

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-МОДЕЛЕЙ
ИХ ЭЛЕМЕНТОВ.
ЧАСТЬ 2: РЕАКТИВНОЕ СОПЛО
ТРДДФ Д-30Ф6

*Утверждены Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний*

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

УДК 621.452.221.3.01(075.8)
ББК 39.55
И 395



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий"**

Составители: *Д.К. Новиков, С.В. Фалалеев, Н.И. Старцев, Ю.И. Цыбизов,
Б.Б. Шмаков, А.Н. Шацкий, Е.А. Папин, А.М. Уланов*

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

ИЗ95 **Изучение конструкции двигателей с использованием 3D-моделей их элементов. Часть 2: Реактивное сопло ТРДДФ Д-30Ф6: метод. указания / [Сост. Д.К. Новиков и др.]** Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 23с. : ил.

Рассмотрена конструкция реактивного сопла ТРДДФ Д-30Ф6. Дано описание кинематической схемы, конструкции основных элементов сопла с использованием их объемных моделей.

Методические указания предназначены для студентов факультета двигателей летательных аппаратов, обучающихся по специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки". Подготовлены на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

Содержание

Предисловие	4
1. Общие сведения	5
2. История создания ТРДДФ Д-30Ф6	6
3. Типовые профили полета при работе двигателей самолетов различного назначения на основных режимах	7
4. Работа реактивного сопла	8
4.1. Схема сопла	8
4.2. Основные режимы работы	8
5. Конструкция реактивного сопла двигателя Д-30Ф6	11
5.1. Кинематическая схема сопла	11
5.2. Дозвуковая часть сопла и первая часть после нее (механическое управление)	12
5.3. Конструкция створок, проставок, их подвеска	14
5.4. Система управления створками	14
5.5. Система синхронизации и центрирования	15
5.6. Доводка конструкции	18
6. Гидравлическая система управления соплом на действующем макете сопла	19
7. Инструкция по работе с гидравлической системой на макете	21
8. Методические указания по проведению лабораторной работы	21

Предисловие

Создание современного авиационного двигателя (АД) - сложный процесс, включающий деятельность многих специалистов в различных областях знаний. Конструктор должен целенаправленно использовать все свои знания, а также знания других специалистов для поиска оптимальных конструкторских решений, обеспечивающих высокий уровень характеристик создаваемого АД. Для этого он должен владеть основами проектирования АД в целом и отдельных их элементов.

Разработанные методические указания по изучению конструкции реактивного сопла (РС) двигателя предназначены для использования в учебной дисциплине «Конструирование основных узлов и систем авиационных двигателей и энергетических установок» для студентов, обучающихся по специальности 160301 «Авиационные двигатели и энергетические установки». Данная дисциплина является связующей цикла специальных дисциплин, формирующих всестороннюю подготовку конструкторов по авиационным двигателям и энергетическим установкам (ЭУ), по следующим направлениям: теория АД и ЭУ, теория и расчет лопаточных машин АД и ЭУ, проектирование и конструирование АД и ЭУ, надежность АД и ЭУ, компьютерные технологии проектирования и конструирования АД и ЭУ, автоматическое регулирование АД и ЭУ, технология сборки АД и ЭУ.

Перед студентами ставится задача в рамках лабораторной работы изучить принципы построения конструкции реактивных сопел с использованием объемных моделей их элементов. Такие лабораторные работы формируют навыки конструирования сложных узлов АД и ЭУ и обеспечивают глубокое изучение предмета.

Авторы выражают признательность студентам Демину В.Г., Давыдову Д.П., Клусачеку М. и Быкову А.С. за помощь в составлении объемных изображений элементов сошла.

1. Общие сведения

За время развития авиации, которое шло по пути освоения больших высот, сверхзвуковых скоростей, большой дальности и грузоподъемности, боевой эффективности и т.д., наиболее существенные изменения претерпели выходные устройства силовых установок (СУ).

Выходное устройство предназначено для преобразования энергии газа, выходящего из двигателя, в энергию реактивной тяги заданного направления. Кроме того, выходное устройство используется для поддержания соответствующего режима работы турбокомпрессора с помощью необходимой площади выходного сечения, для транспортирования газа в фюзеляже или гондоле двигателя, для снижения уровня шума высокоскоростной струи газа и для экранирования прямого инфракрасного (ИК) излучения высокотемпературных элементов газогенератора.

Однако, несмотря на кажущееся многообразие конструкций этих устройств, принципиальное схемное решение их ограничено следующими типами:

- сужающиеся (дозвуковые) сопла;
- эжекторные сопла с разрывом контура вторичного контура в сверхзвуковой части и подачей вторичного воздуха в разрыв;
- сопла с непрерывным контуром сверхзвуковой части;
- сопла с центральным телом.

Конструктивная схема и тип сопла определяются исходя из назначения и решаемых задач летательного аппарата (ЛА), а также из типа и размерности двигателя и компоновки СУ на самолете.

Двигатели с форсажной камерой требуют обязательного применения РС с изменяемой площадью проходного сечения, т. е. регулируемого сопла. Это необходимо для обеспечения возможности сохранения одинакового или близкого режимов работы турбокомпрессора двигателя на форсированном и нефорсированном режимах, так как струя подогретого в форсажной камере газа требует большей площади проходного сечения. В противном случае возникает перегрев турбины или помпаж компрессора двигателя.

Одновременно регулируемое сопло позволяет ускорить и облегчить запуск и приемистость двигателя, получить минимальный удельный расход топлива на крейсерском режиме, увеличить запас устойчивости компрессора. На двигателях без форсажной камеры, предназначенных для использования при дозвуковых скоростях и на двигателях с форсажной камерой, работающих на небольших сверхзвуковых скоростях, регулируемое сопло обычно не применяется из-за экономии массы.

Основные задачи, решаемые регулируемым соплом в составе двигателя силовой установки ЛА:

1. Обеспечение требуемой пропускной способности (а именно, площади критического сечения сопла) на всех возможных стационарных и переменных режимах работы двигателя, включая все виды приемистостей и аварийных сбросов.

2. Обеспечение приемлемого уровня требуемых полетных тяг силовой установки на основных режимах полета ЛА путем изменения площади проходных сечений за критическим сечением сопла.

Если к настоящему времени еще требуется уточнение ряда вопросов создания высокоэффективного многорежимного двигателя сверхзвукового ЛА, сочетающего лучшие качества

дозвукового и сверхзвукового самолетов в отдельности, то основные требования к регулируемому соплу вполне очевидны.

На основании накопленного опыта создания и эксплуатации основным требованием, предъявляемым к соплу, является обеспечение максимальной интеграции элементов системы "двигатель-СУ-ЛА" при минимальной массе сопла и трудозатратах на изготовление и обслуживание.

В настоящее время к регулируемому соплу предъявляются дополнительные специальные требования - обеспечение низкого уровня инфракрасного излучения (ИКИ) горячих частей турбины, деталей сопла и реактивной струи, а также низкий уровень эффективной площади рассеяния (ЭПР) радиолокационного сигнала.

Сформулированные задачи и основные требования решает конструкция регулируемого сопла двигателя Д-30Ф6. Сопло этого двигателя является сложной пространственной конструкцией, имеющей свою систему управления. Тип и конструкция реактивного сопла сильно различаются на различных самолётах и зависят от конструкторского опыта и предпочтений фирмы-разработчика, назначения двигателя, параметров мотогондолы и летательного аппарата и требуемых параметров самого сопла. Кроме этого, они зависят от выбранных методов управления створками, синхронизации перемещения створок, центрирования створок и охлаждения сопла.

Изучение конструкции сопла всегда являлось серьезной проблемой для студентов. Поэтому в настоящей лабораторной работе предложена комплексная система, призванная поднять качество обучения студентов. Основными компонентами этой системы являются использование современных геометрических систем трехмерного моделирования с применением анимации, а также применение подвижного макета сопла, который приводится в движение гидравлическими средствами.

2. История создания ТРДДФ Д-30Ф6

ТРДДФ Д-30Ф6 был создан пермским ОАО "Авиадвигатель" в 1976 году для применения на истребителе МиГ-31/31 Б/31БМ и Су-47 (Беркут) и обладает форсажной тягой в 155 кН. ТРДДФ Д-30Ф6 относится к АД четвертого поколения. Он создан на базе двигателя Д-30КУ, компрессор и турбина которого подверглись серьёзной переделке. Двигатель способен работать на крейсерском режиме с форсажем в течение нескольких часов. Также имеется чрезвычайный режим, при котором тяга может повышаться до 190кН. На двигателе установлена цифровая система регулирования и контроля. Он имеет удовлетворительную экономичность при малых скоростях полёта, а межремонтный ресурс составляет 300 часов. Для МиГ-31М был разработан двигатель повышенной тяги Д-30Ф6М, который серийно не выпускался.

Модификация Д-30Ф6 повышенной тяги установлена на экспериментальном истребителе фирмы Сухого с крылом обратной стреловидности Су-47 "Беркут", совершившим более 100 испытательных полётов.

В дальнейшем на базе Д-30Ф6 был создан высотный ТРДД ПС-30В-12 с максимальной тягой у земли 5000 кН, предназначенный для высотного самолёта М-55. Он был изготовлен малой серией в 1988-92 гг. и применяется в настоящее время на самолёте М-55 "Геофизика", предназначенном для исследования верхних слоев атмосферы.

Максимальная тяга двигателя на высоте 21000 метров - 670 кгс.

Основные параметры двигателя:

массовый расход воздуха: $G_b = 265$ кг/с;

степень повышения давления: $\pi_k = 26$;

степень двухконтурности: $m = 2,44$;

полная температура на выходе из КС: $T^* = 1470$ К;

полная температура на выходе из ФК: $T^*_\phi = 1800$ К;

диаметр двигателя: $D = 1455$ мм;

длина двигателя: $L = 5700$ мм.

3. Типовые профили полета при работе двигателей самолетов различного назначения на основных режимах

Конструктивный облик и выходные параметры АД определяются назначением и функционированием самолета, на который он устанавливается. Определяющим звеном в описании функционирования самолета является профиль полета - график, показывающий зависимость высоты, скорости, а следовательно, и режимов работы двигателя на разных участках полета при заданной дальности. На рис. 1-3 показаны профили полета для разных типов самолетов.

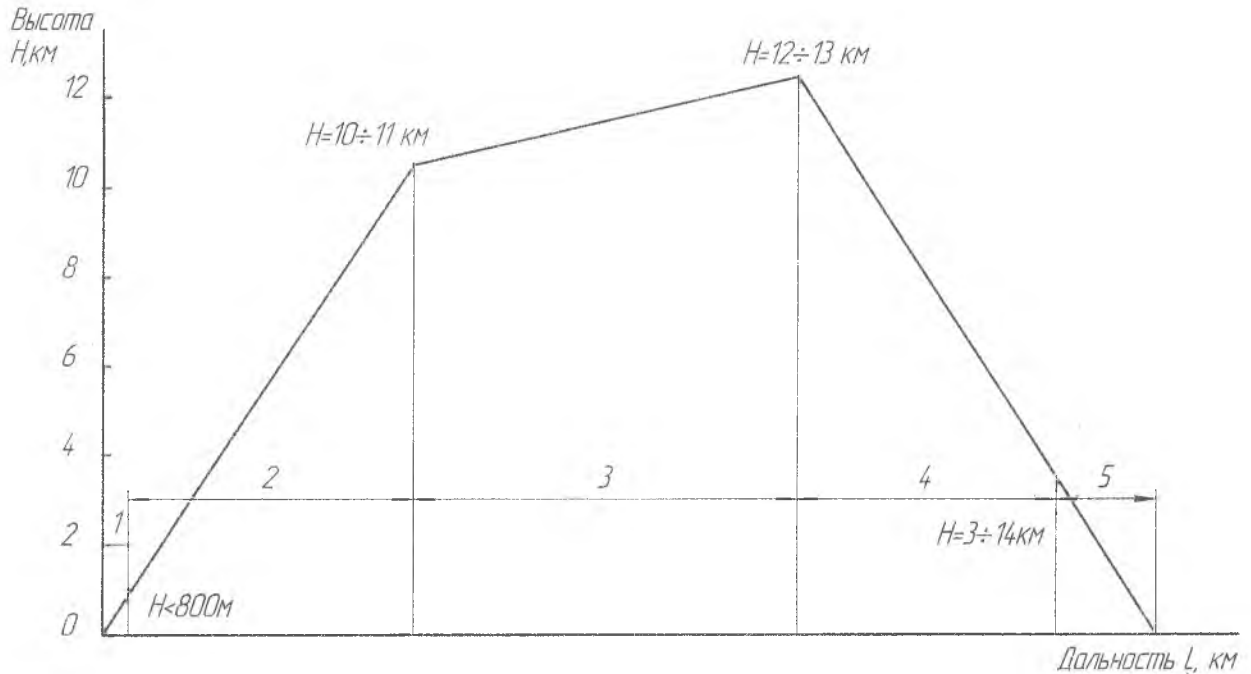


Рис. 1. Максимальная (перегонная) дальность
(Военно-транспортная авиация, гражданская авиация, $M_n \leq 0,8$):
1 - взлет; 2 - набор высоты, разгон; 3 - крейсерский полет; 4 - планирование; 5 - посадка

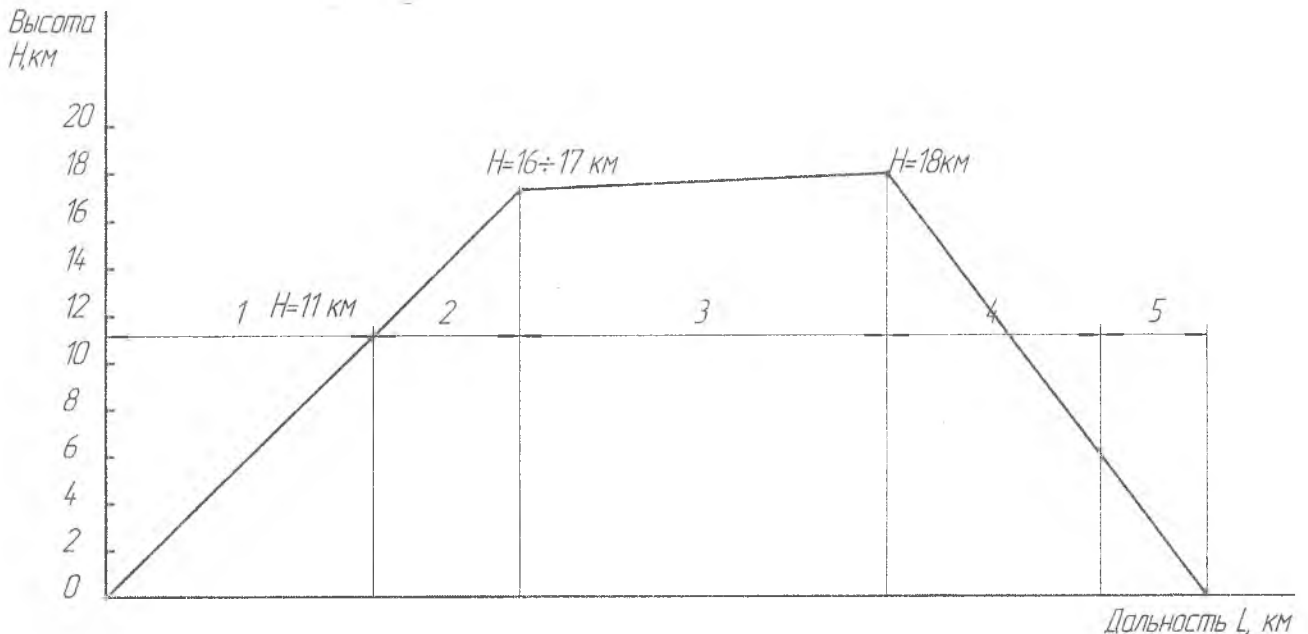


Рис. 2. Сверхзвуковая дальность
(Военная авиация, СПС Ту-144, Конкорд, $M_n \approx 2 \dots 2,2$):
1 - взлет, набор высоты, переход через скорость звука ($H \geq 1$ км, максимальный форсаж);
2 - разгон (до $M_n \approx 2 \dots 2,2$) (частичный форсаж); 3 - крейсерский режим (крейсерский форсаж);
4 - планирование (бесфорсажный режим); 5 - посадка ($0,4 N$, высотный МГ)

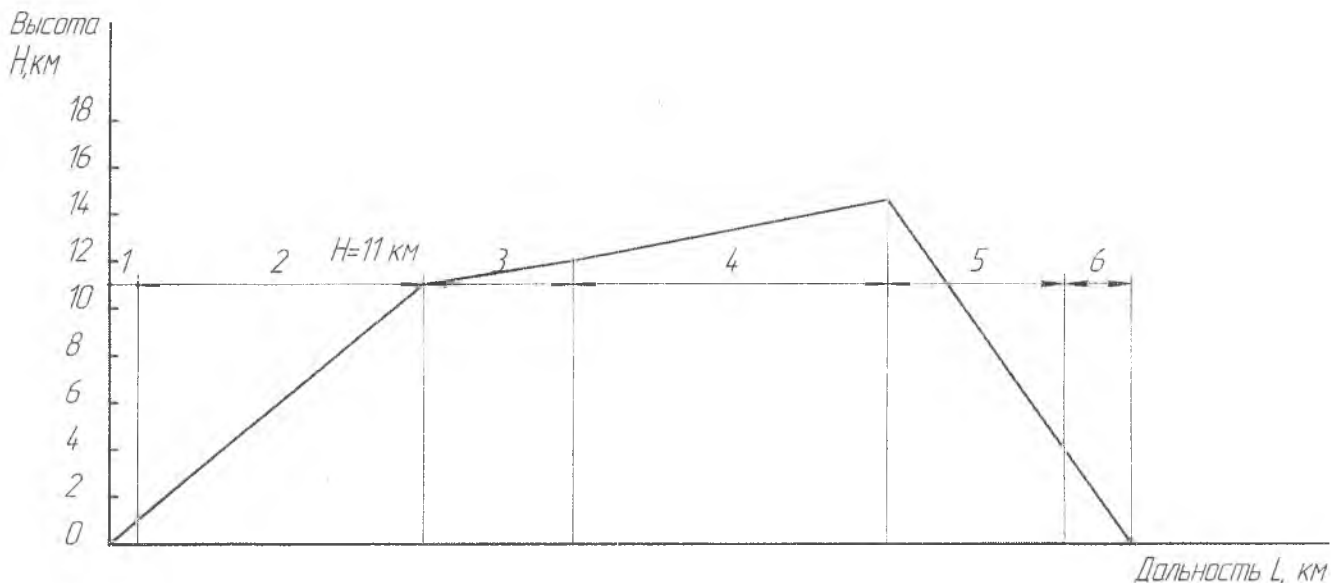


Рис. 3. Комбинированный профиль (Военная авиация):
 1 - взлет (максимальный форсаж); 2 - набор высоты (частичный форсаж, бесфорсажный режим);
 3 - полет до цели (бесфорсажный режим); 4 - разгон до $M_{max} > 2$ (максимальный форсаж);
 5 - планирование; 6 - посадка (бесфорсажный режим)

Положение створок сопла на различных участках полета самолета приведено в разделе 4.1.

4. Работа реактивного сопла

Работа сопла связана с режимами работы двигателя и условиями полета самолета.

4.1. Схема сопла

Разработчики конструкции приняли к исполнению схему сверхзвукового сопла эжекторного типа со свободноподвешенными флюгерными створками наружного сопла (трехстворчатое сопло).

Внутреннее сопло, состоящее из двух рядов створок, образует либо сужающийся тракт, либо сужающе-расширяющийся конический тракт типа сопла Лавалья. В разрыве контура расположены внутренняя обечайка, которая образует либо цилиндрический тракт эжектора за критическим сечением, с подачей вторичного воздуха подпитки в разрыв контура, либо расширяющийся конический тракт, служащий продолжением расширяющегося тракта внутреннего сопла 2^{го} ряда створок.

Наружные створки, служащие для плавного сопряжения с обводами хвостовой части мотогондолы, самоустанавливаются в зависимости от результирующего момента аэродинамических сил давления, действующих снаружи и изнутри. При этом строго фиксируются 2 крайних положения, обеспечивающих минимальную и максимальную площадь среза выходного сечения сопла ($F_{вых\ min}$ и $F_{вых\ max}$).

4.2 Основные режимы работы

Траекторию полета самолета (профиль полета) можно разбить на несколько характерных участков, которые приведены в предыдущем разделе. Опишем основные режимы работы РС Д-30Ф6 и укажем примерное положение дозвуковых и сверхзвуковых створок сопла при работе на этих режимах.

На рис.4 приведена схема реактивного сопла. При запуске двигателя и работе на малом газе ($\alpha_{руд} = 0-15^\circ$) створки полностью раскрыты и сопло представляет собой расширяю-

щийся канал (диффузор). При этом пропускная способность сопла максимальная, что облегчает работу двигателя на малых оборотах и помогает избежать помпажа в компрессоре.

Кроме этого, имеет место стендовая отладка двигателя на бесфорсажных и форсажных режимах, контрольные испытания, подтверждающие исходные тяговые и расходные характеристики. Выполнению полетов предшествует наземное опробование двигателя (гонка) с работой на бесфорсажных и форсированных режимах.

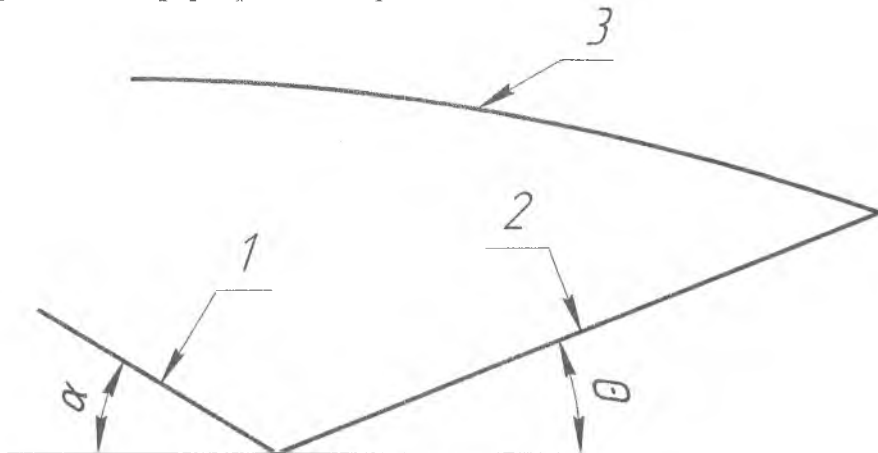


Рис. 4. Схема всережимного сопла:
1 - дозвуковые створки; 2 - сверхзвуковые створки; 3 - наружные створки

Выходу на форсаж соответствует максимальный бесфорсажный режим. На этом режиме створки 1^{го} и 2^{го} ряда максимально прикрыты. Критическое сечение расположено на срезе 2^{го} ряда створок и максимально приближено к срезу сопла.

В стендовых условиях и при наземном опробовании двигателя на бесфорсажном режиме внутренняя обечайка занимает положение, близкое к цилиндру. Наружные створки максимально прикрыты, и площадь среза сопла имеет минимальную величину ($F_{вых\ min}$) (рис.5). Реактивная струя не касается стенок внутренней обечайки.

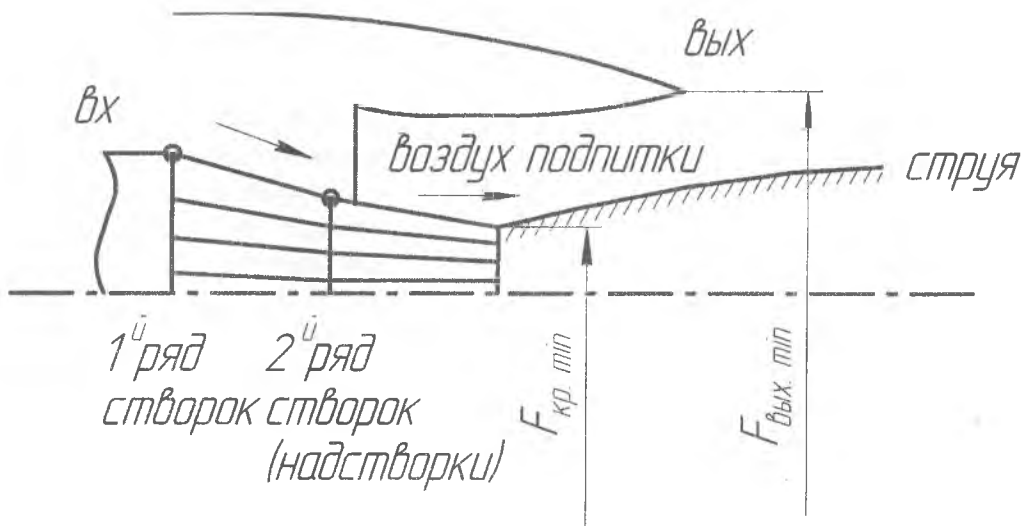


Рис.5. Положение створок сопла на бесфорсажном режиме

В образованный разрыв контура подается вторичный воздух из-под мотогондольного пространства. На этих режимах располагаемая степень понижения давления $\pi_c = \frac{p_{ax}^*}{p_H}$, равная отношению полного давления на входе в сопло p_{ax}^* к давлению окружающей среды p_H и характеризующая степень преобразования потенциальной энергии в кинетическую энергию струи, обычно невелика ($\leq 2,4$).

Основной задачей регулирования является "нейтрализация" вредного влияния сверхзвуковой части, что и осуществляется в виде работы эжектора с оптимальными размерами проточной части.

При работе двигателя на частичном или полном (максимальном) форсаже створки 2^{го} ряда устанавливаются в сверхзвуковое положение (расширяющийся тракт). Критическое сечение перемещается на срез первого ряда створок. Струя касается внутренней обечайки, которая совместно с наружной створкой устанавливается в положение, при котором момент от действия внутренних газовых сил уравнивается моментом от внешних сил, обтекающих наружные створки (рис.6).

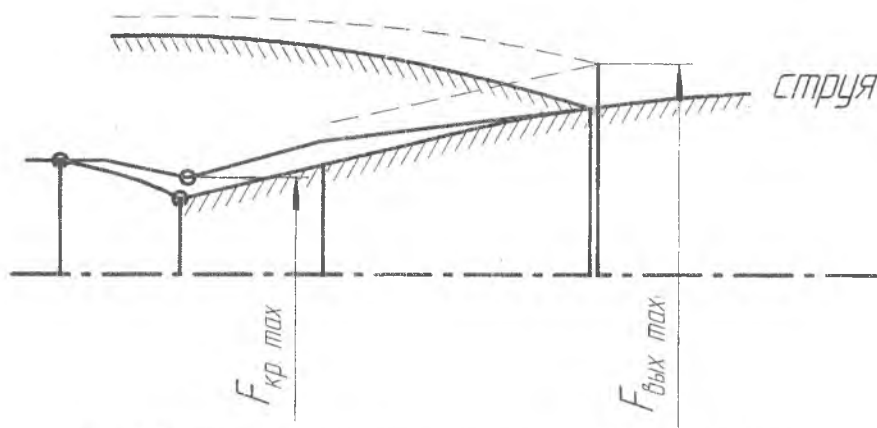


Рис.6. Положение створок на максимальном форсажном режиме

На полном форсаже осуществляется взлет и разгон самолета до сверхзвуковых скоростей, что соответствует увеличению $\pi_c > 4 \dots 7$.

В этом случае решается задача о максимальном эффекте сверхзвуковой части сопла, что осуществляется выбором оптимального угла раскрытия сверхзвуковой части и соответствующей площади среза $F_{вых}$.

На максимальной скорости сверхзвукового полета внутренняя обечайка и наружная створка занимают положение максимального раскрытия $F_{вых max}$ (упор максимального раскрытия створок сопла).

В режиме горизонтального полета $\pi_c > 10$ на частичном форсаже (крейсерский полет) имеет место расчетный режим работы сопла Лавалья с минимальными потерями эффективной тяги. Это осуществляется за счет отсутствия разрыва контура сверхзвуковой части, оптимального угла раскрытия ее ($10 \div 12^\circ$) и реализации необходимой для данного π_c потребной площади среза $F_{вых}$. При этом наклон наружных створок имеет минимальный угол (минимальное внешнее сопротивление).

При выходе двигателя на взлётный режим (максимальный форсажный режим) двигатель некоторое время работает на максимальном бесфорсажном режиме ($\alpha_{руд} = 70-75^\circ$, рис. 7). При работе на этом режиме сопло максимально сжимается, обеспечивая минимальную критическую площадь. При этом возрастает степень расширения в сопле π_c , что ведёт к увеличению скорости истечения газа и, следовательно, к росту тяги двигателя. Сопло принимает форму сопла Лавалья. Угол раскрытия дозвуковых створок α составляет до 40° , угол раскрытия сверхзвуковых створок Θ лежит в диапазоне $0.5 \dots 2^\circ$. Выходная площадь сопла в 1.03... 1.1 раза больше критической.

Затем происходит включение форсажной камеры и переход на максимальный форсажный режим ($\alpha_{руд} = 115-120^\circ$, рис. 8). При этом параметры газового потока (T_f, p^*_f) быстро возрастают и сопло раскрывается, обеспечивая максимальную пропускную способность. По сравнению с бесфорсажным режимом критическая площадь увеличивается примерно в 1.5 раза, а площадь среза сопла ещё больше, что связано с ростом угла Θ . Сопло остаётся соплом Лавалья, но его форма сильно меняется. Угол раскрытия дозвуковых створок α падает до 3° , угол раскрытия сверхзвуковых створок Θ лежит в диапазоне $9 \dots 12^\circ$.

При взлёте располагаемый перепад давлений в сопле n_c незначительно пре-

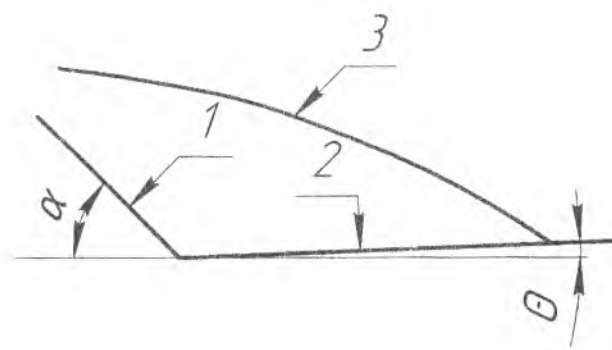


Рис. 7. Максимальный бесфорсажный режим:
1 - дозвуковые створки; 2 - сверхзвуковые створки; 3 - наружные створки

восходит или меньше критического перепада $n_{скр} = 1.851$, поэтому скорость газа в сопле звуковая ($\lambda = 1$) или дозвуковая. При этом сверхзвуковые створки сопла не работают и газ движется, не касаясь их.

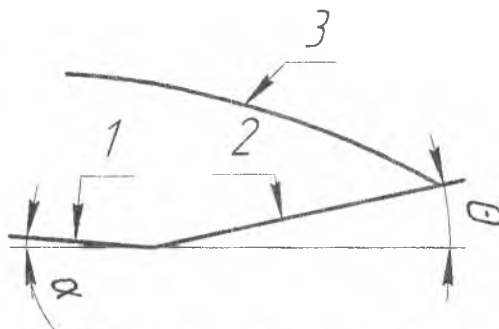


Рис. 8. Максимальный форсажный режим:
1 - дозвуковые створки; 2 - сверхзвуковые створки; 3 - наружные створки

После того как самолёт набрал высоту, двигатель может работать как на форсажном, так и на бесфорсажном режиме. При этом углы раскрытия створок лежат в тех же пределах, что указывались ранее.

Максимальный бесфорсажный режим ($\alpha_{РУД} = 70-75^\circ$): $\alpha = 35-40^\circ$; $\Theta = 0.5-2^\circ$.

Максимальный форсажный режим ($\alpha_{РУД} = 115-120^\circ$): $\alpha = 1-3^\circ$; $\Theta = 9-12^\circ$.

В то же время при достижении больших скоростей полёта значительно возрастает степень повышения давления во входном устройстве. Это приводит к росту степени расширения в сопле π_c , которое становится больше критического перепада давлений.

При этом начинают работать сверхзвуковые створки и сопло обеспечивает значительные сверхзвуковые скорости истечения газа. На максимальном бесфорсажном режиме переход через звук происходит в критическом сечении, а на максимальном форсажном режиме скачок может смещаться по дозвуковой створке, из-за малого угла α .

Следует заметить, что при взлёте рычаг управления двигателем (РУД) сразу переводится на $115-120^\circ$ (максимальный форсаж), а промежуточные этапы работы двигателя регулируются с помощью системы управления, которая соединена с РУД и по определенной программе проходит этапы малого газа, максимального бесфорсажного режима и промежуточных режимов.

В целом режим регулирования сечения сопла достаточно сложен и кроме указанных режимов возможно большое количество промежуточных режимов, на которых створки занимают различные положения. Некоторые из этих режимов приведены в таблице 1.

5. Конструкция реактивного сопла двигателя Д-30Ф6

5.1. Кинематическая схема сопла

Кинематическая схема РС ТРДДФ Д-30Ф6 (рис.9) уникальна тем, что критическое сечение сопла может изменять не только площадь, но и положение по длине сопла. Особен-

ностью данной схемы является также то, что сопло на отдельных режимах работает как эжекторное, а на других – как сопло Лавая. Это достигается тем, что сверхзвуковая створка классического сопла Лавая разделена на управляемую гидроприводом и аэродинамически управляемую. Это позволяет на бесфорсажном режиме получать эжекторное сопло с критическим сечением на срезе первого ряда сверхзвуковых створок, а при максимальном форсаже на взлете – эжекторное сопло с критическим сечением на срезе венца сверхзвуковых створок. Разделение сверхзвуковой створки на два венца решает задачу охлаждения сверхзвуковой створки.

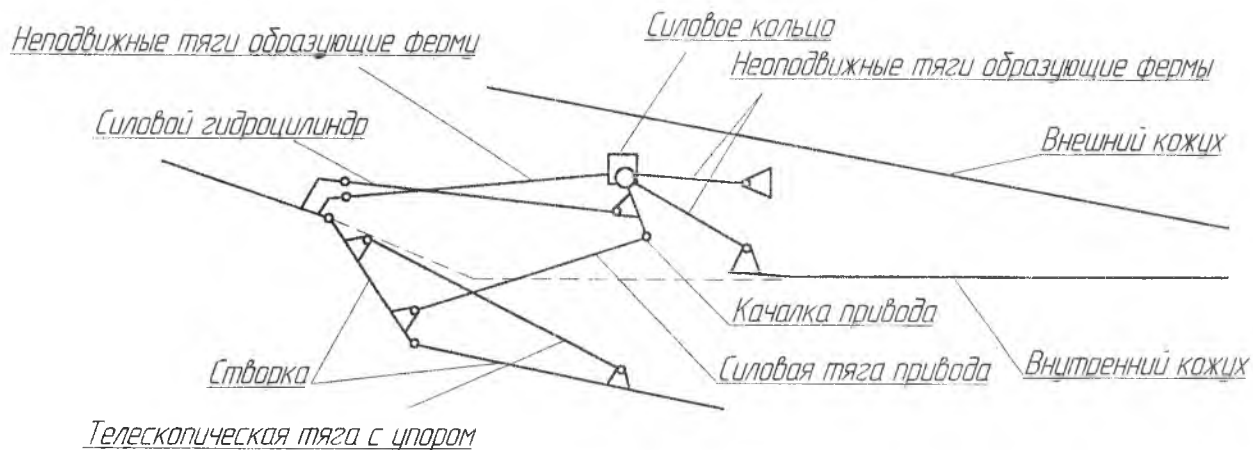


Рис. 9. Кинематическая схема сопла

Дозвуковая и первая сверхзвуковая створки управляются с помощью гидроцилиндров через качалки и силовые тяги привода. Качалки закрепляются шарнирно на силовом кольце, которое входит в состав жесткой силовой фермы, на которую подвешены две сверхзвуковые створки: вторая сверхзвуковая внутренняя створка на одном шарнире, а наружная – на двух шарнирах и связующем кольце (на схеме не показаны). Все четыре венца выполнены по схеме «створка-проставка».

5.2. Дозвуковая часть сопла и первая часть после нее (механическое управление)

РС обеспечивает преобразование потенциальной энергии газа в кинетическую энергию вытекающей струи с минимумом потерь на всех режимах полета. Изменением критического и выходного сечения сопла достигаются оптимальные показатели параметров турбокомпрессора и форсажной камеры и снижаются потери от недорасширения и перерасширения на расчетных и переходных режимах.

В сверхзвуковом сопле (сопле Лавая) газовый поток расширяется до сверхзвуковой скорости. Газ движется по соплу с ускорением, поэтому при малой скорости, когда плотность меняется незначительно, площадь надо уменьшать. Дальнейшее увеличение скорости сопровождается падением давления и плотности, и при достижении скорости звука плотность газа уменьшается обратно пропорционально скорости (начиная с критического сечения). Дальнейшее увеличение скорости, согласно уравнению неразрывности, требует увеличения площади F .

Реактивное сопло двигателя Д-30Ф6 выполнено по схеме сопла Лавая с эжектором в сверхзвуковой части (рис. 10, движение газа справа налево). Сопло крепится к корпусу форсажной камеры с помощью фланцевого соединения.

Таблица 1. Режимы работы реактивного сопла

N п/п	Условия полета	Режим двигателя	Задачи решаемые соплом	Схема. Геометрия сопла	Примечание
1	Наземное опробование двигателя	1. Бесфорсажный номинал 2. Макс. форсаж	Нейтрализация сверхзвуковой части сопла		Стендовые испытания (приемности, сбросы)
2	Взлет (Участок тип. профиля П №1)	Макс. форсаж	Нейтрализация сверхзвуковой части сопла		<p>Эжектор</p> $F_{кр-max}, F_{вых-var}(min)$
3	Набор высоты, Разгон (Участок №2)	Макс. форсаж	Реализация эффекта сверхзвук. части		<p>Сопло Лаваля</p> $F_{кр-max}, F_{вых-var}$
4	Горизонтальный полет $M_n=2$ (Участок №3)	Частичный форсаж	Макс. реализация эффекта сверхзвук. части		<p>Сопло Лаваля</p> $min < F_{кр} < F_{вых-max}$
5	Планирование (Участок №2)	Бесфорсажный режим	Частичная нейтрализация сверхзвуковой части сопла		<p>Эжектор</p> $F_{кр-min}, F_{вых-min}$ $F_{кр-max}, F_{вых-var}$
6	Посадка (Участок №2)	Бесфорсажный режим	Нейтрализация сверхзвуковой части сопла		<p>Эжектор</p> $F_{кр-min}, F_{вых-min}$ $F_{кр-max}, F_{вых-var}$

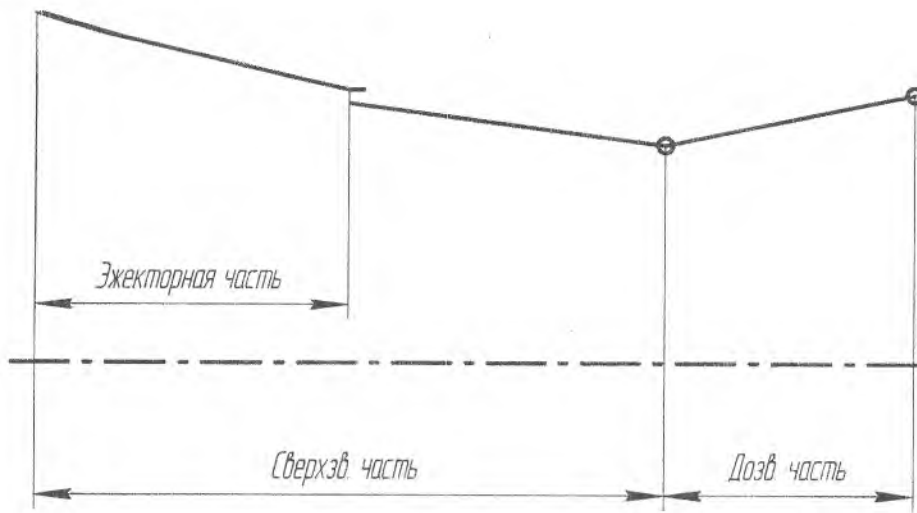


Рис. 10. Принципиальная схема сопла

5.3. Конструкция створок, проставок, их подвеска

РС состоит из следующих основных элементов (рис. 11):

1. Дозвуковые створки 1.
2. Сверхзвуковые управляемые створки 2.
3. Сверхзвуковые неуправляемые створки 3 - нет специальной системы управления. Створки отклоняются за счет газовых сил.
4. До- и сверхзвуковые проставки.

Формула размещения створок и проставок - 18×18 .

Дозвуковые створки представляют собой трапециевидные пластины с поперечными ребрами жесткости и четырьмя продольными ребрами, которые расположены так, чтобы с их помощью производить крепление тяг 9 и демпферов 11 к створке (рис. 12, 13). Наряду с этим продольные ребра также увеличивают жесткость конструкции. Дозвуковые створки 1 крепятся к корпусу РС с помощью цилиндрических шарниров 2 (рис. 12,б). Дозвуковые проставки представляют собой трапециевидные пластины с ребрами жесткости. Они крепятся к корпусу РС с помощью проушин, которые располагаются между дозвуковыми створками.

Сверхзвуковые управляемые створки 2 (рис. 11) представляют собой прямоугольные пластины с поперечными ребрами жесткости и двумя продольными ребрами, с помощью которых к сверхзвуковой створке прикрепляется демпфер. До- и сверхзвуковые створки соединяются друг с другом при помощи цилиндрических шарниров 4 (рис. 12,г). Сверхзвуковые проставки крепятся к дозвуковым с помощью проушин. Сверхзвуковые неуправляемые створки 3 (рис. 11) крепятся к силовому кольцу с помощью коробчатых тяг.

5.4. Система управления створками

Управление створками осуществляется одной группой гидроцилиндров 6 (рис.12). В конструкции предусмотрено девять гидроцилиндров. Основание каждого гидроцилиндра шарнирно прикреплено к корпусу РС, так как при движении штока 5 гидроцилиндр имеет угловое перемещение. По тем же причинам шток 5 шарнирно прикреплен к качалке 7. Усилие со штока 5 гидроцилиндра передается на качалку 7, которая шарнирно закреплена на силовом кольце 8 и имеет только угловое перемещение. К качалке 7 крепятся тяги 9. Данное крепление и крепление тяг 9 к дозвуковым створкам осуществляется с помощью сферических шарниров 1 (рис. 12 а), так как тяги 9 имеют сложное движение из-за того, что они находятся под углом к оси сопла и соединяют два подвижных элемента.

Таким образом, усилие со штока 5 гидроцилиндра через систему тяг и качалок передается к дозвуковым створкам. С помощью демпферов 11, которые выполняют и роль тяг, вслед за дозвуковыми створками будут отклоняться сверхзвуковые. Демпферы 6 крепятся к

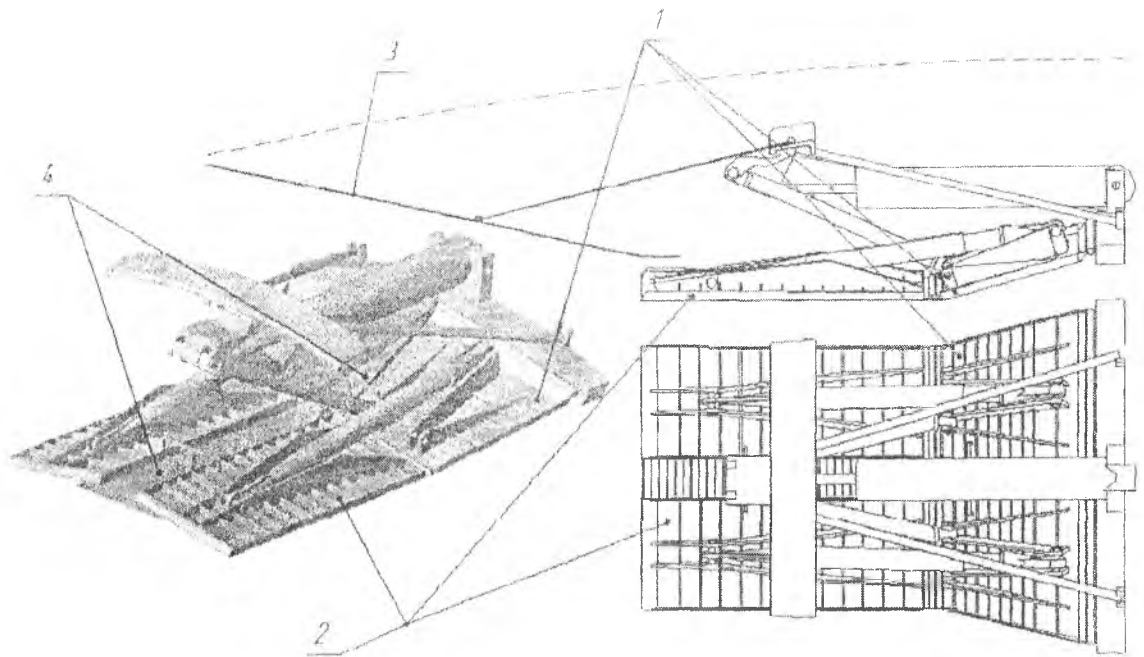


Рис. 11. Конструкция створок

до- и сверхзвуковым створкам с помощью цилиндрических шарниров 3 (рис. 12 в).

Положение при дозвуковом истечении (суживающееся сопло): шток гидроцилиндра вдвинут, положение тяг и створок см. на рис. 11.

Переход от суживающегося сопла к соплу Лавалья (рис. 13, 14): шток гидроцилиндра (5) выдвигается, воздействует на качалку (7), которая шарнирно крепится к силовому кольцу (8). С качалки усилие передается на две тяги (9), которые тянут за собой две соседних дозвуковых створки. Дозвуковые и сверхзвуковые створки связаны шарниром и демпфером (регулируемой тягой), следовательно, вслед за дозвуковыми будут перемещаться сверхзвуковые створки.

На рис. 13 и 14 показаны четыре последовательных положения элементов сопла при переходе от суживающегося сопла к соплу Лавалья: первое положение (рис. 13) соответствует суживающемуся соплу, последнее положение (рис. 14) соответствует соплу Лавалья.

5.5. Система синхронизации и центрирования

Синхронизация движения дозвуковых створок и проставок осуществляется следующим образом: на створках выфрезеровываются каналы определенной длины, в которые вставляется коромысло 13 (рис. 12, 13). Коромысло своим основанием приварено к проставке. При движении створок концы коромысла скользят по каналу. А так как канал имеет определенную длину и расположение на створке, то проставка в любой момент времени занимает строго определенное положение.

Синхронизация движения сверхзвуковых створок и проставок осуществляется с помощью коромысел 12. Она аналогична дозвуковым. Синхронизация перемещений штоков гидроцилиндров осуществляется через дозвуковые створки с помощью тяг, которые отклоняют дозвуковые створки при управлении соплом.

Система центрирования исключает выход из зацепления створок и проставок и не дает соплу раскрыться на величину большую, чем допустимая. Для этого в конструкции сопла предусмотрены коромысла 12 и 13, которые крепятся к проставкам, одновременно являясь элементами подвески проставок к створкам.

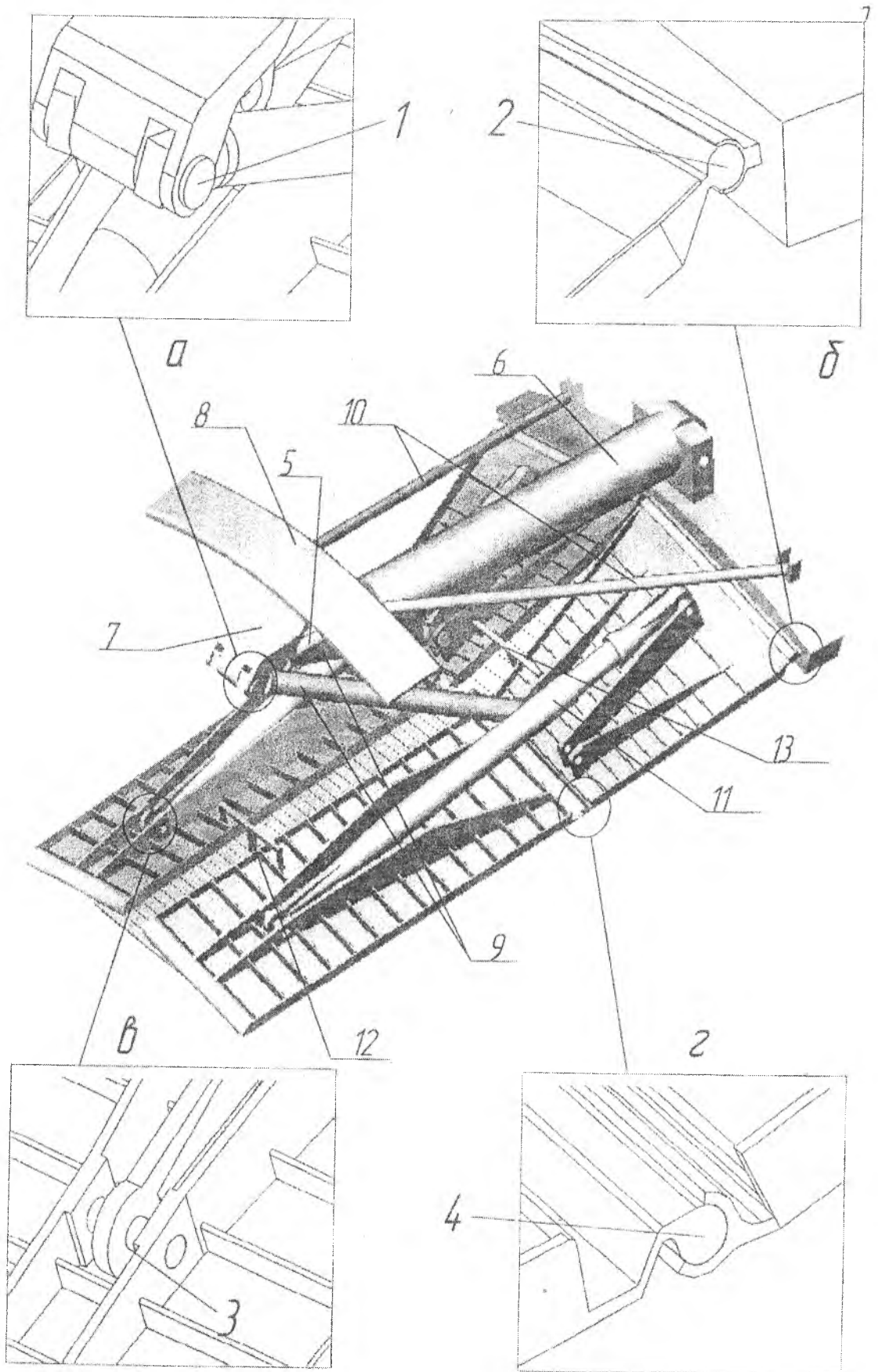


Рис. 12. Система управления створками

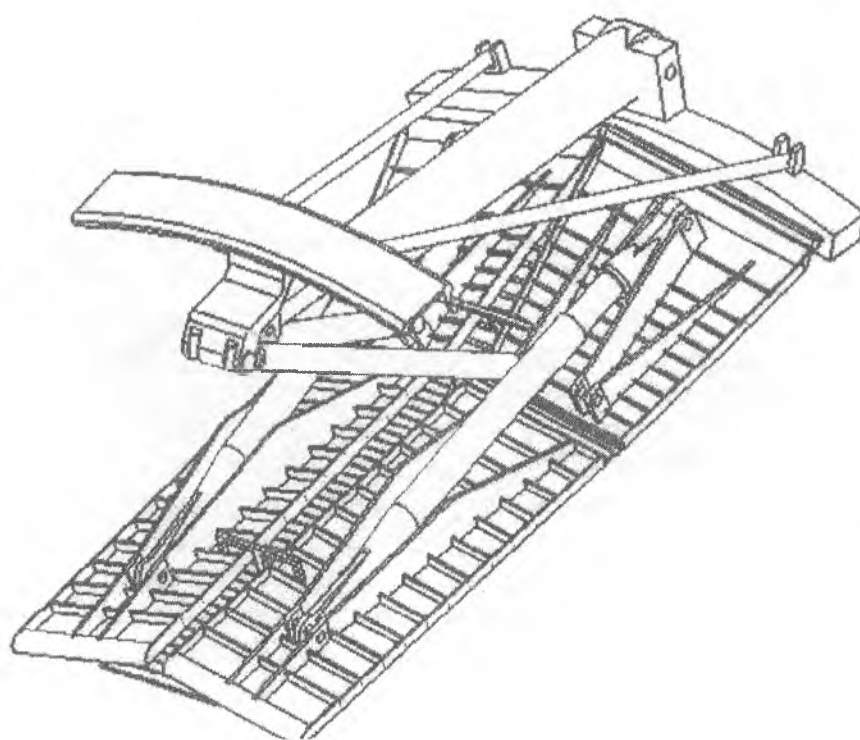
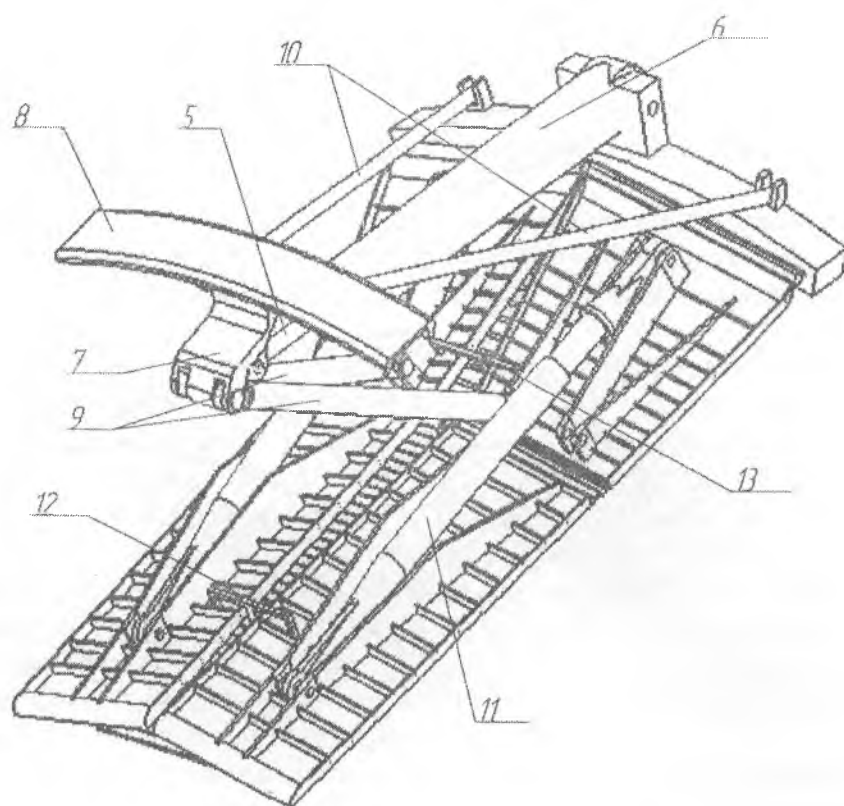


Рис. 13. Конструкция управляемых створок и система их регулирования

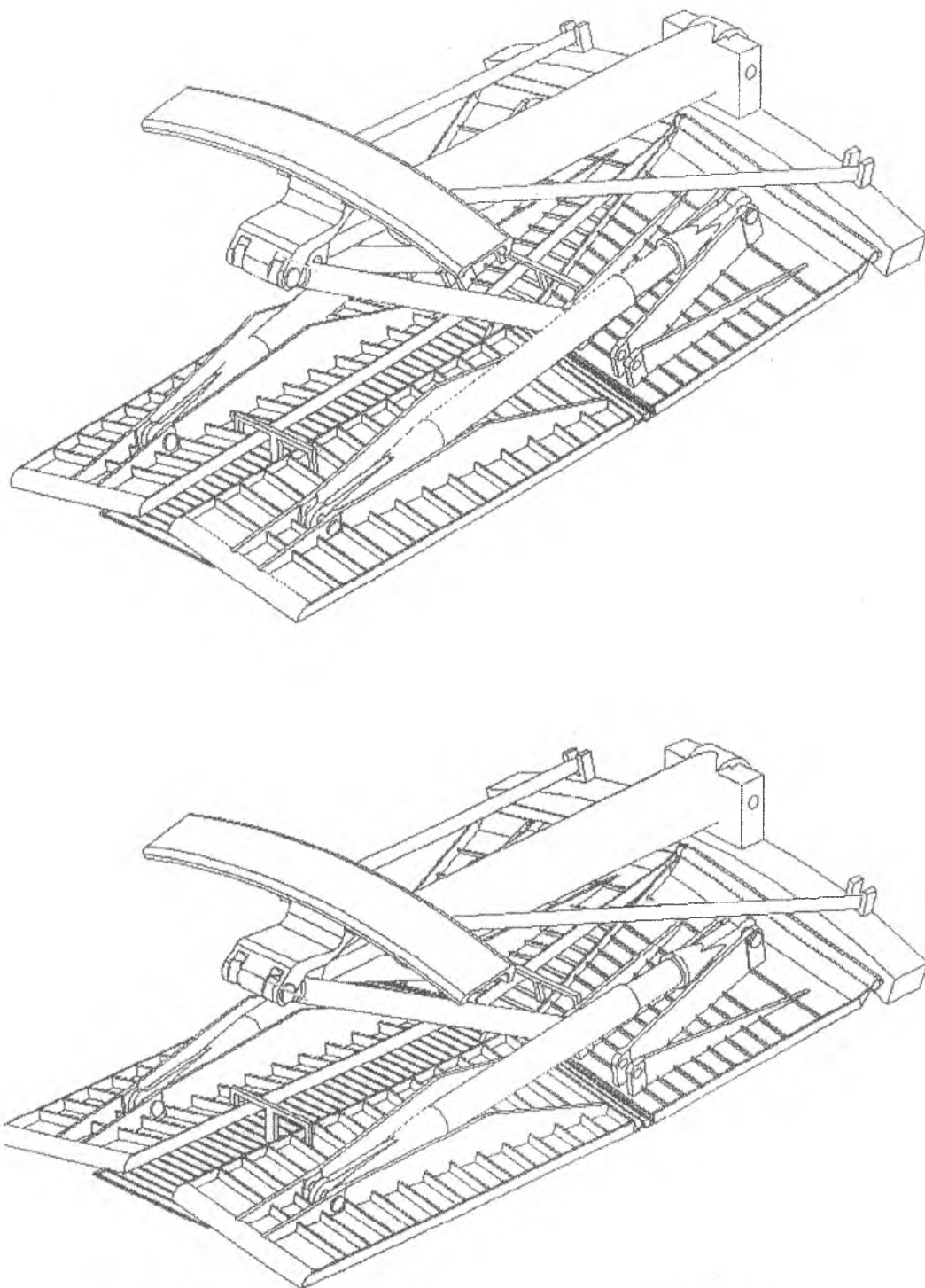


Рис. 14. Два последовательных положения регулируемых створок

5.6. Доводка конструкции

При доводке конструкции этого сопла столкнулись с явлением: «низкочастотные колебания створок» (частота $25-30\text{Гц}$), приводящим к разрушению деталей сопла. Такие колебания возникали в стендовых условиях при розжиге форсажной камеры и при перестройке сопла из дозвукового положения в сверхзвуковое при скачкообразном перемещении критического сечения со среза $2^{\text{го}}$ ряда створок на срез $1^{\text{го}}$ ряда.

Дефект был ликвидирован введением в конструкцию 2^{го} ряда створок (надстворок) клапанов перепуска воздуха из межстворчатого пространства во внутренний расширяющийся в момент перекладки створок.

6. Гидравлическая система управления соплом на действующем макете сопла

Стенд представляет собой сопло двигателя, установленное горизонтально на сварной подставке из швеллера и закрепленное к ней по стыковочному фланцу (см. фотографию на рис. 15). На вертикальных швеллерах закреплены элементы гидравлической и электрической систем управления стендом.

Гидравлическая система состоит из гидробака Б1 (рис. 16), в качестве которого использован маслобак БМ-6А от вспомогательного ГТД ТА-6А. В качестве рабочего тела используется гидросмесь АМГ-10. На нем установлены заправочная горловина с масломерной линейкой, дренажный клапан и кран слива.

Трубопроводом ТП1 гидробак соединен с ручным насосом Н1 марки НР01.

Выбор ручного насоса обусловлен мерами безопасности в учебной лаборатории, упрощением конструкции системы, а также возможностью точной остановки створок сопла в заданном фиксированном положении. От насоса по трубопроводу ТП2 гидросмесь подается к трехпозиционному переключателю Р1 (4/3 распределитель: 4 линии, 3 позиции), в качестве которого использован авиационный гидравлический аппарат ГА-163 с фиксированным нейтральным, положением и электрическим и ручным управлением.

При подаче управляющего напряжения на электромагнит У1 или нажатии одноименной кнопки магистраль высокого давления «Р» соединяется с магистралью «В» и по трубопроводу ТП3 гидросмесь подводится в задние полости гидроцилиндров Ц1...Ц18. Одновременно передние полости гидроцилиндров через трубопровод ТП4 и магистраль «А» соединяются через сливную магистраль «Т» с гидробаком. Штоки гидроцилиндров выдвигаются, в результате чего створки сопла закрываются. При отпускании кнопки или снятии напряжения переключатель Р1 возвращается в нейтральное положение, магистрали «А» и «В» запираются, предотвращая слив гидрожидкости в бак, при этом створки сопла фиксируются в любом промежуточном положении.

При подаче управляющего напряжения на электромагнит У2 или нажатием одноименной кнопки соединяются магистрали «Р» и «А», и «Т» и «В». При этом гидроцилиндры двигаются в обратном направлении и створки сопла открываются.

При достижении крайних положений створок сопла (гидроцилиндров) усилие на ручке насоса резко возрастает, что говорит о необходимости прекращения работы насоса.

Электросхема представляет собой отдельный блок в заземленном корпусе, который содержит трансформатор Т1 (рис. 17) мощностью 300 Вт, в первичную обмотку которого включены предохранитель F1 и группа контактов трехпозиционного переключателя S1.1. Одна из вторичных обмоток, рассчитанная на 6.3В, предназначена для включения индикаторной лампочки Н1, указывающей на наличие напряжения на блоке. Вторая обмотка с выпрямительным блоком V1...V4 на диодах Д232Б и электролитическим конденсатором С1 типа КЭ-2, емкостью 2000,0 МкФ на рабочее напряжение 50В служит для подачи напряжения через группу контактов переключателя S1.2 и соединительный шнур с электроразъемом на обмотки трехпозиционного переключателя ГА-163:

- через контакты 1 и 2 на электромагнит У1;
- через контакты 1 и 3 на электромагнит У2.

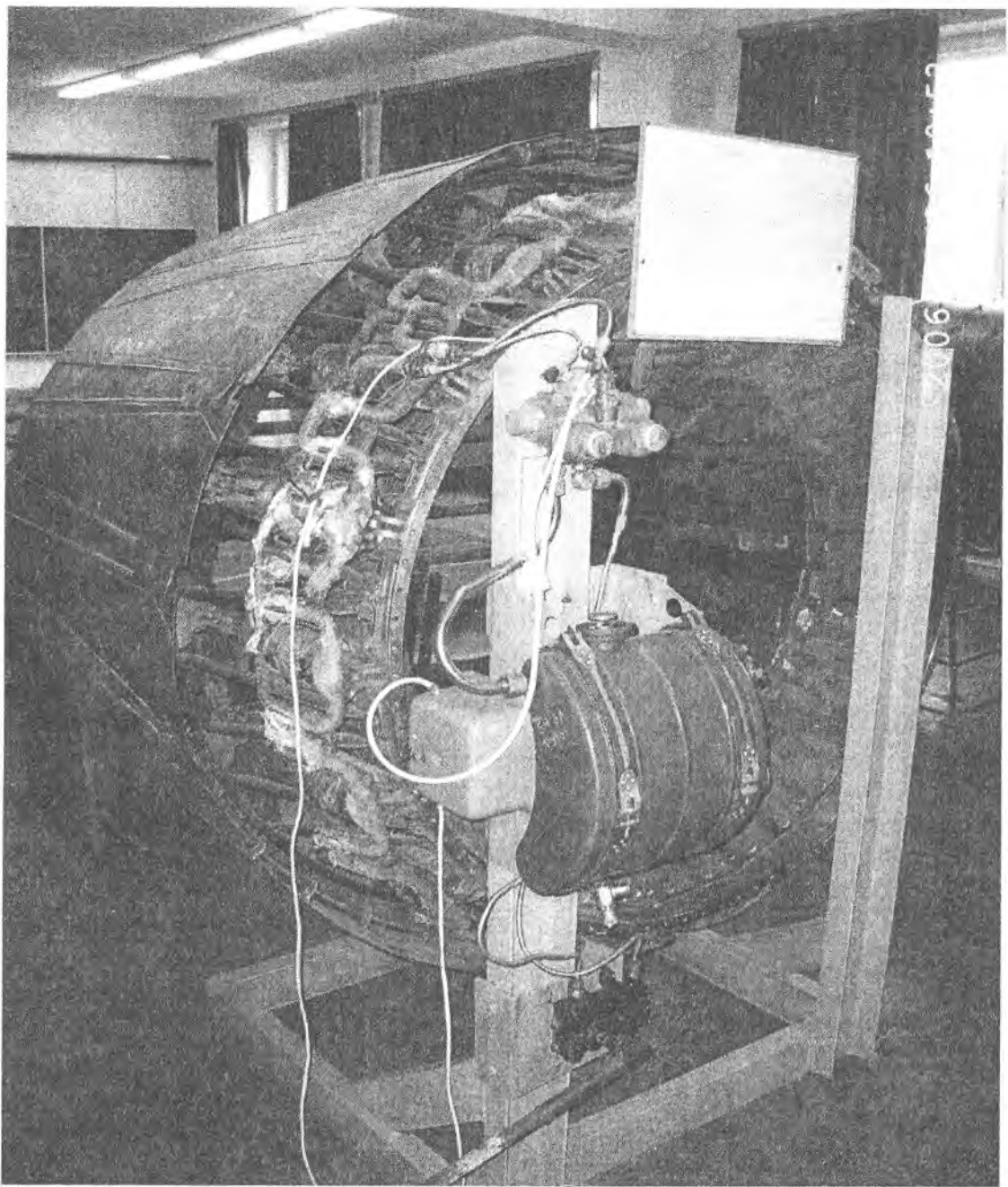


Рис. 15. Фотография макета сопла с гидравлической системой регулирования створок

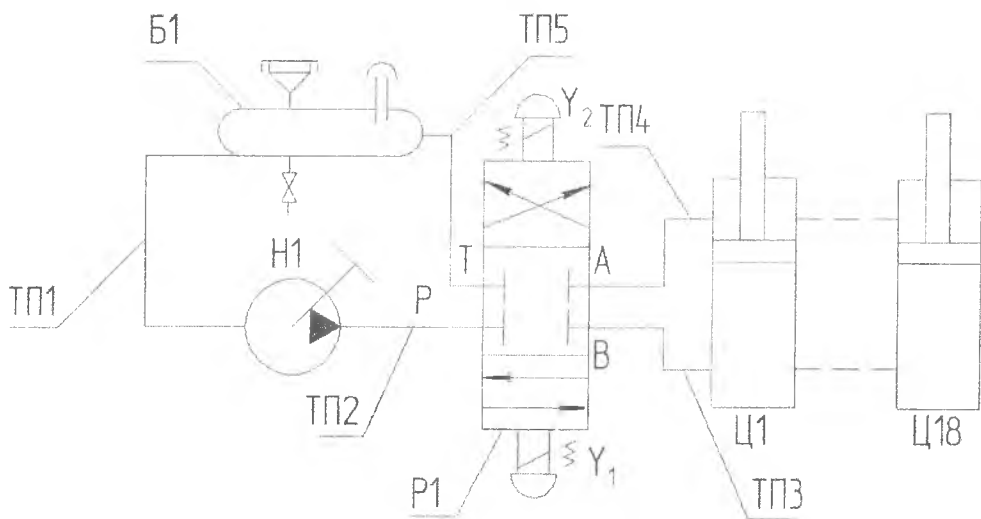


Рис. 16. Гидравлическая схема макета сопла

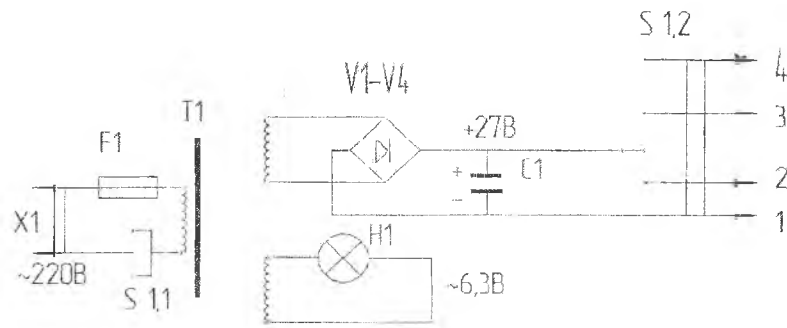


Рис. 17. Электросхема макета сопла

7. Инструкция по работе с гидравлической системой на макете

1. Перед началом работы проверить:

- 1.1. Положение трехпозиционного переключателя на блоке управления «нейтральное» - контрольная лампа не горит.
- 1.2. Уровень гидрожидкости АМГ-10 в баке по масломерной линейке не менее 4л.
- 1.3. Отсутствие подтеканий гидрожидкости по стыкам разъемов.
- 1.4. Отсутствие повреждений электропроводки.

2. Работа:

- 2.1. Включить вилку электрошнура в розетку напряжением 220В.
- 2.2. Перевести трехпозиционный переключатель в соответствующее крайнее положение «О» (открыто) или «З» (закрыто), при этом загорается контрольная лампочка. При отсутствии напряжения питания нажать и удерживать во время всей работы насосом соответствующую «О» или «З» кнопку под защитным колпачком.

Внимание!!

Во избежание поломки ручного насоса при отсутствии напряжения на трехпозиционном переключателе ГА-163 – если не горит контрольная лампа или не нажата кнопка - работа рукояткой насоса **КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩЕНА!!**

- 2.3. Работать рукояткой насоса до перекладки внутренних створок реактивного сопла из одного крайнего положения в другое (~ 3 минуты), что контролируется по специальным отметкам, нанесенным на створки реактивного сопла и возросшему усилию на рукоятке насоса.

Допускается остановка в любом промежуточном положении.

- 2.4. Перевести переключатель в нейтральное положение или отпустить кнопку трехпозиционного переключателя.

3. По окончании работ:

- 3.1. Вынуть вилку питания из розетки.
- 3.2. При необходимости убрать рабочее место.

4. Меры безопасности:

- 4.1. Не допускается подтекание гидрожидкости.
- 4.2. Замена предохранителя и ремонт электропроводки разрешается только специальным допущенным сотрудникам с квалифицированной группой по электробезопасности не ниже 2-й.

8. Методические указания по проведению лабораторной работы

1. Прочитать методические указания.
2. Ознакомиться с работой реактивного сопла на действующем макете.

3. Ознакомиться с работой сопла и его элементов с использованием видеороликов анимации.
4. Подготовить отчет по лабораторной работе, который должен сопровождаться необходимыми рисунками и содержать:
 - тип сопла, особенности компоновки;
 - назначение сопла в цикле двигателя, процесс разгона реактивной струи до сверхзвуковой скорости. Особенности течения газового потока в сопле и воздуха при внешнем обтекании на разных режимах работы двигателя (полета самолета), положение створок на всех режимах работы двигателя;
 - конструктивная схема сопла, конструкция створок, проставок, их подвеска и герметизация;
 - система охлаждения элементов сопла: корпуса, створок, проставок, элементов системы управления и др.;
 - система управления створками, система синхронизации и центрирования створок;
 - подходы к выбору материалов.

Учебное издание

**ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-МОДЕЛЕЙ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ.
ЧАСТЬ 2: РЕАКТИВНОЕ СОПЛО ТРДДФ Д-30Ф6**

Методические указания

Составители: *Новиков Дмитрий Константинович, Фалалеев Сергей Викторинович,
Старцев Николай Иванович, Цыбизов Юрий Ильич, Шмаков Борис Борисович,
Шацкий Антон Николаевич, Панин Евгений Александрович, Уланов Александр Михайлович*

Технический редактор С. К. Б о ч к а р е в
Редакторская обработка О. Ю. Д љ а ч е н к о, Т. К. К р е т и н и н а
Корректорская обработка Т. К. К р е т и н и н а
Компьютерная верстка Д. К. Н о в и к о в
Доверстка Т. Е. П о л о в н е в а, Т. К. К р е т и н и н а

Подписано в печать 28.12.06. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 2,8. Усл. кр.-отт. 2,9. Уч.-изд.л. Печ. л. 3,0.
Тираж 50 экз. Заказ 176 . ИП-79/2006.

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.