

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(национальный исследовательский университет)»

**ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ УСТРОЙСТВА
ВОЗДУШНО – РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Методические указания

Самара 2015

Составитель: Ф.В. Паровой

УДК 621.454.2

ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ УСТРОЙСТВА ВРД:
Методические указания / Самарс. гос. аэрокосм. ун-т; Сост.
Ф.В. Паровой. Самара, 2015, 18 с.

Методические указания предназначены для закрепления и углубления материала, читаемого в курсах лекций «Введение в специальность» и «История науки и техники». Студенты знакомятся с назначением, классификацией, принципом работы и конструкцией входных и выходных устройств ВРД, а также достижениями отечественного авиационного двигателестроения на реальных образцах техники, находящихся в Центре истории авиационных двигателей кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

Методические указания предназначены для студентов института двигателей летательных аппаратов всех специальностей.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва.

1. ЦЕЛЬ ЗАНЯТИЯ И ЗАДАНИЕ СТУДЕНТУ

Цель практического занятия «Входные и выходные устройства ВРД» - ознакомить первокурсника - будущего специалиста по двигателестроению с назначением, принципом действия, классификацией, конструкцией входных и выходных устройств воздушно-реактивных двигателей, а также с взаимосвязью учебных дисциплин, которые будет изучать студент СГАУ.

Задание студенту:

- 1) проработать настоящие методические разработки в течение 35 минут (здесь и далее время указано ориентировочно);
- 2) проверить свои знания, ответив устно на контрольные вопросы (10 минут);
- 3) оформить отчёт по практическому занятию, включающий название работы, цель, необходимые иллюстрации, сопровождающие выполнение заданий по п. 4-8, выводы по работе. Отчёт рекомендуется оформлять в лекционной тетради (25 минут);
- 4) изобразить в отчёте схемы дозвукового (рис. 2) и сверхзвукового (рис. 3) входных устройств, указать основные элементы (15 минут);
- 5) зарисовать схему сверхзвукового реактивного сопла (рис. 4,б), показать основные элементы и возможные способы его регулирования (15 минут);
- 6) изобразить схему реверсивного устройства (рис. 5), указать основные элементы (15 минут);
- 7) ознакомиться с основными элементами реактивного сопла, форсажной камеры и реверсивного устройства одного из двигателей (по макету и плакату) по указанию преподавателя и зарисовать в тетрадь их классификационные признаки (20 минут).
- 8) выполнить и отметить в отчёте индивидуальное задание

преподавателя (20 минут).

- 9) завершить оформление отчёта, сформулировать и записать выводы по работе.

Отведённые для выполнения задания практического занятия «Входные и выходные устройства ВРД» четыре академических часа рекомендуется распределить в соответствии с приведённой выше разбивкой.

За 25 минут до окончания занятия необходимо быть готовым к опросу.

Приём практического занятия фиксируется в отчёте студента и групповом журнале подписью преподавателя и датой приёма.

2. КОНСТРУКЦИЯ ВХОДНЫХ УСТРОЙСТВ

Входные устройства ГТД предназначены для забора атмосферного воздуха, сжатия его под действием скоростного напора и подачи к компрессору двигателя.

Сжатие воздуха во входном устройстве осуществляется за счёт использования кинетической энергии набегающего потока. Эффективность этого процесса растёт с увеличением скорости полёта.

Основным конструктивным элементом входного устройства является *воздухозаборник*, за которым расположен канал, подводящий воздух к двигателю.

Воздухозаборник выполняется таким образом, чтобы свести к минимуму потери энергии, связанные с перемещением и сжатием воздуха. Кроме того, он должен работать устойчиво при различных скоростях полёта и режимах работы двигателя.

Входные устройства классифицируются в зависимости от расчётного числа M (число Маха M – отношение скорости полёта к скорости звука) полёта и формы поперечного входного сечения воздухозаборника (рис. 1).

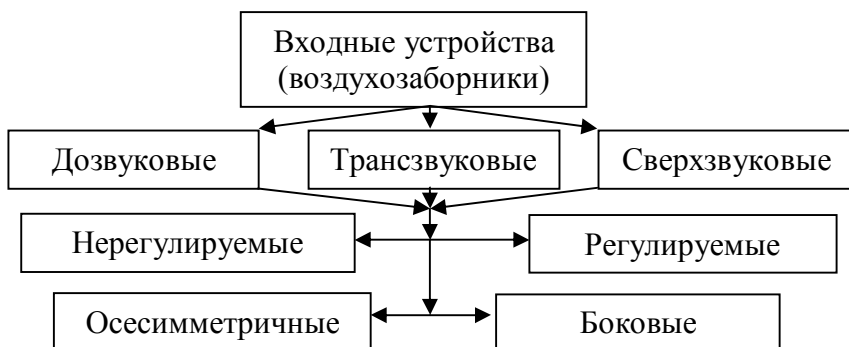


Рис. 1. Классификация входных устройств

Дозвуковые входные устройства ($M < 1$) представляют собой профилированный расширяющийся канал (диффузор) с скруглёнными входными кромками для предотвращения срыва потока.

Интенсивность сжатия потока в канале воздухозаборника определяется степенью изменения площади поперечного сечения канала по его длине (степенью раскрытия канала).

На практике степень раскрытия канала ограничена возможностью отрыва слоя воздуха от стенок и связанными с этим отрывом потока, образованием обратных течений и вихрей.

Схема работы дозвукового воздухозаборника показана на рис. 2. В качестве расчётного режима дозвукового воздухозаборника обычно используют режим, когда скорость потока на входе $W_{\text{вх}}$ составляет половину максимальной скорости полёта ($V > W_{\text{вх}}$). При этом основное сжатие воздуха происходит ещё до входа его в воздухозаборник. В результате уменьшаются потери, сокращается длина и масса входного устройства.

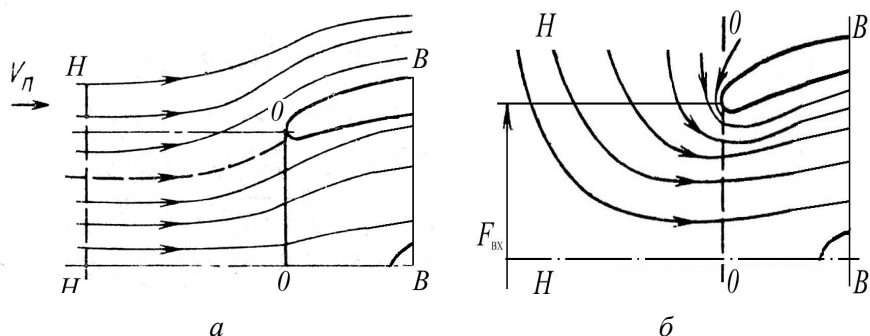


Рис. 2. Дозвуковое входное устройство на расчётном режиме полёта (а) и при $V_n = 0$ (б)

Трансзвуковые воздухозаборники для летательных аппаратов с небольшими сверхзвуковыми скоростями полёта ($1 < M < 1,5$) выполняются по типу дозвуковых, но с заострённой передней кромкой. Торможение потока до дозвукового в таком воздухозаборнике осуществляется в скачке уплотнения, в котором происходит резкое изменение основных параметров потока (скачкообразно изменяются давление, скорость, температура).

В сверхзвуковых воздухозаборниках ($M > 1,5$) торможение потока осуществляется последовательно в системе скачков уплотнения (рис. 3).

Скачки уплотнения организуются поверхностью ступенчатого центрального тела 1 - конуса или клина. Число скачков выбирают в зависимости от расчётного числа M . На расчётном режиме все скачки фокусируются на передней кромке воздухозаборника. В косых скачках 3 последовательно снижается скорость сверхзвукового потока, а в прямом 4 осуществляется переход к дозвуковому потоку.

За прямым скачком 4 канал воздухозаборника выполняют форме сужающе-расширяющегося сопла (сопла Лавалья), самое узкое место которого называют горлом воздухозаборника 5.

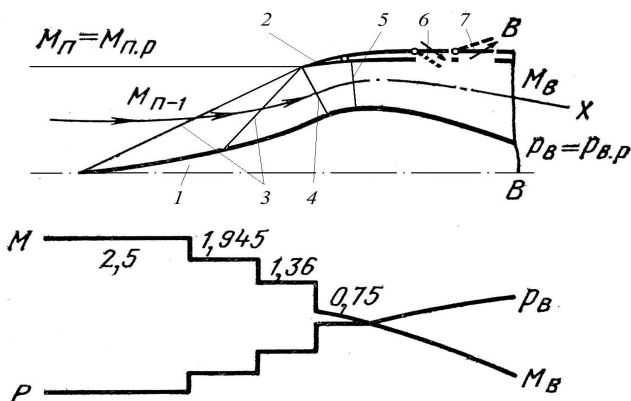


Рис. 3. Схема сверхзвукового входного устройства:

- 1 - центральное тело, 2 - обечайка, 3 - косые скачки уплотнения, 4 - прямой скачок уплотнения, 5 - горло воздухозаборника, 6 - створки выпуска воздуха, 7 - створки впуска воздуха

На нерасчётных режимах полёта и работы двигателя сверхзвуковые (воздухозаборники могут работать неустойчиво. Неустойчивая работа сопровождается уменьшением расхода воздуха, сильными пульсациями потока. Это может привести к выключению двигателя или даже разрушению его элементов. Для устранения неустойчивой работы применяют регулируемые воздухозаборники, согласующие расходы воздуха через систему скачков, горло и двигатель. Конструктивно регулируемые воздухозаборники могут выполняться с перемещающимся в осевом направлении центральным телом, изменяющим форму канала; с использованием специальных створок для уменьшения b (см. рис. 3) или увеличения 7 проходного сечения.

Входные устройства в зависимости от компоновки двигателей на самолёте могут быть осесимметричными или боковыми.

Воздухозаборник и воздушный канал обычно составляют часть планера самолёта, поэтому на большинстве двигателей-макетов элементы воздухозаборников отсутствуют.

При работе двигателей на детали входных устройств действуют распределённые газовые нагрузки, результирующее действие которых заключается в растягивающих напряжениях для корпуса и осевой силе, направленной вперёд по направлению полёта. Кроме того, на детали входных устройств, как и на все элементы самолёта и двигателя действуют сила тяжести и вибрационные нагрузки.

Детали входных устройств выполняют в основном из лёгких алюминиевых или магниевых сплавов, поскольку они работают в благоприятных температурных условиях.

В конструкцию входных устройств иногда включают элементы для очистки воздуха от механических примесей - пыли, песка, льда и прочих посторонних предметов.

Показателями технического совершенства входных устройств являются:

- минимальные потери, сопровождающие преобразование кинетической энергии набегающего потока в потенциальную энергию сжатого воздуха;
- минимальные размеры и масса входного устройства;
- обеспечение устойчивой работы во всём диапазоне изменения режимов полёта и работы двигателя.

3. КОНСТРУКЦИЯ ВЫХОДНЫХ УСТРОЙСТВ

В зависимости от типа и назначения двигателя *выходные устройства* содержат различный набор конструктивных элементов.

Реактивное сопло необходимо для ускорения газового потока с целью создания тяги.

Форсажная камера служит для дополнительного подвода

тепла к отходящим от турбины газам.

Реверсивное устройство предназначено для создания отрицательной тяги и применяется для сокращения пробега самолёта при посадке.

Помимо перечисленных выше элементов выходное устройство может включать специальные устройства, например *шумоглушитель*.

3.1. РЕАКТИВНЫЕ СОПЛА

Реактивные сопла могут быть дозвуковыми и сверхзвуковыми.

Дозвуковое реактивное сопло представляет собой сужающийся канал. В нём скорость движения газового потока увеличивается, но не превышает скорости звука.

Такое сопло входит в состав большинства дозвуковых ТРД, ТРДД, ТВД и ТВВД. В ТРДД для наружного и внутреннего контуров возможно использование отдельных сопел (Д-20П, Д-36, Д-18Т, НК-86) или общего сопла (Д-30, НК-8).

Схема выходного устройства дозвукового ТРД представлена на рис. 4,а. Перед входом в сужающийся реактивный насадок 4 имеется канал с коническим обтекателем 1, преобразующий кольцевой поток газов за турбиной в круглый. Стойки 3 имеют обтекаемые профили и используются также для спрямления потока газа, закрученного после турбины.

Сверхзвуковое сопло (рис. 4,б) имеет после сужающегося участка (аналогичного дозвуковому соплу) расширяющийся канал. В сужающемся участке происходит разгон газа до звуковой скорости. В самом узком месте (критическом сечении) поток достигает скорости звука.

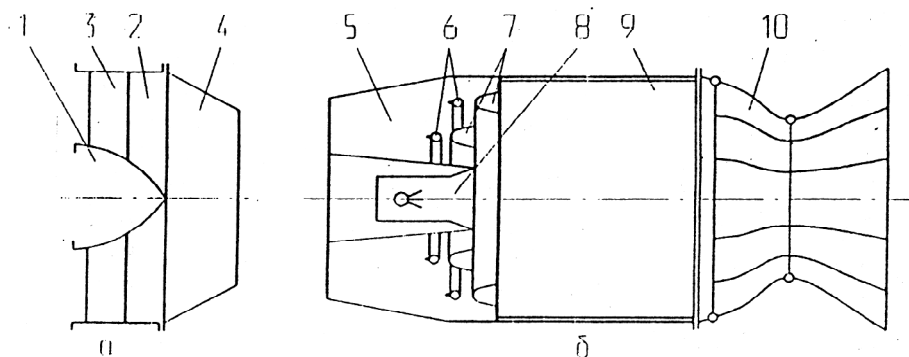


Рис. 4. Выходное дозвуковое устройство ТРД (а) и выходное устройство ТРДФ с форсажной камерой и регулируемым сверхзвуковым реактивным соплом (б):
 1 - конус-обтекатель, 2 - выходная труба, 3 - стойки, 4 - реактивное сопло, 5 - 9 - элементы форсажной камеры:
 5 - диффузор, 6 - топливные коллекторы с форсунками, 7 - стабилизаторы пламени, 8 - воспламенитель, 9 - экран, 10 - регулируемое сверхзвуковое реактивное сопло

Дальнейшее ускорение сверхзвукового потока осуществляется в расширяющейся части сопла.

Реактивное сопло проектируется так, чтобы обеспечить полное расширение газа до атмосферного давления с минимальными потерями энергии.

Нерегулируемые реактивные сопла могут эффективно выполнять свою задачу лишь на одном определённом режиме работы двигателя, для которого проводились их расчёт и профилирование.

Поэтому сверхзвуковые реактивные сопла чаще всего выполняют регулируемыми. Регулирование осуществляется изменением размеров сечений сопел и даёт возможность обеспечить высокую эффективность в широком диапазоне режимов работы двигателя в различных условиях полёта.

При наличии форсажной камеры сгорания использование регулируемого сопла становится обязательным.

Реактивные сопла могут регулироваться различными способами. Один из самых распространённых способов использования поворотных створок, управляемых специальной гидравлической системой. Такой способ регулирования использован в двигателях Р-11Ф2-300, НК-144, НК-6, Р-29, АЛ-7Ф, АЛ-31Ф (см. макеты двигателей и плакаты). Поворотные створки (литые или сварной конструкции) крепятся при помощи петель к проушинам корпуса. По бокам створок имеются крыло с одной стороны и паз с другой. В комплекте крыло одной створки входит в паз другой, обеспечивая возможность синхронного перемещения створок вокруг петель и необходимую герметичность стыков. Створки изготавливают из жаропрочных сплавов и покрывают изнутри эмалью для предохранения от газовой эрозии. Положение створок фиксируется с помощью кольца, перемещаемого вперёд тремя силовыми гидроцилиндрами, перемещение кольца назад для увеличения проходного сечения сопла осуществляется под действием газовых сил.

Сверхзвуковые сопла чаще всего регулируются с помощью двух рядов створок. Один ряд образует сужающуюся часть сопла и регулирует критическое сечение, а второй ряд образует расширяющуюся часть (двигатели НК-144, АЛ-31Ф).

Обеспечение надёжной работы реактивного сопла связано с необходимостью охлаждения его элементов, контактирующих с горячим газовым потоком. На детали реактивного сопла помимо высокой температуры и эрозионного воздействия газов действуют распределённые усилия давления газов, результирующая осевая составляющая которых направлена в сторону, противоположную направлению полёта.

Для изготовления деталей реактивного сопла используют коррозионно-стойкие и жаропрочные сплавы.

3.2. ФОРСАЖНЫЕ КАМЕРЫ

Форсажная камера (ФК) включается в состав выходного устройства ТРДФ или ТРДДФ для повышения тяги на сверхзвуковых режимах полёта и устанавливается перед реактивным соплом. Буква «Ф» в обозначении типа двигателя обычно указывает на наличие форсажной камеры.

Основные элементы форсажной камеры (рис. 4,б):

- диффузор 5, устанавливаемый на входе в ФК и служащий для снижения скорости потока газов, поскольку чем ниже скорость перемещения потока, тем меньшая длина ФК необходима для полного сгорания топлива;
- топливные коллекторы 6 с форсунками для подвода топлива и впрыска его в ФК;
- стабилизаторы пламени 7, выполненные из листового металла уголкового сечения для завихрения газового потока с целью более тщательного перемешивания топлива и интенсивного его сгорания,
- воспламенитель 8 для зажигания топлива в форсажной камере;
- акустический экран 9, предназначенный для устранения неустойчивых режимов работы ФК и вибрационного горения.

Техническое совершенство ФК характеризуется:

- максимальной полнотой сгорания топлива;
- минимальными гидравлическими потерями энергии газового потока, проходящего через ФК как при её работе, так и на бесфорсажных режимах работы двигателя;
- отсутствием неустойчивых режимов работы;
- надёжным воспламенением ФК.

Среди двигателей-макетов имеются следующие ГТД, оснащённые ФК: ТРДФ: Р-11Ф2-300, АЛ-7Ф, Р-29, ТРДДФ: НК-6, НК-144, АЛ-31Ф.

Действующие нагрузки и материалы, применяемые в ФК, аналогичны нагрузкам и материалам реактивных сопел.

3.3. РЕВЕРСИВНЫЕ УСТРОЙСТВА

В состав элементов выходного устройства может входить *реверсивное устройство* (РУ). Создаваемая им отрицательная тяга служит для торможения ЛА после посадки.

Реверсирование в большинстве случаев достигается поворотом потока газа с помощью отклоняющих решёток или створок и направлением его навстречу движению самолёта.

Схема одной из конструкции РУ показана на рис. 5.

Основные элементы РУ: створки 1 перекрывают газовый поток для нейтрализации прямой тяги. Отклоняющие решётки 2 предназначены для направления потока газов в сторону движения самолёта под углом $40...60^\circ$ к оси двигателя. Система управления реверсом 3 служит для перемещения створок. Такие РУ применяют в ТРДД со степенью двухконтурности до 2,5 (двигатели НК-8, Д30).

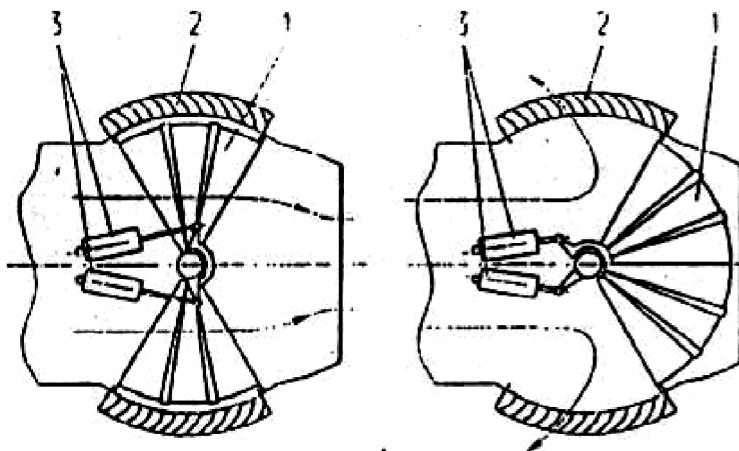


Рис. 5. Схемы реверсивного устройства в положении «прямая тяга» (а) и при включенном реверсе (б): 1 - створки, 2 - отклоняющиеся решётки, 3 - система управления реверсом

В ТРДД с большой степенью двухконтурности ($m > 4$) РУ устанавливают только в наружном контуре. Это можно допустить, поскольку доля внутреннего контура в тяге двигателя не превышает 25%. В этом случае элементы РУ работают при пониженной температуре и могут быть изготовлены из лёгких материалов. Реверсивные струи воздуха не вызывают негативных воздействий на поверхности самолёта и взлётно-посадочной полосы. Внутренний контур ТРДД работает одинаково на режимах прямой тяги и реверса.

Техническое совершенство РУ оценивается:

- минимальными потерями прямой тяги при выключенном реверсе,
- максимальным коэффициентом реверсирования (отношением обратной тяги к прямой),
- минимальными массой и габаритами,
- минимальными искажениями, вносимыми РУ в режим работы двигателя.

Для реверсирования ТВД применяют поворот лопастей воздушного винта изменяемого шага.

В ТРД, ТРДФ, ТРДДФ реверсивные устройства не применяют. Для сокращения пробега после посадки в самолётах с такими двигателями используют другие средства: тормозную систему шасси, тормозные парашюты.

3.4. ШУМОГЛУШИТЕЛИ

При работе ТРД основным источником шума двигателя является реактивное сопло, из которого с огромной скоростью вытекает газовый поток - реактивная струя. Для снижения шума реактивной струи выходные устройства могут оснащаться *шумоглушителями*.

Работа шумоглушителя основывается на дроблении

реактивной струи на несколько мелких струй, имеющих более высокочастотные, но менее мощные шумовые характеристики. Схема такого шумоглушителя показана на рис. 6.

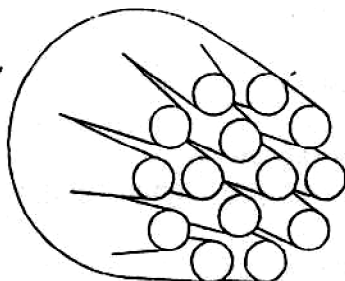


Рис. 6. Шумоглушитель

Малые струи, выходящие из шумоглушителя, имеют большую суммарную площадь смешивания газов с окружающим воздухом. Это уменьшает перепад давления на границе смешения и снижает шум.

К числу мероприятий по шумоглушению относятся также звукопоглощающие покрытия, состоящие из сотового заполнителя и пористой обшивки со стороны потока воздуха или газа.

4. ВЗАИМОСВЯЗЬ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН, КАСАЮЩИХСЯ ИЗУЧЕНИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ УСТРОЙСТВ

Работа входных и выходных устройств сопровождается изменением параметров газового потока, причём в них происходит взаимосвязанное изменение всех параметров газа. Подробно изучить свойства газов, их поведение и изменение параметров при работе входных и выходных устройств помогут учебные дисциплины «Газовая динамика» и

«Термодинамика».

Профилирование каналов входных и выходных устройств осуществляют на основании законов, изучаемых в дисциплине «Теория двигателей». Благодаря этой дисциплине согласовывают также характеристики отдельных узлов двигателя.

Чтобы создать двигатель, необходимо разработать его конструкцию, выбрать методы соединений отдельных его элементов и обеспечить работоспособность всех его узлов. Для этого нужно знать, какие статические и динамические нагрузки действуют на различные детали конструкции и по этим нагрузкам рассчитать прочность деталей. На эти вопросы дают ответы предметы «Конструкция двигателей», «Динамика и прочность двигателей». Методы расчётов на прочность деталей изучаются также в учебных дисциплинах «Сопротивление материалов» и «Детали машин».

Вопросы изготовления деталей, производства и сборки двигателей различными методами изучаются в дисциплинах «Резание», «Основы взаимозаменяемости», «Технология и производство двигателей», «Сборка двигателей», «Обработка металлов давлением» и «Сварка».

Основы строения, проектирования, выбора материалов с требуемыми характеристиками, удовлетворяющими разнообразным требованиям различных случаев применения в двигателе студенты изучают в дисциплине «Авиационное материаловедение».

Эти и ещё многие другие дисциплины позволят, студентам стать высококвалифицированными специалистами по двигателестроению.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите назначение и основные конструктивные элементы входного устройства.
2. В чём разница между дозвуковыми, трансзвуковыми и сверхзвуковыми входными устройствами?
3. Каким образом можно регулировать входные устройства?
4. Р-11Ф2-300 - двигатель сверхзвукового самолёта. Где у него воздухозаборник? Покажите элементы входного устройства.
5. Какие характеристики определяют совершенство входного устройства?
6. Назовите основные элементы выходных устройств и их назначение.
7. Какие требования предъявляются к выходным устройствам?
8. Чем различаются дозвуковые и сверхзвуковые реактивные сопла?
9. Каким образом можно регулировать реактивные сопла?
10. Назовите основные элементы форсажной камеры и найдите их на макете, двигателя (по указанию преподавателя).
11. Какие материалы применяются для изготовления деталей форсажной камеры?
12. Какими способами можно осуществить торможение самолёта после посадки?

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Цель занятия и задание студент	3
2. Конструкция входных устройств	4
3. Конструкция выходных устройств	8
3.1. Реактивные сопла	9
3.2. Форсажные камеры	12
3.3. Реверсивные устройства	13
3.4. Шумоглушители	14
4. Взаимосвязь учебных дисциплин, касающихся изучения входных и выходных устройств	15
5. Контрольные вопросы	17

Учебное издание

ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ УСТРОЙСТВА ВРД

Методические указания

Составитель: Паровой Федор Васильевич

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва
443086 Самара. Московское шоссе, 34

