

В. Бородин

**Пульсирующие воздушно-
реактивные двигатели
летающих моделей самолётов**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 82-053.2
ББК 74.27
В11

В. Бородин
В11 Пульсирующие воздушно-реактивные двигатели летающих моделей самолётов / В. Бородин – М.: Книга по Требованию, 2013. – 102 с.

ISBN 978-5-458-43136-1

В этой книге обобщаются достижения советских и зарубежных авиамоделлистов по конструированию и эксплуатации авиамоделльных 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 авиамоделлистов-спортсменов, инструкторов, руководителей авиамоделльных кружков и широкий круг молодежи.

ISBN 978-5-458-43136-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Глава 1

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 обреза 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.

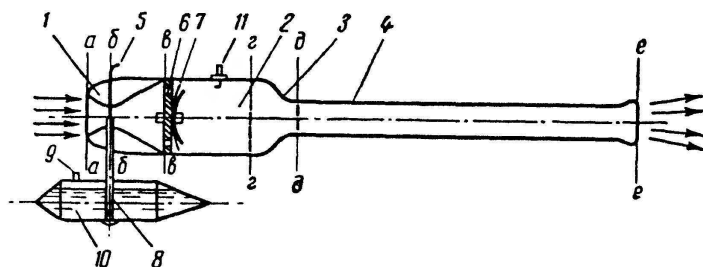


Рис. 1. Принципиальная схема ПуВРД:

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 бак; 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 *б* (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 δ (клапаны закрываются и со стороны выхлопной трубы по направлению к клапанной решетке движется столб остаточных газов и воздуха, поджимающий смесь);

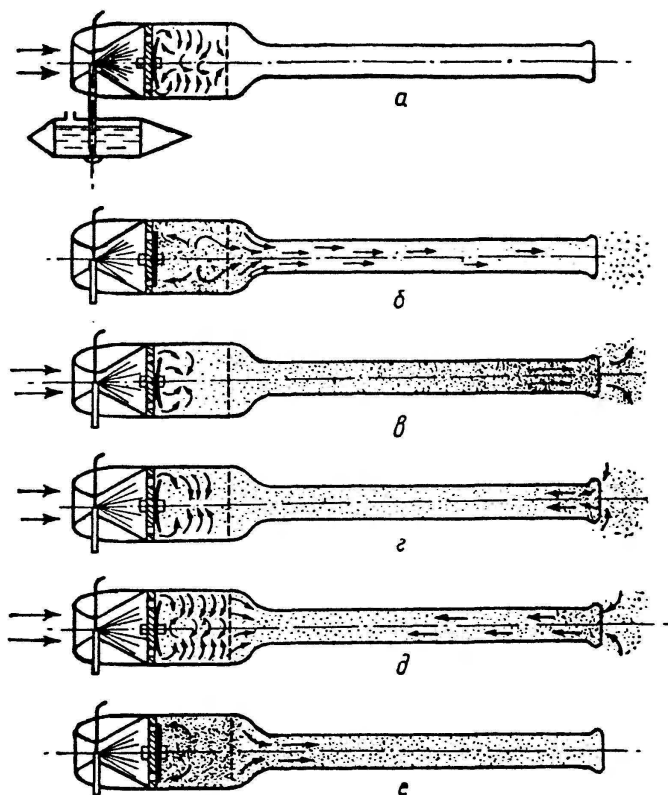


Рис. 2. Принципиальная схема работы ПуВРД

— 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.

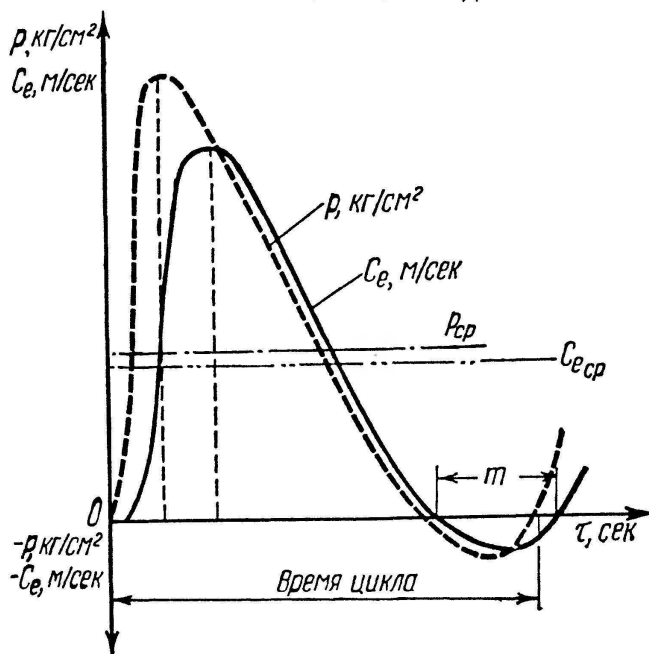


Рис. 3. Характер изменения давления и скорости истечения газа за цикл в ПуВРД с длинной выхлопной трубой

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 $C_{\text{ср}}$ (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:

$$Pt = m_{\text{г}} \cdot C_{\text{ср}} - m_{\text{в}}V, \quad (1)$$

где $m_{\text{г}}$ — масса продуктов сгорания топлива;

$m_{\text{в}}$ — масса воздуха, поступающего в двигатель;

$C_{\text{ср}}$ — 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 :

$$P = \frac{m_r}{t} \cdot C_{e_{cp}} - \frac{m_b}{t} \cdot V = m_{r.сек} \cdot C_{e_{cp}} - m_{b.сек} V, \quad (2)$$

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

$$m_{r.сек} = \frac{G_{r.сек}}{g}, \quad m_{b.сек} = \frac{G_{b.сек}}{g}.$$

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

$$P = \frac{G_{r.сек}}{g} C_{e_{cp}} - \frac{G_{b.сек}}{g} V. \quad (3)$$

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

$$P = \frac{G_{b.сек}}{g} \left(\frac{G_{r.сек}}{G_{b.сек}} C_{e_{cp}} - V \right). \quad (4)$$

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_r будет равен: $G_r = G_r + G_b = 1$ кг топлива + 15 кг воздуха = 16 кг продуктов сгорания, а отношение $\frac{G_r}{G_b}$ в весовых единицах будет иметь вид:

$$\frac{G_r}{G_b} = \frac{G_r + G_b}{G_b} = \frac{1 + 15}{15} = 1,066.$$

Это же значение будет иметь и отношение $\frac{G_{r.сек}}{G_{b.сек}}$.

Принимая отношение $\frac{G_{r.сек}}{G_{b.сек}}$ равным единице, полу-

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$P_{уд} = \frac{C_{\epsilon_{ср}}}{g}.$$

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

$$G_{уд} = \frac{G_T}{P}, \left[\frac{\kappa\epsilon}{\text{час} \cdot \kappa\epsilon} \right] \left[\frac{\epsilon}{\text{час} \cdot \epsilon} \right], \quad (10)$$

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

G_T — часовой расход топлива $\left[\frac{\kappa\epsilon}{\text{час}}, \frac{\epsilon}{\text{час}} \right]$.

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

$$G_T = 3600 \cdot G_{T. \text{сек}}.$$

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:

$$\gamma_{дв} = \frac{G_{дв}}{P}, \left[\frac{\kappa\epsilon}{\kappa\epsilon} \right] \left[\frac{\epsilon}{\epsilon} \right], \quad (11)$$

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

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

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-