы тяги, введем понятие о средней скорости истечения газа из двигателя. Обозначим эту скорость  $C_{ср}$  (см. рис. 3).

Определим тягу двигателя как реактивную силу, соответствующую предполагаемой средней скорости истечения. Согласно второму закону механики изменение количества движения любого газового потока, в том числе и в двигателе, равно импульсу силы, т. е. в данном случае силы тяги:

$$Pt = m_r \cdot C_{ср} - m_b V, \quad (1)$$

где  $m_r$  — масса продуктов сгорания топлива;

$m_b$  — масса воздуха, поступающего в двигатель;

$C_{ср}$  — средняя скорость истечения продуктов сгорания;

$V$  — скорость полета модели;

$P$  — сила тяги;

$t$  — время действия силы.

Формулу (1) можно записать и в другом виде, разделив правую и левую ее части на  $t$ :

$$P = \frac{m_{\text{г. сек}}}{t} \cdot C_{e_{\text{ср}}} - \frac{m_{\text{в. сек}}}{t} \cdot V = m_{\text{г. сек}} \cdot C_{e_{\text{ср}}} - m_{\text{в. сек}} V, \quad (2)$$

где  $m_{\text{г. сек}}$  и  $m_{\text{в. сек}}$  — представляют собой массы продуктов сгорания и воздуха, протекающих через двигатель в секунду, и, следовательно, могут быть выражены через соответствующие секундные весовые расходы  $G_{\text{г. сек}}$  и  $G_{\text{в. сек}}$ , т. е.

$$m_{\text{г. сек}} = \frac{G_{\text{г. сек}}}{g}, \quad m_{\text{в. сек}} = \frac{G_{\text{в. сек}}}{g}.$$

Подставляя в формулу (2) секундные массовые расходы, выраженные через секундные весовые расходы, получим:

$$P = \frac{G_{\text{г. сек}}}{g} C_{e_{\text{ср}}} - \frac{G_{\text{в. сек}}}{g} V. \quad (3)$$

Вынося за скобку  $\frac{G_{\text{в. сек}}}{g}$ , получим выражение

$$P = \frac{G_{\text{в. сек}}}{g} \left( \frac{G_{\text{г. сек}}}{G_{\text{в. сек}}} C_{e_{\text{ср}}} - V \right). \quad (4)$$

Известно, что для полного сгорания 1 кг углеводородного топлива (например, бензина) необходимо примерно 15 кг воздуха. Если теперь предположить, что мы сожгли 1 кг бензина и на его сгорание потребовалось 15 кг воздуха, то вес продуктов сгорания  $G_{\text{г}}$  будет равен:  $G_{\text{г}} = G_{\text{т}} + G_{\text{в}} = 1 \text{ кг топлива} + 15 \text{ кг воздуха} = 16 \text{ кг продуктов сгорания}$ , а отношение  $\frac{G_{\text{г}}}{G_{\text{в}}}$  в весовых единицах будет иметь вид:

$$\frac{G_{\text{г}}}{G_{\text{в}}} = \frac{G_{\text{т}} + G_{\text{в}}}{G_{\text{в}}} = \frac{1 + 15}{15} = 1,066.$$

Это же значение будет иметь и отношение  $\frac{G_{\text{г. сек}}}{G_{\text{в. сек}}}$ .

Принимая отношение  $\frac{G_{\text{г. сек}}}{G_{\text{в. сек}}}$  равным единице, полу-

чим более простую и достаточно точную формулу для определения силы тяги:

$$P = \frac{G_{\text{в. сек}}}{g} (C_{e_{\text{ср}}} - V). \quad (5)$$

При работе двигателя на месте, когда  $V = 0$ , получим

$$P = \frac{G_{\text{в. сек}}}{g} C_{e_{\text{ср}}}. \quad (6)$$

Формулы (5 и 6) можно написать в более развернутом виде:

$$P = \frac{G_{\text{в. ц}}}{g} (C_{e_{\text{ср}}} - V) n, \quad (7)$$

$$P = \frac{G_{\text{в. ц}}}{g} C_{e_{\text{ср}}} n, \quad (8)$$

где  $G_{\text{в. ц}}$  — вес воздуха, протекающего через двигатель за один цикл;

$n$  — число циклов в секунду.

Анализируя формулы (7 и 8), можно сделать вывод, что тяга ПуВРД зависит:

— от количества воздуха, проходящего через двигатель за цикл;

— от средней скорости истечения газа из двигателя;

— от числа циклов в секунду.

Чем больше число циклов двигателя в секунду и чем больше через него проходит топливно-воздушной смеси, тем больше развиваемая двигателем тяга.

## Основные относительные (удельные) параметры ПуВРД

Летно-эксплуатационные качества ПуВРД удобнее всего сравнивать, пользуясь относительными параметрами.

Основными относительными параметрами двигателя являются: удельная тяга, удельный расход топлива, удельный вес и удельная лобовая тяга.

Удельная тяга  $P_{\text{уд}}$  — это отношение развиваемой двигателем тяги  $P$  [кг] к весовому секундному расходу воздуха через двигатель  $G_{\text{в. сек}}$   $\left[ \frac{\text{кг}}{\text{сек}} \right]$ .

$$P_{\text{уд}} = \frac{P}{G_{\text{в. сек}}}, \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}}{\text{кг}} \right] \left[ \frac{\text{г} \cdot \text{сек}}{\text{г}} \right]. \quad (9)$$

Подставляя в данную формулу значение силы тяги  $P$  из формулы (5), получим

$$P_{уд} = \frac{1}{g} (C_{e_{ср}} - V).$$

При работе двигателя на месте, т. е. при  $V = 0$ , выражение для удельной тяги примет очень простой вид:

$$P_{уд} = \frac{C_{e_{ср}}}{g}.$$

Таким образом, зная среднюю скорость истечения газа из двигателя, можем легко определить удельную тягу двигателя.

**Удельный расход топлива**  $G_{уд}$  равен отношению часового расхода топлива к тяге, развиваемой двигателем

$$G_{уд} = \frac{G_{т}}{P}, \left[ \frac{\text{кг}}{\text{час} \cdot \text{кг}} \right] \left[ \frac{\text{г}}{\text{час} \cdot \text{г}} \right], \quad (10)$$

где  $G_{уд}$  — удельный расход топлива;

$G_{т}$  — часовой расход топлива  $\left[ \frac{\text{кг}}{\text{час}}, \frac{\text{г}}{\text{час}} \right]$ .

Зная секундный расход топлива  $G_{т. \text{сек}}$ , можно определить часовой расход по формуле

$$G_{т} = 3600 \cdot G_{т. \text{сек}}.$$

Удельный расход топлива — важная эксплуатационная характеристика двигателя, показывающая его экономичность. Чем меньше  $G_{уд}$ , тем больше дальность и продолжительность полета модели при прочих равных условиях.

**Удельный вес двигателя**  $\gamma_{дв}$  равен отношению сухого веса двигателя к максимальной тяге, развиваемой двигателем на месте:

$$\gamma_{дв} = \frac{G_{дв}}{P}, \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right] \left[ \frac{\text{г}}{\text{г}} \right], \quad (11)$$

где  $\gamma_{дв}$  — удельный вес двигателя;

$G_{дв}$  — сухой вес двигателя.

При заданной величине тяги удельный вес двигателя определяет вес двигательной установки, который, как известно, сильно влияет на летные параметры летающей модели и в первую очередь на ее скорость, высоту и грузоподъемность. Чем меньше удельный вес двигателя при

заданной тяге, тем совершеннее его конструкция, тем большего веса модель этот двигатель может поднять в воздух.

Удельная лобовая тяга  $P_{\text{лоб}}$  — это отношение тяги, развиваемой двигателем, к площади его наибольшего поперечного сечения

$$P_{\text{лоб}} = \frac{P}{F_{\text{лоб}}}, \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right] \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^2} \right], \quad (12)$$

где  $P_{\text{лоб}}$  — удельная лобовая тяга;

$F_{\text{лоб}}$  — площадь наибольшего поперечного сечения двигателя.

Удельная лобовая тяга играет важную роль при оценке аэродинамических качеств двигателя, особенно для скоростных летающих моделей. Чем больше  $P_{\text{лоб}}$ , тем меньшая доля тяги, развиваемой двигателем в полете, расходуется на преодоление его собственного сопротивления.

ПуВРД, имеющий малую лобовую площадь, удобен для установки на летающие модели.

Относительные (удельные) параметры двигателя меняются с изменением скорости и высоты полета, так как при этом не сохраняют свою величину тяга, развиваемая двигателем, и суммарный расход топлива. Поэтому относительные параметры обычно относятся к работе неподвижного двигателя на режиме максимальной тяги на земле.

## Изменение тяги ПуВРД в зависимости от скорости полета

Тяга ПуВРД в зависимости от скорости полета может изменяться различным образом и зависит от способа регулирования подачи топлива в камеру сгорания. От того, по какому закону осуществляется подача топлива, зависит и изменение скоростной характеристики двигателя.

На известных конструкциях летающих моделей самолетов с ПуВРД, как правило, не применяют специальных автоматических устройств для подачи топлива в камеру сгорания в зависимости от скорости и высоты полета, а регулируют двигатели на земле на макси-

мальную тягу или на наиболее устойчивый и надежный режим работы.

На больших летательных аппаратах с ПуВРД всегда устанавливают автомат подачи топлива, который в зависимости от скорости и высоты полета поддерживает постоянным качество топливно-воздушной смеси, поступающей в камеру сгорания, и тем самым поддерживает устойчивый и наиболее эффективный режим работы двигателя. Ниже рассмотрим скоростные характеристики двигателя в тех случаях, когда установлен автомат подачи топлива и когда он не установлен.

Для полного сгорания топлива требуется строго определенное количество воздуха. Для углеводородных топлив, например бензина и керосина, отношение веса воздуха, необходимого для полного сгорания топлива, к весу этого топлива равно примерно 15. Это отношение обычно обозначают буквой  $L$ . Поэтому, зная вес топлива, можно определить сразу же количество теоретически необходимого воздуха:

$$G_{\text{в}} = LG_{\text{т}}. \quad (13)$$

Секундные расходы находятся точно в такой же зависимости:

$$G_{\text{в. сек}} = LG_{\text{т. сек}}. \quad (13a)$$

Но в двигатель не всегда поступает воздуха столько, сколько нужно для полного сгорания топлива: его может быть больше или меньше. Отношение количества воздуха, поступающего в камеру сгорания двигателя, к количеству воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания топлива, называется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ .

$$\alpha = \frac{G_{\text{в}}}{LG_{\text{т}}} \quad (14) \quad \alpha = \frac{G_{\text{в. сек}}}{LG_{\text{т. сек}}}. \quad (14 a)$$

В том случае, когда воздуха в камеру сгорания поступает больше, чем теоретически нужно для сгорания 1 кг топлива,  $\alpha$  будет больше единицы и смесь называется бедной. Если же воздуха в камеру сгорания поступит меньше, чем необходимо теоретически, то  $\alpha$  будет меньше единицы и смесь называется богатой.

На рис. 4 показан характер изменения тяги ПуВРД в зависимости от количества топлива, впрыскиваемого

в камеру сгорания. При этом имеется в виду, что двигатель работает на земле или скорость обдува его постоянна.

Из графика видно, что тяга с увеличением количества топлива, поступающего в камеру сгорания, вначале растет до определенного предела, а затем, достигнув максимума, быстро падает.

Такой характер кривой обусловлен тем, что на очень бедной смеси (левая ветвь), когда в камеру сгорания

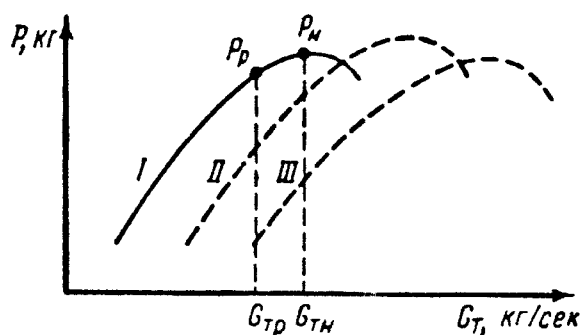


Рис. 4. Характер изменения тяги ПуВРД в зависимости от количества впрыскиваемого топлива в камеру сгорания

поступает мало топлива, интенсивность работы двигателя слабая и тяга двигателя при этом небольшая. С увеличением поступления топлива в камеру сгорания двигатель начинает работать более устойчиво и интенсивно, и тяга начинает расти. При каком-то определенном количестве впрыскиваемого топлива в камеру сгорания, т. е. при каком-то определен-

ном качестве смеси тяга достигает своего наибольшего значения.

При дальнейшем обогащении смеси процесс сгорания нарушается и тяга двигателя вновь падает. Работа двигателя на правой части характеристики (вправо от точки  $P_H$ ) сопровождается ненормальным сгоранием смеси, в результате чего возможно самопроизвольное прекращение работы. Таким образом, ПуВРД имеет определенный диапазон устойчивой работы по качеству смеси и этот диапазон  $\alpha \approx 0,75—1,05$ . Поэтому практически ПуВРД — двигатель однорежимный, и его режим выбирают немного левее максимума тяги (точка  $P_P$ ) с таким расчетом, чтобы гарантировать надежную и устойчивую работу и при увеличении, и при уменьшении расхода топлива.

Если кривая I (см. рис. 4) была снята на скорости, равной нулю на земле, то при каком-то постоянном обдуве или при какой-то постоянной скорости полета также у земли кривая изменения тяги, в зависимости от количества топлива, поступающего в камеру сгорания, сдвинется вправо и вверх, так как с увеличением расхода



воздуха увеличивается и расход топлива, а следовательно, возрастет и максимум тяги — кривая II.

На рис. 5 показано изменение тяги ПуВРД с автоматом подачи топлива в зависимости от скорости полета. Такой характер изменения тяги обусловлен тем, что с увеличением скорости полета возрастает весовой расход

воздуха через двигатель за счет скоростного напора, при этом автомат подачи топлива начинает увеличивать количество топлива, впрыскиваемого в камеру сгорания или в диффузорную часть головки, и тем самым поддерживает постоянным качество топливно-воздушной смеси и нормальный процесс сгорания.

В результате с увеличением скорости полета тяга ПуВРД с автоматом подачи топлива начинает расти и достигает своего максимума на какой-то определенной скорости полета.

При дальнейшем увеличении скорости полета тяга двигателя начинает падать вследствие изменения фазы открытия и закрытия входных клапанов из-за воздействия скоростного напора и сильного отсоса газов из выхлопной трубы, в результате которого ослабляется их обратный ток в сторону камеры сгорания. Циклы становятся слабыми по интенсивности, а при скорости полета 700—750 км/час двигатель может перейти на непрерывное горение смеси без выраженной цикличности. По этой же причине происходит уменьшение максимума тяги и на кривой III (см. рис. 4). Следовательно, с увеличением скорости полета необходимо регулировать подачу топлива в камеру сгорания с таким расчетом, чтобы поддерживать постоянным качество смеси. При этом условии тяга ПуВРД в определенном диапазоне скоростей полета меняется незначительно.

Сравнивая тяговые характеристики авиамодельного ПуВРД и поршневого моторчика с винтом фиксированного шага (см. рис. 5), можно сказать, что тяга ПуВРД в значительном диапазоне скоростей практически остается

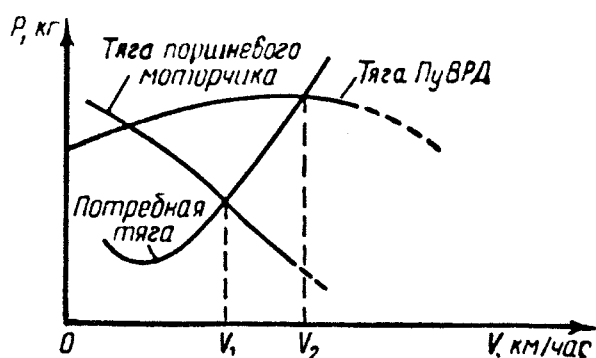


Рис. 5. Изменение тяги ПуВРД с автоматом подачи топлива в зависимости от скорости полета

постоянной; тяга же поршневого моторчика с винтом фиксированного шага с увеличением скорости полета начинает сразу падать. Точки пересечения кривых располагаемых тяг ПуВРД и поршневого моторчика с кривой потребной тяги для соответствующих моделей с равными аэродинамическими качествами определяют максимальные скорости полета, которые эти модели могут развить в горизонтальном полете. Модель с ПуВРД может развивать значительно большую скорость, чем модель с поршневым моторчиком. Это и определяет преимущество ПуВРД.

В действительности на моделях с ПуВРД, полетный вес которых строго ограничен спортивными нормами, как правило, не устанавливают автомат подачи топлива, так как в настоящее время еще нет простых по конструкции автоматов, надежных в эксплуатации и, главное, небольших по габаритам и весу. Поэтому используются простейшие топливные системы, в которых топливо в диффузорную часть головки поступает за счет разрежения, создаваемого в ней при прохождении воздуха, или подается под давлением, отбираемым из камеры сгорания и направляемым в топливный бачок, или с помощью качающего устройства. Ни одна из используемых топливных систем не поддерживает постоянным качество топливно-воздушной смеси при изменении скорости и высоты полета. В главе 7 при рассмотрении топливных систем указывается на влияние каждой из них на характер изменения тяги ПуВРД в зависимости от скорости полета; там же даны и соответствующие рекомендации.

### Определение основных параметров ПуВРД

Сравнивать двигатели между собой и выявлять преимущества одного перед другим удобнее всего по удельным параметрам, для определения которых необходимо знать основные данные двигателя: тягу  $P$ , расход топлива  $G_T$  и расход воздуха  $G_B$ . Как правило, основные параметры ПуВРД определяются экспериментальным путем, с использованием несложного оборудования.

Разберем теперь методы и приспособления, с помощью которых можно определить эти параметры.

**Определение тяги.** На рис. 6 дана принципиальная схема испытательного стенда для определения тяги малогабаритного ПуВРД.

На ящике, изготовленном из 8-мм фанеры, крепятся две металлические стойки, заканчивающиеся в верхней части полукольцами. На этих полукольцах шарнирно подвешены два хомутика крепления двигателя: один из них расположен в месте перехода камеры сгорания в реактивное сопло, а другой — на выхлопной трубе. Нижние части

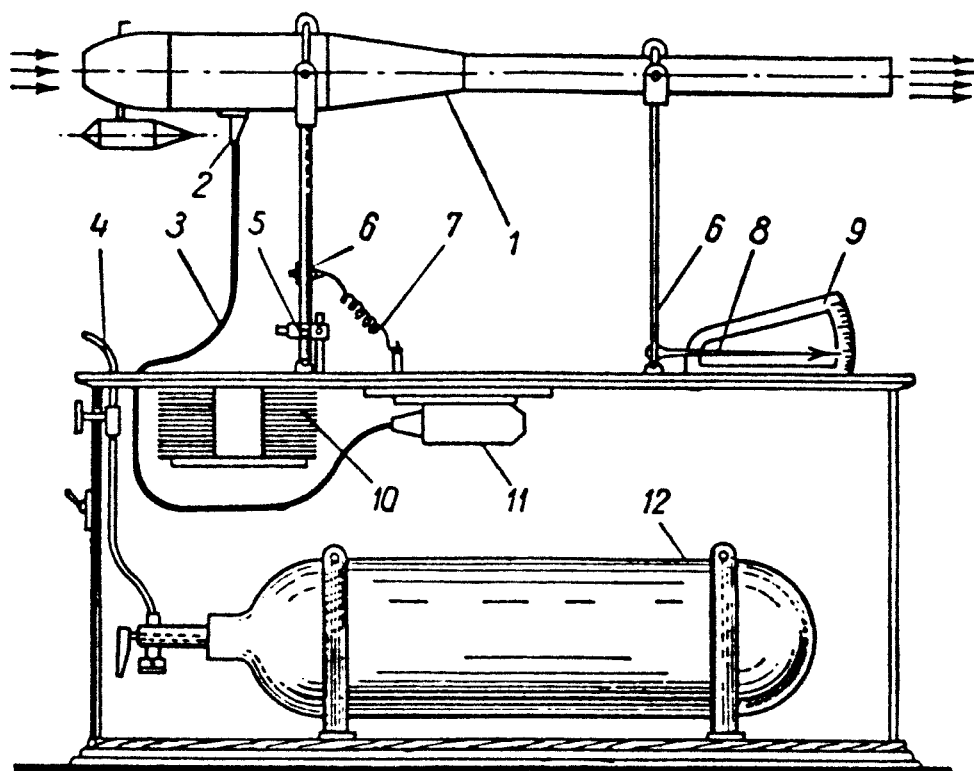


Рис. 6. Схема испытательного стенда:

- 1 — двигатель; 2 — свеча; 3 — проводник высокого напряжения;  
4 — воздушная трубка для запуска; 5 — стопор; 6 — стойки;  
7 — пружина; 8 — стрелка; 9 — шкала; 10 — трансформатор;  
11 — пусковая катушка; 12 — воздушный баллон

стоек жестко приклѣпаны к стальным осям; острые концы осей входят в соответствующие конические углубления в зажимных винтах. Зажимные винты ввернуты в неподвижные стальные кронштейны, установленные в верхней части ящика. Таким образом, при повороте стоек на своих осях двигатель сохраняет горизонтальное положение. К передней стойке прикреплен один конец спиральной пружины, другой конец которой соединен с петлей на ящике. Задняя стойка имеет стрелку, перемещающуюся по шкале.

Тарировку шкалы можно производить с помощью динамометра, зацепив его за веревочную петлю, привязанную к топливной трубке в диффузоре. Динамометр должен быть расположен вдоль оси двигателя.

Во время запуска двигателя передняя стойка удерживается специальным стопором и только в том случае, когда нужно измерить тягу, стопор снимается.

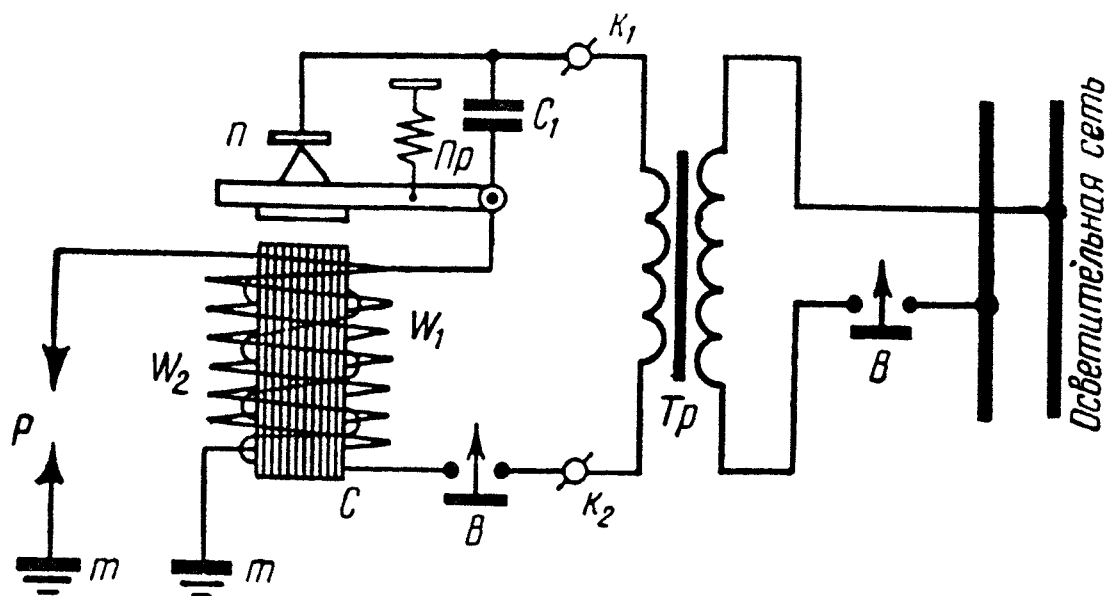


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема запуска ПуВРД:

$B$  — кнопочный выключатель;  $Tr$  — понижающий трансформатор;  $K_1$  и  $K_2$  — клеммы;  $C$  — сердечник;  $W_1$  — первичная обмотка;  $W_2$  — вторичная обмотка;  $C_1$  — конденсатор;  $П$  — прерыватель;  $Пр$  — пружина;  $P$  — разрядник (электрическая свеча);  $m$  — масса

Внутри ящика размещены воздушный баллон объемом примерно 4 л, пусковая катушка и трансформатор, используемые для запуска двигателя. Электрический ток подводится от сети к трансформатору, понижающему напряжение до 24 в, а от трансформатора — к пусковой катушке. Проводник высокого напряжения от пусковой катушки через верхнее днище ящика подсоединяется к электрической запальной свече двигателя. Принципиальная электрическая схема зажигания дана на рис. 7. При использовании аккумуляторных батарей напряжением 12 ÷ 24 в трансформатор отключается и батареи подсоединяются к клеммам  $K_1$  и  $K_2$ .

Более простая схема станка для замера тяги ПуВРД приведена на рис. 8. Станок состоит из основания (доски с двумя железными или дюралюминиевыми уголками), тележки с крепежными хомутами для двигателя, динамометра и топливного бачка. Стойка с топливным бачком сдвинута от оси двигателя с таким расчетом, чтобы не мешать перемещению двигателя во время его работы. Колеса тележки имеют направляющие пазы глубиной

3—3,5 мм и шириной на 1 мм больше ширины ребра уголка.

После запуска двигателя и установления режима его работы стопорная петля снимается с крючка тележки и замеряется тяга по динамометру.

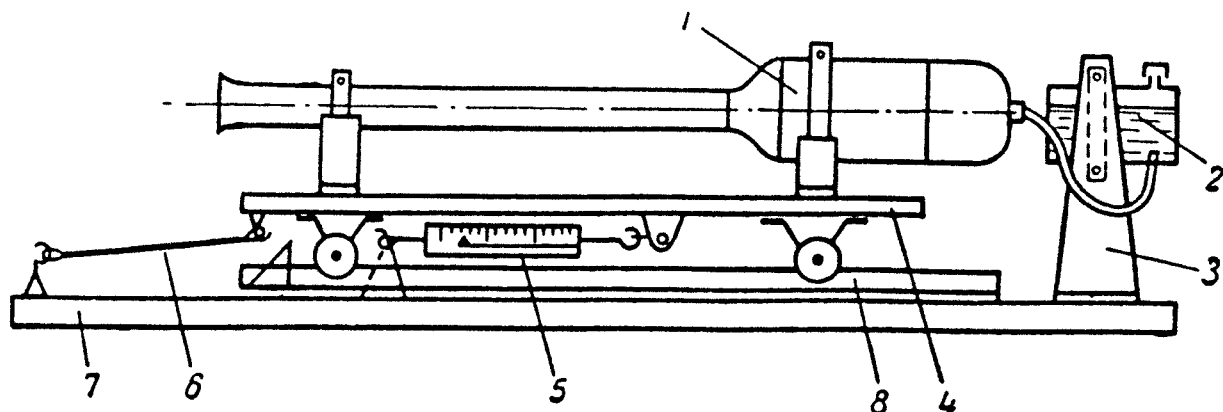


Рис. 8. Схема станка для определения тяги ПуВРД:

1 — двигатель; 2 — топливный бак; 3 — стойка; 4 — тележка; 5 — динамометр; 6 — стопорная петля; 7 — доска; 8 — уголки

**Определение расхода топлива.** На рис. 9 дана схема топливного бачка, с помощью которого можно легко определить расход топлива. На этом бачке закреплена стеклянная трубка, имеющая две отметки, между которы-

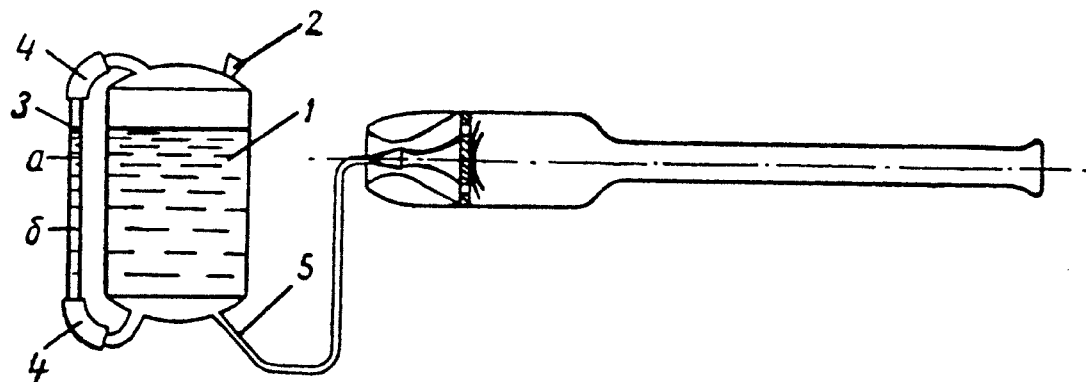


Рис. 9. Схема бачка для определения расхода топлива:

1 — топливный бачок; 2 — заливная горловина; 3 — стеклянная трубка с контрольными отметками а и б; 4 — резиновые трубки; 5 — топливная трубка

ми объем бачка точно вымерен. Необходимо, чтобы перед определением расхода топлива, потребляемого двигателем, уровень топлива в бачке был немного выше верхней отметки. Перед запуском двигателя топливный бачок должен быть закреплен на штативе в строго вертикальном положении. Как только уровень топлива в бачке подойдет к верхней отметке, нужно включить секундо-

мер, а затем, когда уровень топлива подойдет к нижней отметке, выключить его. Зная объем бачка между отметками  $V$ , удельный вес топлива  $\gamma_t$  и время работы двигателя  $t$ , можно легко определить секундный весовой расход топлива:

$$G_{т. сек} = \frac{V \gamma_t}{t}. \quad (15)$$

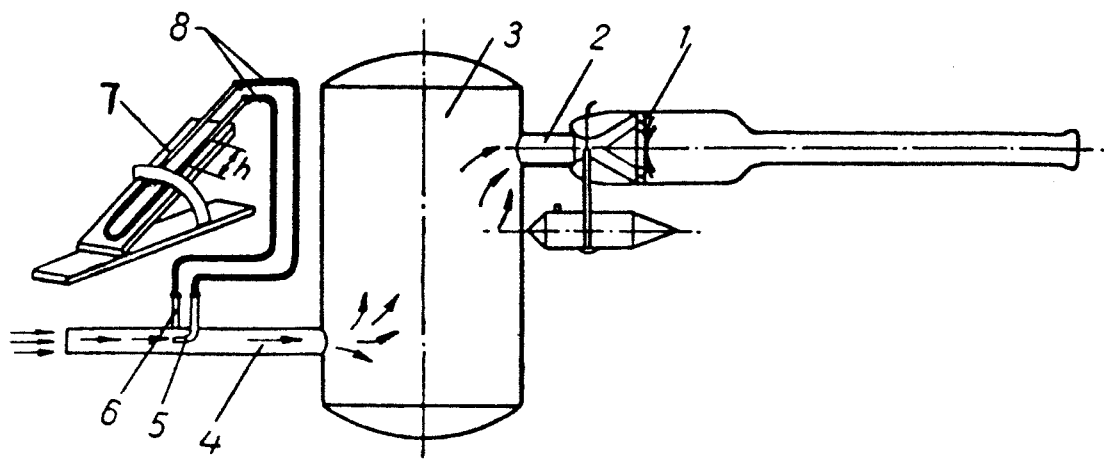


Рис. 10. Схема установки для определения расхода воздуха через двигатель:

1 — авиамодельный ПуВРД; 2 — выходной патрубок; 3 — ресивер; 4 — входной патрубок; 5 — трубка для замера полного давления; 6 — трубка для замера статического давления; 7 — микроманометр; 8 — резиновые трубки

Чтобы более точно определить расход топлива, рекомендуется делать расходный бачок диаметром не более 50 мм, а расстояние между отметками не менее 30—40 мм.

**Определение расхода воздуха.** На рис. 10 приведена схема установки для определения расхода воздуха. Она состоит из ресивера (емкости) объемом не менее 0,4 м<sup>3</sup>, входного патрубка, выходного патрубка и спиртового микроманометра. Ресивер в данной установке необходим для того, чтобы гасить колебания воздушного потока, вызываемые периодичностью всасывания смеси в камеру сгорания, и создавать в цилиндрическом входном патрубке равномерный поток воздуха. Во входном патрубке, диаметр которого 20—25 мм и длина не менее 15 и не более 20 диаметров, примерно посередине установлены две трубки диаметром 1,5—2,0 мм: одна своей открытой частью направлена строго против потока и предназначена для замера полного давления, другая припаяна заподлицо с внутренней стенкой входного

патрубка для замера статического давления. Выходные концы трубок соединены с трубками микроманометра, который при прохождении воздуха по заборному патрубку покажет скоростной напор.

Вследствие малых перепадов давления во входном патрубке спиртовой микроманометр устанавливается не вертикально, а под углом 30 или 45°.

Желательно, чтобы выходной патрубком, подводящий воздух к испытуемому двигателю, имел резиновый наконечник для герметичного соединения головки двигателя с кромкой выходного патрубка.

Чтобы замерить расход воздуха, двигатель запускается, выводится на устойчивый режим работы и постепенно входной частью головки подводится к выходному патрубку ресивера и плотно к нему прижимается. После того, как по микроманометру замерен перепад давления  $h[m]$ , двигатель отводится от выходного патрубка ресивера и останавливается. Затем, пользуясь формулой:

$$V_n = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_v}}, \left[ \frac{м}{сек} \right], \quad (16)$$

где  $V_n$  — скорость воздуха в заборном патрубке  $\left[ \frac{м}{сек} \right]$ ;

$\varphi = 0,97 \div 0,98$  — коэффициент микроманометра;

$\Delta P$  — замеренный динамический напор  $\left[ \frac{кг}{м^2} \right]$ ;

$\rho_v$  — плотность воздуха  $\left[ \frac{кг \cdot сек^2}{м^4} \right]$ ;

определим скорость течения воздуха  $V_n$  во входном патрубке. Динамический напор  $\Delta P$  найдем из следующего выражения:

$$\Delta P = \gamma_c h \sin \alpha, \quad (17)$$

где  $\gamma_c$  — удельный вес спирта  $\left[ \frac{кг}{м^3} \right]$ ;

$h$  — перепад давления по микроманометру  $[м]$ ;

$\alpha$  — угол наклона микроманометра.

Зная скорость течения воздуха  $V_n [м/сек]$  во входном патрубке и площадь его сечения  $F_n [м^2]$ , определим секундный весовой расход воздуха  $G_{в. сек} [кг/сек]$

$$G_{в. сек} = F_n V_n \gamma_v \left[ \frac{кг}{сек} \right], \quad (18)$$

где  $\gamma_v$  [кг/м<sup>3</sup>] — удельный вес воздуха при атмосферном давлении. Удельный вес воздуха  $\gamma_v$  и массовая плотность  $\rho_v$  подсчитываются по следующим известным формулам:

$$\gamma_v = 0,465 \frac{P}{T}, \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right], \quad (19)$$

где  $P$  — показание барометра, [мм рт. ст.];  
 $T$  — абсолютная температура, °К.

$$T = 273^\circ + t^\circ \text{C},$$

где  $t^\circ \text{C}$  — температура наружного воздуха.

$$\rho_v = \frac{\gamma_v}{g} = \frac{0,465}{9,81} \frac{P}{T} = 0,0474 \frac{P}{T} \left[ \frac{\text{кг сек}^2}{\text{м}^4} \right]. \quad (20)$$

Для стандартных атмосферных условий ( $P = 760$  мм рт. ст и  $t = 15^\circ \text{C}$ ):

$$\rho_v = 0,0474 \frac{760}{273 + 15} = 0,125 \left[ \frac{\text{кг сек}^2}{\text{м}^4} \right],$$

$$\gamma_v = \rho_v \cdot g = 0,125 \cdot 9,81 = 1,227 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right].$$

Таким образом, мы определили все основные параметры двигателя — тягу, секундный расход топлива, секундный расход воздуха — и знаем его сухой вес и лобовую площадь; теперь можем легко найти основные удельные параметры:  $P_{уд}$ ,  $G_{уд}$ ,  $\gamma_{уд}$ ,  $P_{лоб}$ .

Кроме того, зная основные параметры двигателя, можно определить среднюю скорость истечения газов из выхлопной трубы и качество смеси, поступающей в камеру сгорания.

Так, например, при работе двигателя на земле формула для определения тяги имеет вид:

$$P = \frac{G_{в. сек}}{g} C_{ср}, [\text{кг}].$$

Определяя из этой формулы  $C_{ср}$ , получим:

$$C_{ср} = \frac{P}{G_{в. сек}} g, [\text{м/сек}].$$

Качество смеси  $\alpha$  найдем из формулы 14:

$$G_{в. сек} = G_{т. сек} \alpha L$$



или

$$\alpha = \frac{G_{в. сек}}{G_{т. сек} L}.$$

Все величины в выражении для  $\alpha$  известны.

**Определение давления в камере сгорания и частоты циклов.** В процессе экспериментирования для выявления лучших образцов двигателей часто определяют максимальное давление и максимальное разрежение в камере сгорания, а также частоту циклов.

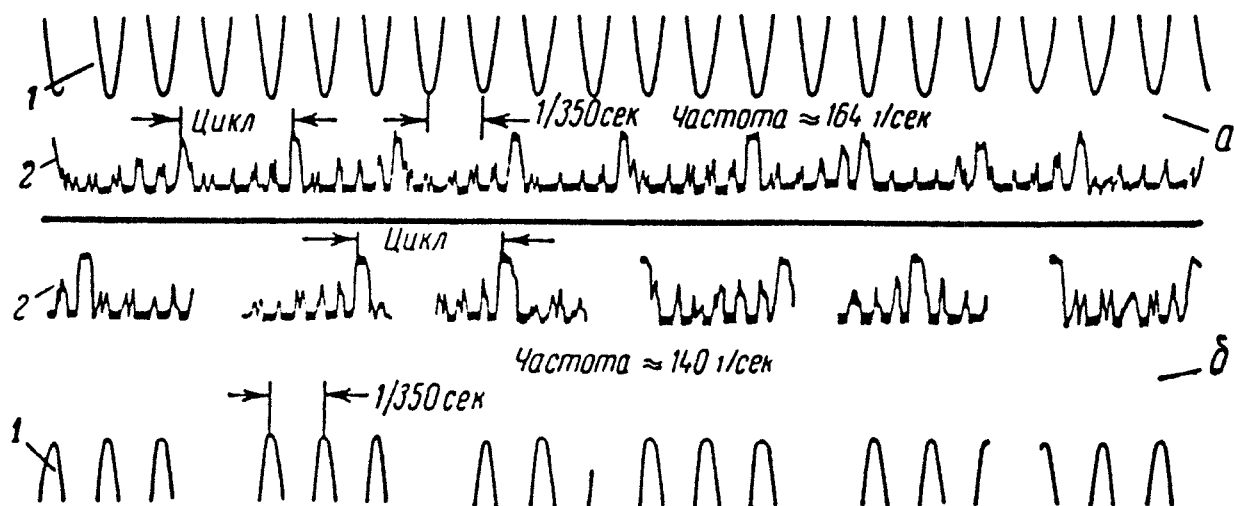


Рис. 11. Осциллограммы частоты циклов двух ПуВРД, снятые шлейфовым осциллографом с пьезокварцевым датчиком:

а — осциллограмма первого двигателя; б — осциллограмма второго двигателя

Частота циклов определяется или с помощью резонансного частотомера, или с помощью шлейфового осциллографа с пьезокварцевым датчиком, который устанавливается на стенке камеры сгорания или подставляется к обрезу выхлопной трубы.

Осциллограммы, снятые при замере частоты двух различных двигателей, приведены на рис. 11. Пьезокварцевый датчик в данном случае подводился к обрезу выхлопной трубы. Равномерные, одной высоты кривые 1 представляют собой отсчет времени. Расстояние между соседними пиками соответствует  $1/350$  сек. На средних кривых 2 показаны колебания газового потока. Осциллограф зафиксировал не только основные циклы — вспышки в камере сгорания (это кривые с наибольшей амплитудой), но и другие менее активные колебания, имеющие место в процессе сгорания смеси и выбрасывания ее из двигателя.

Максимальное давление и максимальное разрежение в камере сгорания с приближенной точностью можно определять с помощью ртутных пьезометров и двух несложных датчиков (рис. 12), причем датчики имеют одинаковую конструкцию. Разница заключается лишь в их установке на камеру сгорания; один датчик установлен так, чтобы выпускать газ из камеры сгорания, другой, чтобы впускать в нее. Первый датчик подключается к пьезометру, измеряющему максимальное давление, второй — к пьезометру, измеряющему разрежение.

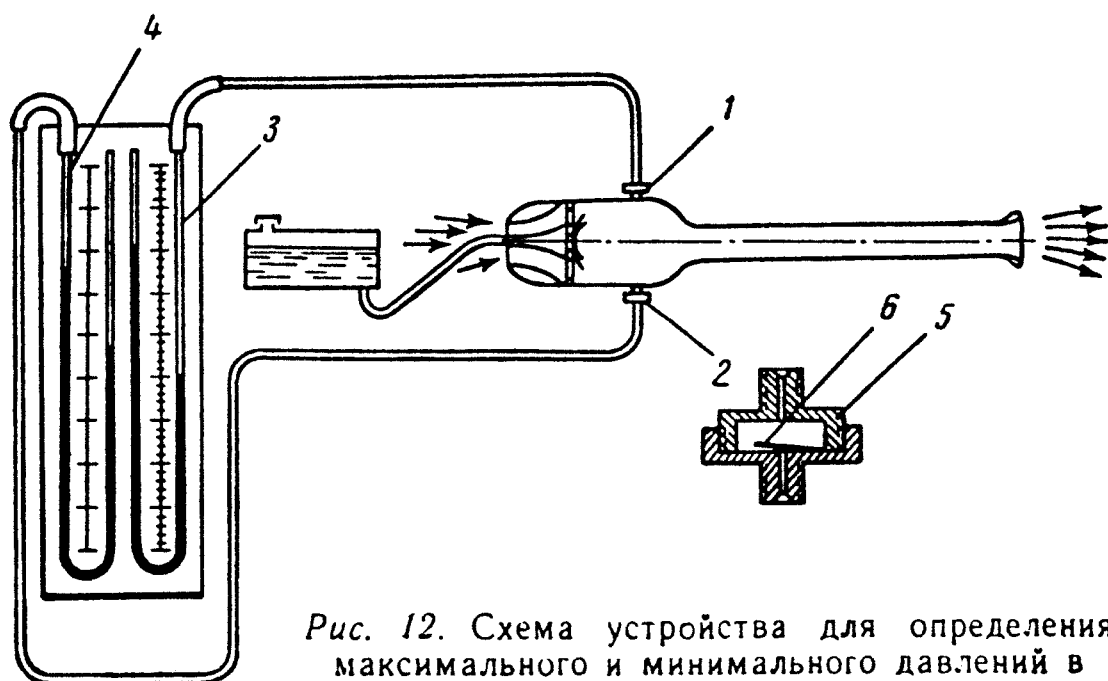


Рис. 12. Схема устройства для определения максимального и минимального давлений в камере сгорания двигателя:

1, 2 — датчики давления в камере сгорания; 3, 4 — ртутные пьезометры  
5 — корпус датчика давления; 6 — клапан (стальная пластинка толщиной 0,05—0,06 мм)

По давлению и разрежению в камере сгорания и частоте циклов можно судить об интенсивности циклов, о нагрузках, которые испытывают стенки камеры сгорания и всей трубы, а также пластинчатые клапаны решетки. В настоящее время у лучших образцов ПуВРД максимальное давление в камере сгорания доходит до 1,45—1,65 кг/см<sup>2</sup>, минимальное давление (разрежение) до 0,8 ÷ 0,70 кг/см<sup>2</sup>, а частота до 250 и более циклов в секунду.

Зная основные параметры двигателя и умея их определять, авиамоделисты-экспериментаторы смогут сравнивать двигатели, а главное, работать над более лучшими образцами ПуВРД.

КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ  
АВИАМОДЕЛЬНЫХ ПуВРД

Исходя из целевого назначения модели подбирается (или конструируется) и соответствующий двигатель.

Так, для моделей свободного полета, у которых полетный вес может достигать 5 кг, двигатели делают со значительным запасом прочности и с относительно низкой частотой циклов, что способствует увеличению срока работы клапанов, а также устанавливают за клапанами пламегасительные сетки, которые хотя и снижают несколько максимально возможную тягу, но предохраняют клапаны от воздействия высоких температур и тем самым еще увеличивают их срок работы.

К двигателям, устанавливаемым на скоростные кордовые модели, полетный вес которых не должен превышать 1 кг, предъявляются другие требования. От них добиваются максимально возможной тяги, минимального веса и гарантированного срока непрерывной работы в течение 3—5 мин., т. е. в течение времени, необходимого для подготовки к полету и прохождения зачетной километровой базы.

Вес двигателя для кордовых моделей не должен превышать 400 г, так как установка двигателей большего веса затрудняет изготовление модели с нужной прочностью и аэродинамическим качеством, а также с необходимым запасом топлива. Двигатели кордовых моделей, как правило, имеют удобообтекаемые внешние обводы, хорошее аэродинамическое качество внутренней проточной части и большое проходное сечение клапанных решеток.

Таким образом, конструкция ПуВРД, развиваемая ими тяга и необходимая продолжительность работы определяются, в основном, типом моделей, на которые они устанавливаются. Общие же требования, предъявляемые к ПуВРД, следующие: простота и малый вес конструкции, надежность в работе и удобство эксплуатации, максимально возможная тяга при заданных габаритах, наибольшая продолжительность непрерывной работы.

Теперь рассмотрим конструкции отдельных элементов двигателя.

## Входные устройства (головки)

Входное устройство ПуВРД предназначено для обеспечения правильного подвода воздуха к клапанной решетке, преобразования скоростного напора в статическое давление (скоростное сжатие) и подготовки топливно-воздушной смеси, поступающей в камеру сгорания двигателя. В зависимости от способа подачи топлива во входной канал головки — или за счет разрежения, или под давлением — проточная часть ее будет иметь различный

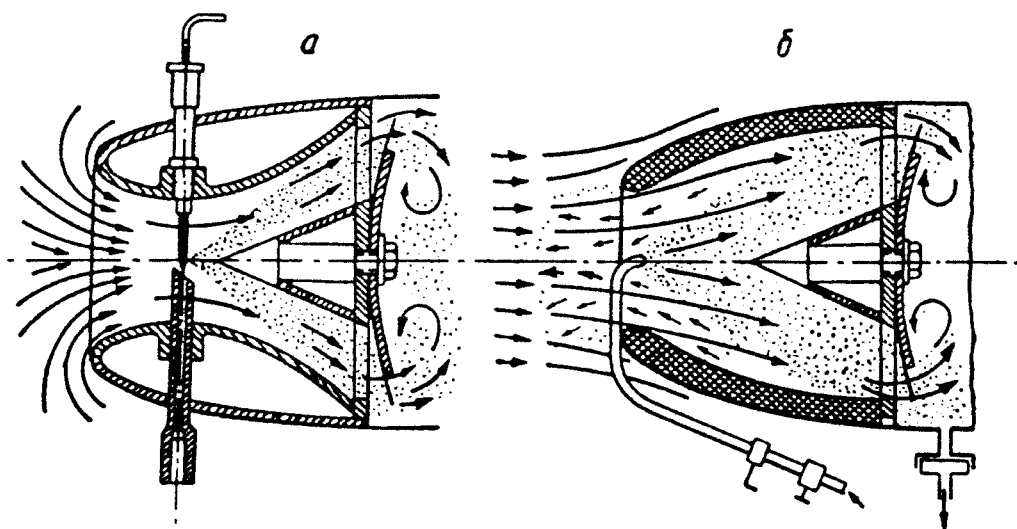


Рис. 13. Форма проточной части головок с подачей топлива:

а — за счет разрежения; б — под давлением

профиль. В первом случае у внутреннего канала есть конфузорный и диффузорный участки, и вместе с подводящей топливной трубкой и регулировочной иглой он представляет собой простейший карбюратор (рис. 13, а). Во втором случае головка имеет только диффузорный участок и топливную трубку с регулирующим винтом (рис. 13, б).

Подача топлива в диффузорный участок головки осуществляется конструктивно просто и вполне обеспечивает качественную подготовку топливно-воздушной смеси, поступающей в камеру сгорания. Это достигается благодаря тому, что поток во входном канале, не установившийся, а колеблющийся в соответствии с работой клапанов. При закрытых клапанах скорость воздушного потока равна 0, а при полностью открытых клапанах — мак-

симальная. Колебания скорости способствуют перемещению топлива и воздуха. Далее, поступившая в камеру сгорания топливно-воздушная смесь воспламеняется от остаточных газов, давление в рабочей трубе возрастает, и клапаны под действием собственных сил упругости и под воздействием повышенного давления в камере сгорания закрываются.

Здесь возможны два случая. Первый, когда в момент закрытия клапанов газы не пробиваются во входной канал и на топливно-воздушную смесь воздействуют только клапаны, которые останавливают ее движение и даже как бы отбрасывают в сторону входа в головку. Второй, когда в момент закрытия клапанов на топливно-воздушную смесь воздействуют не только клапаны, но и пробивающаяся через клапаны вследствие их недостаточной жесткости или чрезмерного отклонения уже поступившая в камеру сгорания, но еще не воспламенившаяся смесь. В этом случае смесь будет отбрасываться к входу в головку на значительно большую величину.

Отбрасывание смеси от диска клапанной решетки в сторону входного отверстия можно легко наблюдать у головок с коротким внутренним каналом (длина канала равна примерно диаметру головки). Перед входным отверстием в головке во время работы двигателя постоянно будет находиться топливно-воздушная «подушка» примерно такая, как показано на рис. 13, б. Явление это можно терпеть, если «подушка» имеет небольшие размеры, а двигатель на земле работает устойчиво, так как в воздухе с увеличением скорости полета возрастает скоростной напор и «подушка» исчезает. Если же во входную часть головки будет пробиваться из камеры сгорания не топливно-воздушная смесь, а горячие газы, то возможно воспламенение смеси в диффузорном участке и остановка двигателя. Поэтому необходимо прекратить попытки запуска и устранить дефект в клапанной решетке, как будет рассказано в следующем разделе. Для устойчивой и эффективной работы двигателя длина входного канала головки должна быть равна 1,0—1,5 наружным диаметрам клапанов, а отношение длин конфузорного и диффузорного участков должно быть примерно 1 : 3.

Профиль внутреннего канала и внешний обвод головки должны быть плавными, чтобы не было отрыва струи

от стенок при работе двигателя как на месте, так и в полете. На рис. 13, а показана головка, профиль которой вполне удовлетворяет движению потока. Она имеет удобообтекаемую форму, и отрыва потока от стенок не будет.

Рассмотрим ряд характерных конструкций головок ПуВРД.

На рис. 14 дана головка, имеющая достаточно хорошее аэродинамическое качество. Образующие конфузоро-

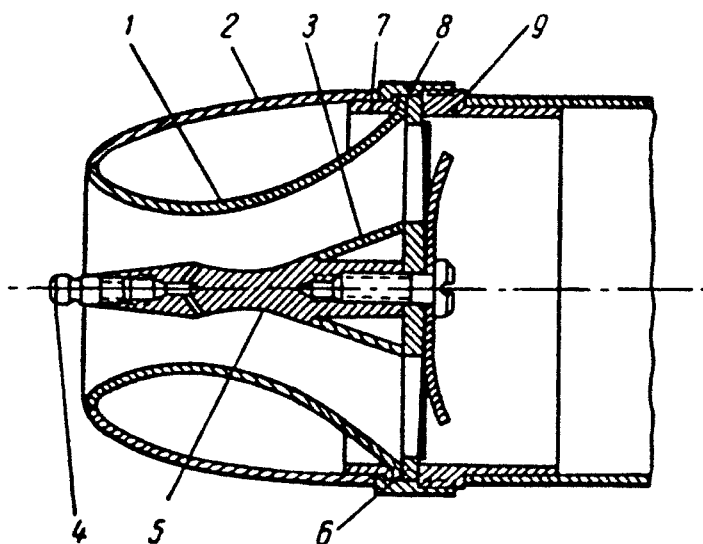


Рис. 14. Головка со стяжным резьбовым кольцом:

1 — корпус внутреннего канала; 2 — обтекатель; 3 — конус форсунки; 4 — жиклер; 5 — корпус форсунки; 6 — клапанная решетка; 7 — кольцо обтекателя; 8 — стяжное резьбовое кольцо; 9 — резьбовое кольцо камеры сгорания.

ного и диффузорного участков, а также передней кромки обтекателя, как видно из рисунка, сопрягаются плавно.

О технологии изготовления отдельных элементов этой головки рассказано в главе 5.

К достоинствам конструкции головки относится ее малый вес, возможность быстрой замены клапанной решетки и размещение форсунки в центре входного канала, что способствует симмет-

ричному течению воздушного потока.

Качество смеси регулируется подбором диаметра отверстия жиклера. Можно применить жиклер с отверстием, большим номинального, и уменьшать при регулировке его проходное сечение, вставляя отдельные жилки диаметром 0,15—0,25 мм от электропровода. Наружные концы жилок загибают на внешнюю сторону жиклера (рис. 15), после чего на него надевают хлорвиниловую или резиновую трубку. Возможна регулировка подачи топлива с применением небольшого самодельного винтового крана.

Головка одного из отечественных двигателей РАМ-2, выпускавшегося серийно, показана на рис. 16. Корпус этой головки имеет внутренний канал, место крепления форсунки, клапанную решетку, резьбу для крепления к камере сгорания и посадочное место для обтекателя.

Форсунка снабжена игольчатым винтом для регулировки качества смеси.

К недостаткам относится снижающая тягу двигателя плохая аэродинамика проточной части — резкий переход потока из осевого направления к входным каналам клапанной решетки и наличие самих каналов (участок б — г), увеличивающих сопротивление и ухудшающих качественное однородное перемешивание топлива с воздухом.

У конструкции головки, изображенной на рис. 17, особенное крепление с камерой сгорания двигателя. В отличие от резьбовых креплений здесь используется корытообразный хомут, выполненный на специальной оправке путем обжата. На передней кромке камеры сгорания сделан специальный профилированный буртик. Клапанная решетка, вставленная внутрь камеры сгорания, упирается в выступ этого буртика. Затем вставляется корпус входного устройства, имеющего также профилированный буртик, и три узла — корпус головки, клапанная решетка и камера сгорания с помощью хомута 7 плотно стягиваются между собой винтом 8. Крепление в целом легкое и надежное в эксплуатации.

Пространство между оболочкой входного канала и обтекателем часто используется как емкость для топливного бачка. В этих случаях, как правило, увеличивают длину входного канала для того, чтобы можно было разместить необходимый запас топлива. На рис. 18 и 19 показаны такие головки. Первая из них хорошо сопрягается с камерой сгорания; топливо в ней надежно изолировано от горячих деталей; она крепится к корпусу диффузора винтами 4. Вторая головка, показанная на рис. 19, отличается оригинальностью крепления к камере сгорания. Как видно из рисунка, головка 4 — профилированный бачок, спаянный из жести или фольги, имеет специальное кольцевое углубление для фиксирования своего положения на буртике клапанной решетки. Сама клапанная решетка 5 ввернута в камеру сгорания.

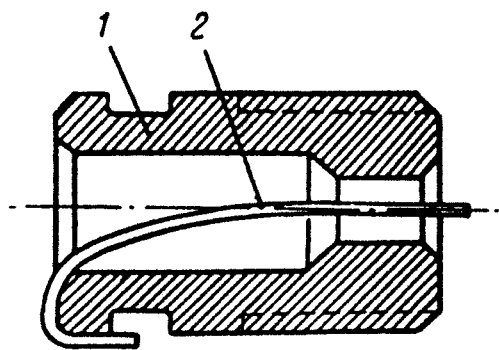


Рис. 15. Изменение проходного сечения жиклера с помощью проволочных жилок:  
1 — жиклер; 2 — проволочная жила

Головка-бачок соединяется с клапанной решеткой и камерой сгорания с помощью пружин 3, стягивающих ушки 2. Соединение не жесткое, но этого в данном случае и не требуется, так как головка не является силовым органом; также не нужна особая герметичность

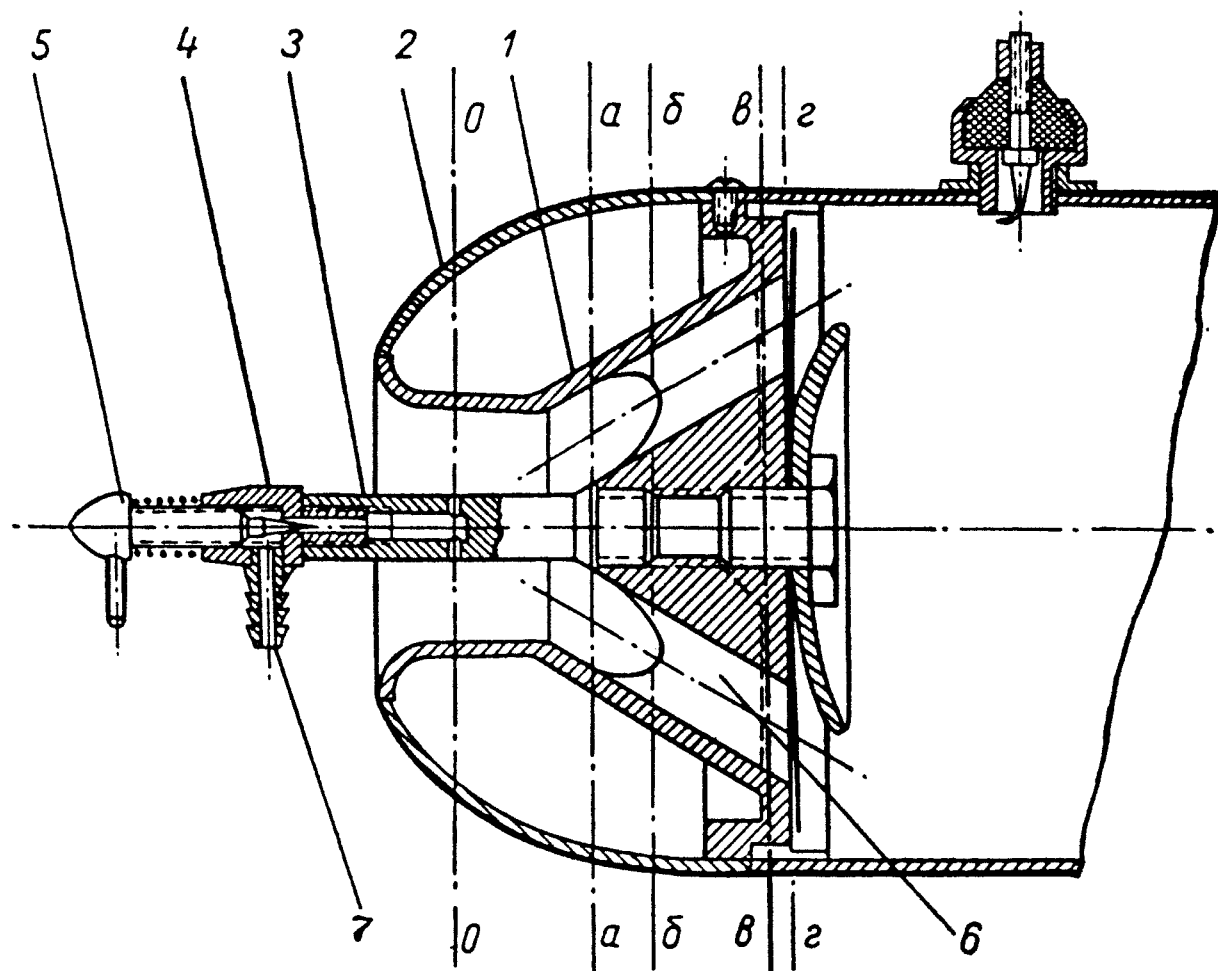


Рис. 16. Головка двигателя РАМ-2:

1 — внутренний канал; 2 — обтекатель; 3 — форсунка; 4 — переходник; 5 — игольчатый винт; 6 — входной канал клапанной решетки; 7 — штуцер для подсоединения топливной трубки

между головкой и клапанной решеткой. Поэтому данное крепление в сочетании с конструкцией клапанной решетки и камеры сгорания вполне оправдано. Автор конструкции этой головки — В. Даниленко (Ленинград).

Головка, показанная на рис. 20, предназначена для двигателей с тягой до 3 кг и более. Ее конструктивная особенность — способ крепления к камере сгорания, наличие охлаждающих ребер и система подачи топлива. В отличие от предыдущих способов данная головка крепится к камере сгорания стяжными винтами. На камере сгорания укреплены шесть ушков 7 с внутренней резьбой МЗ, в которые вворачиваются стяжные винты 5,



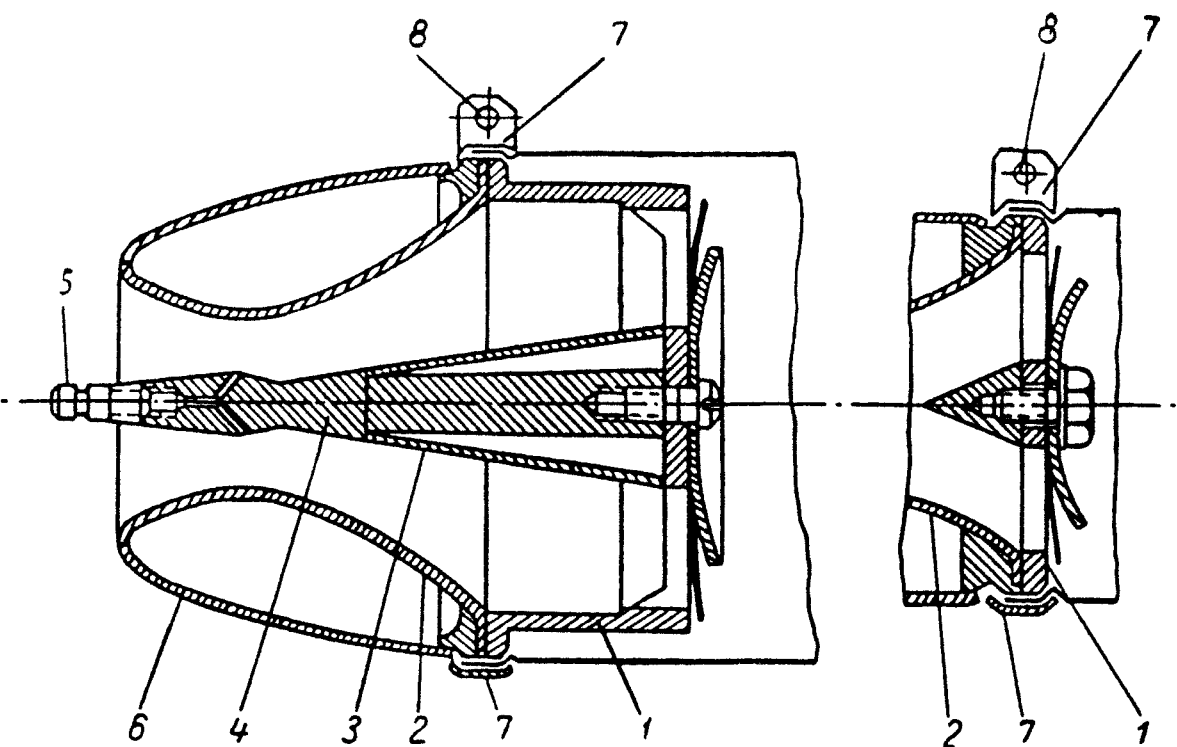


Рис. 17. Головка с креплением к камере сгорания с помощью прсфилированного хомутика:

1 — клапанная решетка; 2 — диффузор; 3 — конус форсунки; 4 — форсунка; 5 — жиклер; 6 — обтекатель; 7 — профилированный хомутик; 8 — стяжной винт

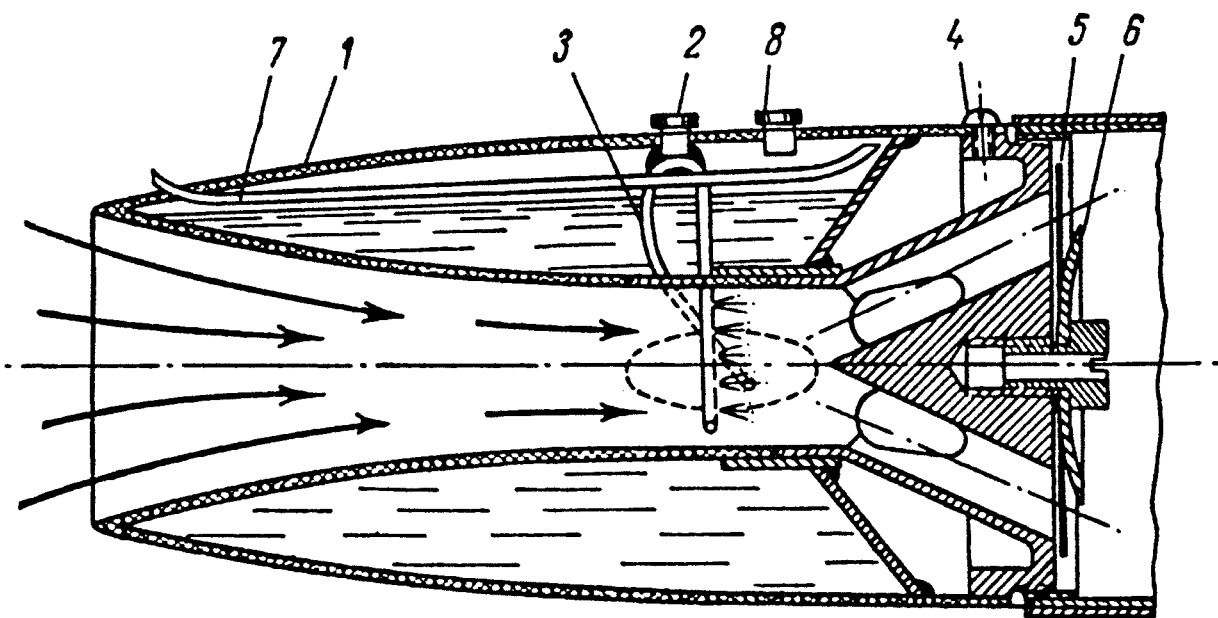


Рис. 18. Головка с топливным бачком:

1 — обтекатель; 2 — винт регулировки подачи топлива; 3 — топливная трубка с выходными отверстиями; 4 — винт крепления головки; 5 — клапан; 6 — ограничительная шайба; 7 — дренажная трубка; 8 — заливная горловина

захватывая при этом специальными накладками 4 силовое кольцо диффузора и прижимая его к камере сгорания. Крепление, хотя и трудоемкое в изготовлении, при больших габаритах двигателя (в данном случае диаметр камеры сгорания равен 100 мм) применять целесообразно.

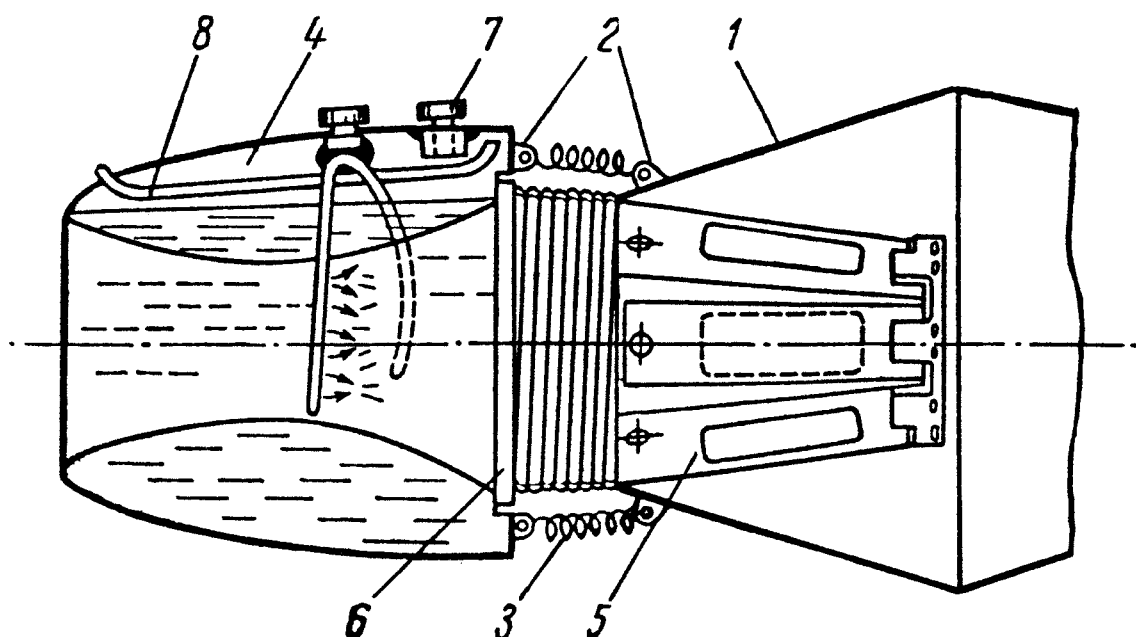


Рис. 19. Головка, прикрепленная к камере сгорания с помощью пружин:

1 — камера сгорания; 2 — ушки; 3 — пружина; 4 — головка; 5 — клапанная решетка; 6 — буртик клапанной решетки; 7 — заливная горловина; 8 — дренажная трубка

Во время работы двигатель имеет высокий тепловой режим и для предохранения обтекателя, изготовляемого из бальзы или пенопласта, и топливной системы от воздействия высоких температур на внешней части диффузора предусмотрены четыре охлаждающие ребра.

Подвод топлива осуществляется двумя жиклерами — главным 11 с нерегулирующим отверстием и вспомогательным 12 с иглой 13 для тонкой регулировки.

### Конструкции клапанных решеток

Единственные подвижные детали двигателя — клапаны, перепускающие топливно-воздушную смесь в одном направлении, — в камеру сгорания. От подбора толщины и формы клапанов, от качества изготовления и их регулировки зависит тяга двигателя, а также устойчивость и продолжительность его непрерывной работы. Мы

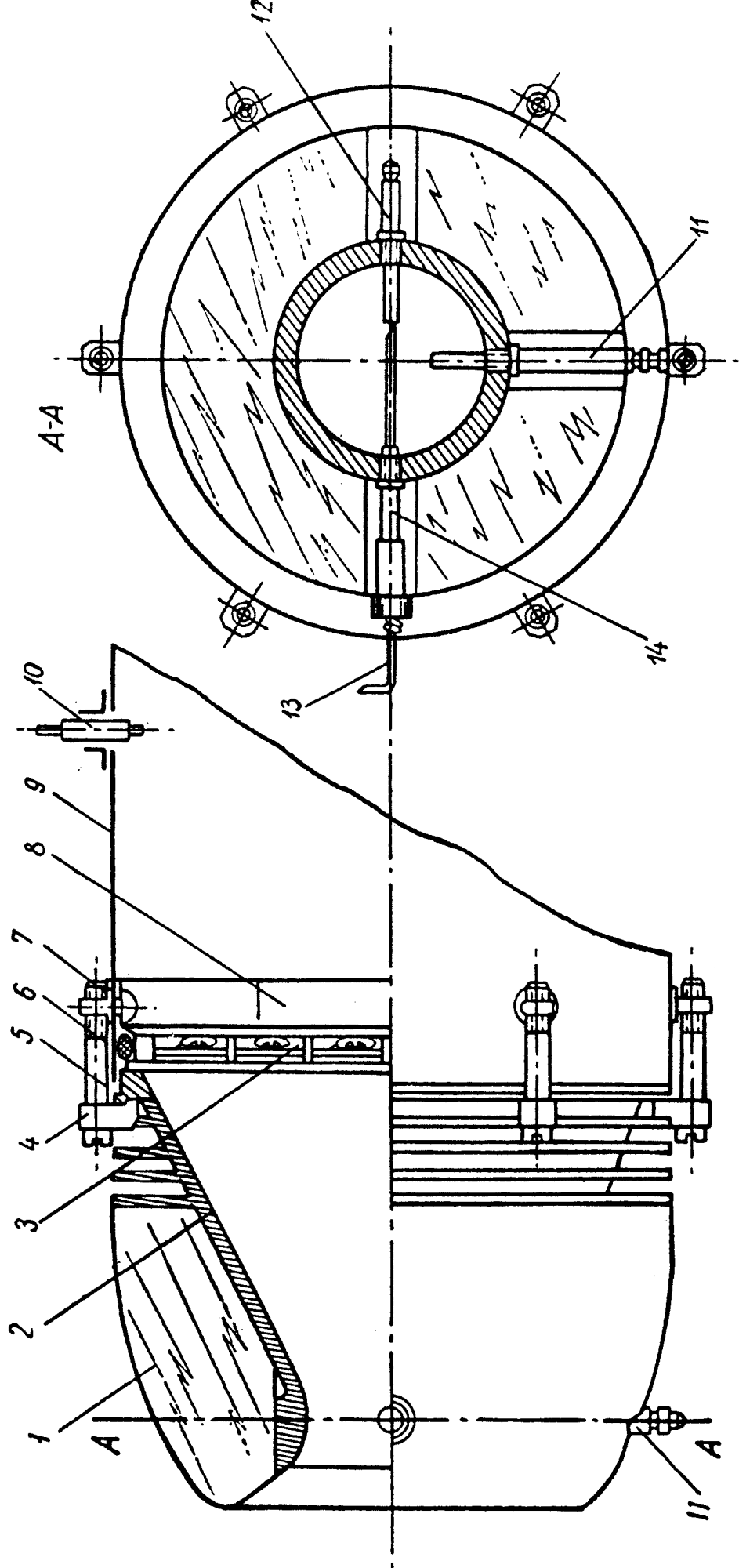
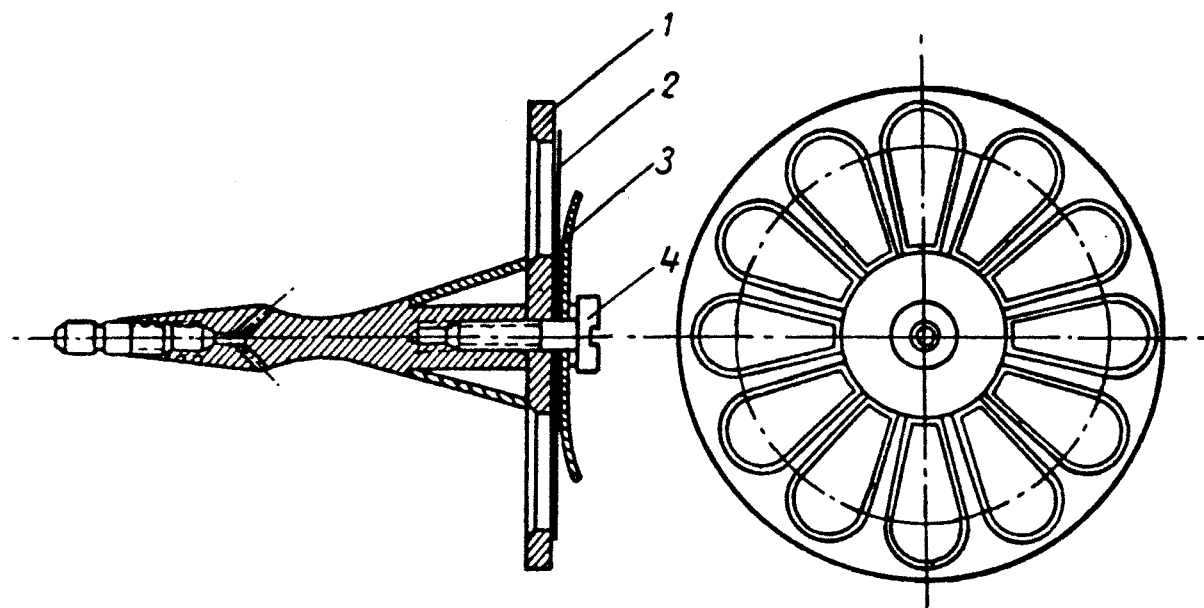


Рис. 20. Головка с охлаждающими ребрами и балловым обтекателем:

1 — обтекатель из баллы; 2 — диффузор; 3 — клапанная решетка; 4 — накладка; 5 — винт; 6 — уплотнение из шнурового асбеста; 7 — ушко; 8 — упорное кольцо; 9 — камера сгорания; 10 — свеча; 11 — главный жиклер; 12 — вспомогательный жиклер; 13 — игла направляющая иглы вспомогательного жиклера; 14 — вспомогательный жиклер

уже говорили, что от двигателей, устанавливаемых на кордовые модели, требуется максимальная тяга при малом весе, а от двигателей, устанавливаемых на модели свободного полета, — наибольшая продолжительность непрерывной работы. Поэтому и клапанные решетки, устанавливаемые на эти двигатели, также конструктивно различаются.



*Рис. 21. Дискная клапанная решетка:*

1 — диск решетки; 2 — клапан; 3 — ограничительная шайба; 4 — стяжной винт

Рассмотрим коротко работу клапанной решетки. Для этого возьмем так называемую дискную клапанную решетку (рис. 21), получившую наибольшее распространение, особенно на двигателях для кордовых моделей. От любой клапанной решетки, в том числе и от дисквой, добиваются максимально возможной площади проходного сечения и хорошей аэродинамической формы. Из рисунка видно, что большая часть площади диска используется для входных окон, разделенных перемычками, на кромки которых ложатся клапаны. Практика показала, что минимально допустимым перекрытием входных отверстий является показанное на рис. 22; уменьшение площади прилегания клапанов ведет к разрушению кромок диска — к вдавливанию и скруглению их клапанами. Диски, как правило, изготавливаются из дюралюминия марок Д-16Т или В-95 толщиной 2,5—3,5 мм, или из стали толщиной 1,0—1,5 мм. Входные кромки закругляются и полируются. Особое внимание

уделяется точности и чистоте обработки плоскости прилегания клапанов. Необходимая плотность прилегания клапанов к плоскости диска достигается только после кратковременной приработки на двигателе, когда каждый клапан «вырабатывает» для себя собственное седло.

В момент вспышки смеси и повышения давления в камере сгорания клапаны закрыты. Они плотно прилегают к диску и не пропускают газы в диффузор головки. Когда основная масса газов устремляется в выхлопную трубу и за клапанной решеткой (со стороны камеры сгорания) будет образовываться разрежение, клапаны начнут открываться, оказывая при этом сопротивление поступлению свежей топливно-воздушной смеси и создавая тем самым некоторую глубину разрежения в камере сгорания, которое в последующий момент распространится до обреза выхлопной трубы. Сопротивление, создаваемое клапанами, зависит главным образом от их жесткости, которая должна быть такой, чтобы достигалось наибольшее поступление топливно-воздушной смеси и своевременное закрытие входных отверстий в момент вспышки. Подбор жесткости клапанов, которая удовлетворяла бы указанным требованиям, — один из основных и трудоемких процессов конструирования и доводки двигателя.

Предположим, что мы выбрали клапаны из очень тонкой стали и отклонение их ничем не ограничили. Тогда в момент поступления смеси в камеру сгорания они отклонятся на какую-то максимально возможную величину (рис. 23, а), причем можно с полной уверенностью сказать, что отклонение каждого клапана будет иметь различную величину, так как очень трудно сделать их строго одинаковой ширины, да и по толщине они также могут отличаться. Это приведет к неодновременному их закрытию. Но главное в следующем. По

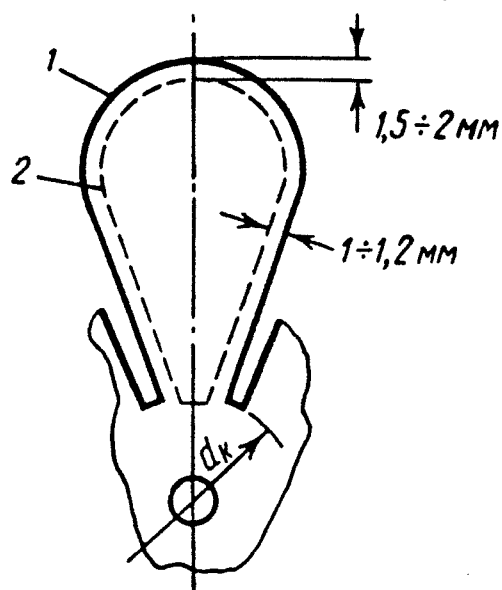


Рис. 22. Перекрытие входного отверстия клапаном:  
1 — контур клапана; 2 — контур входного отверстия

окончании процесса наполнения в камере сгорания наступает мгновение, когда давление в ней становится немного меньше или равным давлению в диффузоре. Именно в это мгновение клапаны должны, главным образом под действием собственных сил упругости,

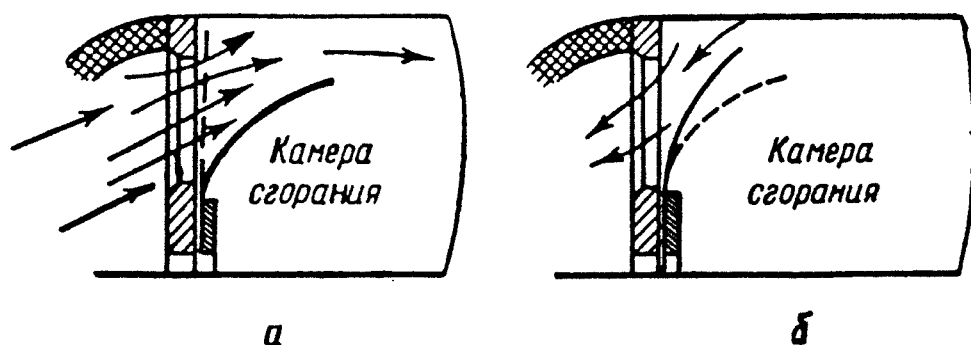


Рис. 23. Отклонение клапанов без ограничительной шайбы

успеть закрыть входные отверстия, чтобы после воспламенения топливно-воздушной смеси газы не смогли пробиться в диффузор головки. Клапаны с малой жесткостью, отклонившиеся на большую величину, не смогут вовремя закрыть входные отверстия и газы будут пробиваться в диффузор головки (рис. 23, б), что приведет к падению тяги или к вспышке смеси в диффузоре и остановке двигателя. Кроме того, тонкие клапаны, отклоняясь на большую величину, испытывают большие динамические и термические нагрузки и быстро выходят из строя.

Если взять клапаны повышенной жесткости, то явление будет обратное — клапаны будут позже открываться и раньше закрываться, что приведет к уменьшению количества поступающей в камеру сгорания смеси и резкому снижению тяги. Поэтому для того, чтобы добиться возможно быстрого открытия клапанов при наполнении камеры сгорания смесью и своевременного закрытия их при вспышке, прибегают к искусственному изменению линии изгиба клапанов с помощью установки ограничительных шайб или рессор.

Как показала практика, для различной мощности двигателей толщина клапанов берется 0,06—0,25 мм. Стали для клапанов применяются и углеродистые У7, У8, У9, У10 и легированные холоднокатаные ЭИ395, ЭИ415, ЭИ437Б, ЭИ598, ЭИ100, ЭИ442.

Ограничители отклонения клапанов обычно выполняются или на полную длину клапанов или на меньшую, специально подобранную.

На рис. 24 показана клапанная решетка с ограничительной шайбой 1, выполненной на всю длину клапанов. Главное ее назначение: задать клапанам наивыгоднейший профиль изгиба, при котором они пропускают максимально возможное количество топливно-воздушной смеси в камеру сгорания и вовремя закрывают входные отверстия. На практике, из технологических соображений, профиль шайбы выполняют по радиусу с таким расчетом, чтобы концы клапанов отходили от плоскости прилегания на 6—10 мм. Начало радиуса профиля необходимо брать от начала входных окон. Недостатки этой шайбы: она не позволяет использовать полностью упругие свойства клапанов, создает значительное сопротивление и имеет сравнительно большой вес.

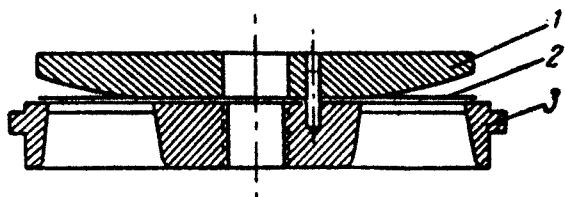


Рис. 24. Клапанная решетка с ограничительной шайбой на всю длину клапанов:

1 — ограничительная шайба; 2 — клапан; 3 — корпус решетки

Наибольшее распространение получили ограничители отклонения клапанов, выполненные не на полную длину клапанов, а на экспериментально подобранную. Под действием сил давления со стороны диффузора и разрежения со стороны камеры клапан отклоняется на какую-то величину: без ограничителя отклонения — на максимально возможную (рис. 25, а); с ограничителем отклонения, имеющим диаметр  $d$ , на другую (рис. 25, б). Вначале клапан отклонится по профилю шайбы до диаметра  $d_1$ , а дальше — на какую-то величину  $\delta_1$ , не ограниченную шайбой. В момент закрытия концевая часть клапана вначале, как бы отталкиваясь от кромки шайбы с упругостью, которую клапан имеет на диаметре  $d_1$ , получает определенную скорость движения к седлу, гораздо большую, чем при отсутствии шайбы. Если теперь увеличить диаметр шайбы до диаметра  $d_2$ , а высоту шайбы  $h_1$  оставить неизменной, тогда упругость клапана на диаметре  $d_2$  будет больше, чем на диаметре  $d_1$ ; так как площадь его поперечного сечения увеличилась, а площадь конца клапана, на которую действует давление со стороны диффузора, уменьшилась, концевая часть

отклонится уже на меньшую величину  $\delta_2$  (рис. 25, в). «Отталкивающая» способность клапана уменьшится, уменьшится и скорость закрытия. Следовательно, требуемый эффект от ограничительной шайбы уменьшается.

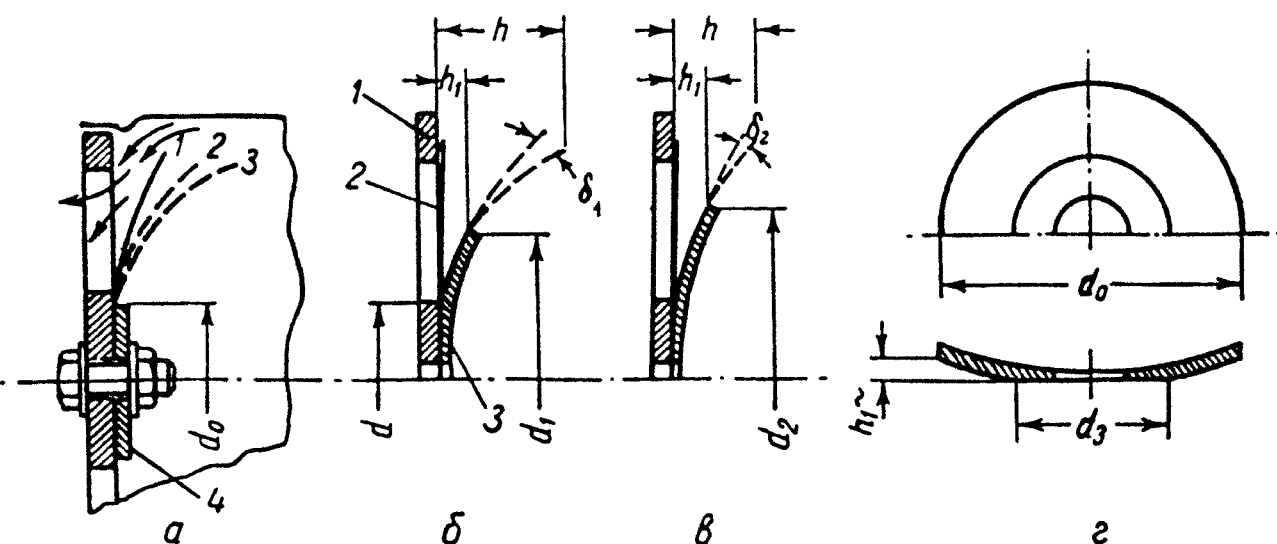


Рис. 25. Влияние ограничительной шайбы на отклонение клапанов: 1 — диск клапанной решетки; 2 — клапан; 3 — ограничительная шайба; 4 — зажимная шайба

Поэтому можно сделать вывод, что для каждой выбранной толщины клапанов при заданных габаритах двигателя существует оптимальная величина диаметра ограничительной шайбы  $d_0$  (или длины ограничителя) и высоты  $h_1$ , при которых клапаны имеют максимально допустимое отклонение и своевременно закрываются в момент вспышки. У современных ПуВРД размеры ограничителей отклонения клапанов имеют следующие величины: диаметр окружности ограничительной шайбы (или длина ограничителя) равен 0,6—0,75 наружного диаметра клапанов (или длины его рабочей части); радиус изгиба равен 50—75 мм, а высота кромки шайбы  $h_1$  от плоскости прилегания клапанов равна 2—4 мм. Диаметр плоскости прижима должен быть равен диаметру по корневому сечению клапанов. Практически нужно иметь запас ограничительных шайб с отклонением от номинальных размеров в ту и другую сторону, и при замене клапанов, испытывая двигатель, подбирать наиболее подходящую, при которой двигатель работает устойчиво, а тяга наибольшая.

Клапаны рессорного типа (рис. 26) используются с той же целью — для максимально возможного открытия клапанов в процессе наполнения камеры сгорания



топливно-воздушной смесью и своевременного их закрытия в момент сгорания смеси. Рессорные клапаны способствуют увеличению глубины разрежения и поступлению большего количества смеси. Для рессорных клапанов толщину листовой стали берут на 0,05—0,10 мм меньше, чем для клапанов с ограничительной шайбой, а количество листов рессоры, их толщину и диаметр подбирают экспериментально. Форма листов рессоры обычно соответствует форме основного лепестка, прикрывающего входное отверстие, но концы их должны быть срезаны перпендикулярно радиусу, проведенному через середину лепестка. Число рессорных лепестков выбирают в пределах 3—5 штук, а наружные их диаметры (для 5 штук) делают равными 0,8—0,85  $d_k$ , 0,75—0,80  $d_k$ , 0,70—0,75  $d_k$ , 0,65—0,70  $d_k$ , 0,60—0,65  $d_k$ , где  $d_k$  — наружный диаметр основного клапана.

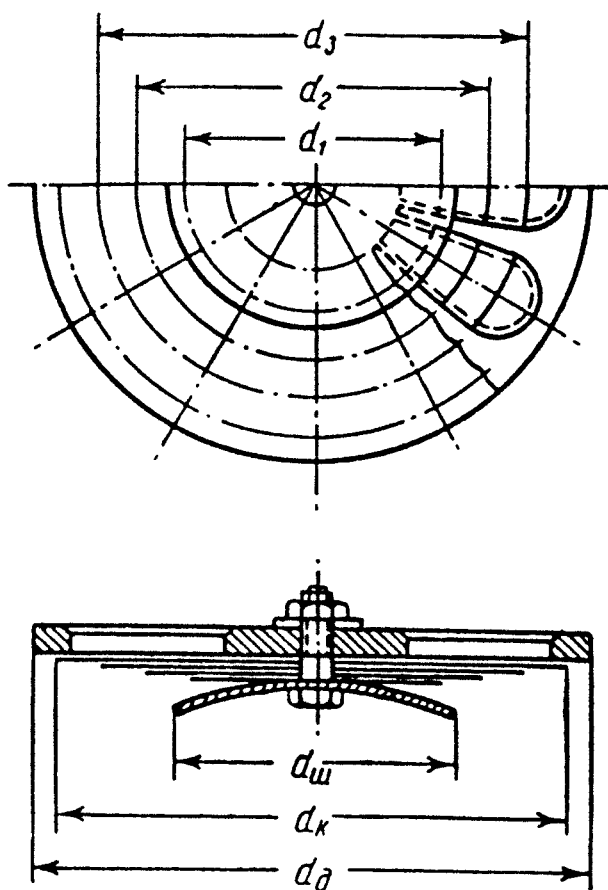


Рис. 26. Клапанная решетка с рессорными клапанами

При использовании клапанов рессорного типа можно обойтись без ограничительной шайбы, так как числом и диаметром рессорных пластин можно получить наиболее выгодную линию изгиба клапанов. Но иногда ограничительную шайбу все же устанавливают и на рессорные клапаны, главным образом для выравнивания их конечного отклонения.

Клапаны во время работы испытывают большие динамические и термические нагрузки. Действительно, нормально подобранные клапаны, открываясь на какую-то максимально возможную величину (на 6—10 мм от седла), полностью перекрывают входные отверстия тогда, когда смесь уже воспламенилась и давление в камере сгорания начало возрастать. Поэтому клапаны

движутся к седлу не только под действием собственных сил упругости, но и под действием давления газов, и ударяются о седло с большой скоростью и со значительной силой. Количество ударов равно числу циклов двигателя.

Температурное воздействие на клапаны происходит за счет непосредственного соприкосновения с горячими газами и лучистого нагрева и, хотя клапаны омываются сравнительно холодной топливно-воздушной смесью,

средняя температура их остается достаточно высокой. Действие динамических и термических нагрузок приводит к усталостному разрушению клапанов, особенно их концов. Если клапаны выполнены вдоль волокон ленты (вдоль направления ее прокатки), то к концу срока работы волокна отделяются друг от друга; наоборот, при поперечном направлении выкрашива-

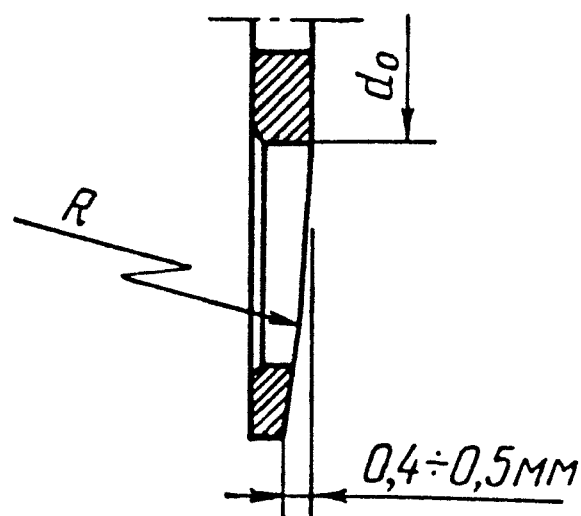


Рис. 27. Сферическая плоскость прилегания клапана

ются концевые кромки. В том и другом случае это приводит к выходу клапанов из строя и остановке двигателя. Поэтому качество обработки клапанов должно быть очень высоким.

Наиболее качественные клапаны изготавливаются с помощью электроискровой обработки. Однако чаще всего клапаны нарезают специальными наждачными круглыми камнями толщиной 0,8—1,0 мм. Для этого из клапанной стали вырезают вначале заготовки, закладывают их в специальную оправку, обрабатывают по наружному диаметру, а затем, в оправке же, наждачным камнем прорезают межклапанные пазы. Наконец, при серийном выпуске двигателей клапаны вырубаются штампом. Но каким бы способом они ни были сделаны, шлифовка кромок обязательна. Заусенцы на клапанах не допускаются. Не должны клапаны иметь также погнутостей и короблений.

Иногда для некоторого облегчения условий работы клапанов плоскость прилегания на диске обрабатывают

по сфере (рис. 27). Закрывая входные отверстия, клапаны получают небольшой обратный изгиб, благодаря которому несколько смягчается их удар о седла. Неплотное прилегание клапанов к диску в спокойном состоянии облегчает и ускоряет запуск, так как топливно-воздушная смесь может свободно проходить между клапаном и диском.

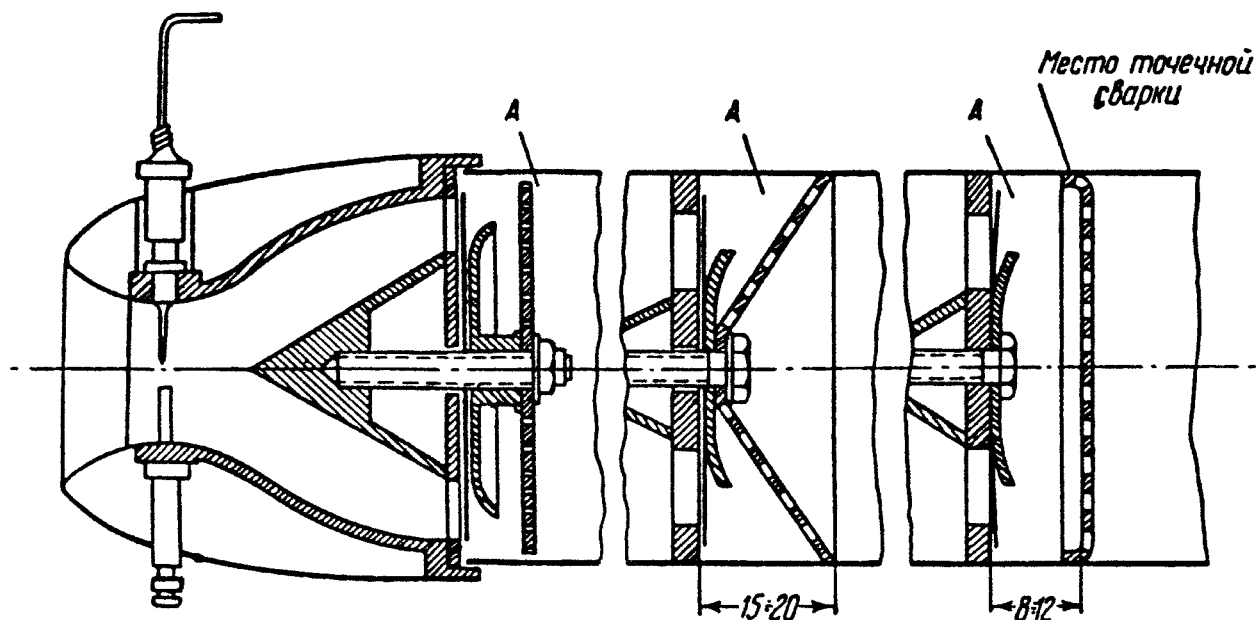


Рис. 28. Клапанные решетки с пламегасительными демпфирующими сетками

Наиболее эффективный способ предохранения клапанов от воздействия динамических и термических нагрузок — установка пламегасительных демпфирующих сеток. Последние в несколько раз увеличивают срок работы клапанов, но значительно снижают тягу двигателя, так как создают большое сопротивление в проточной части рабочей трубы. Поэтому их устанавливают, как правило, на двигатели, от которых требуется большой срок работы и сравнительно небольшая тяга.

Сетки ставят в камере сгорания (рис. 28) за клапанной решеткой. Их изготовляют из листовой жаростойкой стали толщиной 0,3—0,8 мм, с отверстиями диаметром 0,8—1,5 мм (чем толще материал сетки, тем больше берется диаметр отверстий).

В момент вспышки смеси в камере сгорания и нарастания давления горячие газы стараются через отверстия сетки проникнуть в полость А. Сетка разбивает основное пламя на отдельные тонкие струйки и гасит их.

Попавшие в полость *A* газы уже не могут поджечь находящуюся в ней топливно-воздушную смесь. Возросшее давление в камере сгорания в момент вспышки смеси за короткое время своего действия так же слабо воздействует на клапаны, так как отверстия сетки на пути движения газов являются сопротивлением, снижающим давление на клапаны.

Таким образом, клапаны почти не испытывают температурного воздействия, а динамические нагрузки они

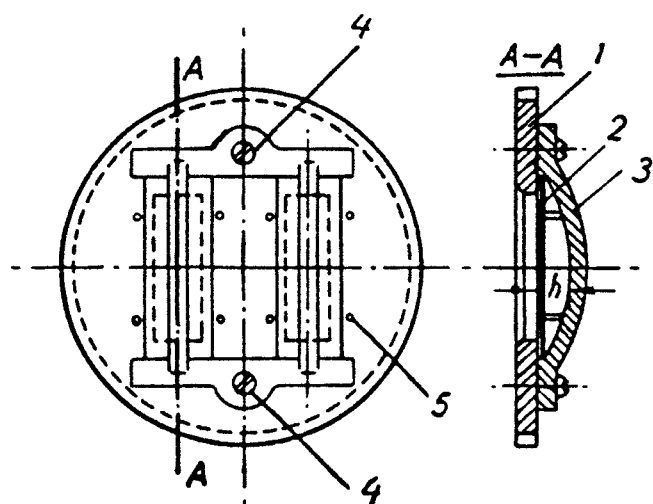


Рис. 29. Клапанная решетка со свободнолежащими клапанами:  
1 — диск решетки; 2 — клапан; 3 — ограничитель отклонения; 4 — винт; 5 — штифт

воспринимают главным образом от собственных сил упругости. Объем полости *A* примерно равен очередному объему смеси, поступающему в камеру сгорания, и находится опытным путем. Опытным путем определяются диаметр и число отверстий сетки, так как все эти величины находятся в прямой зависимости от диаметра камеры сгорания и длины рабочей трубы. На существующих двигателях с диаметром камеры сгорания равным 50 мм и

длиной рабочей трубы около 600 мм расстояние сетки от клапанной решетки равно 8—10 мм, а число отверстий диаметром 1,4—1,5 мм — 100—120. Сетки крепятся к головке винтом, привариваются точечной сваркой к камере сгорания (см. рис. 28) или плотно вставляются в нее.

Мы рассмотрели конструкцию и работу дисковой клапанной решетки, на которой клапаны размещены по радиусам в виде звездочки, перпендикулярно продольной оси двигателя. Расположение клапанов на решетках может быть и другим. Рассмотрим наиболее характерные.

Оригинальная схема клапанов применена на ПуВРД конструкции В. Давыдова (Ленинград). Эти клапаны не имеют неподвижного крепления, и на диске решетки лежат в свободном состоянии (рис 29). Величина и профиль изгиба клапана 2 задаются ограничителем откло-

нения 3, а положение на клапанной решетке фиксируется специальными штифтами 5. Максимальное отклонение клапана  $h$  находится опытным путем. Подобные клапанные решетки устанавливаются на двигатели с низкой частотой циклов, с длиной рабочей трубы 650—750 мм и более.

На рис. 30 изображена клапанная решетка с прямоугольными входными окнами, расположенными параллельно друг другу. Ограничитель отклонения клапанов и клапаны крепятся к корпусу винтами. Корпус решетки и ограничитель отклонения клапанов дюралюминиевые.

Коническая клапанная решетка (рис. 31) обладает сравнительно большим проходным сечением входных окон. Клапаны с увеличивающейся к месту закрепления шириной практически не требуют установки ограничителей отклонения.

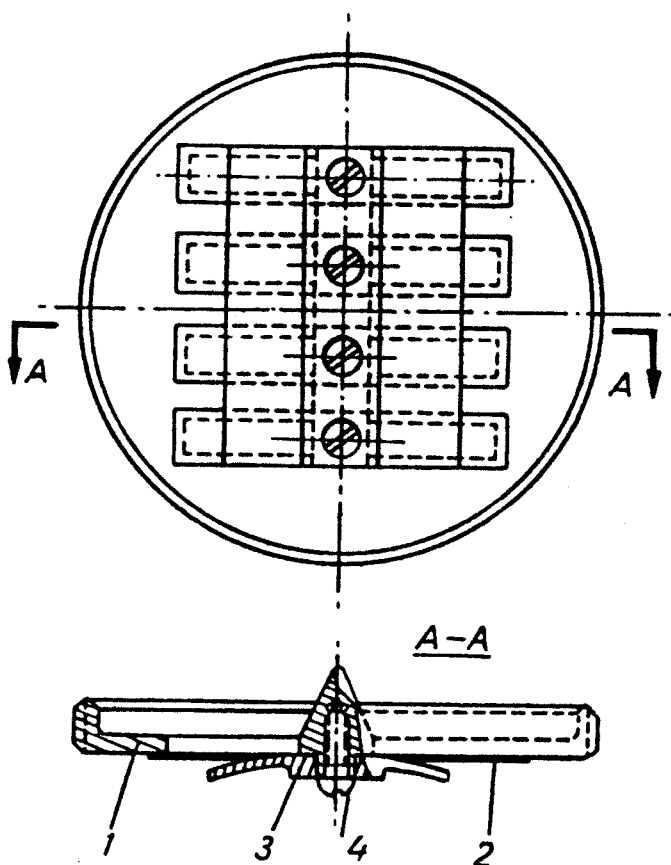


Рис. 30. Клапанная решетка с прямоугольными входными окнами:  
1 — диск решетки; 2 — клапан; 3 — ограничитель отклонения; 4 — винт

## Рабочие трубы

Колебания газового потока в рабочей трубе, обеспечивающие наполнение камеры сгорания свежей смесью и воспламенение ее, лежат в основе принципа действия ПуВРД.

Рабочая (резонансная) труба определяет частоту и интенсивность колебания газового потока.

Длина и форма рабочей трубы могут быть различными. Практически можно «заставить» работать двигатель с любой формой рабочей трубы: цилиндрической,

расширяющейся, сужающейся, изогнутой и т. п. (рис. 32, а). Но максимально возможную тягу от двигателя при заданной площади проходного сечения клапанной решетки можно получить только при оптимальных величинах длины и диаметра рабочей трубы и ее формы. Оптимальная форма и длина рабочей трубы определяются обычно в процессе эксперимента. В настоящее время наиболее установившиеся и получившие распространение формы рабочих труб изображены на рис. 32, б, с условным названием отдельных частей: камера сгорания, реактивное сопло, выхлопная труба и расширяющееся сопло.

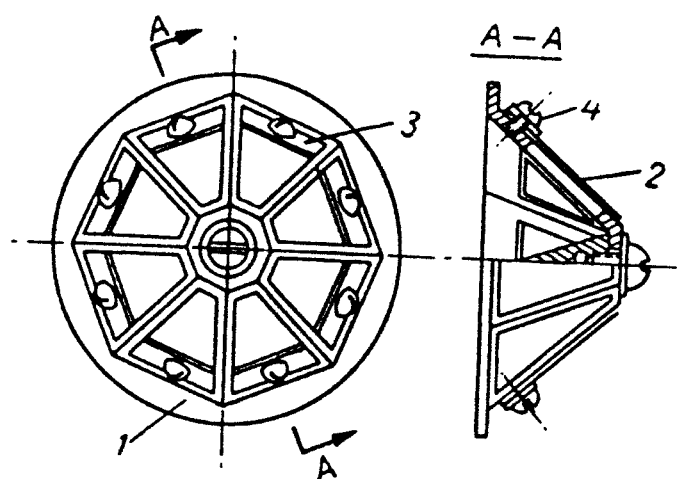


Рис. 31. Коническая клапанная решетка:

1 — корпус решетки; 2 — клапан; 3 — ограничитель отклонения; 4 — винт

Также установились и соотношения между отдельными элементами рабочей трубы, полученные опытным путем (рис. 33):

$$d = (0,5 \div 0,52)D;$$

$$l_{к. с} = (1,0 \div 2,0)D;$$

$$l_{в. т} = (4,5 \div 6,5)D;$$

$$d_p = (1,2 \div 1,35)d;$$

$$l_{р. с} = (0,8 \div 1,5)D;$$

$$l = (0,5 \div 1,5)d.$$

Рассмотрим конструкцию элементов рабочей трубы. Камеры сгорания чаще всего выполняются цилиндрической или эллипсовидной формы. Иногда при цилиндрических или конусных клапанных решетках их делают расширяющимися с последующим переходом в реактивное сопло.

Реактивное сопло может быть коническим (см. рис. 32, 2) или коноидальным (см. рис. 32, 1). Лучшее сопло, безусловно, — коноидальное, имеющее меньшее сопротивление при истечении газа. На коническом сопле для уменьшения гидравлических потерь угол конусности берут обычно не более 15—30°, а место перехода сопла в выхлопную трубу делают плавным.

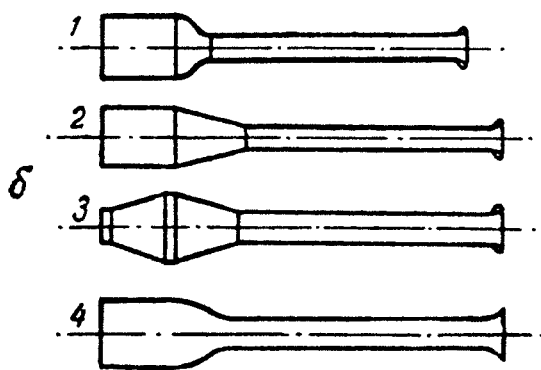
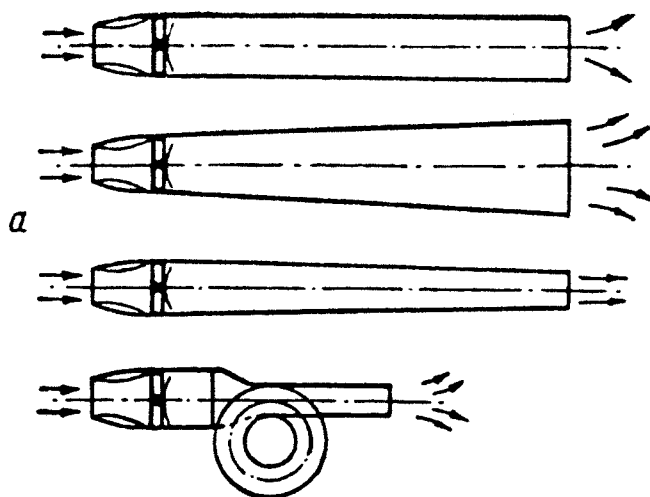


Рис. 32. Схемы рабочих труб ПуВРД:  
 а — возможные формы; б — применяемые  
 формы; 1 — с коноидальным соплом; 2 —  
 с коническим соплом; 3 — с расширяющей-  
 ся рабочей камерой и коническим соплом,  
 4 — с эллипсовидной камерой сгорания

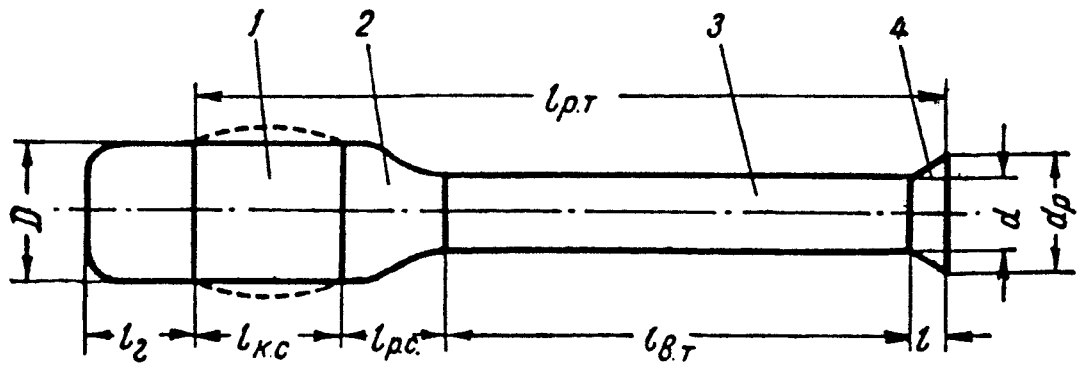


Рис. 33. Соотношения элементов рабочей трубы:  
 1 — камера сгорания; 2 — реактивное сопло; 3 — выхлопная труба;  
 4 — расширяющееся сопло (законцовка выхлопной трубы)

Из реактивного сопла газы поступают в цилиндрическую трубу и движутся по ней в виде газового «поршня», образуя за собой пониженное давление (разрежение). Это разрежение, как мы уже говорили, распространяется до обреза выхлопной трубы, вследствие

чего подсасывается какое-то количество воздуха и со стороны выхлопной трубы (рис. 34). Для уменьшения потерь и увеличения количества подсасываемого воздуха на свободном конце выхлопной трубы делают специальную расширяющуюся законцовку каплеобразного сечения. Выполняют ее и в виде расширяющегося конуса, причем угол его берут не более 20—30°. Поступающий со стороны свободного конца воздух усиливает поджатие смеси в камере сгорания и повышает величину максимального давления.

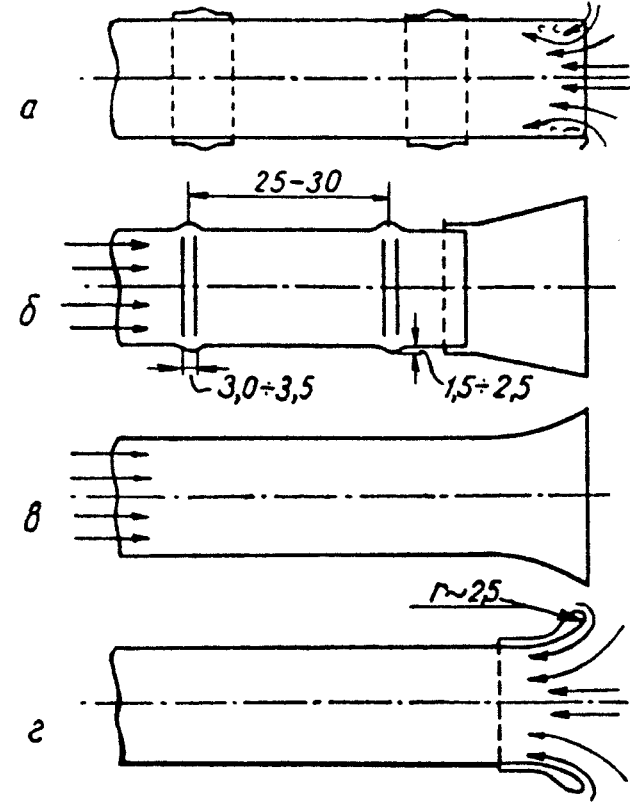


Рис. 34. Формы законцовок выхлопной трубы:  
 а — цилиндрическая; б — коническая;  
 в — коноидальная; г — коноидальная обтекаемая

Для рабочей трубы используют жаропрочные и жаростойкие материалы: Я1Т(ЭЯ1Т), ЭИ437Б, ЭИ417, ЭИ598, ЭИ618(ЖСЗ). Приводим толщины стенок отдельных элементов рабочих труб в зависимости от диаметра камер сгорания.

Диаметр камеры сгорания, мм					
	50	65	75	85	100
Элементы рабочей трубы	Толщина стенок, мм				
Камера сгорания . . . . .	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35
Реактивное сопло . . . . .	0,20	0,25	0,30	0,30	0,35
Выхлопная труба . . . . .	0,15	0,20	0,25	0,30	0,30



Иногда для увеличения прочности рабочей трубы на всей ее длине накатывают ребра жесткости (см. рис. 34, б) или приваривают специальные профилированные пояски (см. рис. 34, а). Толщину материала элементов трубы в этих случаях берут меньше на 0,05—0,10 мм.

В крайнем случае рабочую трубу можно изготовить из листового железа (или очищенной жести), увеличивая толщину на 0,10—0,15 мм. Но из-за образования окалины она быстро выходит из строя. Если двигатель предназначен для демонстрационных целей, рабочую трубу можно изготовить из любой стали с толщиной стенок 0,50—1,0 мм.

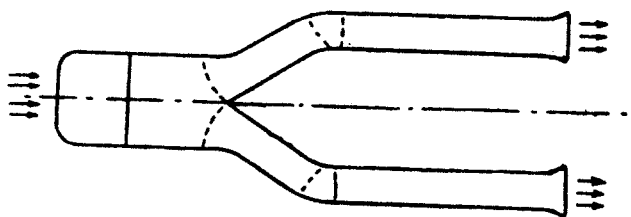


Рис. 35. Рабочая труба с двумя выхлопными трубами

Если толщина материала не обеспечивает необходимую прочность, труба может сплюснуться в момент образования в ней разрежения.

В начале этого раздела мы говорили, что рабочие трубы могут иметь различные формы. Они, в частности, могут быть и с двумя выхлопными трубами; при этом площадь сечения каждой равна половине площади сечения одной выхлопной трубы (рис. 35), которой должен быть снабжен этот двигатель.

Иногда возникает другая необходимость: установить реактивные двигатели в мотогондолы модели — копии многомоторного самолета. Для этого нужны короткие двигатели и поэтому трубу можно изогнуть на  $360^\circ$  примерно так, как показано на рис. 36. Полная длина двигателя уменьшилась более чем на половину.

## Моделирование ПуВРД

В процессе конструирования и создания летающей модели может потребоваться двигатель определенной мощности, которого у вас нет. Нет также и его чертежей, но есть отработанный двигатель (или чертежи) другой мощности.

Предположим, что вы имеете исходный двигатель 1 (рис. 37), развивающий статическую тягу, равную 2 кг.

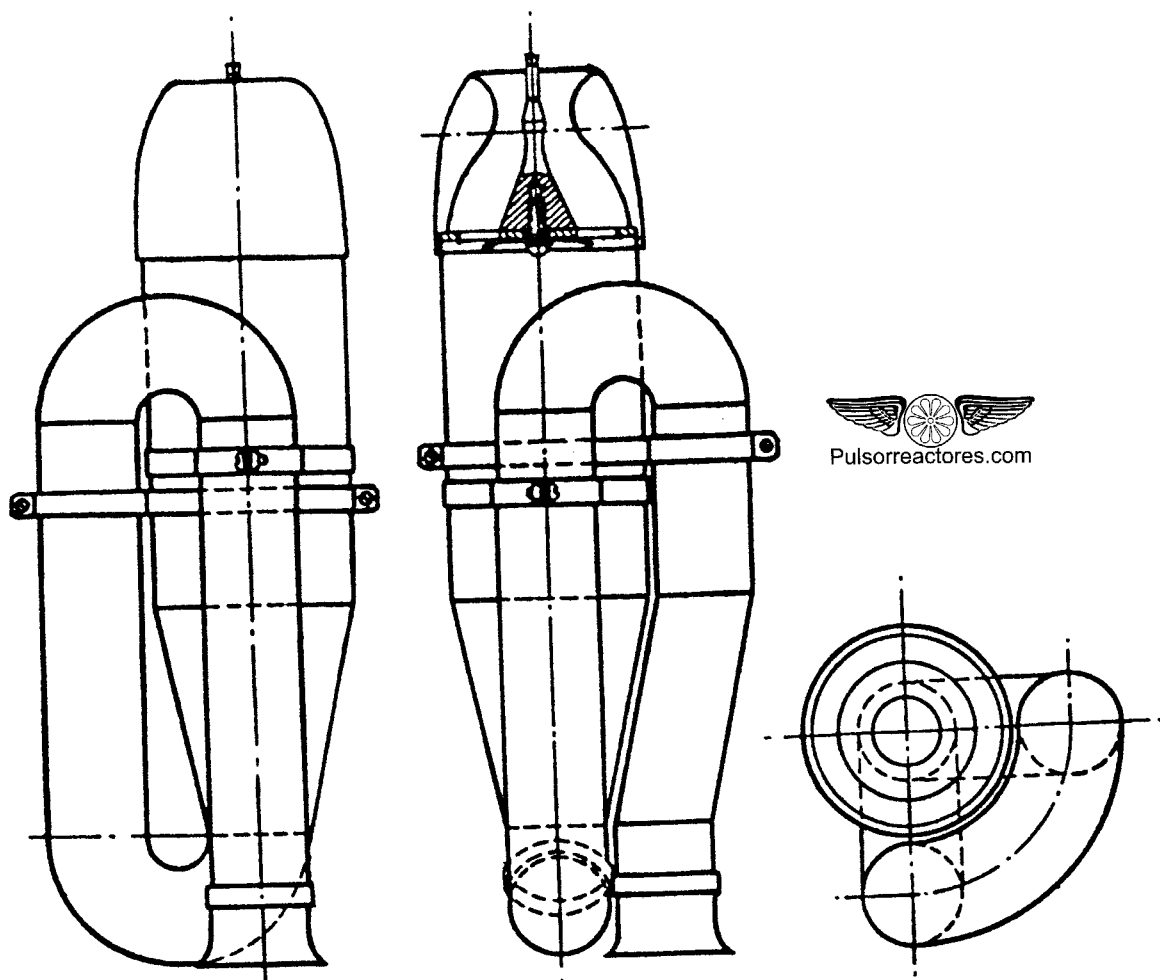


Рис. 36. ПуВРД с изогнутой на 360° выхлопной трубой

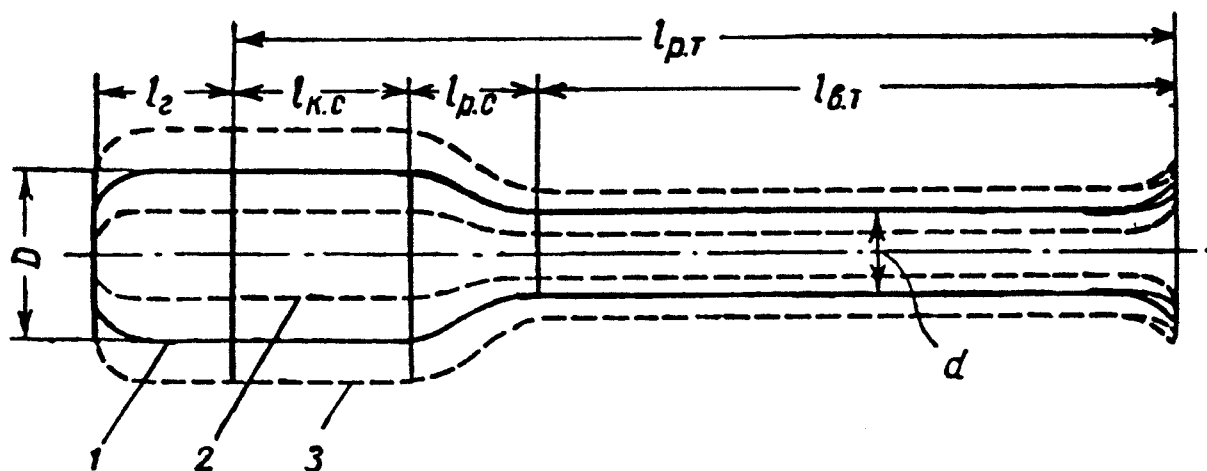


Рис. 37. Изменение размеров ПуВРД:

1 — контур исходного двигателя; 2 — контур двигателя с меньшей тягой, чем у исходного двигателя; 3 — контур двигателя с большей тягой, чем у исходного двигателя;  $l_{\Gamma}$  — длина головки;  $l_{к.с}$  — длина камеры сгорания;

$l_{р.с}$  — длина реактивного сопла;  $l_{в.т}$  — длина выхлопной трубы;

$l_{р.т}$  — длина рабочей трубы.

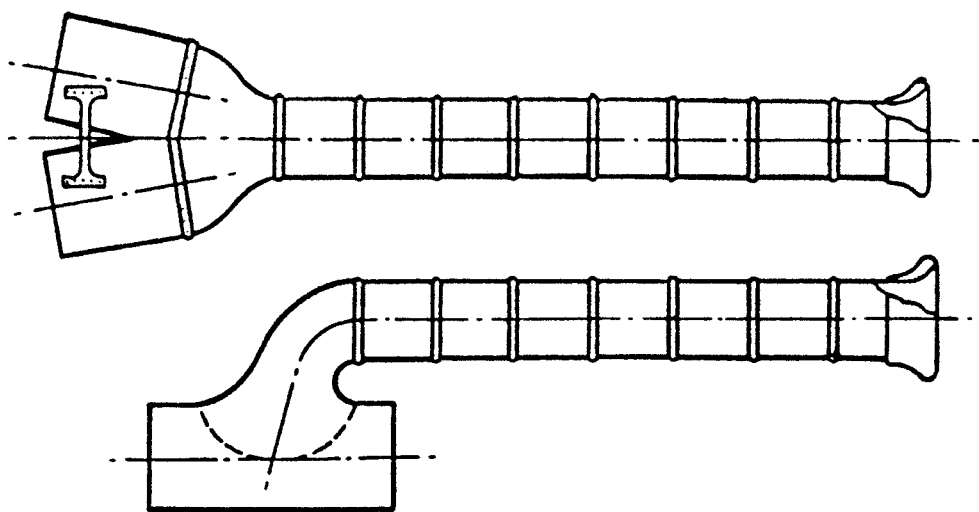


Рис. 38. Рабочие трубы для двух головок

но вам необходим двигатель с тягой 3 кг. В этом случае можно увеличить пропорционально площади всех проходных сечений в 1,5 раза, оставляя неизменным длины элементов рабочей трубы и жесткость клапанов.

Например, у исходного двигателя диаметры камеры сгорания и выхлопной трубы соответственно равны 64 мм и 32 мм, а площади их сечений  $\sim 3200 \text{ мм}^2$  и  $\sim 800 \text{ мм}^2$ , площадь проходного сечения клапанной решетки  $1000 \text{ мм}^2$ . Увеличивая теперь проходные сечения в 1,5 раза, получим площадь сечения камеры сгорания равной  $4800 \text{ мм}^2$ , выхлопной трубы —  $1200 \text{ мм}^2$  и клапанной решетки —  $1500 \text{ мм}^2$ . Размеры рабочей трубы нового двигателя (см. рис. 37, 3) будут равны: диаметр камеры сгорания 78 мм, диаметр выхлопной трубы 39 мм. Длина рабочей трубы осталась той же, не изменилась и жесткость клапанов. Величина отклонения клапанов остается равной величине отклонения клапанов исходного двигателя. Головку двигателя при конструктивной необходимости можно немного увеличить в длину.

При соблюдении всех указанных условий новый двигатель будет развивать тягу в 1,5 раза больше исходного и даже несколько более, так как относительные потери тепла через стенки будут меньше, чем у исходного двигателя, вследствие непропорционального роста объема и площади стенок элементов рабочей трубы. При конструировании двигателя с меньшей тягой, чем у исходного двигателя, все его поперечные сечения необходимо соответственно уменьшить (см. рис. 37, 2).

Если площадь проходного сечения клапанной решетки меняется непропорционально изменению площадей сечений рабочей трубы и сами клапаны изменяют форму и размеры, то необходимо заняться доводкой двигателя — подобрать толщину клапанов, длину камеры сгорания и выхлопной трубы.

Когда требуется двигатель с тягой, в два раза превышающей тягу исходного двигателя, поступают иногда так. Берут в неизменном виде две головки с клапанными решетками исходного двигателя и устанавливают на рабочую трубу с увеличенными в два раза объемами элементов при сохранении общей длины исходного двигателя. Конструкции двух таких труб показаны на рис. 38.

## Глава 4

### КОНСТРУКЦИИ И ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ АВИАМОДЕЛЬНЫХ ПуВРД

Первый отечественный ПуВРД А-5М ЛДП (рис. 39) сконструирован и построен в ленинградском Дворце пионеров А. Анисимовым, В. Скобельцыным, Я. Нильком, В. Метелицыным. С этим двигателем на модели конструкции М. Шарова и А. Анисимова в 1949 г. был установлен первый всесоюзный рекорд скорости полета кордовой модели, равный 110 км/час.

Основные данные двигателя: длина — 760 мм, диаметр камеры сгорания — 48 мм, диаметр выхлопной трубы — 22 мм, вес — 250 г, тяга — до 700 г, топливо — авиационный или автомобильный бензин. Рабочая труба изготовлена из стали ЭЯ 1Т толщиной 0,2 мм точечной сваркой.

Каждый клапан вырезается ножницами по шаблону из ленты У8—У10 толщиной 0,2 мм так, чтобы волокна ленты были направлены вдоль клапана. Кромки клапана шлифуются мелкозернистым бруском. Готовые клапаны приваривают по шаблону строго в соответствии с чертежом к шайбе диаметром 16 мм, вырезанной из нержавеющей стали толщиной 0,1—0,2 мм. Пламегасительная сетка устанавливается для увеличения времени работы клапанов.

Двигатель Д-65-02, показанный на рис. 40, предназначен главным образом для cordовых скоростных моделей. При проектировании его за основу был взят чехословацкий двигатель — Летмо-250. Двигатель имеет хорошую аэродинамическую форму проточной части.

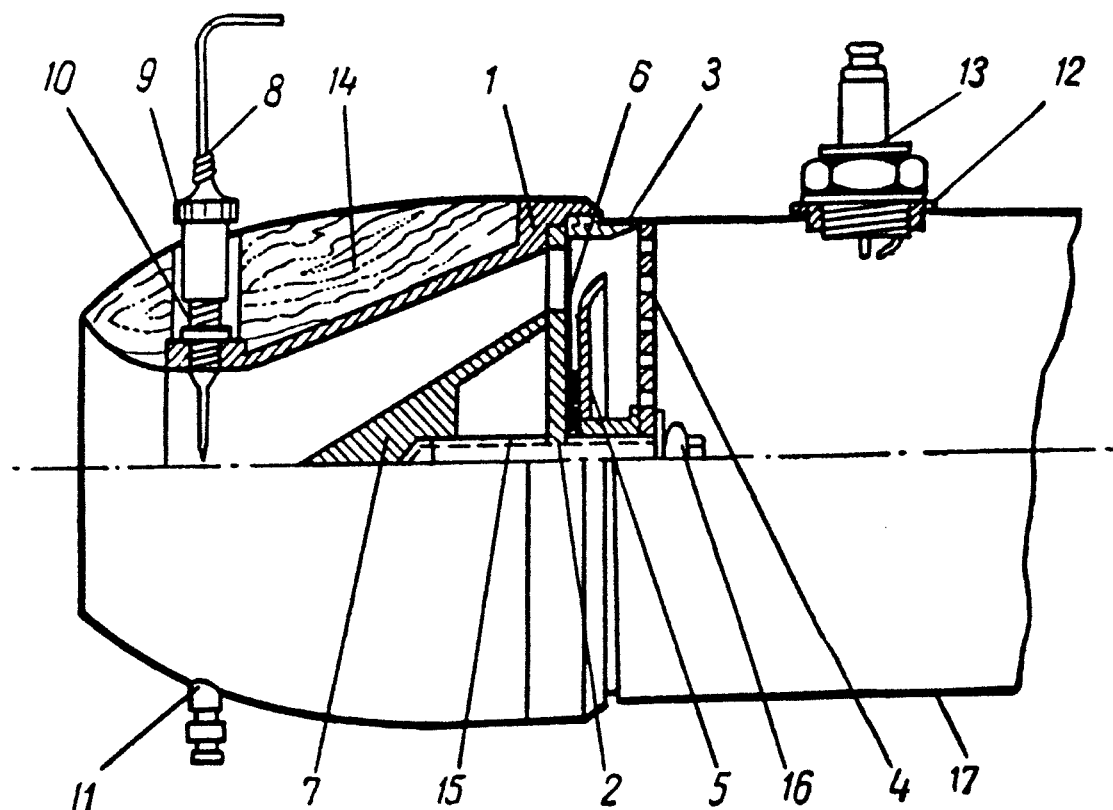
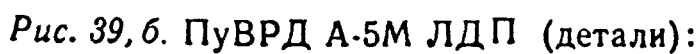


Рис. 39, а. ПувРД А-5М ЛДП — общий вид (обозначение позиций см. на рис. 39, б)

Основные данные двигателя: полная длина — 515 мм, диаметр камеры сгорания — 65 мм, диаметр выхлопной трубы — 33 мм, вес — 220 г, развиваемая тяга — 1700—2000 г, удельный вес 0,11—0,14 г/г тяги, частота циклов — 250 1/сек, максимальное давление в камере сгорания — 1240 мм рт. ст., минимальное давление — 530 мм рт. ст., топливо-авиационный бензин Б-70 и автомобильный бензин без примесей.

Внутренний канал и обтекатель выдавлены на соответствующих оправках из алюминия толщиной 1,0—1,2 мм. Камера сгорания и головка соединяются между собою с помощью резьбового кольца. Диск клапанной решетки имеет большую площадь проходного сечения, что выгодно ее отличает от клапанных решеток других конструкций. Ограничитель отклонения клапанов выдав-



1 — корпус головки (дюралюминий); 2 — диск решетки (дюралюминий); 3 — крепежное кольцо (сталь); 4 — пламегасительная сетка (нержавеющая сталь); 5 — ограничительная шайба (сталь); 6 — клапан; 7 — конус диффузора (дюралюминий); 8 — игла (сталь); 9 — гайка иглы (латунь); 10 — направляющая иглы (латунь); 11 — топливная трубка (латунь).



55

ливается по специальному шаблону из нержавеющей стали толщиной 1,0 мм. Рабочая труба двигателя изготовлена из стали ЭЯ 1Т толщиной 0,25—0,2 мм. Швы в три ряда выполнены точечной сваркой. Реактивное сопло по специальной оправке выдавлено на токарном станке. Законцовка выхлопной трубы имеет каплеобразную форму в сечении.

Двигатель РАМ-1 (реактивный авиамодельный) (рис. 41) конструкции С. Башкина и М. Васильченко выпускался серийно.

Основные данные двигателя: тяга — до 1500 г, вес — 320 г, удельный вес — 0,213 г/г тяги, длина двигателя — 865 мм, диаметр камеры сгорания — 65 мм, диаметр выхлопной трубы — 34 мм, расход топлива — до 1,5 г/сек, топливо — авиационный бензин Б-70 и автомобильный бензин.

Головка двигателя крепится к рабочей трубе резьбой. Рабочая труба изготовлена из стали ЭЯ 1Т толщиной 0,2 мм точечной сваркой. Стальное резьбовое кольцо соединено с камерой сгорания также точечной сваркой.

К недостаткам двигателя относится сравнительно малая его тяга и большая длина. Малая тяга обусловлена прежде всего низкой частотой циклов и большими гидравлическими потерями во входном канале головки и рабочей трубе. Раздельные входные каналы головки, кроме того, ухудшают перемешивание топливно-воздушной смеси. Двигатель чаще всего устанавливался на кордовые летающие модели.

Над устранением недостатков двигателя РАМ-1 много работал мастер спорта И. Иванников.

Взяв за основу серийный двигатель РАМ-1 с тягой 1,2—1,3 кг, он создал свой, новый двигатель РАМ-И2 с высокими характеристиками (рис. 42).

Основные данные двигателя: тяга — 2,4—2,5 кг, длина — 790 мм, диаметр камеры сгорания — 70 мм, диаметр выхлопной трубы — 39 мм, вес двигателя с шасси — 403 г, удельный вес — 0,15—0,16 г/г тяги, удельная лобовая тяга — 195—200 г/см<sup>2</sup>, топливо — авиационный бензин Б-70 и автомобильный бензин без примесей.

Наружная оболочка головки двигателя (см. рис. 42) выклеена на оправке из четырех слоев материи казеиновым клеем; снаружи и изнутри загрунтована эмали-



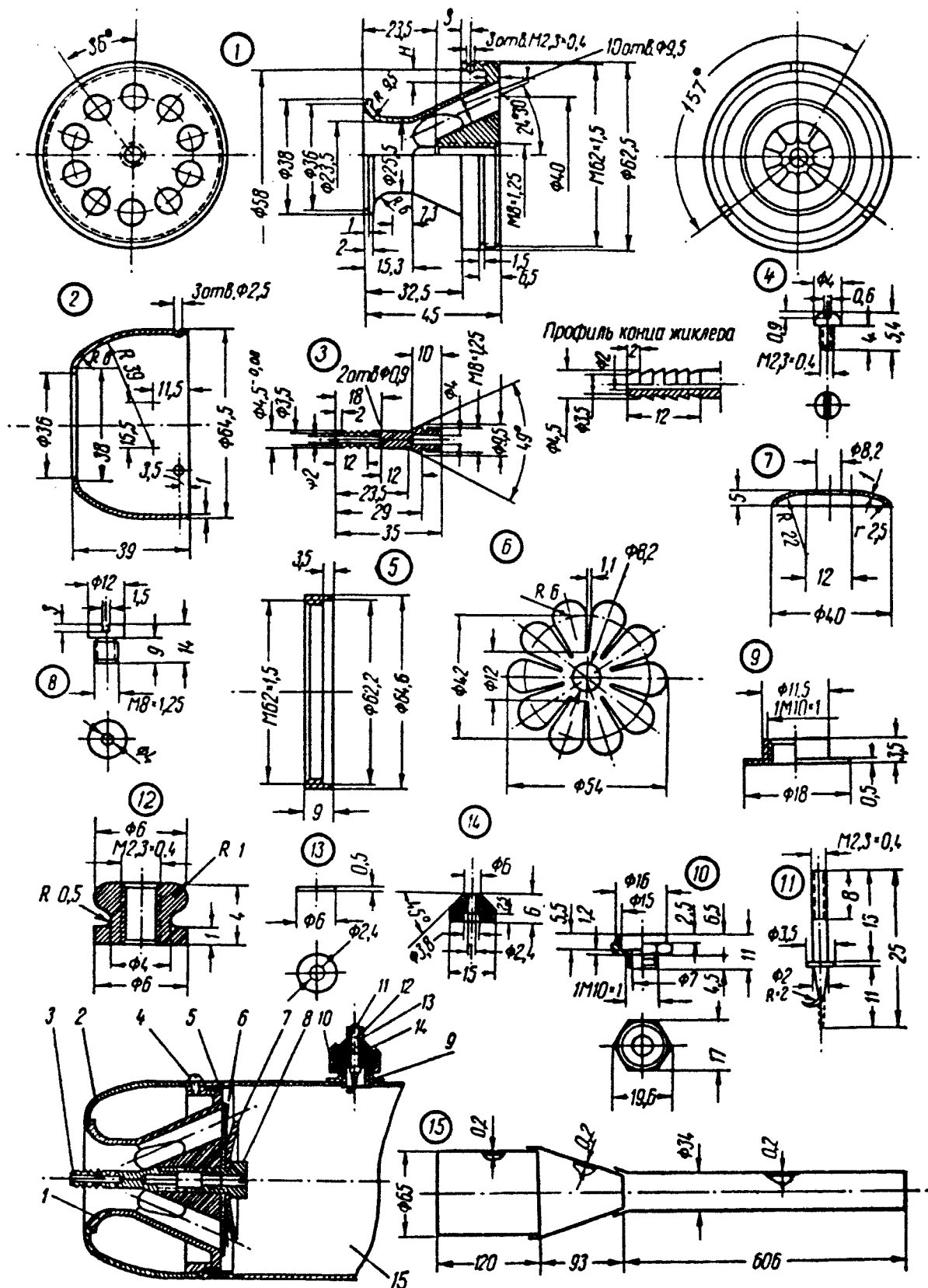


Рис. 41. Авиамодельный ПуВРД РАМ-1:

1 — корпус головки (дюралюминий Д-16); 2 — обтекатель (алюминий); 3 — форсунка (латунь); 4 — винт (сталь); 5 — кольцо (сталь); 6 — клапан (сталь ЭИ-100); 7 — ограничительная шайба (сталь); 8 — винт (сталь); 9 — втулка для свечи (сталь); 10 — корпус свечи (сталь); 11 — электрод (сталь); 12 — гайка (сталь); 13 — шайба (медь); 14 — изолятор (слюда или прессованный асбест); 15 — рабочая труба (нержавеющая сталь ЭЯ 1Т)



том. Внутренний канал — конфузорный участок и задняя стенка бака — изготовлен из целлулоида толщиной 1 мм. Задняя кромка внешней оболочки усилена изнутри пояском из жести с отверстиями под винты для крепления к клапанной решетке.

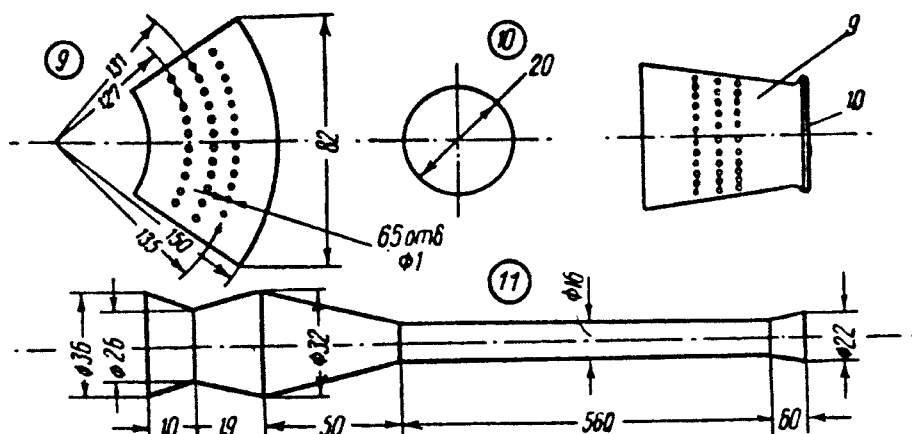
Корпус клапанной решетки изготовлен из дюралюминия. Входные окна расточены вручную. Клапаны толщиной 0,2 мм и рессоры (0,2—0,25 мм) выполнены из стали ЭИ-100 или ЭИ-442. Клапаны лежат на входных окнах с перекрытием в 1,5 мм. Центральное отверстие клапана вырублено с помощью пробойника, а междуклапанные прорезы пропилены вулканитовым наждачным кругом толщиной 1 мм. Наружные части клапанов вырезаны ножницами и зашлифованы мелкозернистым бруском. Рессоры изготовлены аналогичным образом, а в клапанную решетку они подбираются и по числу и по диаметру с таким расчетом, чтобы при работе двигателя на земле пламя не пробивало во входной канал. Крепится головка к корпусу клапанной решетки по ободку четырьмя винтами М2,6.

Двигатель А-7 (рис. 43) конструкции А. Анисимова. С этим двигателем модель конструкции Э. Смирнова в 1951 г. установила три всесоюзных рекорда — дальности, продолжительности и высоты полета (чертеж модели см. на стр. 84).

Двигатель можно устанавливать только на модели свободного полета, так как он обладает небольшой тягой, но малым весом и большим сроком работы клапанов.

Основные данные двигателя: длина — 715 мм, диаметр камеры сгорания — 32 мм, диаметр выхлопной трубы — 16 мм, тяга — 200 г, вес — 50 г, если рабочая труба изготовлена из стали толщиной 0,1 мм, 60 г — из стали толщиной 0,15 мм, 75 г — из стали толщиной 0,2 мм, расход топлива — 0,25—0,30 г/сек, удельный вес — 0,25 — 0,375 г/г тяги, топливо — авиационный и автомобильный бензин без примесей.

Головка изготовлена из дюралюминия или электрона. Входной канал цилиндрический и при изготовлении отверстие растачивается сквозным. С задней стороны врезано и закернено дюралюминиевое ребро толщиной 1 мм, которое разделяет левое и правое входные окна и на которое ложатся концы клапанов.



1 — регулировочная игла (стальная проволока); 2 — гайка иглы (латунь); 3 — направляющая втулка иглы (латунь); 4 — корпус головки (дюралюминий или электрон); 5 — жиклер (латунь); 6 — ограничитель отклонения клапана (сталь). 7 — клапан (стальная лента У7 — У10); 8 — винт; 9 и 10 — детали предохранительного конуса; 11 — рабочая труба

Рабочая труба двигателя изготавливается из стали Я1Т (ЭЯ 1Т) толщиной 0,1—0,2 мм или нелуженой жести толщиной 0,3 мм точечной сваркой.

Собирается двигатель следующим образом. На головку надевается пламегасительная сетка, а затем она на клею АК-20 или аэролаке вставляется в камеру сгорания. В том случае, когда двигатель отрегулирован (подобрано число отверстий на сетке), передняя кромка пояски камеры сгорания завальцовывается на буртик головки. Ориентировочно количество отверстий должно быть равно 65, но может быть немного больше или меньше. Когда отверстий больше чем нужно, двигатель будет работать только от свечи. В этом случае пламегасительную сетку необходимо переделать.

Основные характеристики отечественных ПуВРД приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ СОВЕТСКИХ АВИАМОДЕЛЬНЫХ ПуВРД

Название	Тяга, кг	Ориентировочная частота, гц	Вес, кг	Общая длина, мм	Диаметр камеры сгорания, мм	Диаметр выхлопной трубы, мм
А-5МЛДП	0,70	—	0,250	760	48	22
А-7	0,20 ÷ 0,25	—	0,060	650	32	16
РАМ-1	1,50	150	0,320	865	65	34
РАМ-2	2,50	160/180	0,420	750	80	40
Д-65-02	1,70 ÷ 2,00	250	0,220	515	65	33
РАМ-И2	2,40 ÷ 2,50	—	0,400	790	70	39

## Глава 5

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ АВИАМОДЕЛЬНЫХ ПуВРД

Технология изготовления, оборудование и необходимые приспособления не являются чем-то строго определенным и зависят от технических возможностей и навыков исполнителя. Поэтому приводимое здесь оборудование, инструмент и приспособления, а также технология изготовления деталей двигателя даны исключительно для ориентировки и могут быть изменены в зависимости от конкретных условий.

В основное оборудование, которое необходимо при изготовлении, входят: токарно-винторезный и сверлильный станки, наборы резцов, сверл (от 0,5 до 10 мм), метчиков и плашек (диаметром от 2,6 до 5 мм) и набор слесарного инструмента. Необходим также и самодельный аппарат для точечной сварки тонких листов.

Основные детали головки двигателя можно изготавливать обработкой на токарном станке с последующей слесарной доводкой или выдавливать на специальных оправках. Наиболее технологично выдавливание деталей (корпуса диффузора, обтекателя, а также конoidalного реактивного сопла) с помощью давления или гладилки на оправках, закрепленных в шпинделе токарного станка. Выдавленные детали имеют достаточно точные размеры и высокую чистоту обработки. На оправках производится выдавливание профиля стяжного хомутика и упорного паза на камере сгорания.

Клапанная решетка — это узел, от которого в большей степени зависят тяга двигателя и продолжительность его непрерывной работы. Поэтому необходимо детали клапанной решетки изготавливать внимательно и тщательно, в строгом соответствии с чертежом. Ко всем клапанным решеткам предъявляются одни и те же требования. Поэтому расскажем только о дисковой клапанной решетке как наиболее распространенной.

Диск клапанной решетки изготавливается чаще всего из алюминиевых сплавов марок Д-16Т, Д-1Т, В95 или из нержавеющей стали. Материал может быть или прутковый или листовой толщиной 2,5—3,5 мм. Нельзя выполнять диски решеток из алюминия, так как он не выдерживает температурных напряжений и прогибается, а места посадки клапанов выбиваются клапанами.

Изготовление диска из листового материала начинается с разметки заготовки. После разметки высверливается центральное отверстие. Затем заготовку насаживают на оправку и обтачивают по внешнему диаметру, после чего проделывают входные окна. Это удобнее всего выполнять с помощью специального шаблона, изготовленного из стали и имеющего отверстия по форме входных окон. Шаблон и заготовка стягиваются вместе винтом, и в заготовке высверливаются, а затем опиливаются по шаблону входные окна. Можно выпиливать входные окна лобзиком для

металла, оставляя небольшой припуск для последующей обработки надфелями.

После опиловки контуров входных окон необходимо их кромки со стороны входа смеси закруглить.

Плоскость прилегания клапанов рекомендуется притереть на притирочной плите, пользуясь для этого специальной притирочной пастой.

Плоскость прилегания клапанов должна быть чистой, без царапин, задиров.

Изготовление клапанов — одна из ответственных операций. Лучшие способы изготовления клапанов: штамповка, после которой производится только зашлифовка кромок, и электронскровой метод, после которого не требуется никакой доработки.

Для изготовления клапанов типа «звездочки» нужно обязательно иметь кондуктор, выполненный точно по размерам клапана, с двумя приливами под стопоры и стяжные винты. Заготовки клапанов вырезаются из ленты с небольшим припуском по окружности. Затем с помощью пробойника пробиваются центральные отверстия. Из 7—10 штук заготовок набирается пакет, вставляется в кондуктор и стягивается тремя винтами — центральным и двумя на приливах. Кондуктор с заготовками укрепляется на суппорте шлифовального станка. На шпинделе закрепляется вулканитовый диск толщиной 0,8—1,0 мм и после выверки кондуктора на суппорте производится прорезка межклапанных пазов. Последующая обработка сводится к закруглению клапанов, что можно сделать или на шлифовальном станке другим камнем толщиной не менее 5 мм, или обрезанием ножницами с последующей зашлифовкой всех кромок мелкозернистым бруском.

При изготовлении клапанов следите за тем, чтобы они не подвергались короблению. Покоробленные клапаны не годны к использованию. Надо, чтобы клапаны при наложении на рабочую поверхность диска плотно к ней прилегали — только в таком случае можно надеяться на их хорошую работу.

Продолжительность работы клапанов зависит от того, в каком направлении по ленте они вырезаны, т. е. как расположены волокна ленты — вдоль клапана или поперек. Опыт показывает, что если волокна ленты проходят вдоль клапанов, то последние работают более

продолжительное время, чем те, у которых волокна находятся поперек. Кроме того, жесткость клапанов с поперечным и продольным расположением волокон неодинакова и это сказывается на работе решетки. Таким недостатком обладают все клапаны типа «звездочки», выполненные из одного куска ленты. Этого нет у клапанов, изготовленных отдельно (см. рис. 39).

Ограничитель отклонения клапанов (ограничительная шайба) изготавливается на токарном станке или выштамповывается с помощью пуансона и матрицы. Заготовка для штамповки вырезается из нержавеющей или углеродистой листовой стали толщиной 0,8—1,0 мм.

Рабочая труба двигателя во время работы находится под постоянным воздействием высоких температур и циклических изменений давления. Поэтому при ее изготовлении необходимо добиваться прочности и герметичности сварочных швов.

Рабочую трубу можно выполнить несколькими способами.

Первый из них самый сложный — штамповка гидравлическим давлением из одной тонкостенной трубы-заготовки, помещенной в специальную форму. При этом рабочая труба получается без швов, с необходимыми плавными переходами.

Второй способ — штамповка и сварка по длине двух одинаковых заготовок рабочей трубы. Рабочая труба получается герметичной с хорошими аэродинамическими качествами проточной части.

Наконец, наиболее распространенный способ — изготовление рабочих труб из отдельных элементов соединением их газовой, роликовой или наиболее часто применяемой точечной сваркой.

Прежде чем рассматривать изготовление рабочих труб, составленных из отдельных элементов и сваренных точечной сваркой, познакомимся с аппаратом для точечной сварки, принципиальная электрическая схема которого дана на рис. 44, а общий вид сварочного аппарата показан на рис. 45.

В процессе точечной сварки наложенные друг на друга листы сжимаются двумя электродами, по которым пропускается ток большой силы в течение короткого промежутка времени. Вследствие большого переходного сопротивления в месте контакта свариваемых частей



происходит сильный нагрев. Образовавшееся тепло расплавляет поверхностный тонкий слой металла, а прилегающие к нему зоны доводит до пластического состояния. В этот момент выключают ток и производят сжатие электродов. Для получения сварочной точки хорошего качества необходимо, чтобы ее диаметр был в 2—3 раза больше толщины свариваемого материала.

Приводим данные трансформаторов действующих сварочных аппаратов.

Для сети с напряжением 127 в (предложено А. Анисимовым): трансформаторное железо — сечением 30 см<sup>2</sup>, первичная обмотка — 200 витков провода диаметром 1,2 мм, вторичная обмотка — изолированная шина сечением 0,5 × 60 мм, 4 витка.

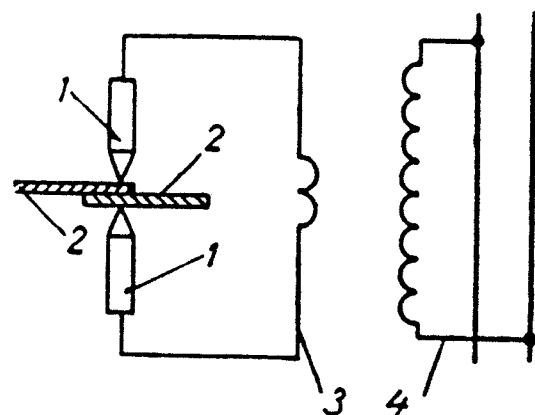


Рис. 44. Принципиальная электрическая схема аппарата для точечной сварки:

1 — электроды; 2 — свариваемые детали; 3 — вторичная обмотка трансформатора; 4 — первичная обмотка трансформатора

Для сети с напряжением 220 в (предложено И. Ивановым): трансформаторное железо — сечением 20 см<sup>2</sup>, первичная обмотка — 275 витков провода диаметром 1,2 мм, вторичная обмотка — 2,5 витка шины сечением 25 мм<sup>2</sup>. Так как сваривать приходится листы различной толщины, для регулировки силы сварочного тока целесообразно использовать реостат, включенный последовательно первичной обмотке.

Все шины и электроды обычно изготавливаются из красной меди. Концы электродов притуплены и имеют площадки диаметром 0,8—1,0 мм.

Для изоляции шин, к которым подводится ток от вторичной обмотки, аппарат собран на текстолитовом основании. Прерывание тока в первичной обмотке обычно производится ножным выключателем — фабричным или самодельным.

Прежде чем сварить заготовки рабочей трубы, берут две пластинки материала, из которого выполнены подготовленные детали для сварки, и делают пробное сваривание. Для этого наложенные одна на другую пластины кладут на нижний контакт, прижимают верхним кон-

таким и, нажав ногой выключатель, включают в цепь первичную обмотку. Сделав сварную точку, стараются разъединить пластины. Пользуясь реостатом, добиваются наиболее качественного соединения. В процессе сварки контакты могут подгорать или на них может образовываться налет. В этих случаях сварку прекращают и зачищают контакты.

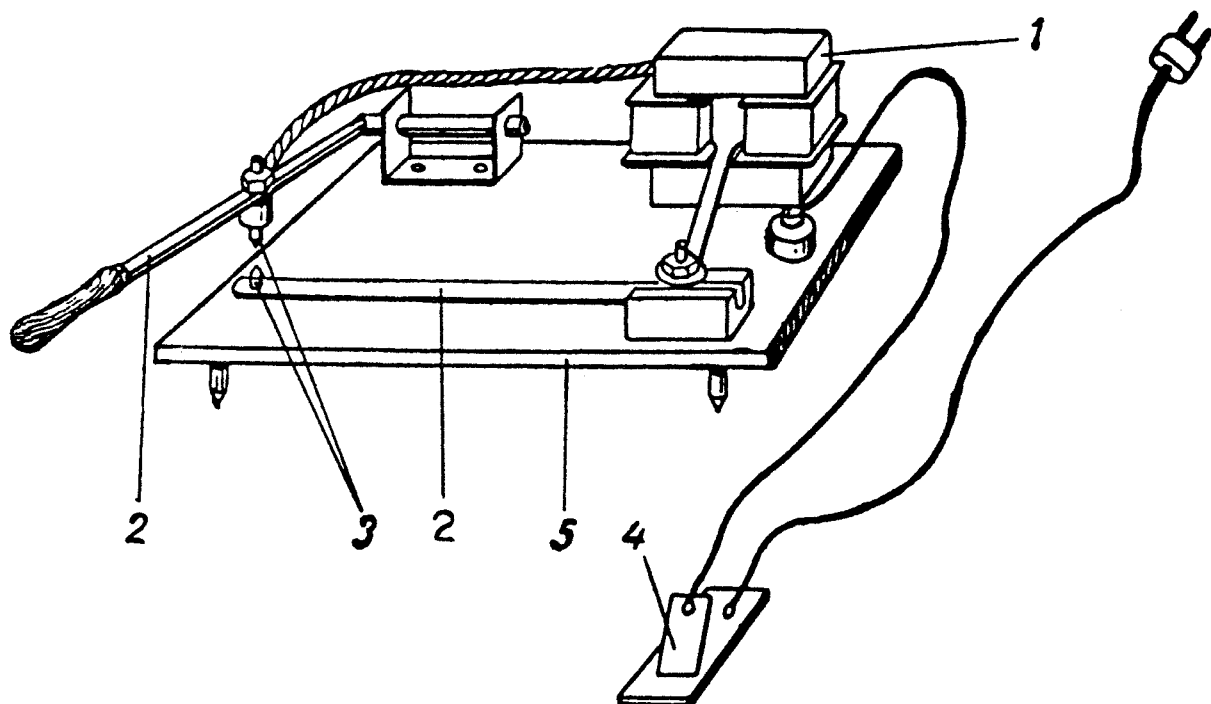


Рис. 45. Аппарат для точечной сварки:

1 — трансформатор; 2 — шины; 3 — контакты; 4 — выключатель; 5 — основание

При разметке заготовок для деталей рабочей трубы нужно предусматривать припуск на сварной шов шириной 5—6 мм. Заготовки аккуратно вырезают, выправляют и сгибают в соответствии с чертежом. Прочертив на одной из кромок ширину сварочного шва, приступают к сварке.

Вначале делают по одной точке на концах и в середине шва, затем между промежутками и т. д. по всей длине шва. Надежнее всего делать три ряда сварных точек, располагая точки в шахматном порядке. Расстояние между точками лучше всего делать не более 1,5—2 мм.

Выхлопную трубу желательно сваривать на оправке (из красной меди или латуни), так как она имеет сравнительно большую длину и малый диаметр и ее трудно

установить неперекошенной. На оправке заготовку выхлопной трубы укрепляют проволокой, проверяют правильность наложения шва и вместе с оправкой устанавливают под контакты электродов. По всей длине шва предварительно наносят сварочные точки через 10—15 мм, после чего снимают проволоку, вынимают оправку, подравнивают трубу и продолжают сварку.

Перед сваркой детали трубы необходимо подогнать друг к другу. Камера сгорания должна плотно входить в широкую часть реактивного сопла. Кромки выхлопной трубы следует немного развальцевать, чтобы они были направлены вдоль образующей реактивного сопла.

Детали камеры сгорания лучше всего сваривать между собой в следующем порядке: вначале соедините камеру сгорания и реактивное сопло, затем приварите к соплу выхлопную трубу. Первые точки нужно наносить с диаметрально противоположных сторон.

В том случае, когда головка к камере сгорания крепится с помощью хомутика, накатку упорного буртика на камере сгорания делают до сварки с реактивным соплом.

Накатку ребер на камере сгорания и выхлопной трубе производят до сварки элементов на несложном приспособлении, состоящем из штанги с накатным пояском и плиты с пазом. Штангу обычно берут диаметром 15—20 мм и длиной 700—800 мм, а плиту размером 150 × 200 × 8 мм.

Отверстие под свечу (если она устанавливается) вырезают до сварки камеры сгорания.

## Глава 6

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВИАМОДЕЛЬНЫХ ПуВРД

Необходимые навыки по эксплуатации ПуВРД приобретаются практикой. В зависимости от того, насколько хорошо освоена техника обращения с двигателем и тщательно подготовлены к запуску двигатель, необходимое оборудование и приспособления зависят легкость запуска и безопасность.

Для запуска двигателя нужно подготовить испытательный стенд, систему питания, воздушный насос, систему зажигания и, в отдельных случаях, трубу-надставку и пусковой бачок.

Мы уже привели схемы испытательных стенда и станка-тележки (см. рис. 6, 8). Испытательным стендом целесообразнее пользоваться только в лабораторных условиях, а станком-тележкой — в различных условиях, в том числе и в полевых.

Стенд или станок-тележку надо установить на стол с металлической обивкой таким образом, чтобы газы выбрасывались в безопасном направлении.

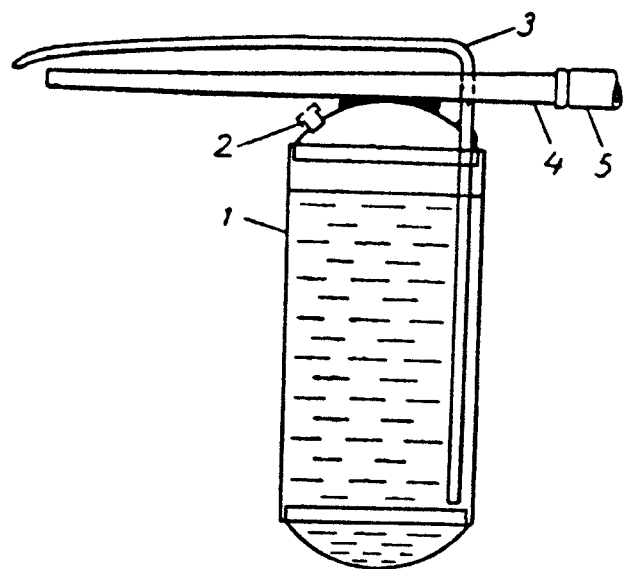


Рис. 46. Пусковой бачок-пульверизатор:

1 — топливный бачок; 2 — пробка с дренажным отверстием; 3 — топливная трубка диаметром 1,8—2 мм; 4 — наконечник; 5 — резиновый шланг

В качестве топливного бачка для испытания нужно использовать специально изготовленный для этого бачок (см. рис. 9). Он должен иметь емкость не более 0,25 л и укрепляться на специальной штанге, чтобы его можно было поднимать и опускать. Располагать бачок надо спереди (на 20 см) и слева (на 10 ÷ 15 см) от головки двигателя. Уровень топлива перед запуском должен быть на 10 мм ниже жиклера фор-

сунки. Топливную трубку лучше брать хлорвиниловую с внутренним диаметром 3,0—3,5 мм.

Для подачи топливно-воздушной смеси в камеру сгорания во время запуска обычно используют обыкновенный автомобильный насос. В лабораторных условиях, где имеется возможность заряжать воздушные баллоны, используют при запуске сжатый воздух из баллонов. Независимо от способа подачи воздуха — от насоса или от баллона — на конце резинового шланга закрепляют специальный наконечник с расплющенной выходной частью. Иногда применяют специальный пусковой бачок-пульверизатор (рис. 46).

Пусковой бачок-пульверизатор имеет наконечник, на который насаживается резиновый шланг, и выводную топливную трубку. Наконечник и выводная топливная трубка припаяны к корпусу бачка, причем концевая часть топливной трубки может изменять свое положение относительно обреза наконечника. Когда через наконечник прокачивается воздух, нажатием пальца на выводную топливную трубку можно регулировать количество топлива, подаваемого в камеру сгорания.

Примерные размеры пускового бачка-пульверизатора следующие: диаметр — 45—50 мм, длина наконечника — 130—150 мм, диаметр выходного отверстия наконечника — 3,0—3,5 мм, диаметр выводной топливной трубки — 1,8—2,0 мм.

Для первоначального воспламенения топливно-воздушной смеси в камере сгорания используется электрическая свеча.

Высокое напряжение на свечу подается от переносного магнето или от катушки высокого напряжения, работающей от аккумуляторов. Электрические свечи применяются как промышленного производства, так и самодельные.

Когда нет возможности установить на двигатель свечу (например, двигатель размещен внутри фюзеляжа), первоначальное воспламенение производят от спички или от пламени паяльной лампы. Категорически воспрещается раскалять камеру сгорания паяльной лампой, так как это опасно в противопожарном отношении и может вывести из строя клапаны.

Перед запуском подсоедините проводник высокого напряжения к свече, после чего направьте наконечник резинового шланга на отверстия форсунки таким образом, чтобы при прокачивании воздуха от насоса из них подсасывалось топливо, и образующейся топливно-воздушной смесью продуйте двигатель. Не прекращая продувку, включите напряжение в цепи свечи.

В случае запуска двигателя с помощью пускового бачка-пульверизатора его наконечник с топливной трубкой направьте непосредственно на клапанную решетку, минуя отверстия форсунки.

Быстрота запуска зависит прежде всего от качества и количества смеси, поступающей в двигатель при про-

дудке. Необходимое качество смеси характеризуется пламенем с голубоватым оттенком. Когда горение происходит только на конце трубы и не переходит в камеру сгорания, что бывает при очень богатой смеси, нужно продуть двигатель чистым воздухом, направив наконечник резинового шланга от воздушного насоса прямо на отверстия решетки.

В период подачи в камеру сгорания топливно-воздушной смеси с помощью насоса всегда помните о том, что возможны случаи попадания горячих газов в диффузор головки и воспламенения смеси в нем вследствие выхода из строя клапанов или за счет неравномерного их прилегания к рабочей поверхности диска. Поэтому запускающий должен находиться от головки двигателя на расстоянии не менее полуметра. При воспламенении смеси в диффузоре головки надо прекратить подачу воздуха насосом, спокойно сдуть пламя, а затем проверить правильность сборки клапанной решетки.

Выше было сказано, что ПуВРД с короткими трубами (менее 550—600 мм) даже при хорошей регулировке топливной системы не всегда быстро запускаются. Чтобы облегчить запуск, используют трубы-надставки, вставляемые на время запуска в выхлопную трубу. Труба-надставка, длина которой равна примерно половине длины выхлопной трубы, уменьшает частоту циклов и увеличивает глубину разрежения, способствуя полноте наполнения камеры сгорания свежей смесью. После запуска труба-надставка убирается и двигатель рывком выходит на свой режим (на большую частоту).

После того как двигатель выйдет на режим и устойчиво заработает, подача воздуха насосом прекращается, выключается напряжение зажигания и отсоединяется проводник высокого напряжения от свечи.

Трудность запуска двигателя в большинстве случаев вызывается следующими наиболее вероятными неисправностями:

- не подсасывается топливо из отверстий форсунки или из подводящей топливной трубки, так как засорены отверстия форсунки, жиклера или перекрыто иглой отверстие подводящей топливной трубки;

- не поступает топливно-воздушная смесь в камеру сгорания, так как наконечник от насоса не направлен на

отверстия форсунки и поэтому не создается необходимого подсоса топлива; возможно также чрезмерное прижатие клапанов к решетке, и насос не обеспечивает необходимого давления для их открытия;

— не подается ток высокого напряжения на свечу.

Работа двигателя с перебоями говорит о неравномерной подаче топлива вследствие засорения форсунки.

Регулировка режима работы двигателя в большой степени зависит от системы питания, и для каждой конкретной системы питания должна быть своя регулировка качества смеси. Поэтому при проведении испытания на стенде выявляют обычно только максимально возможную тягу, которую может развить двигатель, и определяют расход топлива.

При определении максимальной тяги необходимо вначале топливный бачок постепенно опускать по штанге, т. е. обеднять смесь. Как только тяга двигателя, замеряемая по динамометру, начнет падать, опускание бачка надо приостановить. Затем постепенно нужно поднимать бачок, контролируя величину тяги по динамометру. С поднятием бачка, т. е. с постепенным обогащением смеси до какого-то предела, тяга двигателя будет расти и, достигнув максимума, начнет падать вследствие переобогащения смеси. После этого положением топливного бачка нужно установить режим работы двигателя на максимальную тягу и определить расход топлива.

В дальнейшем, когда двигатель установлен на летающую модель, имеющую определенную конструкцию топливной системы, регулировать качество смеси, а следовательно, и двигатель на максимальную тягу, следует регулировочной иглой или подбором жиклеров с различными диаметрами отверстий.

Двигатель на испытательном стенде правильнее всего останавливать путем закрытия перекрывного крана или (пережатием) топливной трубки. Останавливать двигатель перекрытием отверстия жиклера регулировочной иглой не рекомендуется, так как при последующих запусках потребуются заново регулировать подачу топлива.

После запуска и регулировки двигателя на стенде его можно устанавливать на летающую модель.

# УСТАНОВКА АВИАМОДЕЛЬНЫХ ПуВРД НА ЛЕТАЮЩИЕ МОДЕЛИ САМОЛЕТОВ

## Особенности работы ПуВРД на летающих моделях

К особенностям реактивного двигателя, влияющим на компоновочную схему модели, относятся: отсутствие винта, наличие мощной струи выхлопных газов с высокой температурой и с большой скоростью, большие расходы горючего по сравнению с поршневыми моторчиками и, особенно, высокая температура стенок камеры двигателя.

Отсутствие винта на реактивном двигателе прежде всего позволяет разместить последний внутри фюзеляжа модели и совместить ось выхлопной трубы с продольной осью модели, благодаря чему изменение величины тяги будет незначительно изменять балансировку модели. Самому фюзеляжу в этом случае можно придать обтекаемую форму, но изготавливать его нужно из нержавеющей стали толщиной 0,15—0,20 мм или из дюралюминия толщиной примерно 0,2—0,3 мм методом выколотки или штамповки.

Установка двигателя сверху фюзеляжа или под крылом неблагоприятно сказывается на продольной балансировке и аэродинамическом сопротивлении модели, так как при этом создается большой момент от реактивной силы относительно центра тяжести и увеличивается мишень модели, но фюзеляж при этом можно изготавливать из обычных материалов.

При расположении двигателя над фюзеляжем необходимо применять разнесенное вертикальное оперение или направлять выхлопную трубу над килем. Для уменьшения влияния нагретых стенок реактивного двигателя на детали летающей модели между ними устанавливают специальные отражательные экраны; иногда к деталям модели с помощью жаростойкого лака или клея (например БФ-2) приклеивают тонкий листовый асбест.

Вследствие значительного расхода топлива модели с ПуВРД имеют топливные баки большого объема. Их



нужно устанавливать ближе к центру тяжести модели, чтобы при выработке топлива центровка не изменялась.

Специфика полета моделей на корде налагает дополнительное требование — учет действия центробежных сил на режим работы двигателя.

На кордовых реактивных моделях двигатель обычно размещают или внутри фюзеляжа или над фюзеляжем. В «большой авиации» существует неписанный закон о том, что двигатель не должен быть силовым элементом конструкции планера. Но на кордовых реактивных моделях получила распространение схема, в которой в качестве фюзеляжа используется рабочая труба двигателя, что значительно упрощает конструкцию модели, снижает ее полетный вес и уменьшает лобовое сопротивление.

Простейшие топливные системы, в которых топливо в диффузор головки подается главным образом за счет разрежения, не обеспечивают необходимую однорежимную работу двигателя из-за выработки горючего из бака и действия центробежных сил.

В том случае, когда и обеспечивается равномерная подача топлива в диффузор двигателя кордовой модели, на качество топливно-воздушной смеси все равно влияет действие центробежной силы. Топливо на выходе из отверстий форсунки, когда оно находится еще в виде достаточно крупных частичек, под действием центробежной силы отбрасывается к внешней стенке диффузора. В результате объем диффузора перед клапанной решеткой заполняется неравномерно перемешанной топливно-воздушной смесью: у внешней стенки диффузора — обогащенной, у внутренней — обедненной.

Это явление легко обнаружить, если посмотреть на работавшие какое-то время клапаны. Клапаны, расположенные у внешней стенки камеры сгорания, выглядят как новые, без цветов побежалости, так как они лучше охлаждаются. Клапаны, расположенные у внутренней стенки камеры сгорания, имеют цвета побежалости; обычно они быстрее выходят из строя вследствие того, что недостаточно хорошо охлаждаются обедненной смесью. Поэтому, чтобы уменьшить неравномерность поступающей в камеру сгорания смеси, рекомендуется размещать топливную форсунку ближе к внутренней стенке диффузора и ближе к входной кромке головки;

можно использовать одно- или двухлепестковый неподвижный завихритель. Лепестки завихрителя должны быть узкими и иметь угол наклона не менее  $45^\circ$ .

## Топливные системы летающих моделей с ПуВРД

Чтобы поддерживать выбранный режим работы двигателя постоянным (при постоянном обдуве или при постоянной скорости полета), необходимо обеспечить постоянство расхода топлива. Это требование по-разному выполняется на моделях кордовых и свободного полета.

На моделях свободного полета, не совершающих в воздухе резких эволюций, примерно постоянного качества смеси, поступающей в камеру сгорания двигателя, можно добиться за счет использования в топливной системе поплавковой камеры или вакуумного бачка, которые поддерживают уровень топлива в расходном бачке или в поплавковой камере постоянным.

В системе с поплавковой камерой (рис. 47) топливо из основного бачка 1 по трубке 3 идет самотеком к поплавковой камере 2 до тех пор, пока поплавков 4 не поднимется до определенной высоты и не перекроет клапаном 5 отверстие трубопровода. Как только уровень топлива в расходном бачке упадет, поплавков опустится, клапан отойдет от отверстия трубопровода и топливо вновь начнет поступать в камеру.

Система с вакуумным бачком (рис. 48) работает следующим образом. После заливки основного бачка 1 топливом заливная горловина 6 плотно закрывается резиновой пробкой. По трубке 8 топливо поступает в расходный бачок 2; небольшая часть топлива выливается через дренажное отверстие 4, вследствие чего в бачке 1 образуется разрежение; при определенном разрежении топливо перестает вытекать. При запуске двигателя топливо вначале вырабатывается из расходного бачка до уровня перегородки 3. При дальнейшей работе двигателя на смену выработавшемуся топливу в расходный бачок поступает топливо из основного бачка; одновременно из расходного бачка воздух в виде пузырьков поступает под перегородкой в дренажную трубку 7, а через нее в основной бачок 1. Давление над топливом в основном бачке повысится и часть его вновь через труб-

ку 8 поступит в расходный бачок. Уровень топлива  $h$  в расходном бачке будет оставаться постоянным во время выработки топлива, так как он определяется высотой перегородки 3.

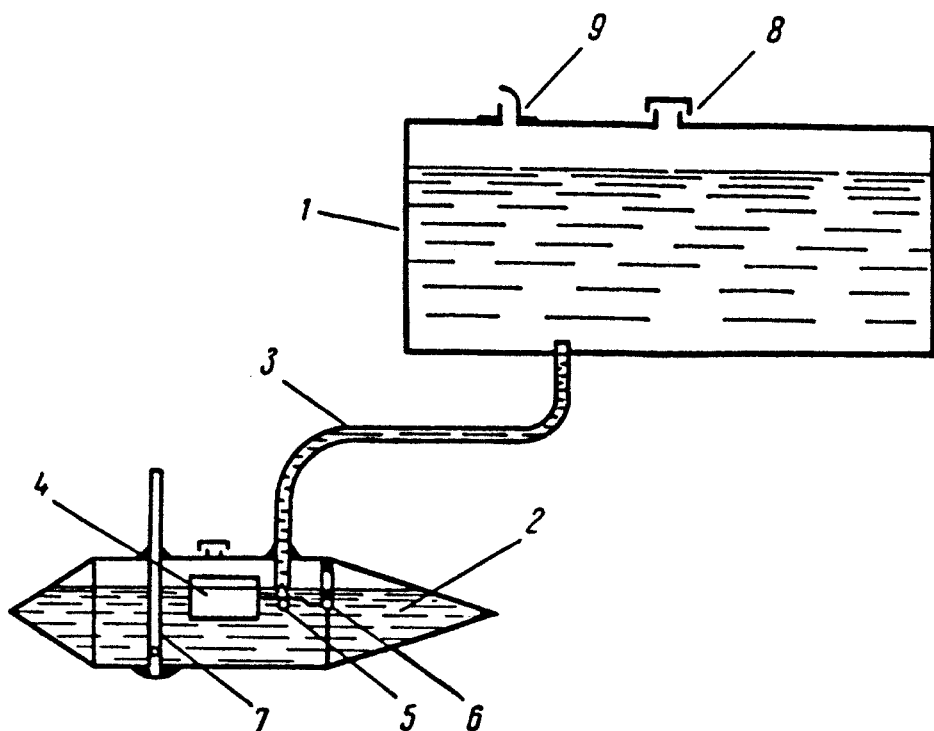


Рис. 47. Принципиальная схема топливной системы с поплавковой камерой:

1 — основной топливный бачок; 2 — поплавковая камера; 3 — топливная трубка; 4 — поплавок; 5 — клапан; 6 — шарнир; 7 — топливная трубка к двигателю; 8 — заливная горловина; 9 — дренажное отверстие

Система с вакуумным бачком должна быть герметичной. Если герметичность нарушится (например, основной бачок закрыт пробкой неплотно), то система работать не будет и топливо выльется через дренажное отверстие 4.

Особенность работы элементарного карбюратора — непропорциональный рост расхода топлива с увеличением расхода воздуха. С увеличением расхода воздуха через внутренний канал (через головку двигателя) расход топлива растет быстрее, чем расход воздуха, что приводит к постепенному обогащению и переобогащению смеси, а следовательно, к нарушению выбранного режима работы двигателя. Поэтому на моделях с приведенными топливными системами перед выпуском моделей в воздух необходимо немного обеднить смесь,

чтобы в воздухе на установившейся скорости полета качество смеси приближалось бы к наивыгоднейшему, при котором двигатель работает устойчиво, а тяга близка к максимальной.

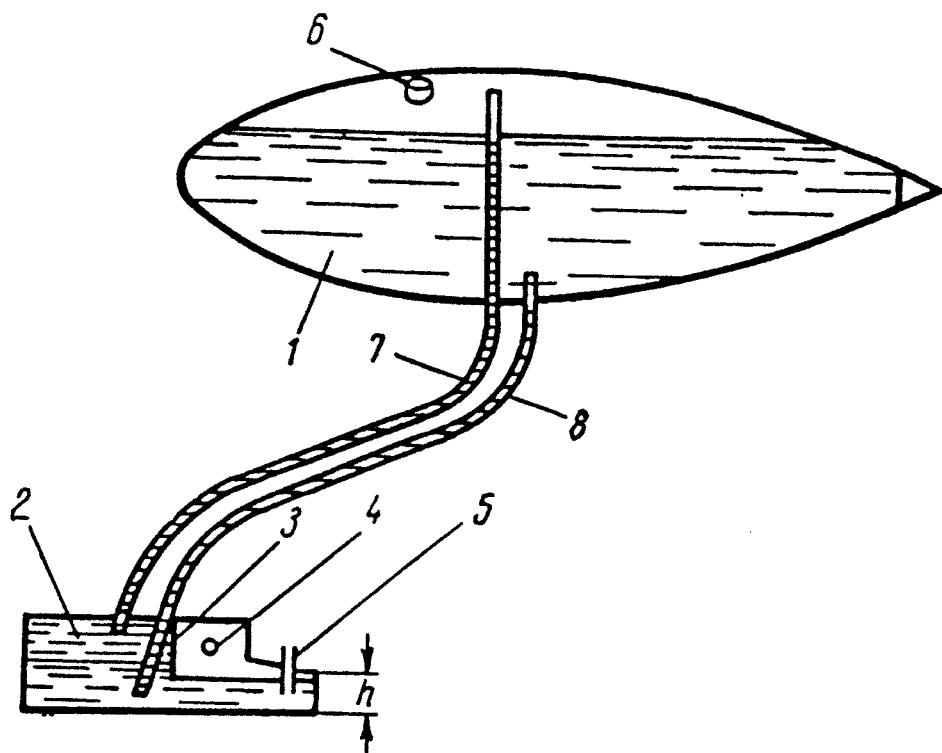


Рис. 48. Схема топливной системы с вакуумным бачком:

1 — основной бачок; 2 — расходный бачок; 3 — перегородка; 4 — дренажное отверстие; 5 — топливная трубка к двигателю; 6 — заливная горловина; 7 — дренажная трубка; 8 — топливная трубка

Топливо в топливных системах кордовых моделей находится под постоянным действием центробежного ускорения, изменяющего качество топливно-воздушной смеси.

При выходе модели на режим установившейся скорости полета при использовании топливной системы, показанной на рис. 49, топливно-воздушная смесь будет переобогащена. С выработкой топлива смесь начнет постепенно обедняться и приближаться к наивыгоднейшей. Тяга двигателя будет возрастать и на каком-то режиме достигнет своего максимума, а модель разовьет наибольшую скорость полета. При дальнейшем обеднении смеси (при выработке столба топлива  $h_2$ ) тяга двигателя падает, уменьшается и скорость полета и может

наступить момент, когда разрежение, создаваемое потоком воздуха в узкой части диффузора, будет недостаточным для подсоса топлива, и двигатель остановится.

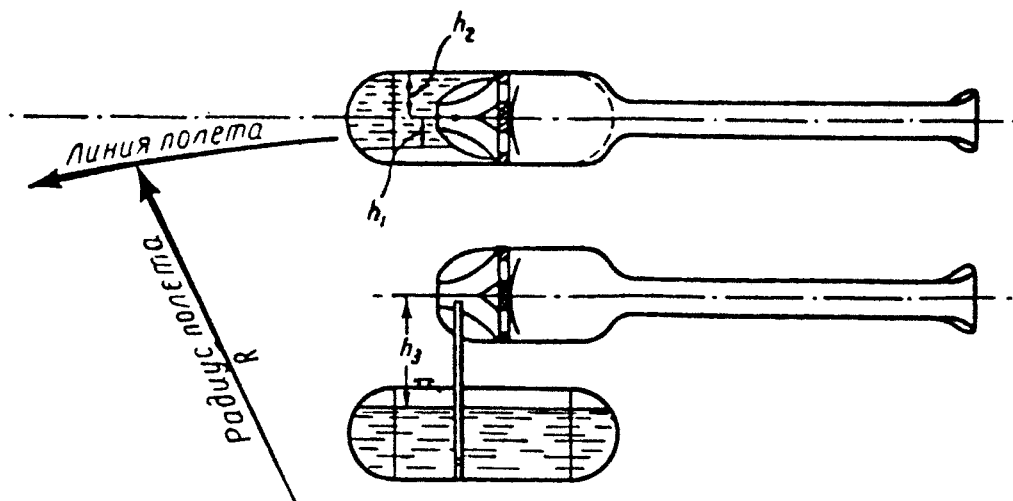


Рис. 49. Схема топливной системы с расположением бачка ниже двигателя

Следовательно, основное влияние на работу двигателя оказывает центробежная сила, развиваемая столбом топлива  $h_1 + h_2$ . Изменение высоты подсоса  $h_3$  мало сказывается на режиме работы двигателя.

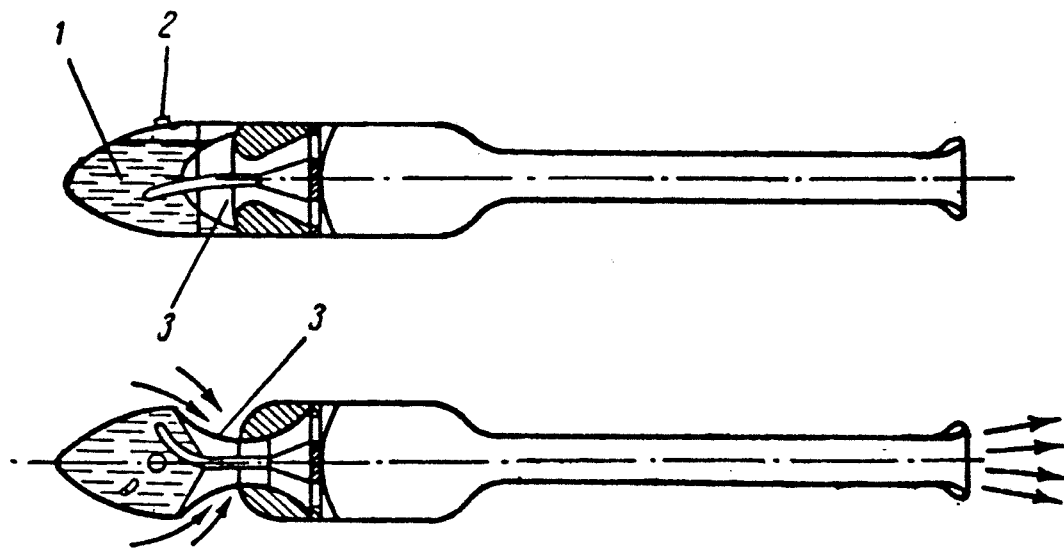


Рис. 50. Схема топливной системы с расположением бачка перед двигателем:

1 — топливный бачок; 2 — заливная горловина; 3 — воздухозаборники

Схемы топливных систем, показанные на рис. 50 и 51, имеют более рациональное размещение топлива (уменьшена высота подсасывания, компактность бачков), но

в них также не устранено действие центробежных сил, развиваемых топливом, на режим работы двигателя. Кроме того, выработка топлива из головок изменяет положение центра тяжести модели.

На рис. 52 и 53 даны схемы топливных систем с размещением топливных баков с внутренней стороны двигателей (если смотреть из центра круга).

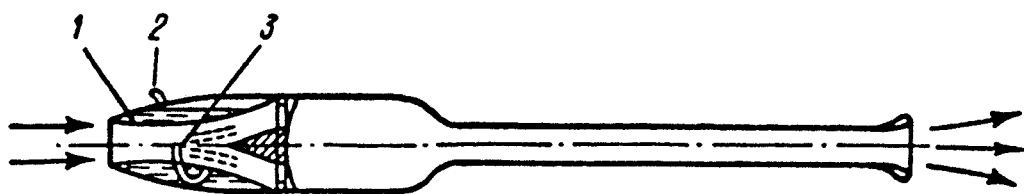


Рис. 51. Схема топливной системы с размещением топлива в головке:

1— топливный бачок; 2— заливная горловина; 3— форсунка

На первой схеме топливный бачок выполнен отдельной деталью и укреплен на обтекателе головки. Топливная трубка пропущена почти через всю длину бачка, так как по мере выработки горючего центровка модели смещается назад, нос модели поворачивается во внутрь окружности полета и топливо отливает к задней внутренней стенке. Между стенкой бачка и камерой сгорания проложен лист асбеста толщиной 1 мм.

На второй схеме под топливный бачок используется часть объема фюзеляжа, сделанного из дюралюминиевой трубки. Все указанные бачки вмещают по 140—160 см<sup>3</sup> топлива.

Преимущество указанных на рис. 52 и 53 топливных систем заключается в том, что их бачки расположены ближе к центру тяжести модели и расход горючего меньше сказывается на центровке. Но постоянного качества топливно-воздушной смеси здесь также достичь нельзя.

Уменьшить влияние изменения количества топлива в бачке на качество топливно-воздушной смеси на какой-то установившейся скорости полета можно с помощью обратного клапана, создавая в топливном бачке постоянное повышенное давление (рис. 54). Отбор давления производится из камеры сгорания при помощи обратного клапана 1, перепускающего часть газа из камеры сгорания в топливный бачок. Клапан от камеры сгорания должен находиться на расстоянии 15—20 мм, а трубку,

соединяющую камеру сгорания с клапаном, надо располагать на расстоянии 10—15 мм от клапанной решетки.

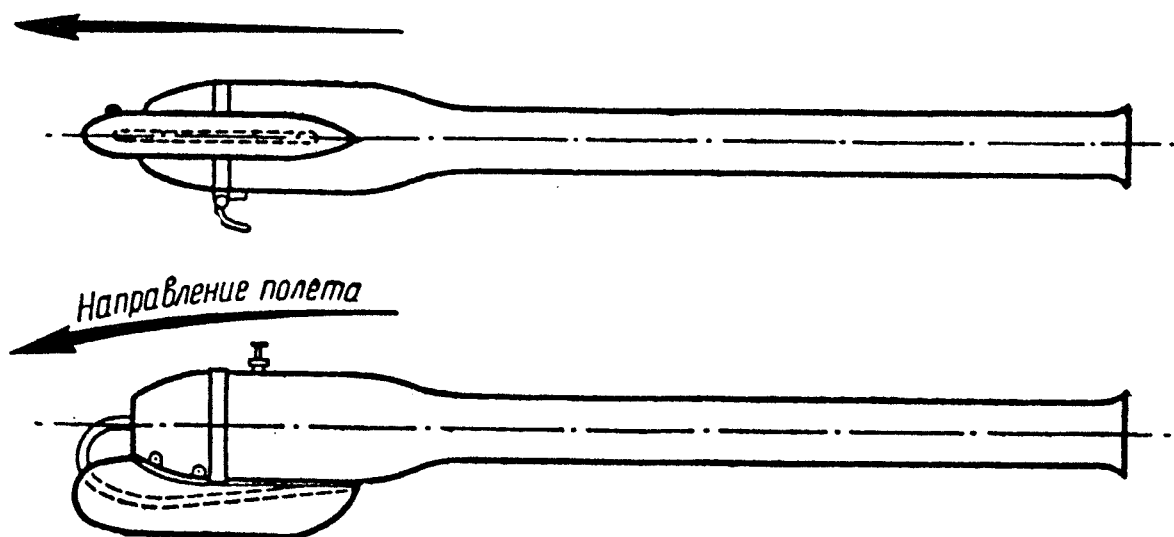


Рис. 52. Схема топливной системы с расположением бачка на головке двигателя

Конструкция клапана предельно проста: между двумя половинками корпуса зажат пластинчатый стальной клапанок толщиной 0,05—0,06 мм. Трубку наддува

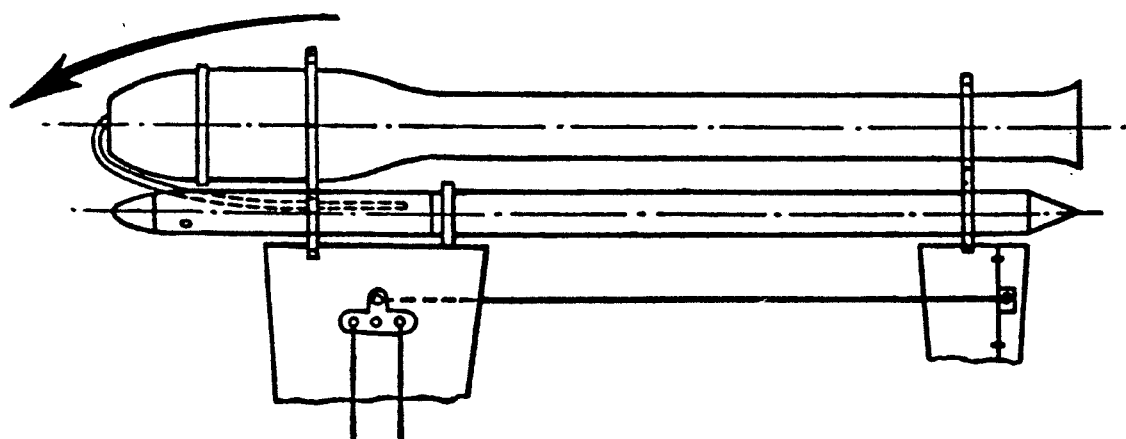


Рис. 53. Схема топливной системы с размещением топлива в фюзеляжной балке

от клапана до топливного бачка нужно делать длиной не менее 100 мм и диаметром не более 2 мм. Если расстояние до топливного бачка меньше указанной длины, то трубку необходимо свернуть в спираль. После заливки топлива в бачок заливная горловина 5 и перекрывной кран 3 плотно закрываются. Регулировочную иглу 4 после определения ее положения лучше не трогать, чтобы не нарушить регулировку.

Запускать двигатель удобнее всего с помощью бачка-пульверизатора (см. рис. 46). При подаче в двигатель топливно-воздушной смеси он будет давать серию вспышек, создавая тем самым повышенное давление в бачке. 2. Продолжая подачу в двигатель смеси, постепенно открываем перекрывной кран 3 и переводим двигатель на непрерывный режим работы от основного бачка 2. Номинальное давление в бачке достигается после нескольких серий вспышек в камере сгорания. Качество смеси регулируется иглой 4.

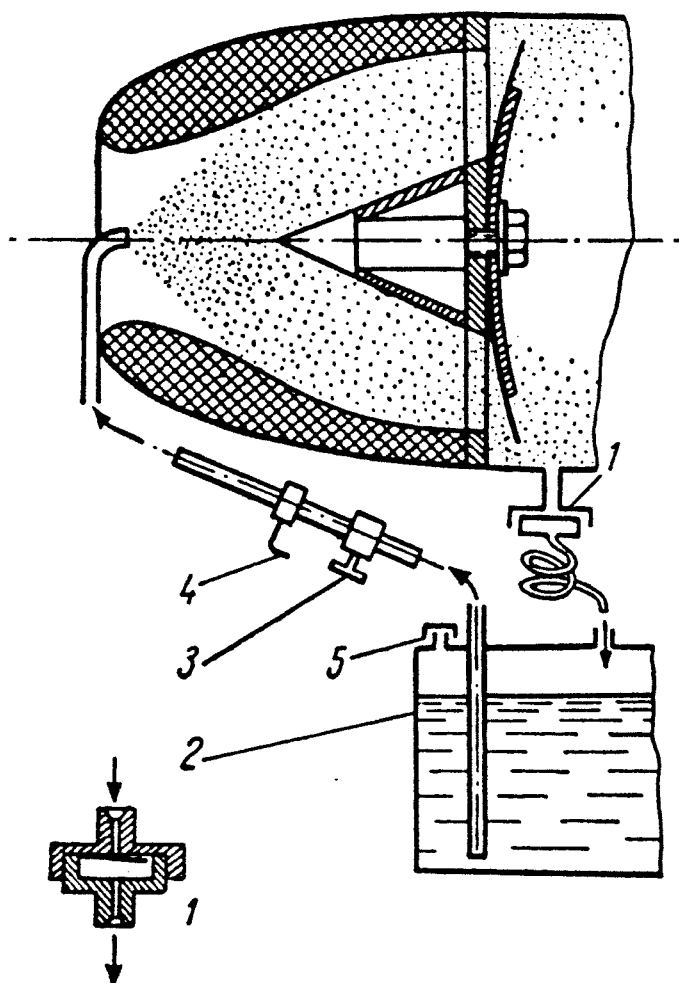


Рис. 54. Схема топливной системы с подачей топлива под давлением:

1 — обратный клапан; 2 — топливный бачок; 3 — перекрывной кран; 4 — регулировочная игла; 5 — заливная горловина

Последняя схема топливной системы (рис. 55) имеет бачок с несложным полуавтоматическим устройством для дозирования топлива, поступающего в двигатель, в зависимости от развиваемой топливом центробежной силы. Этот топливный бачок на модели лучше размещать таким образом, чтобы обрез топливной трубки находился левее осевой линии двигателя. Регулирующее устройство устанавливается внутри топливного бачка. Оно состоит из одного или нескольких анероидов 6, клапана 2 с пластинчатой пружиной 7 и регулировочного винта 5. Анероидные коробочки, укрепленные на пружине, прижимаются к концу винта 5. На земле режим работы двигателя регулируется иглой его карбюратора, в воздухе — винтом 5.

Принцип действия регулирующего устройства следующий. На земле двигатель работает на режиме максимальной тяги. В воздухе с увеличением скорости полета



центробежная сила, развиваемая топливом, начнет возрастать, давление на стенки анероидов 6 увеличится и они будут сжиматься, уменьшая сечение между клапаном 2 и седлом топливной трубки 3. Количество топлива

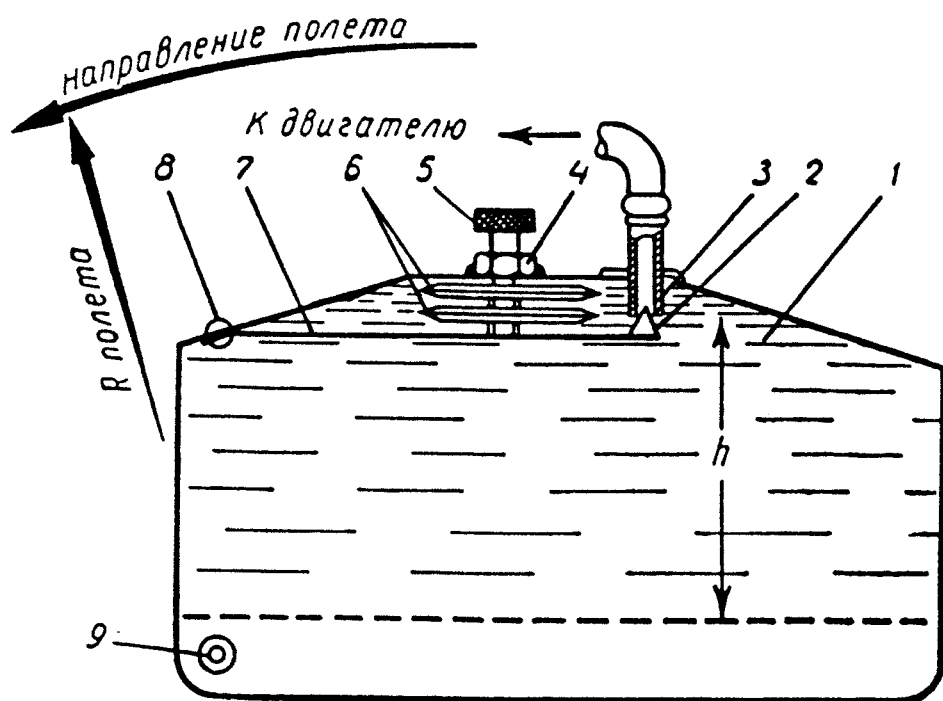


Рис. 55. Схема топливного бака с устройством для дозирования топлива:

1 — топливный бак; 2 — клапан; 3 — топливная трубка с седлом; 4 — гайка, припаянная к стенке бака; 5 — регулировочный винт; 6 — анероиды; 7 — пластинчатая пружина; 8 — узлы крепления пружины; 9 — заливная горловина

поступающего в двигатель, останется прежним или станет немного большим, чем было отрегулировано на земле, так как увеличивается и расход воздуха через двигатель. С выработкой топлива из бака высота столба топлива  $h$  будет уменьшаться. Уменьшаться будет и давление топлива на анероиды, и они, разжимаясь, постепенно будут увеличивать проходное сечение между клапаном и трубкой, и расход топлива останется неизменным.

Некоторой сложности конструкции и кропотливой работы по подбору числа анероидов, угла конусности клапана 2 и регулировки качества смеси не следует бояться. Это делается один раз.

Монтаж топливных систем должен проводиться самым тщательным образом. Течь в соединениях не допускается. Соединения должны быть надежными, выдерживающими вибрационные нагрузки.

ПуВРД могут работать практически с одинаковой эффективностью на авиационном бензине марки Б-70 и на автомобильном бензине, на спирте, керосине и ацетоне. Предпочтение из перечисленных топлив можно отдать авиационному бензину Б-70 и автомобильному бензину как наиболее доступным. Не рекомендуется использовать бензин с антидетонационными присадками.

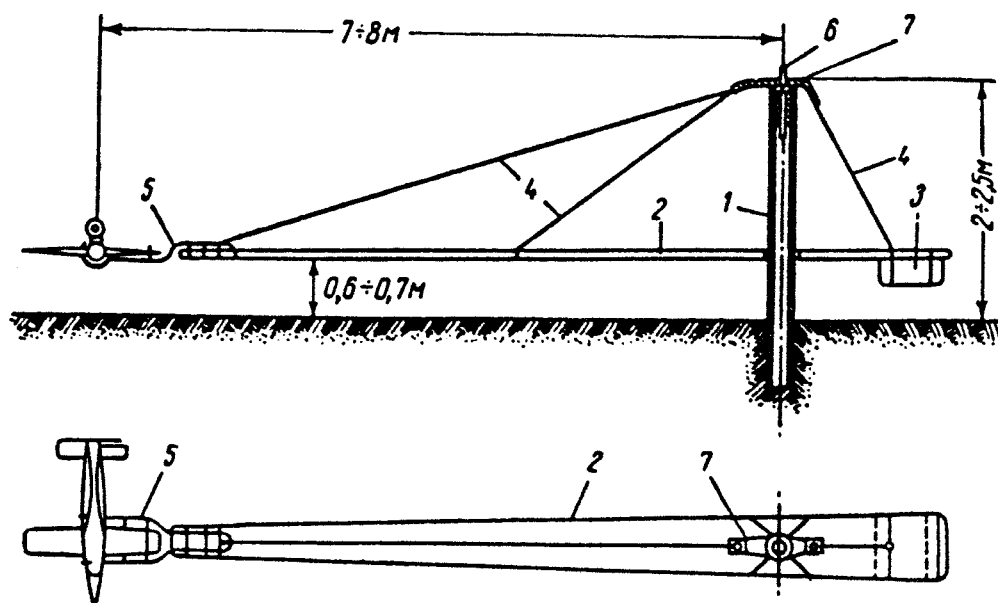


Рис. 56. Стенд для испытания топливных систем кордовых моделей:

1 — штанга; 2 — рычаг; 3 — противовес; 4 — расчалки; 5 — кронштейн; 6 — штырь; 7 — скоба

Приводим стенд для испытания топливных систем кордовых моделей (рис. 56). Стенд не имитирует полностью условий, в которых находится модель в воздухе. Но на нем можно отработать ряд этапов по доводке топливной системы.

## Летающие модели с реактивными двигателями

Приводим наиболее интересные конструкции реактивных моделей — кордовых и свободного полета.

Первая модель — свободного полета (конструкции ленинградского спортсмена Э. Смирнова); на ней установлен ПуВРД типа А-7 (конструкции А. Анисимова). На Всесоюзных соревнованиях авиамоделистов в 1951 г. эта модель установила три всесоюзных рекорда (дальность полета — 16 км, продолжительность — 31 мин. и высота — 600 м).

Модель — нормальной схемы (рис. 57) с наборным

крылом и оперением, фюзеляжем балочного типа, напоминающая по своим внешним формам модель планера. Двигатель укреплен под фюзеляжем. Основные материалы для изготовления модели — бальза, миллиметровая фанера, сосна и липовый шпон.

Носовая часть фюзеляжа — долбленая из бальзы, состоит из двух половинок. Между половинками при их соединении вклеивается фанерная прокладка, выступающая под фюзеляжем в виде небольшого ребра. Конусная, круглого сечения балка изготовлена из бальзы и вклеивается в носовую часть фюзеляжа. Сверху над балкой проходит выполненная из липового шпона килеватость, переходящая затем в киль. Киль — наборный, из бальзовых нервюр и кромок.

Руль поворота вырезан из бальзовой пластинки и крепится к килю с помощью двух проволочек. Для крепления половинок стабилизатора на киле установлен бамбуковый штырек. В небольшом центроплане для крепления крыла вклеены три дюралюминиевые пластинки толщиной 1 мм. Половины крыла притягиваются друг к другу резиновым жгутом, проходящим через отверстие в центроплане. Нижняя часть центроплана, так же как и центральная часть крыла, защищена от температурного воздействия двигателя пластиной из алюминиевой фольги.

Крыло имеет профиль НАСА 6412. В первом и втором отсеке вклеены коробки крепления крыла. Первые отсеки обшиты бальзой.

Стабилизатор имеет профиль НАСА 0009. В передние отсеки корневых частей половинок стабилизатора вклеены коробочки крепления. Второй точкой крепления стабилизатора служат проволочные полудужки, притягиваемые к килю болтиком диаметром 2,6 мм.

Обтянута модель папиросной бумагой; покрыта аэролаком и цветной нитроэмалью.

На модели смонтирована топливная система с вакуумным бачком, показанная на рис. 48. Бачки изготовлены из прозрачного целлулоида: основной — емкостью около 200 см<sup>3</sup>, каплеобразной формы, склеен из двух отштампованных половинок и установлен над крылом; расходный — цилиндрический, емкостью около 30 см<sup>3</sup>, наглухо вклеен в нижнюю часть фюзеляжа. Соединения всех трубопроводов топливной системы герметичные. Принцип работы топливной системы объяснен на стр. 76.

**Рис. 57. Модель свободного полета конструкции Э. Смирнова с ПуВРД типа А-7 конструкции А. Анисимова**

Вес модели без горючего 380 г, в том. числе вес двигателя 60 г.

Регулировка модели с работающим двигателем производилась при заправке топливом только расходного бака; этого количества топлива достаточно на 1,5 мин. работы двигателя.

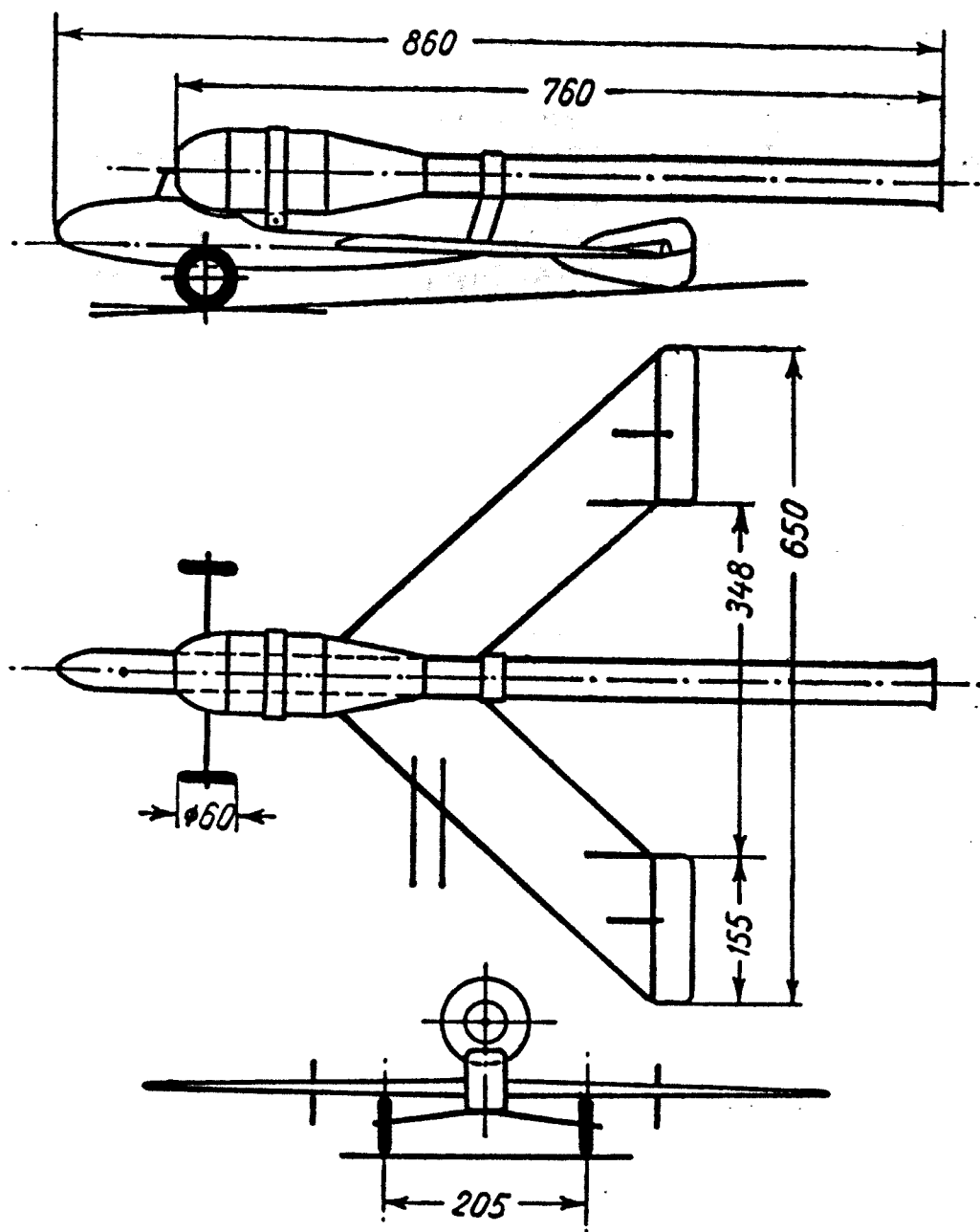


Рис. 58. Кордовая модель «Летающее крыло» конструкции М. Васильченко

Следующая модель самолета — кордовая, типа «Летающее крыло» (рис. 58). В 1953 г. она установила абсолютный мировой рекорд скорости полета, показав 264,7 км/час. Автор конструкции модели и двигателя — москвич М. Васильченко.

Основные данные модели: размах крыла — 650 мм, средняя хорда крыла — 143 мм, площадь крыла —  $9,2 \text{ дм}^2$ , длина — 860 мм, полетный вес — 895 г, нагрузка —  $97 \text{ г/дм}^2$ , тип двигателя — РАМ-2.

Крыло модели стреловидной формы; профиль — плоско-выпуклый толщиной 8%. Собрано крыло на фанерной пластине, которая одновременно является и обшивкой нижней поверхности крыла. Верхняя поверхность крыла обтянута плотной бумагой.

Фюзеляж модели — прямоугольного сечения, собран из трех необлегченных шпангоутов, вырезанных из миллиметровой фанеры, двух липовых боковин толщиной 3 мм и липовой носовой бобышки. Верх и низ фюзеляжа обшиты бальзовыми пластинками толщиной 5 мм.

Топливный бачок, склеенный из целлулоида, размером  $100 \times 30 \times 50 \text{ мм}$  установлен в носовой части фюзеляжа.

На концах крыла подвешены рули высоты, сделанные из бальзы. Управление — от корды, передается на рули через систему жестких тяг и качалок, смонтированных в крыле. Кили вырезаны из полуторамиллиметровой фанеры и приклеены к крылу.

Средняя верхняя часть крыла и верх фюзеляжа под двигателем обшиты дюралюминием толщиной 0,3 мм.

Основные данные двигателя РАМ-2: длина — 750 мм, диаметр камеры сгорания — 80 мм, диаметр выхлопной трубы — 40 мм, тяга — 2,5 кг, вес — 420 г, удельный вес —  $0,160 \text{ г/г тяги}$ .

Конструкция головки двигателя показана на рис. 16.

Следующие две реактивные кордовые модели самолетов были построены И. Иванниковым. Первая модель на Международных соревнованиях авиамodelистов в 1955 г. в Чехословакии показала скорость полета, равную  $275,004 \text{ км/час}$ , а в 1958 г. достигла скорости  $301 \text{ км/час}$ . Оба результата были абсолютными мировыми достижениями.

Основные данные модели (рис. 59): размах крыла — 428 мм, средняя хорда крыла — 67 мм, площадь крыла —  $2,87 \text{ дм}^2$ , площадь стабилизатора —  $0,9 \text{ дм}^2$ , длина — 890 мм, полетный вес — 690 г, двигатель — РАМ-И2.

К рабочей трубе двигателя с помощью хомутиков, имеющих короткие лонжероны, крепится крыло.

К лонжерону переднего правого хомутика (модель

летает по кругу в правую сторону) крепится качалка управления, от которой к кабанику руля тангажа проходит двухмиллиметровая проволочная тяга. Консоли крыла выгнуты из листового дюралюминия толщиной 0,3 мм и имеют двояковыпуклый профиль толщиной 5%.

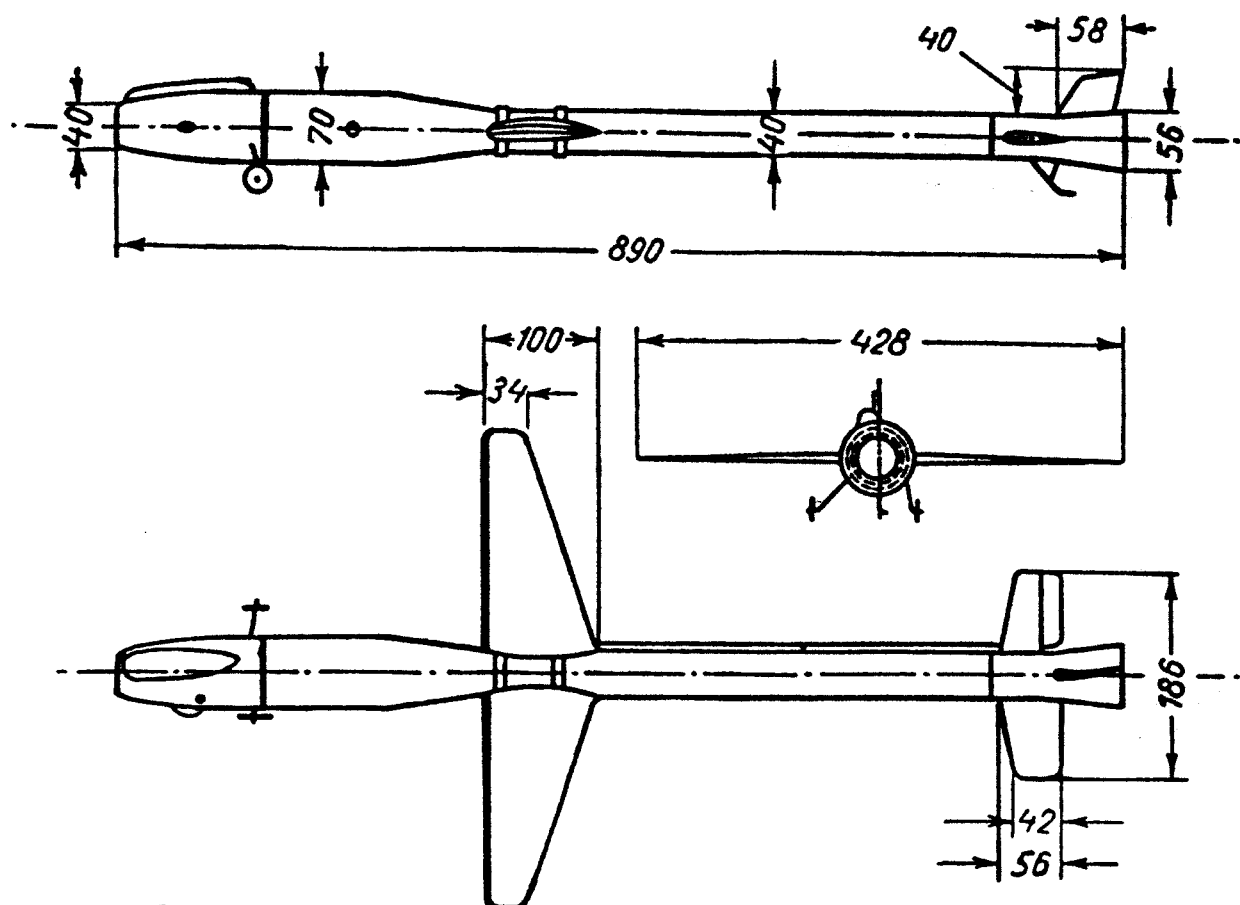


Рис. 59. Кордовая модель конструкции И. Иванникова

Стабилизатор изготовлен из листового электрона толщиной 1 мм и прикреплен двумя болтиками к специальному кожуху, приваренному к конусу выхлопной трубы.

Головка двигателя удлиненной и несколько асимметричной формы служит одновременно и для размещения топлива.

Бак вмещает до 150 см<sup>3</sup> топлива, имеет дренажное отверстие и заливную горловину и трубку-жиклер с регулировочным винтом. Крепится головка четырьмя винтами к корпусу клапанной решетки.

Шасси модели — из проволоки ОВС диаметром 3 мм, также закреплено на корпусе клапанной решетки.

Вторая модель И. Иванникова (рис. 60) с более совершенными аэродинамическими формами. Ее треугольное крыло с симметричным профилем.

Эта модель, как и первая, фюзеляжа не имеет.

Основные данные модели: размах крыла — 375 мм, несущая площадь — 7 дм<sup>2</sup>, длина — 790 мм, полетный вес — 660 г, нагрузка — 94 г/дм<sup>2</sup>, двигатель — конструкции И. Иванникова.

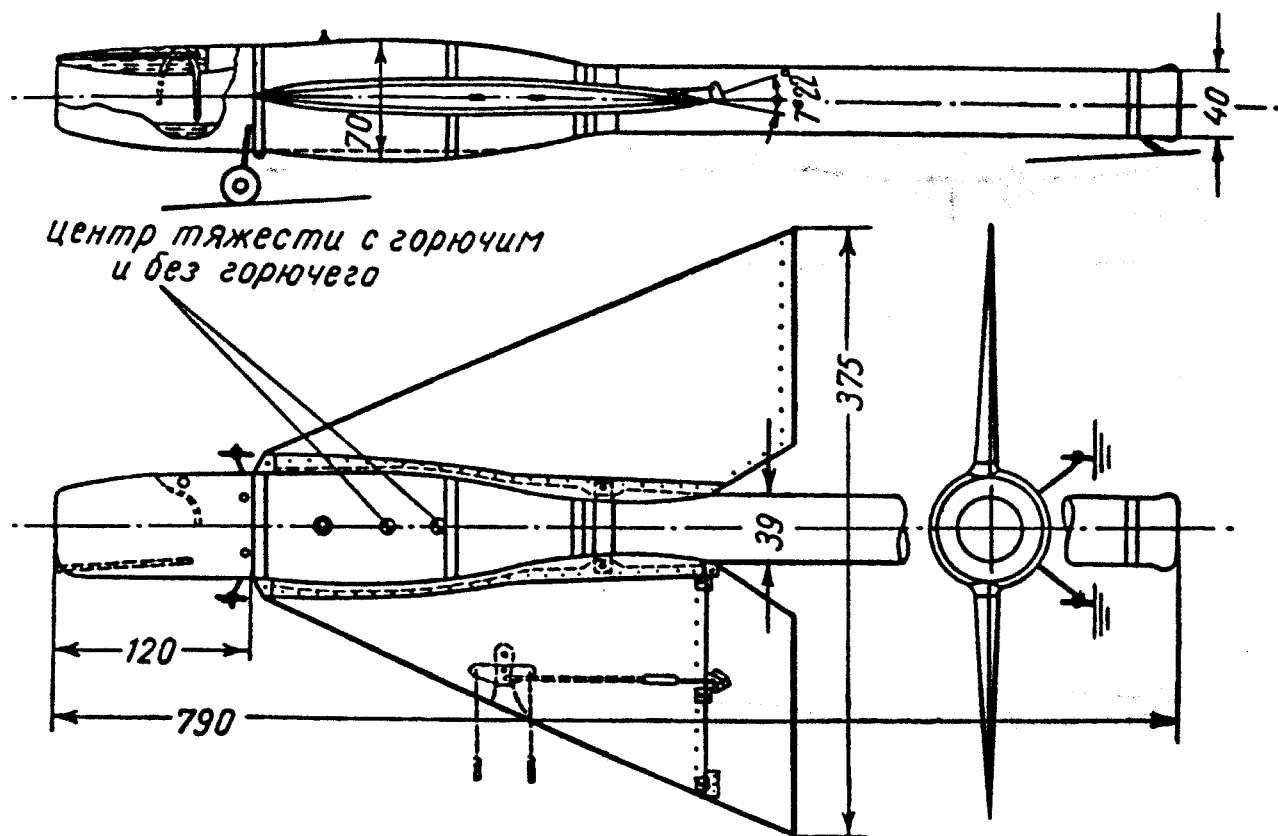


Рис. 60. Кордовая модель «Летающее крыло» конструкции И. Иванникова

Крыло выполнено из листового дюралюминия толщиной 0,3 мм и состоит из двух половин. Заготовки перегибаются по передней кромке; задние кромки склепываются; к корневым кромкам приклепываются зализы, при этом четыре заклепки сквозные и проходят через распорные втулки.

К двум стальным хомутам — переднему толщиной 0,3 мм и заднему толщиной 0,5 мм, — с помощью которых крыло крепится к рабочей трубе, приклепаны профилированные лонжероны.

Консоли крыла насажены на лонжероны и закреплены заклепками. Хомуты под двигателем стянуты проволоочными булавками диаметром 1 мм. Место крепления качалки усилено накладками.

Руль глубины, выполненный из листового дюралюминия толщиной 0,5 мм, подвешен к левой консоли на трех





1 — головка-бачок; 2 — камера сгорания; 3 — хомуты крепления крыла; 4 — тяга; 5 — хомуты крепления стабилизатора; 6, 7 — киль; 8 — шасси; 9 — крыло; 10 — качалка управления; 11 — стабилизатор; 12 — руль высоты; 13 — выхлопная труба; 14 — топливная трубка; 15 — жиклер; 16 — втулка; 17 — регулировочная игла; 18 — пружина; 19 — гайка; 20 — заправочная горловина; 21 — внутренняя стенка бака; 22 — наружная стенка бака; 23 — кольцо-вставка; 24 — клапанная решетка; 25 — резьбовое кольцо; 26 — клапан; 27 — ограничительная шайба; 28 — винт; 29 — дренажная трубка

шарнирах. От качалки к кабанчику руля глубины идет жесткая тяга управления. Для придания модели более правильного положения в воздухе и для удобства управления имеется «уздечка», один конец которой закреплен на передней части головки, другой — на передней корде.

На рис. 61 показана реактивная модель В. Найдовского (г. Харьков). По схеме модель напоминает первую модель И. Иванникова, но отличается от нее своими размерами и конструктивным выполнением ряда узлов.

Основные размеры модели даны на рис. 61; вес модели без топлива 770 г.

На модели установлен двигатель конструкции В. Найдовского. Обтекатель, внутренний канал и задняя стенка головки выполнены из алюминиевого сплава марки АМЦ-АМ толщиной 1,2 мм.

Клапанная решетка по конструкции аналогична решетке двигателя РАМ-2, но упрощена и облегчена. Она изготовлена из высокопрочного алюминиевого сплава В95, но может быть сделана из Д-16Т.

Рабочая труба имеет обтекаемую проточную часть; выполнена из листовой стали 1Х18Н9Т толщиной 0,3 мм.

## Глава 8

### АВИАМОДЕЛЬНЫЕ ПУВРД И КОРДОВЫЕ РЕАКТИВНЫЕ МОДЕЛИ ЗАРУБЕЖНЫХ СПОРТСМЕНОВ

Один из лучших ПуВРД Летмо-МР-250 (рис. 62) создан в Чехословакии в авиационной лаборатории г. Брно под руководством известного спортсмена З. Хузички.

Основные данные двигателя: длина — 509 мм, диаметр камеры сгорания — 64 мм, диаметр выхлопной трубы — 32 мм, вес — 210 г, тяга на месте — 2,27 кг, удельный вес — 0,092 г/г тяги, удельная лобовая тяга — 68 г тяги/см<sup>2</sup>.

Как видно из основных данных, двигатель имеет хорошие относительные удельные параметры.

Камера сгорания и реактивное сопло с толщиной стенок 0,25 мм изготовлены из жаропрочной стали методом

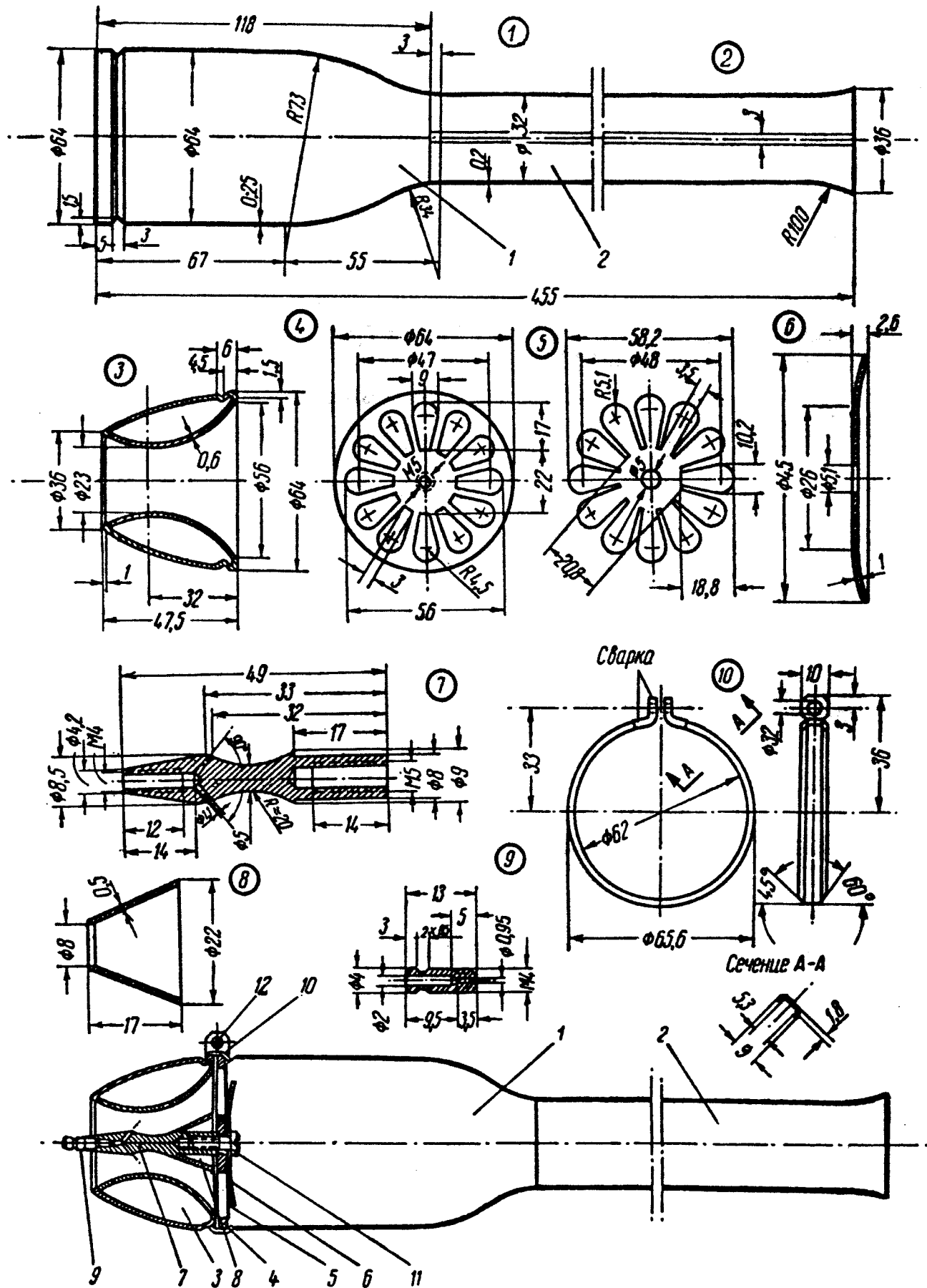


Рис. 62. ПуВРД Летмо-МР-250:

1 — камера сгорания; 2 — выпускная труба; 3 — головка (алюминий); 4 — диск клапанной решетки (дюралюминий); 5 — клапаны (сталь  $\delta = 0,15$  мм); 6 — ограничительная шайба (листовая нержавеющая сталь); 7 — форсунка (дюралюминий); 8 — конус форсунки (дюралюминий); 9 — жиклер (латунь); 10 — хомут (нержавеющая сталь  $\delta = 0,8-1$ ); 11 — винт М5  $\times$  15; 12 — винт М3  $\times$  10

давления или последовательной вытяжки и представляют одно целое. Выхлопная труба выполнена из листовой жаропрочной стали толщиной 0,2 мм.

На рис. 63 показан двигатель Аэроджет-2 венгерского спортсмена Г. Бенедека, с которым он в октябре 1957 г. установил мировой рекорд скорости полета модели на корде, равный 281 км/час (при этом диаметр каждой корды был 0,3 мм).

Основные данные двигателя: длина — 670 мм, диаметр камеры сгорания — 75 мм, диаметр выхлопной трубы — 38 мм, вес — 370—400 г, тяга на месте — 2,5 кг, удельный вес — 0,148—0,16 г/г тяги, удельная лобовая тяга — 55,5 г тяги/см<sup>2</sup>.

Диск клапанной решетки изготовлен из алюминиевого сплава Д-16 или В-95 и имеет толщину 3,7 мм на диаметре 32 мм и 3,4 мм на наружном диаметре, вследствие чего поверхность прилегания клапанов коническая. Входные окна выпиливаются по шаблону вручную, а с кромок перемычек со стороны входа в решетку снята фаска  $1 \times 45^\circ$ .

Клапанная звездочка изготавливается из углеродистой стали толщиной 0,18—0,20 мм.

Ограничительная шайба выполнена из дюралюминия. Конструктор двигателя рекомендует делать сразу несколько ограничительных шайб с отклонением наружного диаметра от номинального и в ту и другую сторону на 1,5—2,0 мм и подбирать для каждой клапанной пластины свою шайбу.

Стяжной профилированный хомутик изготовлен из листовой стали толщиной 1,0 мм методом выколотки на специальной оправке.

Жиклер выполнен из текстолита, так как металлический жиклер, нагреваясь от деталей клапанной решетки, может расплавить топливную хлорвиниловую трубку. Диаметр жиклерного отверстия колеблется в пределах 1,2—1,25 мм. В дальнейшем конструктор двигателя взял диаметр отверстия равным 1,36 мм и регулировку производил специальным краном.

Форсунка сделана из дюралюминия; имеет два выходных отверстия диаметром 1,2 мм или шесть отверстий диаметром 0,8 мм.

Конус также изготовлен из дюралюминия.

Рабочая труба выполнена из жаропрочной стали

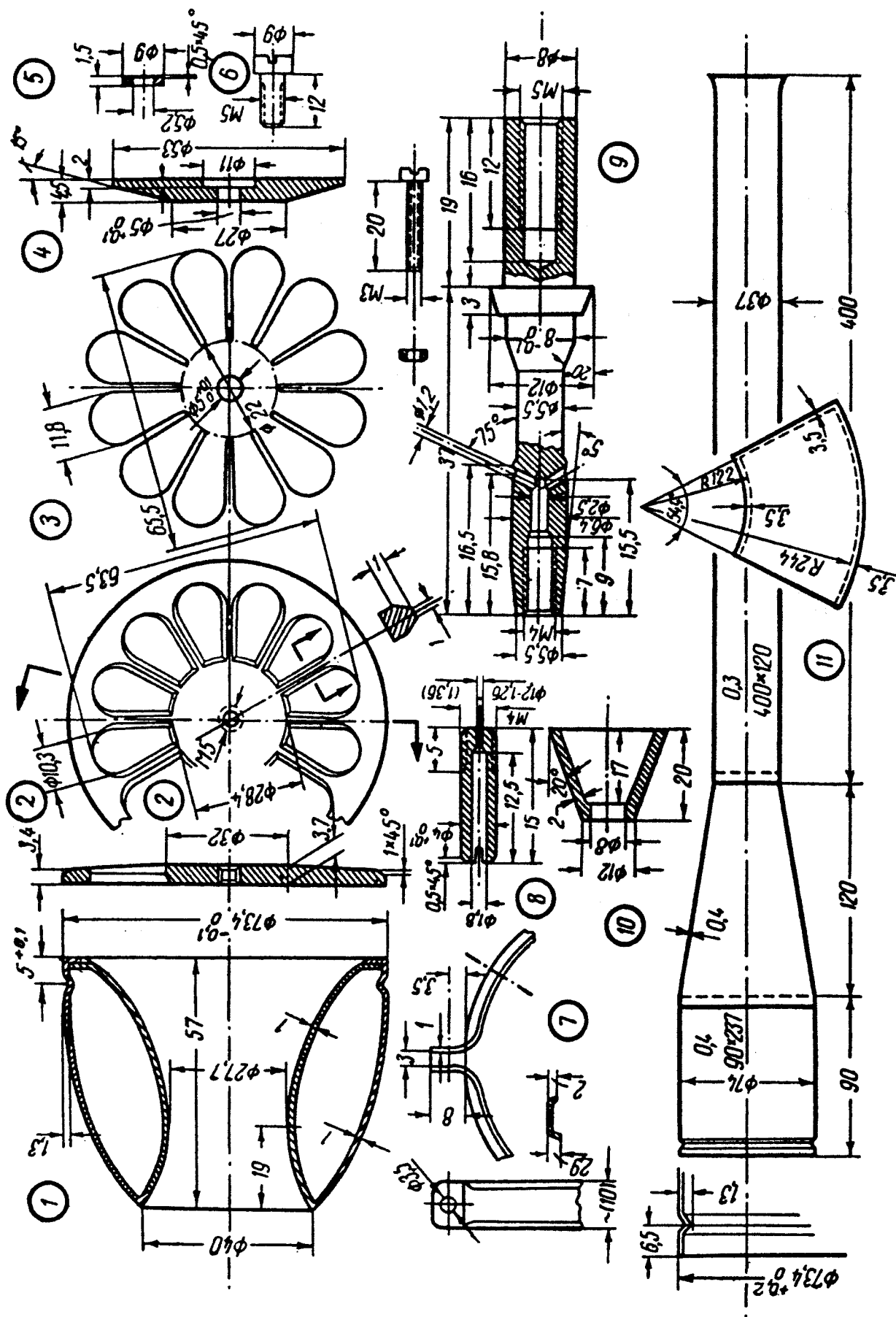


Рис. 63. ПУВРД Аэроджет-2:

1 — головка; 2 — диск клапанной решетки; 3 — клапаны; 4 — ограничительная шайба; 5 — шайба; 6 — винт; 7 — стяжной хомут; 8 — жиклер; 9 — форсунка; 10 — конус форсунки; 11 — рабочая труба

с толщиной стенок камеры сгорания и реактивного сопла 0,4 мм и выхлопной трубы 0,3 мм.

Двигатель конструкции чехословацкого спортсмена О. Монацека (рис. 64) мало чем отличается от предыдущего. Но вследствие более удачного подбора геометрических размеров рабочей трубы двигатель развивает статическую тягу 2,8—3 кг.

За счет немного больших размеров рабочей трубы вес двигателя возрос до 450 г.

Основные данные двигателя: длина — 680 мм, диаметр камеры сгорания — 75 мм, диаметр выхлопной трубы — 38 мм, тяга на месте — 2,8—3 кг, удельный вес — 0,15—0,16 г/г тяги, удельная лобовая тяга — 64—65 г тяги/см<sup>2</sup>.

Клапаны изготовлены из стальной углеродистой ленты толщиной 0,18—0,22 мм, жиклер — из текстолита, форсунка — из дюралюминия. Диск клапанной решетки сделан из стальной пластины толщиной 1,2—1,5 мм.

Габаритные чертежи некоторых разработанных за рубежом ПуВРД приведены на рис. 65, а их характеристики — в табл. 2.

Приводим краткое описание нескольких реактивных моделей зарубежных спортсменов.

Модель чехословацкого спортсмена И. Сладкого (рис. 66) снабжена ПуВРД Летмо-300 и имеет хорошие аэродинамические формы.

Учитывая сравнительно малые габариты двигателя (длина — 510 мм, диаметр камеры сгорания — 66 мм), конструктор нашел возможным установить его внутри обтекаемого фюзеляжа.

Фюзеляж изготовлен из жаропрочной стали толщиной 0,25—0,30 мм. Топливный бак размещен в носовой части фюзеляжа, а заборник воздуха для двигателя расположен слева сверху.

Центроплан крыла выполнен из нержавеющей стали, у фюзеляжа переходит в плавные зализы и крепится заклепками. Консоли крыла сделаны из бальзы и укреплены на центроплане двумя сквозными заклепками.

Стабилизатор изготовлен из листового электрона толщиной 1 мм и укреплен тремя болтами в верхней части фюзеляжа.

В левой половине центроплана укреплена качалка управления, от которой по консоли проходят две тяги

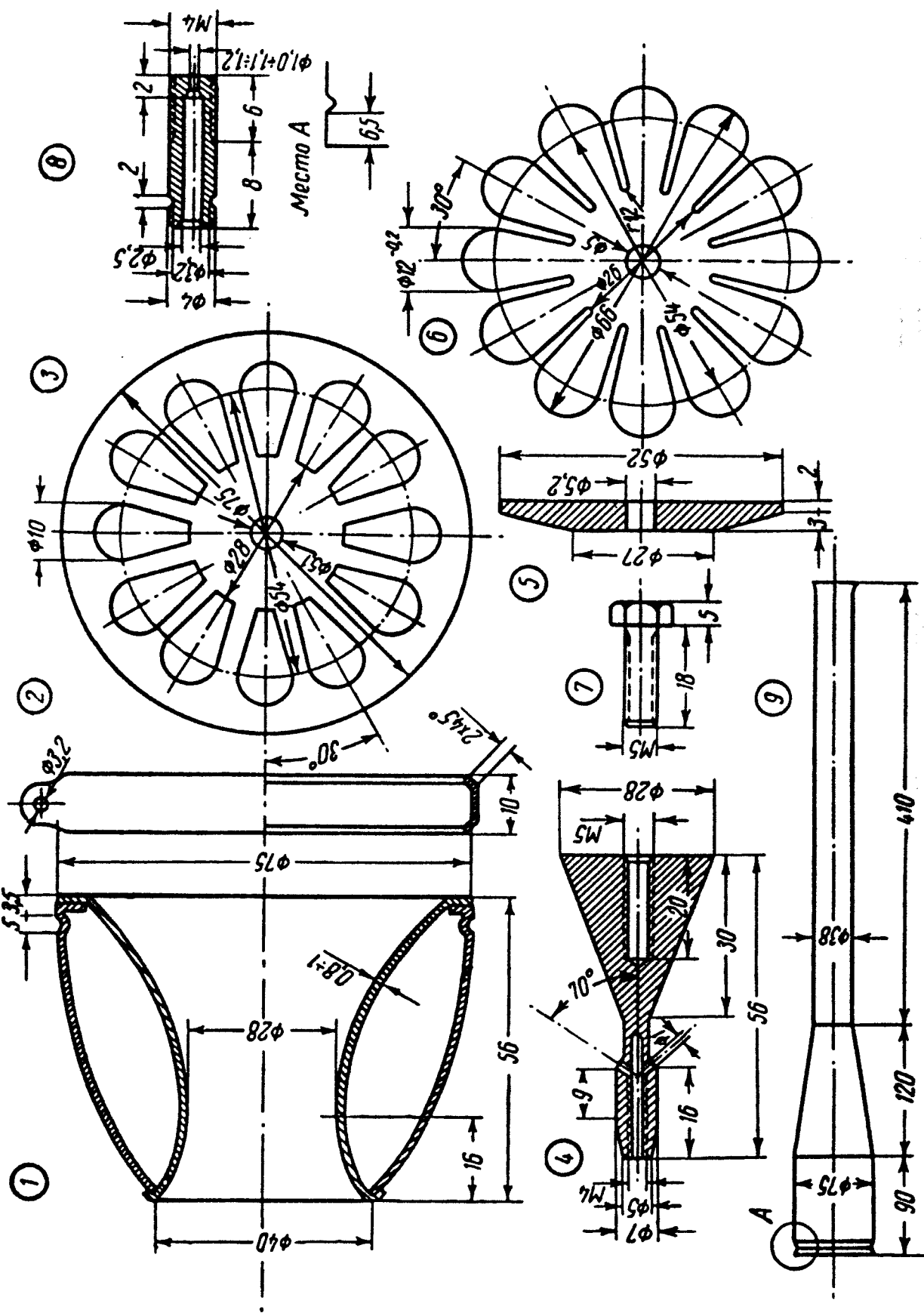


Рис. 64. ПуВРД конструкции О. Монаека (Чехословакия):

1 — головка; 2 — стяжной хомут; 3 — диск клапанной решетки; 4 — форсунка; 5 — ограничительная шайба; 6 — клапаны; 7 — винт; 8 — жиклер; 9 — рабочая труба

ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ЗАРУБЕЖНЫХ АВИАМОДЕЛЬНЫХ ПУВРД

Название	Страна	Тяга, кг	Ориенти- ровочная частота, Гц	Вес, кг	Общая длина, мм	Диаметр камеры сгорания, мм	Диаметр выхлопной трубы, мм
OS тип II	Япония	1,70	220—240	0,400	546	64	31
MEW-307	США	1,36	—	0,385	520	76,0	32
Тигр-джет M1	Япония	0,80	250	0,204	465	44,5	22
Летмо МР-250	Чехословакия	2,27	—	0,210	509	64	32
Аэроджет-2	Венгрия	2,5	—	0,37 ÷ 0,40	670	75	38
Виктория MD-1	ГДР	1,60	—	0,357	800	74	37
Дина-джет	США	1,83	220—240	0,454	540	64	32



к нитям корды и тяга к рулю глубины. Тяга, прикрытая специальным щитком от механических повреждений, проходит вдоль левого борта фюзеляжа.

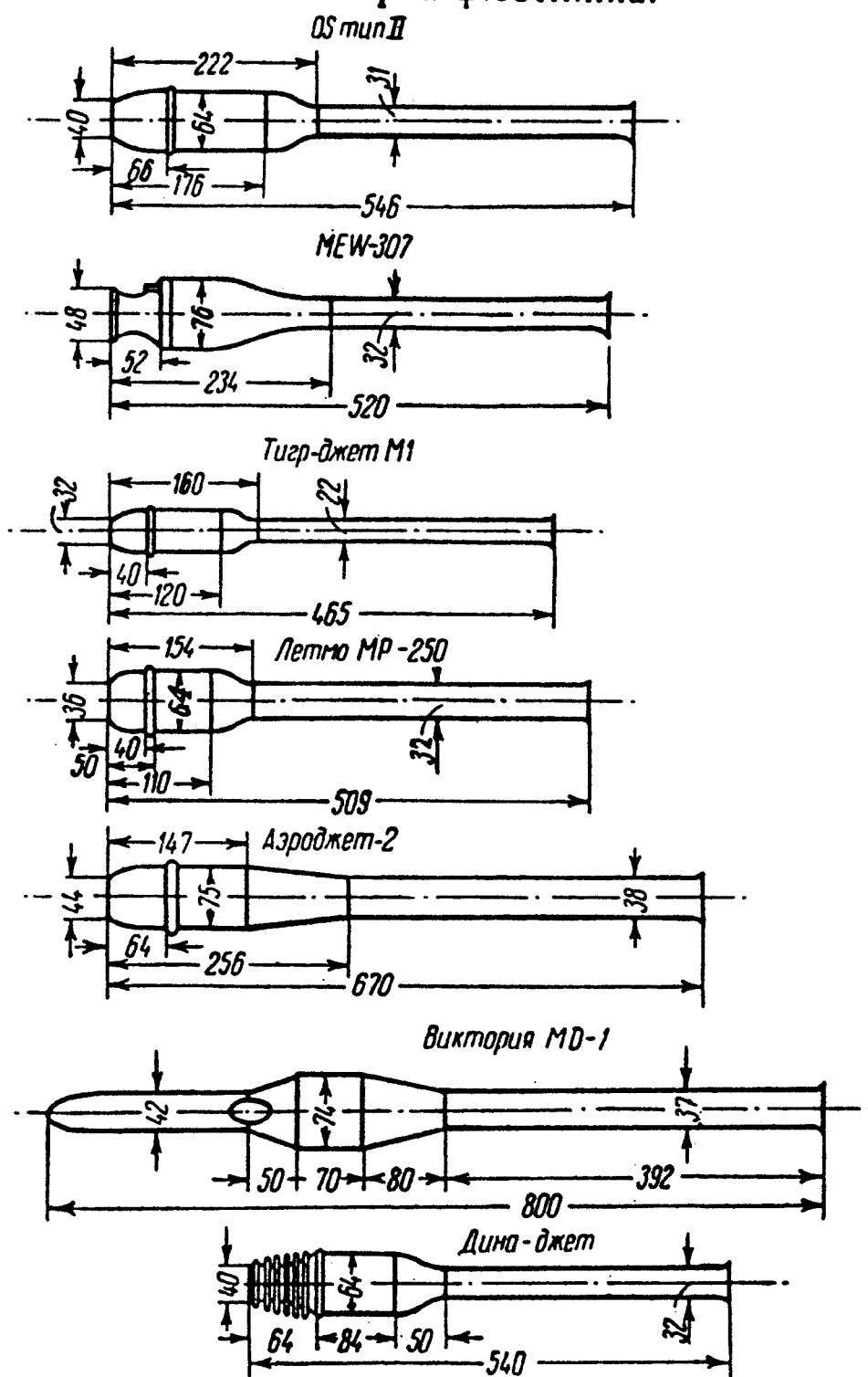


Рис. 65. Схемы зарубежных авиамodelьных ПувРД,

Двигатель укреплен на двух кронштейнах — переднем и заднем, которые одновременно и центрируют его. Для охлаждения стенок фюзеляжа в передней части заливов сделаны специальные заборники воздуха. Вес модели без горючего равен 870 г, а полетный — 945 г.

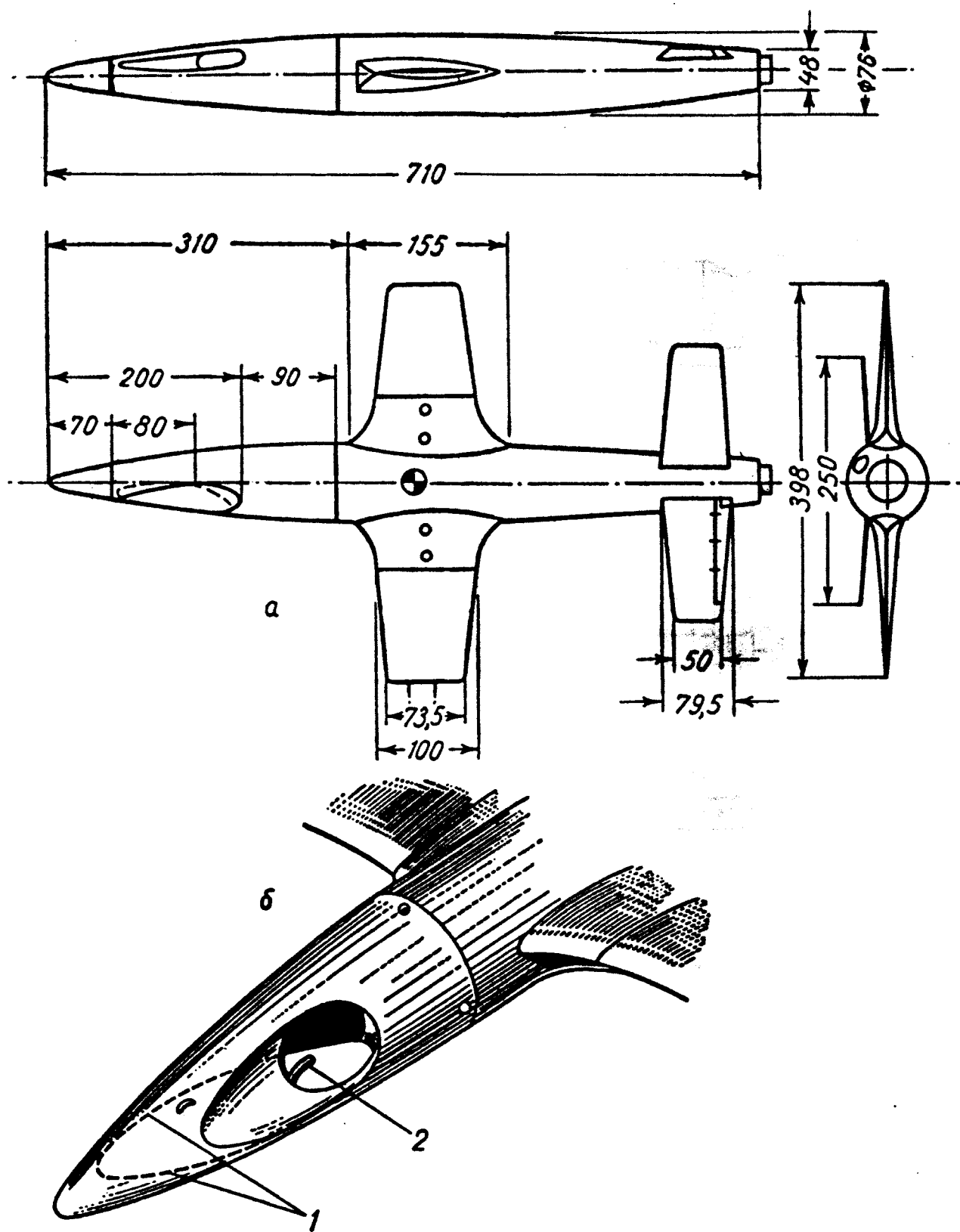


Рис. 66. Кордовая модель самолета И. Сладкого (Чехословакия):  
 а — общий вид модели; б — расположение бензобака в носовой части и тяга управления в фюзеляже; 1 — контур бензобака; 2 — топливная трубка

Двигатель Летмо-300, по данным спортсмена, развивает статическую тягу 2370 г и весит 250 г.

Модель взлетает со специальной четырехколесной тележки, садится на лыжу. Базу она проходит со скоростью 220—230 км/час.

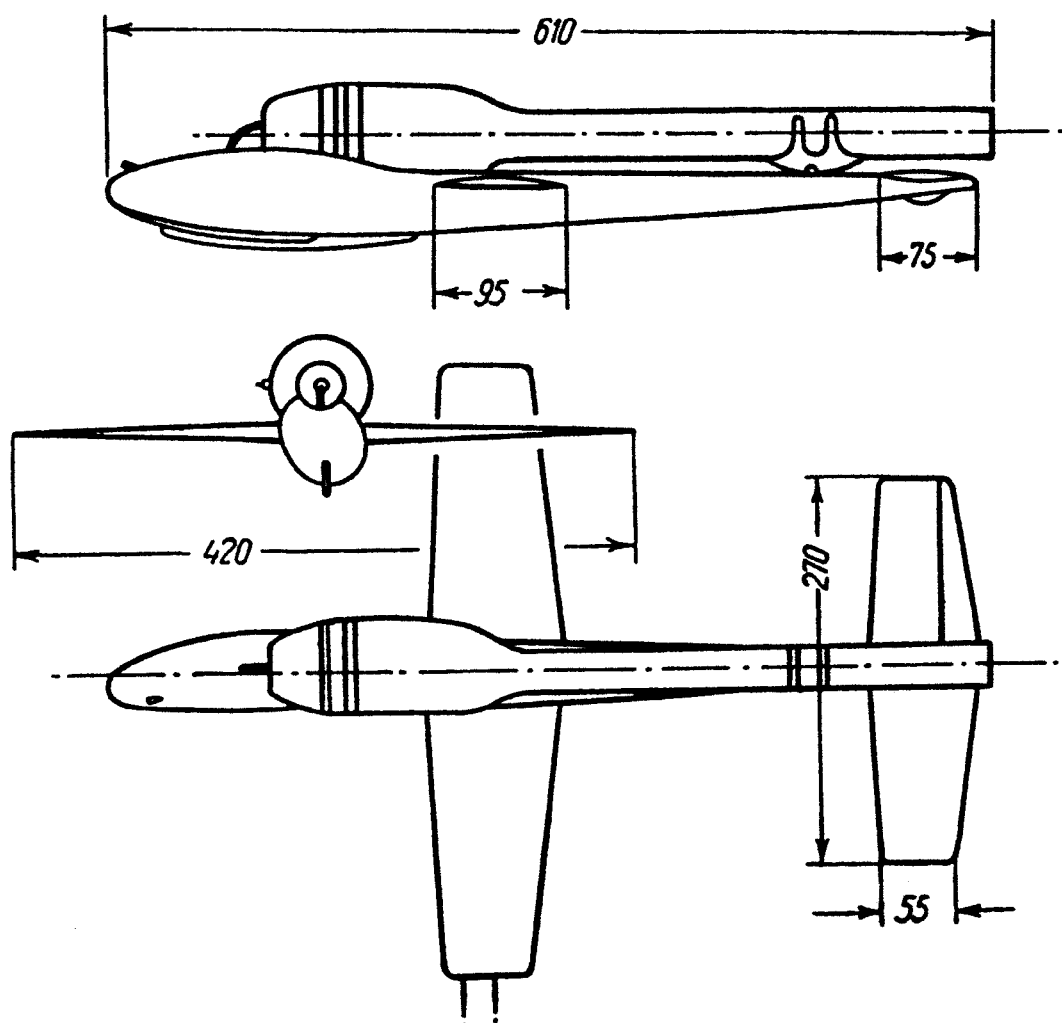


Рис. 67. Кордовая модель Э. Хорвата (Венгрия)

Модель венгерского спортсмена Э. Хорвата (рис. 67), цельнодеревянная, с расположением двигателя над фюзеляжем.

На модели установлен двигатель Летмо-МР-250.

Носовая часть долбленого фюзеляжа с размещенным в нем топливным бачком смещена относительно продольной оси с таким расчетом, чтобы отлив топлива под действием центробежной силы во время полета меньше сказывался на изменении режима работы двигателя.

Крыло сделано из бальзы, профиль его толщиной 10%.

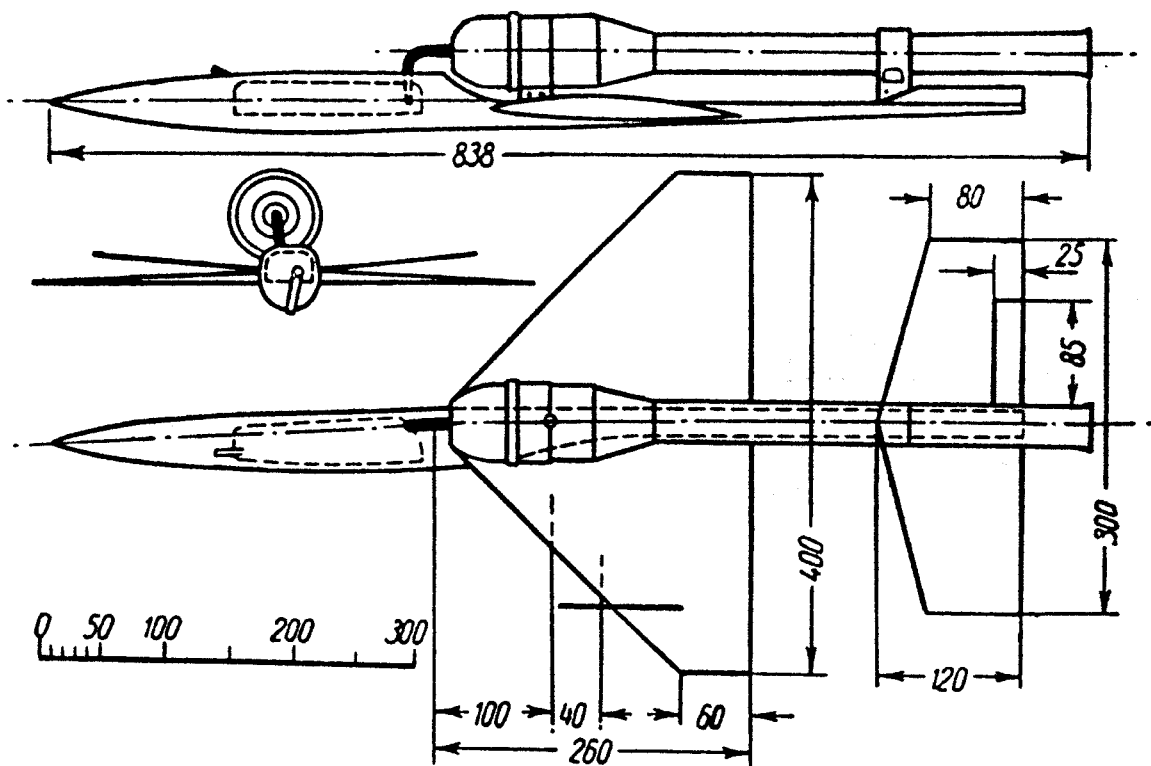


Рис. 68. Кордовая модель И. Урбана (Чехословакия)

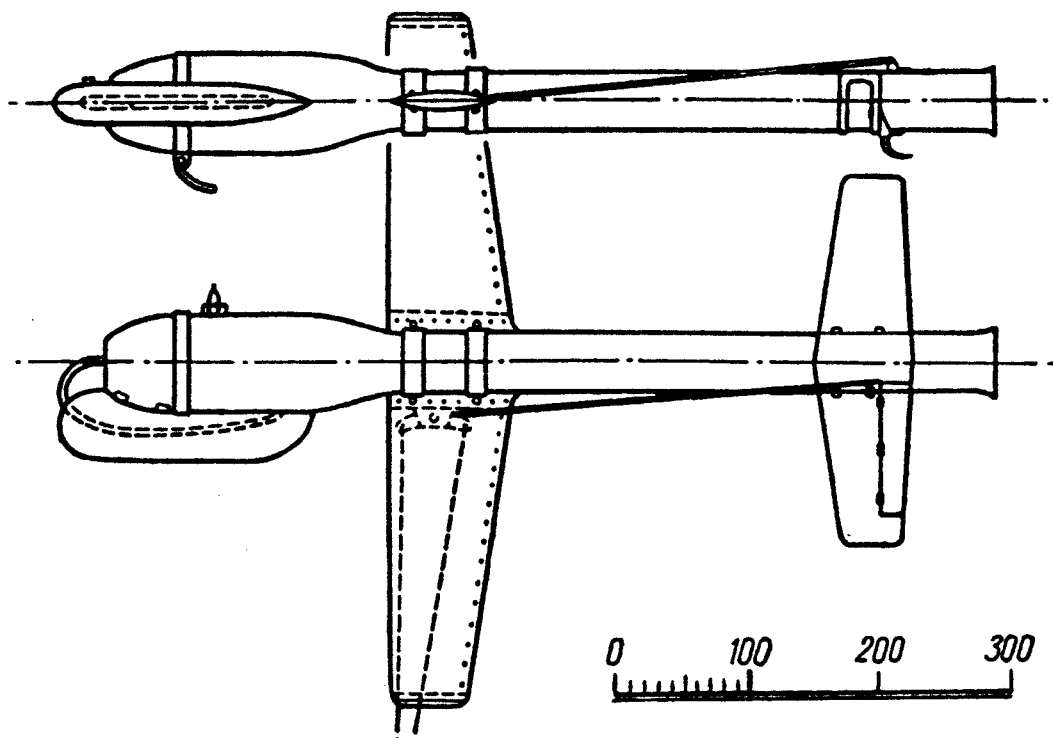


Рис. 69. Кордовая модель С. Браши и У. Росси (Италия)

Двигатель крепится на двух хомутиках: переднем, вблизи клапанной решетки, и заднем, охватывающем выхлопную трубу.

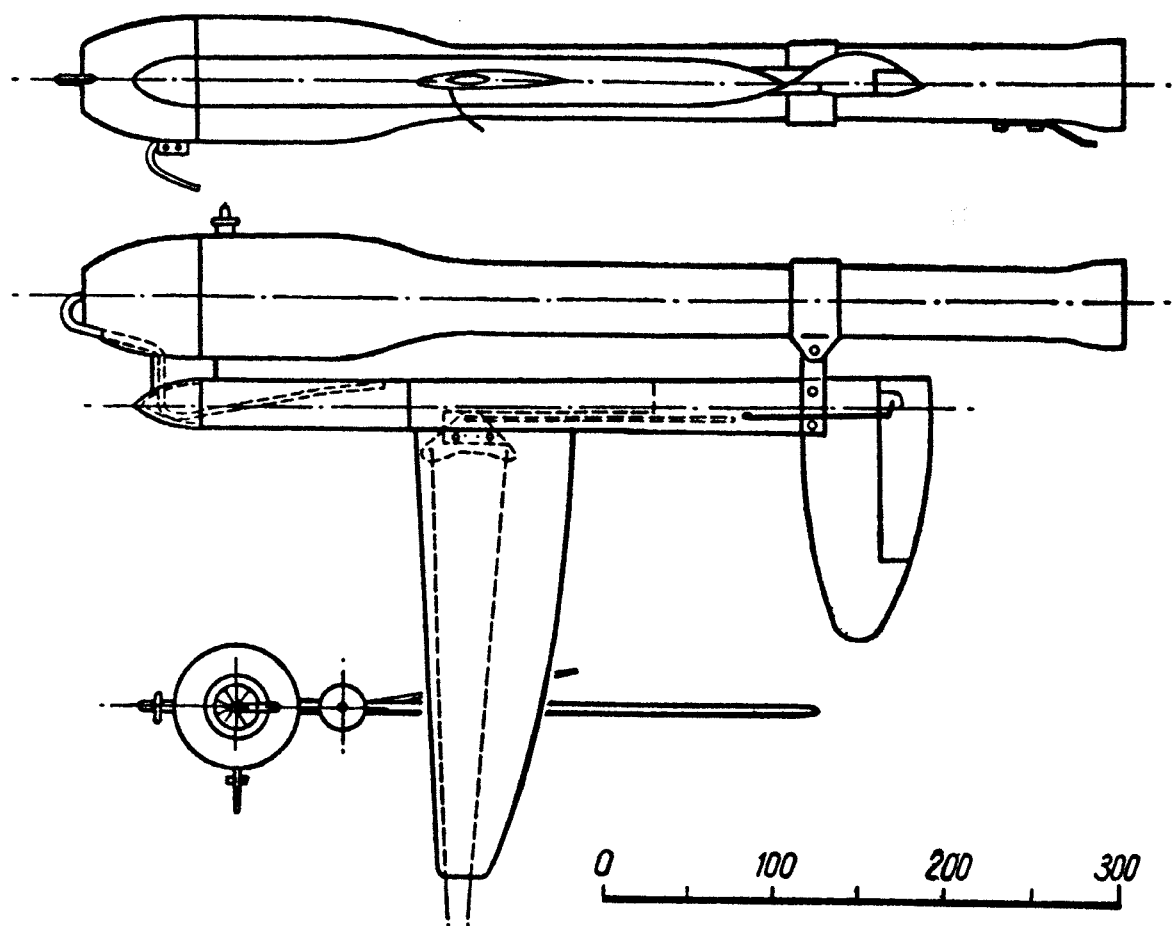


Рис. 70. Кордовая модель Э. Занина (Италия)

Вес модели без горючего — 85 г; полетный вес — 980 г. Модель взлетает со специальной тележки и садится на лыжу. Базу она проходит со скоростью 200—220 км/час.

На рис. 68 дана реактивная модель чехословацкого спортсмена И. Урбана.

На модели установлен двигатель Летмо-250. Общая площадь несущей поверхности ее равна  $9,3 \text{ дм}^2$ , нагрузка —  $99 \text{ г/дм}^2$ . Емкость бака —  $140 \text{ см}^3$ .

На рис. 69 и 70 приведены две модели итальянских спортсменов. Авторы первой модели (рис. 69) С. Браши и У. Росси. В октябре 1960 г. их модель показала скорость 302,52 км/час.

Основные данные двигателя: длина — 670 мм, диаметр камеры сгорания — 73 мм, тяга на месте — около 3,5 кг, полетный вес модели — 740 г.

Автор второй модели (рис. 70) — спортсмен Э. Занин. В июле 1963 г. эта модель показала скорость полета по кругу, равную 306 км/час. Характерная черта этой модели — ее асимметрия. Модель имеет только одну консоль крыла и одну половинку стабилизатора. По мнению конструктора, при такой схеме аэродинамическое сопротивление модели уменьшается, так как все крыло лежит внутри круга минимального радиуса 19,91 м.



## ЛИТЕРАТУРА

Бородин В. А. Авиамодельный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель. Изд-во ДОСААФ, 1951.

Бабаев Н., Лебединский М., Малик С., Мартынов Б. В воздухе летающие модели. Изд-во ДОСААФ, 1955.

Кулагин И. И. Теория газотурбинных реактивных двигателей. Оборонгиз, 1952.

Бабаев Н., Гаевский О., Кудрявцев С., Микиртумов Э., Хухра Ю. Авиационный моделизм. Изд-во ДОСААФ, 1956.

Болонкин А. Теория полета летающих моделей. Изд-во ДОСААФ, 1962.

Журналы: „Крылья Родины“, „Modellezés“, „Modellbau und Basteln“, „Modelarz“.

---