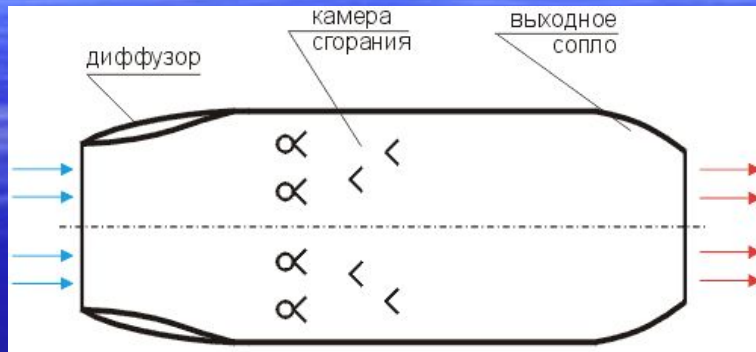


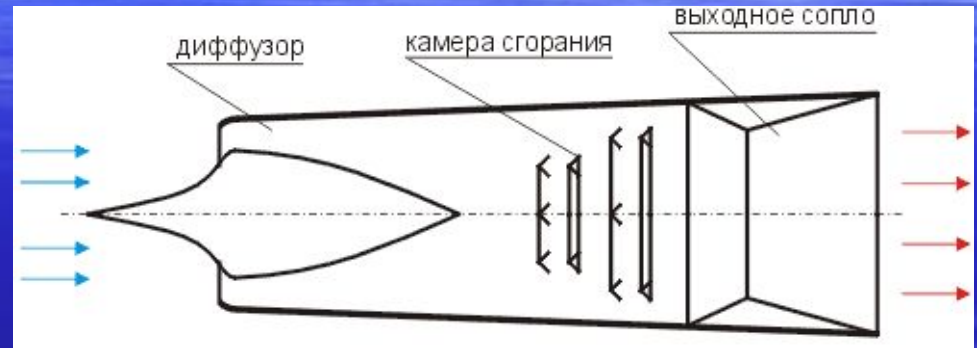
Прямоточный воздушно-  
реактивный двигатель (ПВРД),  
Сверхзвуковой ПВРД,  
Гиперзвуковой ГПВРД  
Пульсирующий воздушно-  
реактивный (ПуВРД).

2009

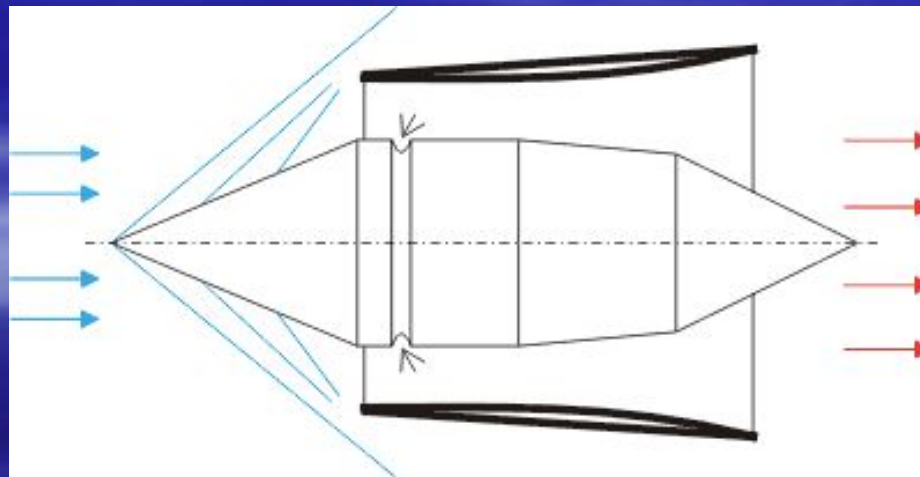
# Прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД)



Дозвуковой ПВРД



Сверхзвуковой ПВРД



Гиперзвуковой ПВРД

# История ПВРД

- Первый прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД) запатентован в 1913 г, привлекал конструкторов простотой своего устройства, но главное — своей потенциальной способностью работать на гиперзвуковых скоростях и в самых высоких, наиболее разреженных слоях атмосферы, то есть в условиях, в которых ВРД других типов неработоспособны или малоэффективны.



- Leduc 010 первый аппарат, летавший с ПВРД (Музей в Ле Бурже).
- Первый полёт — 19 ноября 1946



# Крылатая ракета Крылатая ракета «Буря»



- В СССР с 1954 по 1960гг разрабатывалась крылатая ракета В СССР с 1954 по 1960гг разрабатывалась крылатая ракета «Буря» В СССР с 1954 по 1960гг разрабатывалась крылатая ракета «Буря», предназначенная для доставки ядерных зарядов на межконтинентальные расстояния, и использовавшая в качестве маршевого двигателя В СССР с 1954 по 1960гг разрабатывалась крылатая ракета «Буря», предназначенная для доставки ядерных зарядов на межконтинентальные расстояния, и использовавшая в качестве маршевого двигателя ПВРД, разработанный группой М. М.

# Дозвуковые ПВРД

Дозвуковые ПВРД предназначены для полётов на скоростях с числом Маха от 0,5 до 1.

Торможение и сжатие воздуха в этих двигателях происходит в расширяющемся канале входного устройства – *диффузоре*. Эти двигатели характеризуются крайне низкой эффективностью.

При полёте на скорости  $M=0,5$  степень повышения давления в них равна 1,186, вследствие чего их идеальный термический КПД (в соответствии с формулой (3)) составляет всего 4,76%, а с учётом потерь в реальном двигателе эта величина становится почти равной 0.

Это означает, что на скоростях полёта при  $M < 0,5$  ПВРД неработоспособен.

Но и на предельной для дозвукового диапазона скорости, при  $M=1$  степень повышения давления составляет 1,89, а идеальный термический КПД – 16,7%, что в 1,5 раза меньше чем у реальных поршневых ДВС, и вдвое меньше, чем у газотурбинных двигателей. К тому же, и поршневые, и газотурбинные двигатели эффективны при работе на месте.

По этим причинам дозвуковые прямоточные двигатели оказались неконкурентоспособными в сравнении с авиадвигателями других типов и в настоящее время серийно не выпускаются.

# Сверхзвуковые ПВРД (СПВРД)

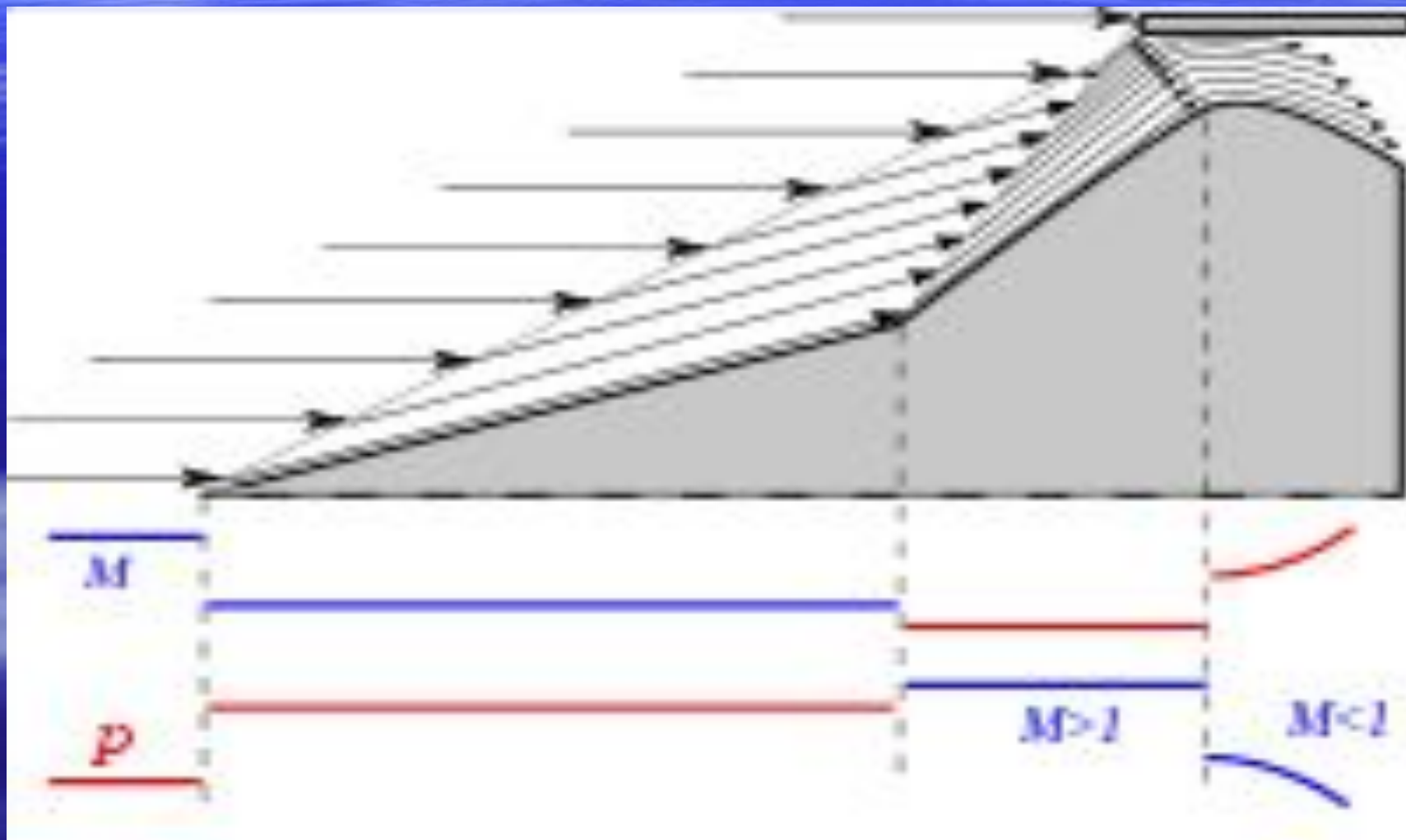


- СПВРД предназначены для полётов в диапазоне  $1 < M < 5$ .
- Торможение сверхзвукового газового потока происходит всегда разрывно (скачкообразно) – с образованием ударной волны, (*скачком уплотнения*)
- Чем интенсивнее скачок уплотнения, т.е. чем больше изменение скорости потока на его фронте, – тем больше потери давления, которые могут превышать 50%.





Процесс торможения сверхзвукового потока во входном устройстве конического течения, внешнего сжатия с 3-мя скачками уплотнения.





Потери давления удаётся минимизировать за счёт организации сжатия не в одном, а в нескольких (обычно, не более 4-х) последовательных скачках уплотнения меньшей интенсивности, после каждого из которых (кроме последнего), скорость потока снижается, оставаясь сверхзвуковой.

В последнем скачке (всегда прямом – нормальном к вектору скорости воздушного потока) скорость становится дозвуковой и дальнейшее торможение и сжатие воздуха происходит непрерывно в расширяющемся канале диффузора.

В случае, если входное устройство двигателя находится в зоне невозмущённого потока, например, в носовом окончании летательного аппарата, или на консоли на достаточном удалении от фюзеляжа, оно исполняется **осесимметричным** и снабжается **центральной телом** – длинным острым "конусом", выступающим из обечайки, назначение которого состоит в создании во встречном потоке системы косых скачков уплотнения, обеспечивающих торможение и сжатие воздуха ещё до поступления его в канал входного устройства – т.н. **внешнее сжатие**.

Коническое центральное тело может быть регулируемым

При установке двигателя на нижней (боковой) стенке фюзеляжа, или под крылом летательного аппарата, то есть в зоне аэродинамического влияния его элементов, обычно применяются *плоские входные устройства двумерного течения*, имеющие прямоугольное поперечное сечение, без центрального тела.

Система скачков уплотнения в них обеспечивается благодаря внутренней форме канала. Они называются также *устройствами внутреннего или смешанного сжатия*, так как внешнее сжатие частично имеет место и в этом случае – в скачках уплотнения, образованных у носового окончания и/или у передней кромки крыла летательного аппарата.

Регулируемые входные устройства прямоугольного сечения имеют меняющие свое положение клинья внутри канала.

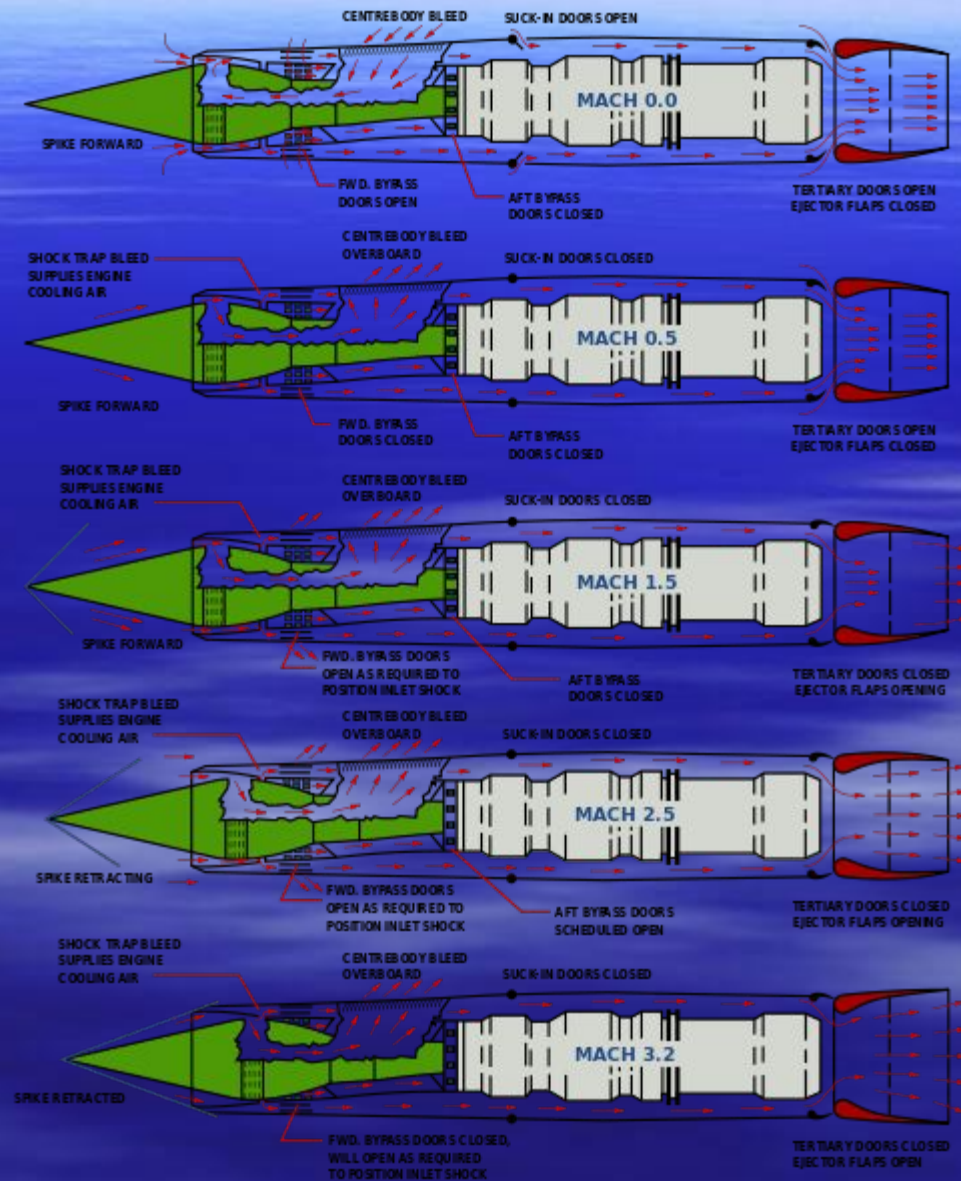
На скорости  $M=3$  для идеального ПВРД степень повышения давления по формуле (2) составляет 36,7, что сравнимо с показателями самых высоконапорных компрессоров турбореактивных двигателей, а термический КПД - 64,3%.



# SR-71



Локхид SR-71 — стратегический сверхзвуковой — стратегический сверхзвуковой разведчик ВВ С США. Неофициально был назван «Blackbird». Особенности данного самолёта являются высокая скорость и высота полёта, благодаря которым основным манёвром уклонения от ракет было ускорение и набор высоты. Максимально допустимая скорость: 3,2 М Практический потолок: 25910 м



# Гиперзвуковой ПВРД

M>5



Сверхзвуковой беспилотный самолет X-43A.

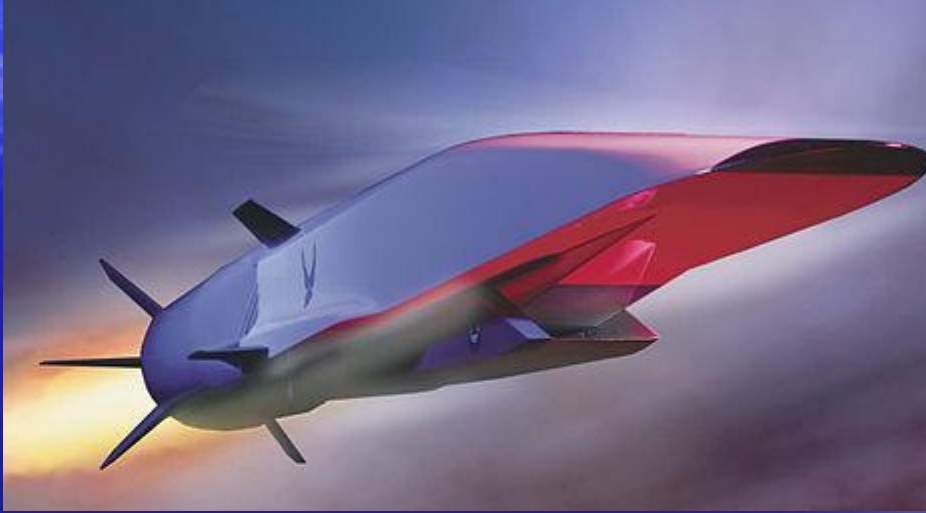
Длина - 3,7 м Вес 1300 кг, Скорость M=7 ( 8 тысяч км/ч)

Топливо – водород, H=12 км, t=10 сек

Разгон X-43A осуществлялся с помощью ракеты «Пегас», которая была выпущена из-под крыла стратегического бомбардировщика B-52.

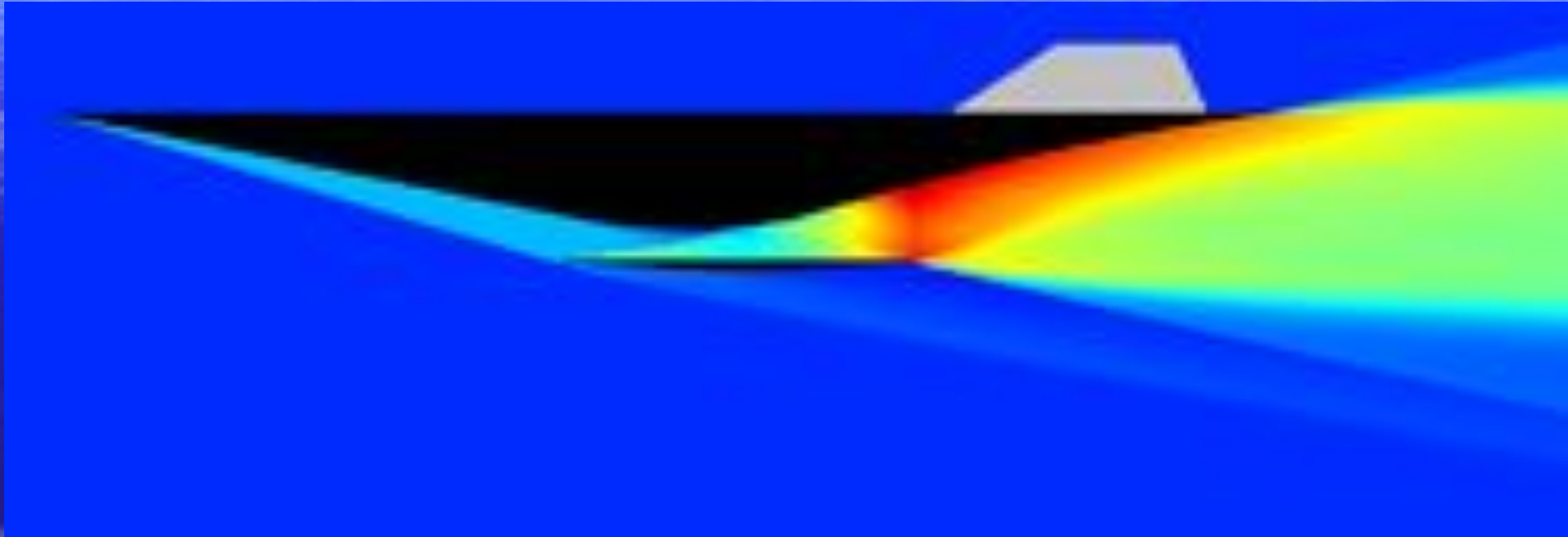


# X-51A Waverider



- **X-51A** — разрабатываемая в США гиперзвуковая — разрабатываемая в США гиперзвуковая крылатая ракета — разрабатываемая в США гиперзвуковая крылатая ракета. Разработка идёт в рамках концепции «быстрого глобального удара», основная цель — сократить подлётное время высокоточных крылатых ракет.
- Согласно проекту, X-51A должна развивать максимальную скорость около 6-7 M<sup>[1]</sup> (6,5-7,5 тыс. км/ч). В ходе первого самостоятельного полета аппарат должен развить скорость в 4,5 маха.
- 1 мая 1 мая 2013 года США провели успешные испытания ракеты над Тихим океаном. <sup>[7][7][8]</sup> Она была запущена с борта самолета B-52

# Иллюстрация газодинамических процессов в плоском ГПВРД



Сжатие воздуха происходит в двух скачках уплотнения: внешнем, образованном у носового окончания аппарата, и внутреннем – у передней кромки нижней стенки двигателя. Оба скачка – косые и скорость потока остаётся сверхзвуковой.

# Достоинства и недостатки

- **Достоинства**

- способностью работать на гиперзвуковых скоростях
- в самых высоких, наиболее разреженных слоях атмосферы

- **Недостатки**

- нулевая тяга на месте
- низкая эффективность на малых скоростях полёта



# Область применения ПВРД

- ПВРД неработоспособен при низких скоростях полёта, тем более — при нулевой скорости. Для достижения начальной скорости, при которой он становится эффективным, аппарат с этим двигателем нуждается во вспомогательном приводе, который может быть обеспечен, например, твёрдотопливным ракетным ускорителем, или самолётом-носителем, с которого запускается аппарат с ПВРД.
- Неэффективность ПВРД на малых скоростях полёта делает его практически неприемлемым для использования на пилотируемых самолётах, но для беспилотных, боевых, крылатых ракет одноразового применения, летающих в диапазоне скоростей  $2 < M < 5$ , благодаря своей простоте, дешевизне и надёжности, он предпочтителен.
- Также ПВРД используются в летающих мишенях. Основным конкурентом ПВРД в этой нише является ракетный двигатель.
- Верхний предел скорости гиперзвукового **ПВРД** (ГПВРД) без использования дополнительного окислителя (ГПВРД) без использования дополнительного окислителя оценивается в M (ГПВРД) без использования дополнительного окислителя оценивается в  $M=12—24$ . Исследования в рамках проекта «X-30» фирмы *Роквелл* в 80-х годах XX-го века установили верхнее значение скорости для работы ГПВРД, соответствующим M, соответствующим  $M=17$  в связи с обеспечением условий для сгорания в двигателе. Для сравнения, самый быстрый пилотируемый самолёт со сверхзвуковыми комбинированными турбопрямоточными воздушно-реактивными двигателями «SR-71» (англ. Black Bird, «Чёрный дрозд») компании Локхид) компании Локхид достигает скорости не выше M=3,4 из-за





ЗУРЗУР Bristol Bloodhound  
(Великобритания)



ЗУРЗУР Bomarc  
(США)



Корабельная ЗУРКорабельная ЗУР  
RIM-8 Talos (США)



Ракета воздух-воздух  
«Метеор» (Евросоюз)



Противокорабельная крылатая ракета БраМос. (Индия)



Противокорабельная крылатая ракета «Москит» (Россия)



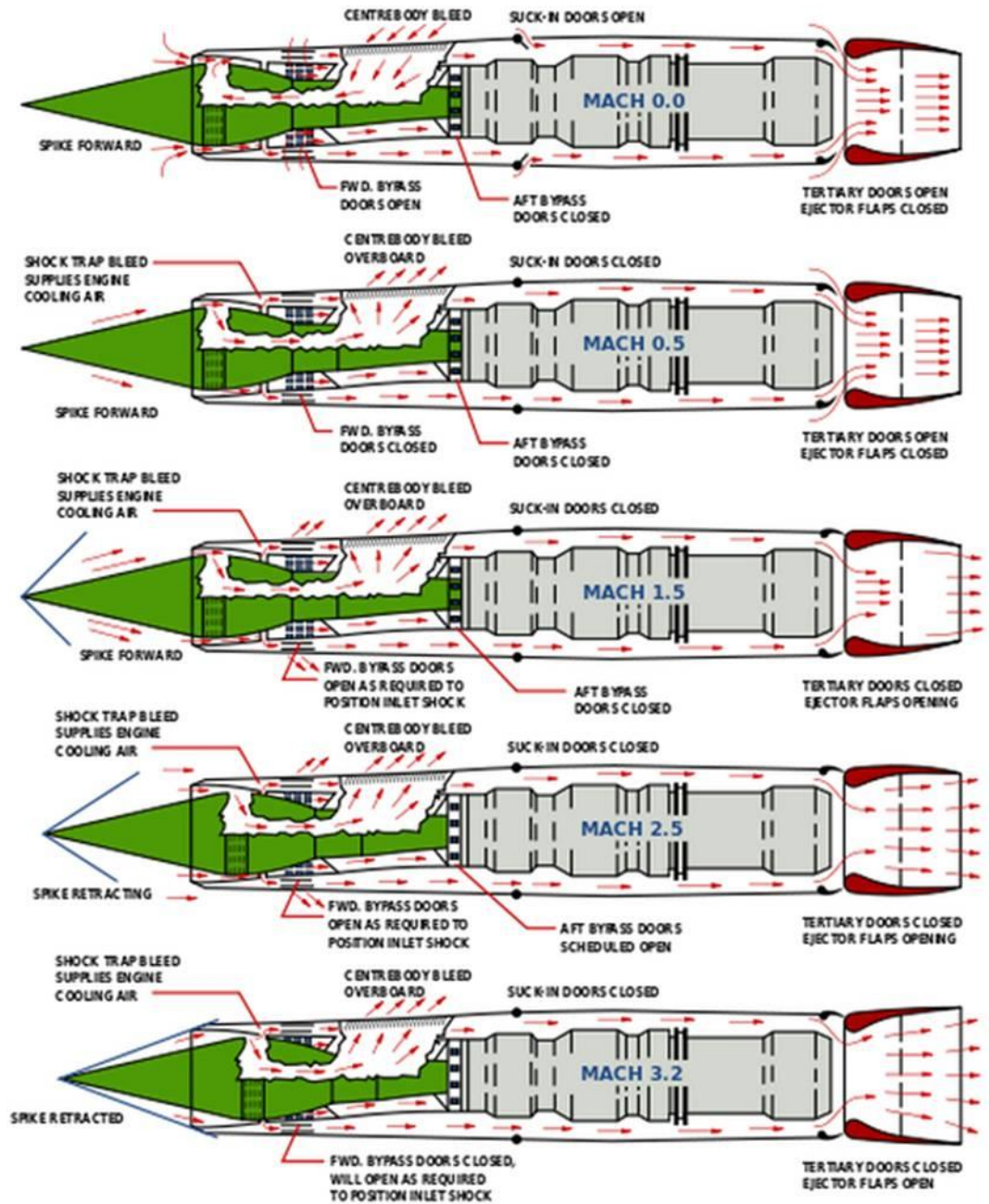
Противокорабельная крылатая ракета «Яхонт» (Россия).



Пусковая установка ЗРК Пусковая установка ЗРК «Круг» Пусковая установка ЗРК «Круг», снаряженная 2-мя ЗУР ЗМ8 (Россия)



# SR-71



# Пульсирующий воздушно-реактивный (ПуВРД).

- Пульсирующий воздушно-реактивный двигатель (ПуВРД) был изобретён в XIX веке шведским изобретателем Марином Вибергом
- Наиболее известным летательным аппаратом (и единственным серийным) с ПуВРД Argus As-014 производства фирмы Argus-Werken, явился немецкий самолёт-снаряд Наиболее известным летательным аппаратом (и единственным серийным) с ПуВРД Argus As-014 производства фирмы Argus-Werken, явился немецкий самолёт-снаряд Фау-1
- Главный конструктор Фау-1 Роберт Люссер выбрал для него ПуВРД не ради эффективности (поршневые авиационные двигатели той эпохи обладали лучшими характеристиками), а, главным образом, из-за простоты конструкции и, как следствие, малых трудозатрат на изготовление, что было оправдано при массовом производстве одноразовых снарядов, серийно



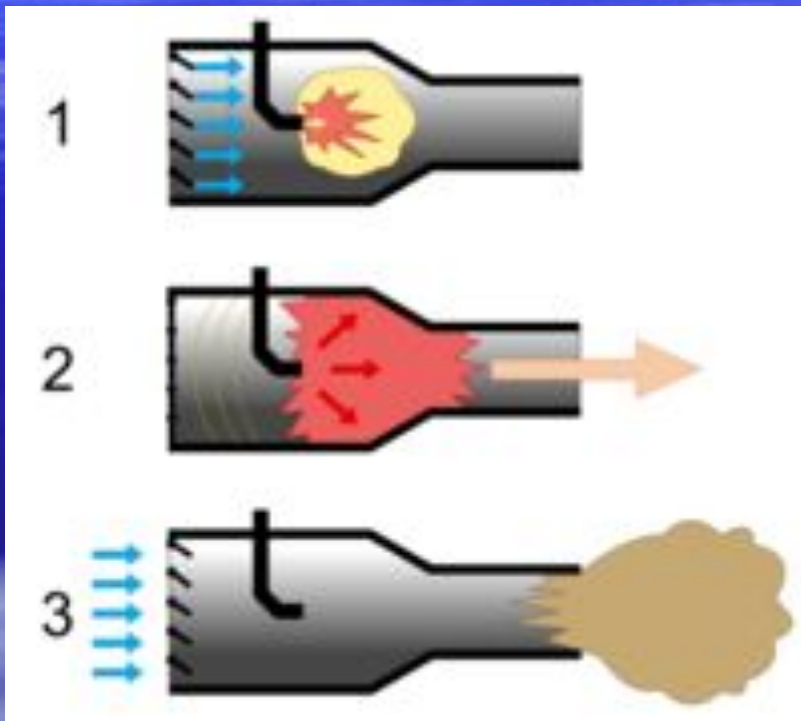
# Авиамодель с ПуВРД



# Принцип действия и устройство ПуВРД

- Пульсирующий воздушно-реактивный двигатель (ПуВРД, англоязычный термин Pulse jet), как следует из его названия, работает в режиме пульсации, его тяга развивается не непрерывно, как у ПВРД или ТРД, а в виде серии импульсов, следующих друг за другом с частотой от десятков герц, для крупных двигателей, до 250 Гц — для малых двигателей, предназначенных для авиамodelей.

# Принцип действия и устройство ПуВРД



- 1. Воздушный клапан открыт, воздух поступает в камеру сгорания, форсунка впрыскивает горючее, и в камере образуется топливная смесь.
- 2. Топливная смесь воспламеняется и сгорает, давление в камере сгорания резко возрастает и закрывает воздушный клапан и обратный клапан. Топливная смесь воспламеняется и сгорает, давление в камере сгорания резко возрастает и закрывает воздушный клапан и обратный клапан в топливном тракте. Продукты сгорания, расширяясь, истекают из сопла, создавая реактивную тягу.
- 3. Давление в камере уравнивается с атмосферным, под напором воздуха в диффузоре воздушный клапан открывается и воздух начинает поступать в камеру, топливный клапан тоже открывается, двигатель переходит к



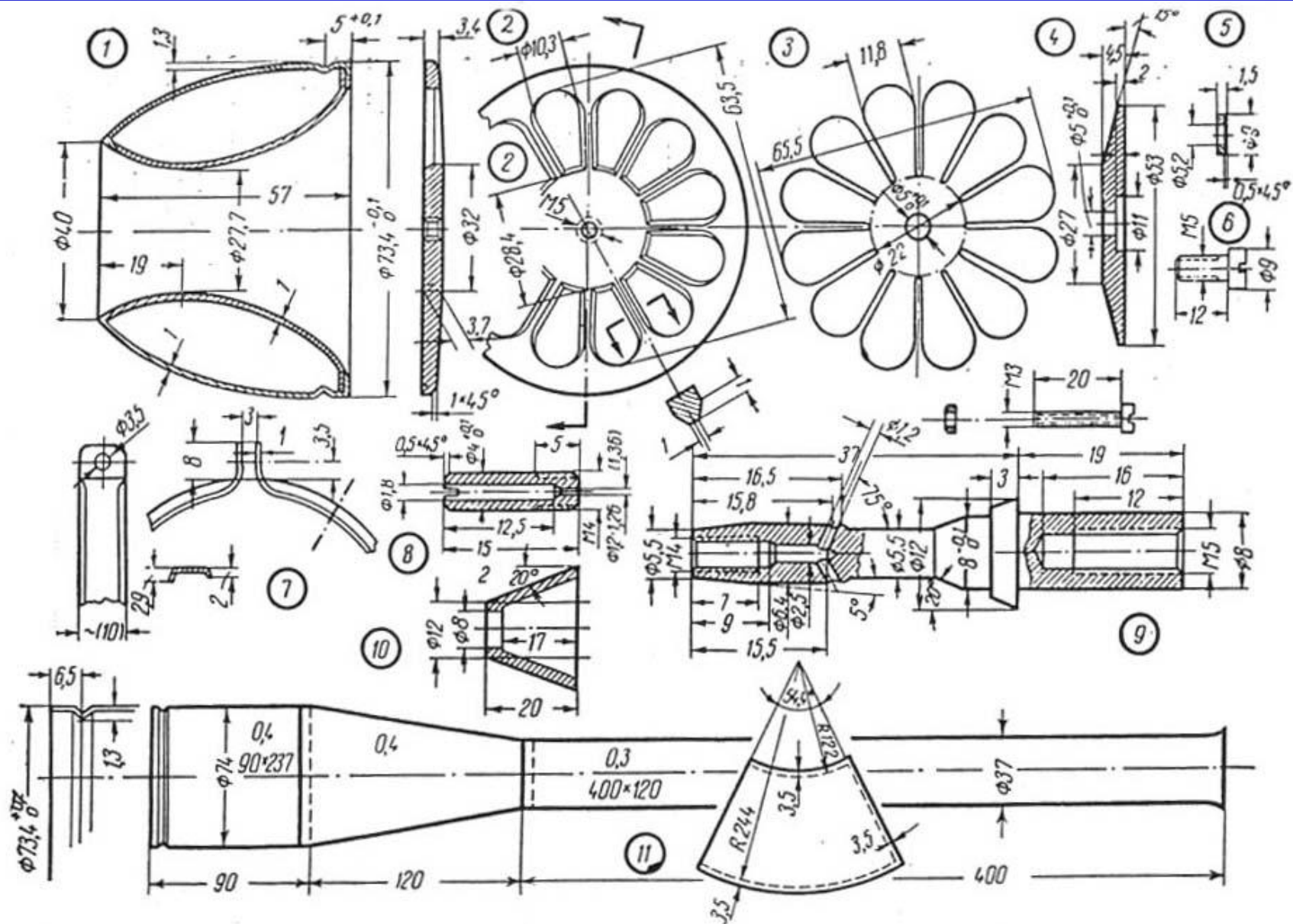


Рис. 63. ПуВРД Аэроджет-2:

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





© НОВОСТИ КОСМОНАВТИКИ



# Область применения ПуВРД

- ПуВРД характеризуется как **шумный и неэкономный**, зато **простой и дешёвый**. Высокий уровень шума и вибрации вытекает из самого пульсирующего режима его работы. О неэкономном характере использования топлива свидетельствует обширный факел, «бьющий» из сопла ПуВРД — следствие неполного сгорания топлива в камере.
- Сравнение ПуВРД с другими авиационными двигателями позволяет довольно точно определить область его применимости.
- ПуВРД во много раз дешевле в производстве, чем газотурбинный ПуВРД во много раз дешевле в производстве, чем газотурбинный или поршневой ДВС, поэтому при одноразовом применении он выигрывает экономически у них.
- По простоте и дешевизне ПВРД практически не уступает ПуВРД, но на скоростях менее 0,5М он неработоспособен. На более высоких скоростях, ПВРД превосходит по эффективности ПуВРД (при закрытом клапане резко возрастает лобовое сопротивление ПуВРД и на околосвуковых скоростях оно «съедает» почти всю тягу, создаваемую этим двигателем).
- Совокупность этих обстоятельств и определяют ту нишу, в которой находит применение ПуВРД — беспилотные летательные аппараты одноразового применения с рабочими скоростями до 0,5М,— летающие мишени, беспилотные разведчики. [15]
- Клапанные, также как и бесклапанные, ПуВРД имеют распространение в любительской авиации и авиамоделировании, благодаря простоте и дешевизне.