

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)**

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ
И НАГРУЗОК НА ГИДРОПРИВОДЫ
СВЕРХЗВУКОВОГО
РЕГУЛИРУЕМОГО СОПЛА**

САМАРА 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И НАГРУЗОК НА ГИДРОПРИВОДЫ СВЕРХЗВУКОВОГО РЕГУЛИРУЕМОГО СОПЛА

Рекомендовано редакционно-издательской комиссией института
двигателей и энергетических установок в качестве методических указаний

Составитель В.С. Мелентьев

САМАРА
Издательство Самарского университета
2017

Составитель ***В. С. Мелентьев***

Рецензент д-р техн. наук, проф. В. Б. Балякин

М47. Исследование кинематики и нагрузок на гидроприводы сверхзвукового регулируемого сопла [Электронный ресурс]: методические указания / сост. В.С. Мелентьев – Самара: Изд-во Самарского университета. 2017. – Электрон. и граф. дан. (6,5 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Изложены сведения о конструкции, принципах - работы сверхзвукового регулируемого сопла реактивного двигателя. Приведена методика расчёта кинематики сопла на основе проведения численного эксперимента в программной среде MSC.ADAMS и сравнение полученных результатов со значениями, полученными в ходе физического эксперимента.

Методические указания предназначены для Института двигателей и энергетических установок для обучения по направлениям подготовки 24.03.05, 24.04.05, 24.05.02 – «Двигатели летательных аппаратов».

Разработано на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

РЕФЕРАТ

Методические указания: 31 стр., 17 рис., 4 табл., 16 источ., 1 прил.

*ГИДРОПРИВОД, ДИНАМИКА, КИНЕМАТИКА, КОНСТРУКЦИЯ,
СВЕРХЗВУКОВОЕ РЕАКТИВНОЕ СОПЛО, ANSYS, MSC.ADAMS, SIEMENS NX*

Изложены сведения о конструкции, принципах работы сверхзвукового регулируемого сопла реактивного двигателя. Приведена методика расчёта кинематики сопла на основе проведения численного эксперимента в программной среде MSC.ADAMS и сравнение полученных результатов со значениями, полученными в ходе физического эксперимента.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Занятие 1. Изучение конструкции сопла и проведение эксперимента.....	7
Занятие 2. Создание кинематических групп сопла.....	14
Занятие 3. Приложение кинематических граничных условий.....	21
Занятие 4. Проведение расчёта и анализ результатов.....	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	27
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	28
ПРИЛОЖЕНИЕ. Динамическая схема 3D-модели сопла.....	30

ВВЕДЕНИЕ

Выходные устройства современных двигателей - сложные регулируемые устройства, предназначенные для оптимального использования газового потока, создаваемого двигателем. Так как все узлы двигателя связаны газодинамически, работа выходного устройства отражается и на стабильности турбины и компрессора двигателя.

Желание избежать доводки, создать другой способ проверки качеств изделия, является главной движущей силой в создании всё более совершенных систем автоматизированного анализа виртуальных моделей механизмов и машин. Для этого используются специальные алгоритмы технологии создания «виртуального изделия», в которые CAD/CAE/CAM-части входят как одни из этапов.

В ходе создания рассматриваемой численной модели были использованы следующие программные пакеты: SIEMENS NX (для создания моделей деталей и сборок узлов и предварительной обработки расчётной модели); MSC.ADAMS (для расчётов кинематики и динамики упрощённой модели); ANSYS Workbench (для расчёта на прочность).

Общая методика расчёта включает в себя решение следующих задач:

1. Объёмное моделирование (NX)

Порядок создания и иерархия:

- а). детали;
- б). подсистемы;
- в). отдельные контуры;
- г). сопло

2. Газодинамический расчёт (CFX)

- 2.1 Расчёты на стационарных режимах
- 2.2 Расчёт переходного режима с максимальным изменением углов створок.
- 2.3 Сведение нагрузок к векторам для приложения в динамическом расчёте

3. Кинематический расчёт (ADAMS)

- 3.1 Импорт модели в ADAMS (перечень упрощений модели) или создание стержневой модели;
- 3.2 Разработка кинематической схемы;
- 3.3 Оснащение шарнирами;
- 3.4 Приложение программы управления;
- 3.5 Получение диаграммы открытия/закрытия;
- 3.6 Получение скоростей открытия/закрытия;
- 3.7 Проверка кинематических зазоров;

4. Динамический расчёт (ADAMS)

Проводится на четырёх различных моделях по уровню сложности и решаемым задачам:

- а). Стержневая модель;
- б). Один сектор, состоящий из пяти створок;
- в). Два противоположных сектора, наличие системы синхронизации;

г). Модель полного сопла

4.1 Разработка динамической схемы;

4.2 Добавление в модель нагрузок;

4.3 Получение усилий в гидроприводах;

4.4 Получение реакций в подвесах;

4.5 Учёт деформируемости некоторых элементов (обычно управляющие кольца) для более равномерного расчёта усилий в подвесах створок;

4.6 Определение реакций в подвесах с деформированием;

5. Прочностной расчёт (ANSYS)

5.1 Расчёт детали "тяги";

5.2 Расчёт детали "управляющее кольцо";

5.3 Расчёт детали "статорное кольцо".

6. Специализированные расчёты (NX, ANSYS, ADAMS)

Поэтапное решение представленных задач позволяет получить адекватную методику расчёта регулируемого сверхзвукового сопла газотурбинного двигателя на основе "виртуального изделия".

Цель работы определена как изучение конструкции, работы и методики расчёта кинематики реактивного сопла, посредством его расчёта в MSC.ADAMS и определение перемещения, скорости, ускорения в механизме сопла, а также усилия в управляющих гидроприводах при открытии/закрытии створок сопла; сравнение полученных значений с определёнными в ходе проведённого физического эксперимента.

ЗАНЯТИЕ 1. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ СОПЛА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения конструкции сопла следует воспользоваться его описанием и натурным макетом (рис. 1), а также объёмной моделью (рис. 2, 3), полученной у преподавателя.

Основные сведения об объекте исследования представлены ниже.

Реактивное сопло автомоделного типа. Оно предназначено для преобразования потенциальной энергии газа в кинетическую энергию вытекающей струи с минимальными потерями и обеспечения заданного режима работы двигателя на всех эксплуатационных режимах.

Регулированием критического и выходного сечений сопла подвижными створками достигаются оптимальные значения параметров турбокомпрессора и форсажной камеры, а также снижаются потери тяги от недорасширения или перерасширения газа на нерасчётных режимах.

Основной принцип работы данного регулируемого сопла состоит в следующем. Гидроцилиндры управления венцом дозвуковых створок через переставляющее кольцо, поворачивают ведущие, а через них и ведомые створки, а также входные кромки внутренних створок и проставок внутреннего

сопла, шарнирно соединенных с ведущими и ведомыми створками, обеспечивая необходимую площадь критического сечения.

Гидроцилиндры управления венцом внешних створок через управляющее кольцо, тяги привода, шлиц – шарнирные соединения поворачивают на осях створки, а через них и проставки внешнего сопла, а также выходные кромки внутренних створок и проставок внутреннего сопла, обеспечивая необходимую площадь среза.

Изменение площадей критического сечения и среза сопла осуществляется системой управления сопла. Система управления положением створок сопла работает во взаимосвязи с системой управления работой двигателя.



Рис. 1. Натурный макет объекта исследования

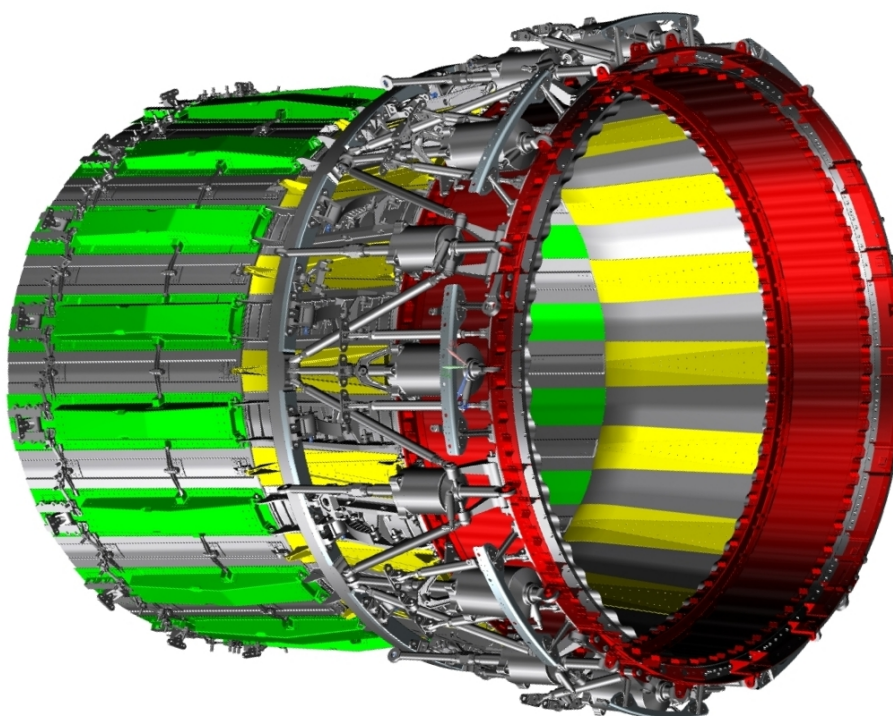


Рис. 2. Полная объёмная модель сопла (без кожуха и наружных створок)

В конструкции и системе управления сопла предусмотрена блокировка, предотвращающая возможность самопроизвольного уменьшения площади среза сопла ниже площади критического сечения.

Реактивное сверхзвуковое сопло состоит из двух основных узлов: внутреннего и внешнего сопел.

Внутреннее сопло

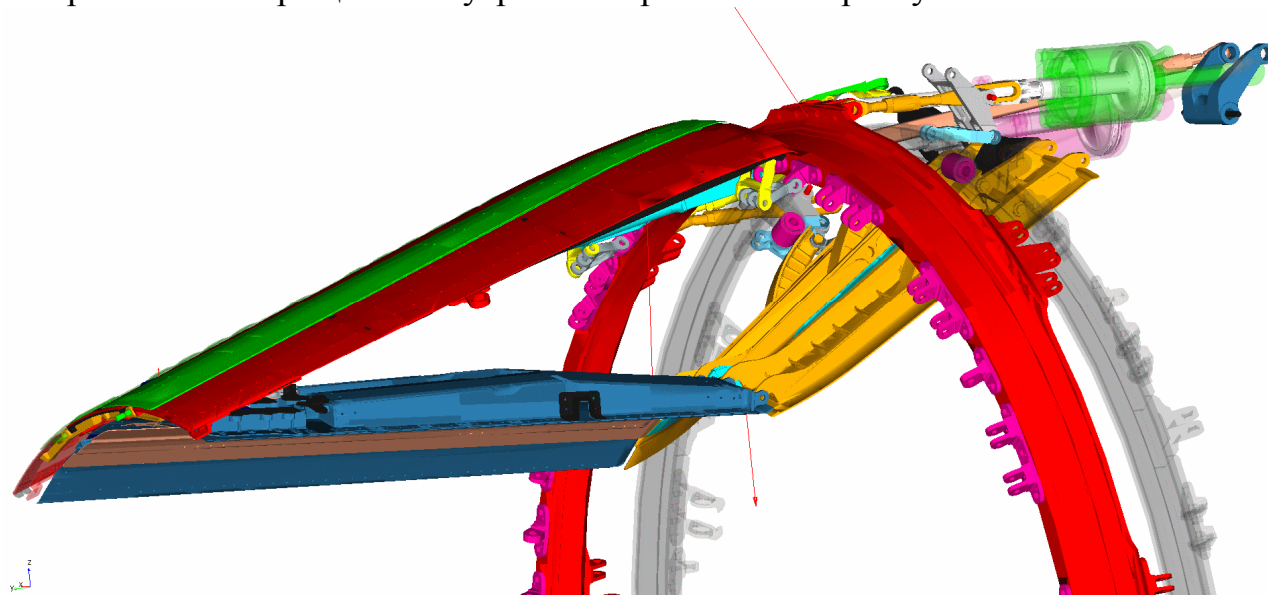
Основными узлами и деталями внутреннего сопла являются: корпус, ведущая створка, ведомая створка, внутренняя створка, внутренняя проставка, переставляющее кольцо, элементы системы механической синхронизации, кольцо уплотнения.

Корпус является силовым элементом реактивного сопла, воспринимающим газодинамические силы, массу реактивного сопла с форсажной камерой и нагрузки, возникающие при эксплуатации двигателя. Корпус представляет собой тонкостенную трубу (кожух) с двумя силовыми кольцами и теплозащитным экраном. Переднее силовое кольцо представляет собой сварной узел коробчатого сечения и служит для крепления сопла к форсажной камере. На наружной поверхности силового кольца расположены: 18 цапф крепления гидроцилиндров системы управления соплом, четыре цапфы подвески реактивного сопла и форсажной камеры к мотогондоле самолета, две транспортировочные цапфы. К задней кромке кольца приваривается кожух. Кольцо привеса створок (заднее силовое кольцо) представляет собой сварной узел П-образного сечения, приклепанный к кожуху. Кольцо привеса створок воспринимает нагрузки от ведущих и ведомых створок, а также от внешнего сопла. Теплозащитный гофрированный экран приклепан с внутренней стороны кожуха к силовому кольцу и к кольцу привеса створок. Экран предназначен для подвода охлаждающего воздуха к ведущим и ведомым створкам, а также для предохранения титановых деталей корпуса от перегрева при работе двигателя на форсажных режимах.

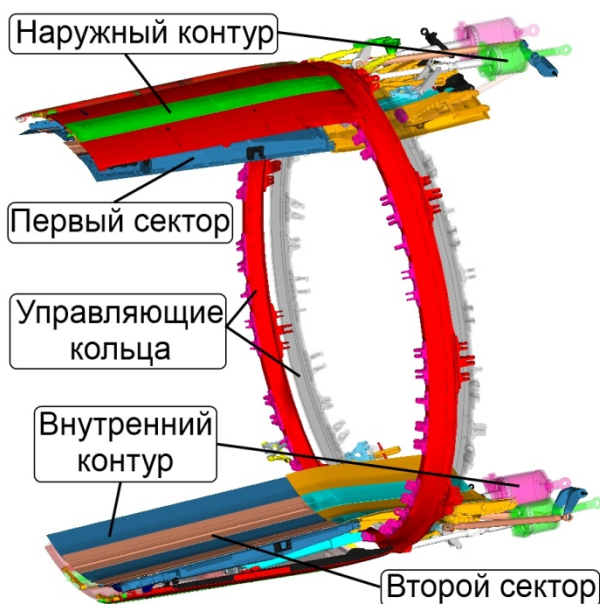
Ведущие створки (18 штук) предназначены для изменения площади критического сечения сопла. Они выполнены цельнолитыми с двумя продольными силовыми ребрами. Передней частью створки подвешиваются с помощью осей вращения и петель к кольцу привеса створок. К задней части створок крепятся на осях вращения створки внутренние, образующие сверхзвуковую часть внутреннего сопла. По оси симметрии ведущей створки устанавливается направляющий профиль для привода створок от переставляющего кольца.

Ведомые створки (18 штук) расположены между ведущими створками и образуют вместе с последними газоздушный тракт дозвуковой части сопла. Ведомая створка представляет собой штампованный лист, к которому с наружной стороны приклепаны: дефлектор для поддержания ведомых створок на кромках ведущих створок при неработающем изделии и для уменьшения утечек газа между кромками соседних створок на работающем изделии; кронштейн для подвески передней части створки с помощью осей вращения и

петель к кольцу привеса створок; кронштейн для крепления к задней кромке створки на осях вращения внутренних проставок сверхзвуковой части сопла.



а) Объёмная модель сектора сопла



б)

Рис. 3. Объёмная модель сопла для передачи на расчёт:

а) Объёмная модель сектора сопла; б) Объёмная модель двухсекторной модели

Внутренние створки (18 штук) сверхзвуковой части сопла совместно с внутренними проставками образуют расширяющую часть газоздушного тракта внутреннего реактивного сопла. Створка представляет собой штампованный лист, к которому с наружной стороны приклепаны: силовая коробка; кронштейн с проушинами для крепления передней кромки внутренней створки к задней кромке ведущей створки, кронштейны с беговой дорожкой для стыковки задней кромки створки через два ролика с задней кромкой створки внешнего сопла.

Внутренние проставки (18 штук) расположены между внутренними створками. Проставка представляет собой штампованный лист, к которому с наружной стороны приклепаны: кронштейн с проушиной для крепления передней кромки проставки к задней кромке ведомой створки; два кронштейна для установки на нем коромысел, ограничивающих радиальное перемещение проставок относительно створок; кронштейн для установки на нем коромысла и элементов центровки задней кромки проставки относительно соседних створок.

Переставляющее кольцо представляет собой сварной узел коробчатого сечения, состоящий из переднего и заднего колец. На переднем фланце кольца расположены: 18 съемных кронштейнов с роликами для привода ведущих створок; девять вваренных в кольцо цапф крепления гидроцилиндров системы управления критическим сечением; девять съемных кронштейнов системы центровки кольца; съемный кронштейн крепления тросов обратной связи.

Система механической синхронизации исключает перекос переставляющего кольца при неравномерных усилиях развиваемых гидроцилиндрами, и включает в себя: 18 кронштейнов и девять качалок на заднем торце силового кольца; 18 тяг шарнирно соединяющих девять качалок силового кольца с девятью кронштейнами крепления гидроприводов на переставляющем кольце.

Кольцо уплотнения изготавливается из листа и крепится с помощью петель к заднему торцу кольца привеса створок. Кольцо уплотнения обеспечивает минимальный уровень утечек газа в зоне подвижного контакта с передними кромками ведущих и ведомых створок.

Внешнее сопло

Основными узлами внешнего сопла являются: внешний корпус, внешняя створка, внешняя проставка, управляющее кольцо, элементы механической блокировки, элементы дополнительной синхронизации, кожух.

Внешний корпус является силовым элементом сопла, воспринимающим усилия от части газовых сил, действующие на внутренние створки и внутренние проставки, и усилия от внешних створок и проставок.

Корпус состоит из сваренных между собой переднего фланца, кожуха, заднего фланца и приклепанных к кожуху силовых накладок.

Внешние створки (18 штук) предназначены вместе с проставками для создания необходимой аэродинамической формы внешнего сопла и для изменения площади среза сопла. Створка представляет собой штампованный лист, к которому приклепан штампованный на листе корпус с тремя литыми кронштейнами к двумя штампованными из листа стрингерами.

Передним кронштейном створки подвешиваются с помощью осей вращения и петель к заднему фланцу внешнего корпуса.

К среднему кронштейну крепится болтами штампованный кронштейн для привода створок. Все створки во внешнем сопле соединены между собой в районе среднего кронштейна шлиц – шарнирными серьгами, являющимися

частью привода створок. К кронштейну у конца створки крепится ось с опорными роликами для соединения с концами внутренних створок.

Внешние проставки (18 штук) расположены между внешними створками и опираются на кромки последних. Проставка представляет собой клёпано – сварную конструкцию, состоящую из:

- а) наружного и внутреннего днищ;
- б) дефлектора для создания уплотнения между проставкой и соседними створками в сопле;
- в) проушины для шарнирного закрепления коромысла, обеспечивающего надежное прилегание кромок проставки к кромкам створок с целью создания уплотнения между ними;
- г) двух уголков для шарнирного закрепления ограничителей максимального раскрытия створок и проставок в сопле;
- д) кронштейна для привеса передней кромки проставки с помощью осей вращения и петель к заднему фланцу внешнего корпуса.

Управляющее кольцо представляет собой сварной узел коробчатого сечения, состоящий из переднего и заднего фланцев и листовых колец между ними. На переднем фланце кольца расположены:

- а) девять съемных совмещенных кронштейнов для крепления гидроцилиндров системы управления срезом сопла и пазовых тяг системы механической блокировки, тяг дополнительной синхронизации и для крепления троса обратной связи;
- б) съемный кронштейн для крепления троса датчика перемещений.

На заднем фланце кольца расположены:

- а) 18 съемных кронштейнов для шарнирного крепления тяг привода, соединяющих кольцо с шлиц – шарнирными звеньями внешних створок;
- б) девять съемных кронштейнов центровки управляющего кольца относительно заднего фланца внешнего корпуса.

Механическая блокировка состоит из систем пазовых тяг, качалок кронштейнов и связывает внешний корпус, переставляющее кольцо и управляющее кольцо.

Система механической синхронизации исключает перекося управляющего кольца при неравномерных усилиях, развиваемых гидроцилиндрами, и включает в себя: девять корпусов, закрепленных на внешнем корпусе; 18 рычагов с зубчатыми секторами, попарно находящимися в зацеплении; 18 тяг шарнирно – соединяющих 18 рычагов с девятью кронштейнами крепления гидроцилиндров на управляющем кольце.

Кожух задней частью опирается на корпус внешнего сопла. Передней частью кожух крепится к силовому кольцу внутреннего сопла с помощью девяти кронштейнов. Кожух выполнен из листового материала, имеет два продольных разъема. В конструкцию кожуха входит опорное кольцо, поперечное ребро которого препятствует стеканию топлива вовнутрь мотогондолы. Стык между корпусом внешнего сопла и кожухом уплотнен резиновым уплотнительным кольцом.

Экспериментальное исследование кинематики реактивного сопла

Схема экспериментальной установки показана на рис.4.

Методика проведения эксперимента состоит в следующем. На входное устройство установки подаётся постоянное давление $P_{в}$, величину которого следует зафиксировать в протоколе (табл. 1), оценив показания датчика давления. С помощью электрического блока управления давление подаётся сначала в одну из камер гидропривода, что приводит к полному раскрытию сопла. При этом время открытия t_0 сопла в секундах фиксируется в протоколе.

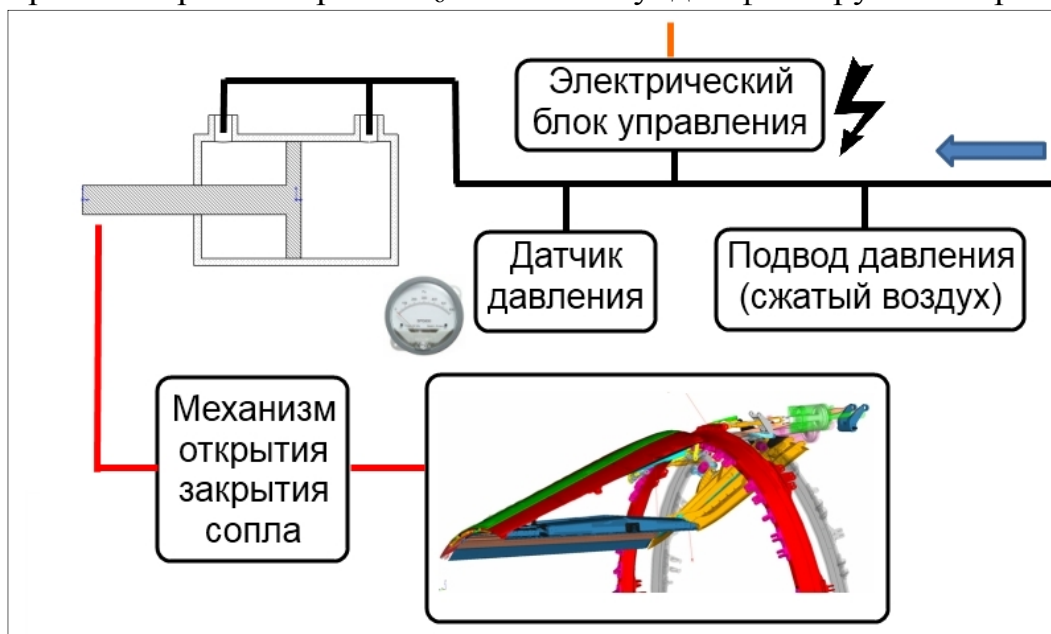


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

После этого давление подаётся во вторую полость гидропривода, что приводит к закрытию сопла. При этом время закрытия t_3 сопла в секундах также фиксируется в протоколе. Для повышения точности эксперимент можно повторить несколько раз, вычислив затем среднее значение параметров.

Табл. 1. Образец протокола экспериментальных исследований кинематики реактивного сопла

Давление $P_{в}$, Па	№ эксперимента	Время открытия t_0 , с	Время закрытия t_3 , с
	1		
	2		
	3		
	Среднее		
	Расчётное		
	Расхождение, %		

ЗАНЯТИЕ 2. СОЗДАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ГРУПП СОПЛА

Целью динамического расчёта сопла является получение перемещений, скоростей и ускорений всех деталей сопла, реакций во всех связях (шарнирах) сопла, с графическим выводом значений наиболее важных из них. Особенно это касается величин усилий на гидроприводы системы управления наружным и внутренним контуром сопла, и усилий на критичные элементы, подвергающиеся в дальнейшем прочностному расчёту.

Процессы, протекающие в реактивном сопле, считаются нестационарными. Поэтому принимается существование нескольких установившихся режимов и переходных процессов между ними. Детали сопла считаются абсолютно жёсткими, однако допускается наличие между ними деформирующихся связей, что открывает возможность учёта колебаний отдельных элементов. Для отдельных связей допускается наличие демпфирования.

Геометрия импортируется из CAD-пакета (SIEMENS NX) в пакет MSC.ADAMS, где детали объединяются в кинематические группы (см. рис. 5-11), имеющие один центр масс и движущиеся в модели совместно по общему закону. То есть кинематическая группа "Сверхзвуковая створка", обозначенная в MSC.ADAMS, как "vsz" на самом деле состоит из большого числа жёстко связанных деталей или геометрий (Geometry). Объединение происходит следующим образом. Сначала выбирается базовая деталь группы, затем командой "Rename" изменяется принадлежность детали.

Рассмотрим пример. Имеем две детали, каждая представляет собой тело с физическими свойствами и геометрией: .Model.Stvorka.Solid1 и Model.Part_2.Solid2. По умолчанию всем импортированным телам (которым назначена в CAD-пакете плотность материала) присваивается название "Part_#", а геометриям "Solid#". Заменяем название геометрии .Part_2.Solid2 на Stvorka.Solid2, затем удаляем пустую деталь Part_2, не содержащую геометрии. Получаем одну деталь .Model. Stvorka с двумя геометриями Solid1 и Solid2. Во избежание путаницы геометрии можно переименовать в соответствии с названиями исходных деталей, взятых, например, из спецификации.

В версии MSC.ADAMS 2010 и выше, наряду с классическим, присутствует «ленточный» интерфейс, аналогичный используемому в пакете MS.Office 2007 и выше, установленный по умолчанию. Оба интерфейса равно функциональны и выбор одного из них зависит от личных предпочтений. В данной работе при описании взаимодействия пользователя с программой идёт ориентация на классический интерфейс. Чтобы переключиться к классическому виду интерфейса MSC.ADAMS в меню "Settings" выберите пункт "Interface Style" и затем подпункт "Classic".

Далее работа велась лишь с одним сектором сопла (рис. 3а), включающем в себя три створки и две проставки. Подобное деление позволило, с одной стороны - снизить трудоёмкость задачи, с другой - обеспечить нормальную кинематику выбранного сектора, поскольку три наружные створки "ns"

управляются двумя тягами "nq", также на данном секторе содержатся все имеющиеся в модели виды подвески управляющих колец, а также по одному гидроприводу - наружного и внутреннего контура.











Модель (рис. 5-11, А.1) содержит в себе 62 кинематические группы, из которых 40 приходится на наружный контур и систему подвеса колец, и 22 на внутренний контур; 111 шарниров (см. табл. 2-4), из которых 62 приходится на наружный контур (вместе с системой связи между контурами), и 49 на внутренний контур; два генератора движения "Motion" , управляющих движением штоков гидроприводов.









Табл. 2. Маркировка и спецификация шарниров в MSC.ADAMS








Маркировка	Тип	Значение
JR, 	Вращательный	Одна вращательная степень свободы
JF, 	Неподвижный	Убирает все 6 степеней свободы. Заделка
JT, 	Поступательный	Одна поступательная степень свободы
JS, 	Сферический	Три вращательные степени свободы
JB, 	Гибкая муфта	Жесткости и коэффициенты демпфирования по всем поступательным и вращательным осям
G, 	Земля	Абсолютно неподвижное тело. С ним связана центральная система координат
Spring, 	Пружина	Жесткость и коэффициент демпфирования по одной поступательной оси
JC, 	Цилиндрический	Одна поступательная и одна вращательная степени свободы
JK, 	Coupler	Связь вращательных или поступательных шарниров через передаточный коэффициент

Для удобства моделирования кинематические группы и шарниры были объединены в группы (Build - Group). Состав и названия групп сведены в таблицу 4. Группировка позволяет управлять группой элементов, как единым целым, например, одновременно скрывать и отображать на экране, менять прозрачность, активировать и деактивировать в процессе предварительных расчетов. Шарниры в таблице разделены также по кинематическим цепочкам. Всего в модели содержится четыре группы, цифрами обозначены присвоенные по окружности номера створок:

- naruzh_1_2_18 - кинематические группы наружного контура;
- vnutr_1_2_18 - кинематические группы внутреннего контура;
- n_joints_1_2_18 - шарниры наружного контура;
- v_joints_1_2_18 - шарниры внутреннего контура.

Табл. 3. Анализ соотношения различных типов шарниров в модели

Контур	Число шарниров							
	JF 	JR 	JC 	JS 	JT 	JB 	Coupler 	JCurve 
Наружный	7	17	14	14	5	3	0	2
Внутренний	10	11	14	7	0	0	4	3
Всего	17 15%	28 25%	28 25%	21 19%	5 5%	3 3%	4 3%	5 5%

Как видно из анализа кинематических граничных условий объекта исследования (табл. 3), основную долю шарниров составляют вращательный "JR" , цилиндрический "JC"  и сферический "JS"  - соединения вращения. Шарниры "JC"  в основном заменяют шарниры "JR"  там, где требуется не допустить избыточных связей (redundant constraint) или где в соединениях присутствуют заклинивания из-за микроперемещений, вызванных погрешностью создания 3D-модели из деталей с абсолютно жёсткой геометрией. Некоторое количество фиксирующих шарниров "JF"  оставлено для обеспечения связи кинематических групп, для которых возможно задание при доводке модели других граничных условий, например, учёт вращения ролика "pd" (JF_pd1_colco_v), который в данной модели скользит по направляющим, или исключённых из силовой схемы элементов синхронизации проставок (JF_zvpz1_np1). Упруго-демпфирующих связей "JB"  использовано минимальное количество (vJB_ns1_F01) с целью снижения их влияния на результат расчёта.

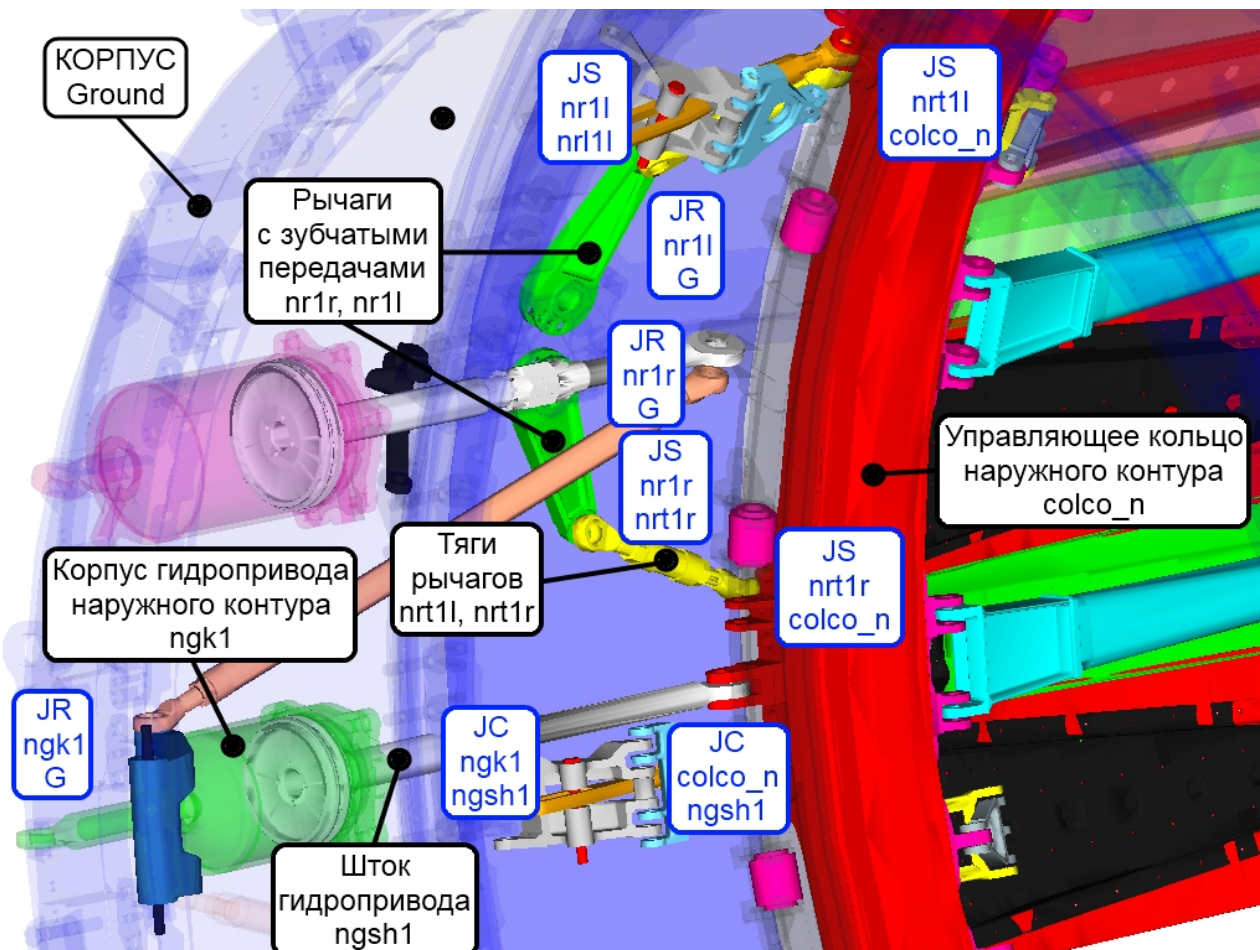


Рис. 5. Вид 3D-модели с обозначениями (наружный контур, зона гидроприводов)

Табл. 4. Группировка кинематических групп и шарниров динамической модели сопла

Группа	Объекты
1. naruzh_1_2_18 40 объектов	ns1, ns2, ns18, np1, np2, f01, f02, f18, f011, f012, f021, f022, f181, f182, cnpс1, cnpс2, cnpг1, cnpг2, nr11, nr1r, nrt11, nrt1r, nq1, nq2, nq11, nqr1, nqr2, nq12, nkr1, nkr2, zvpz1, zvpz2, sv1, sv2, ss1, ss2, st1, st2, svt1, svt2
2. vnutr_1_2_18 22 объекта	vsz1, vsz2, vsz18, vpz1, vpz2, vsp1, vsp2, vsp18, vpp1, vpp2, vkrp1, vkrp2, vkrz1, vkrz2, vpzj1, vpzj2, vpzj11, vpzj12, vpzjr1, vpzjr2, vpz11, vpz12
3. n_joints_1_2_18 62 объекта	<p>JR_ngk1_G, JC_ngk1_ngsh1, JC_colco_n_ngsh1 (система управления наружным кольцом);</p> <p>JR_nr11_G, JR_nr1r_G, JS_nr1r_nrt1r, JS_nr11_nrl11, JS_nrt11_colco_n, JS_nrt1r_colco_n (зубчатая система синхронизации);</p> <p>JR_cnpг1_G, JR_cnpг2_G, JC_cnpс1_cnpг1, JC_cnpс2_cnpг2, JS_colco_n_cnpс1, JS_colco_n_cnpс2 (подвеска наружного кольца к статору);</p> <p>JR_ss1_G, JR_ss2_G, JC_svt1_ss1, JC_svt2_ss2, JT_svt1_st1, JT_svt2_st2, JS_st1_colco_n, JS_st2_colco_n, JC_sv1_ss1, JC_sv2_ss2, JS_sv1_colco_v, JS_sv2_colco_v (связь наружного и внутреннего колец);</p> <p>JC_nq1_colco_n, JC_nq2_colco_n, JR_nq1_nqr1, JR_nq1_nq11, JR_nq2_nqr2, JR_nq2_nq12, JS_nq11_ns18, JS_nqr1_ns1, JS_nq12_ns1, JS_nqr2_ns2, JC_ns1_G, JR_ns2_G, JR_ns18_G, JCurve_ns1, JC_beg_ns1_zvpz1, JCurve_ns2, JC_beg_ns2_zvpz2, JF_zvpz1_np1, JF_zvpz2_np2, JR_np1_G, JR_np2_G, JF_nkr1_np1, JF_nkr2_np2 (приведение в движение наружных створок);</p> <p>vJB_ns18_f18, vJB_ns1_f01, vJB_ns1_f02, JF_f012_f01, JF_f182_f18, JF_f022_f02, JR_f011_f01, JC_f181_f18, JR_f021_f02, JT_f011_vsz1, JT_f181_vsz18, JT_f021_vsz2 (связь контуров на срезе сопла)</p>
4. v_joints_1_2_18 49 объектов	<p>JR_vgk1_G, JC_vgk1_vgsh1, JC_vgsh1_colco_v (система управления внутренним кольцом);</p> <p>JF_vka1_G, JC_vk1_vka1, JS_vt2_vk1, JS_vt1_colco_v, JS_vt2_colco_v (система подвески внутреннего кольца);</p> <p>JF_pd1_colco_v, JF_pd2_colco_v, JF_pd18_colco_v, JCurve_vsp1, JC_beg_vsp1_colco_v, JCurve_vsp2, JC_beg_vsp2_colco_v, JCurve_vsp18, JC_beg_vsp18_colco_v, JR_vsp1_G, JR_vsp2_G, JR_vsp18_G, JR_vsz1_vsp1, JR_vsz2_vsp2, JR_vsz18_vsp18 (приведение в движение дозвуковых створок);</p> <p>JR_vpp1_G, JR_vpp2_G, C_JR_vsp1_JR_vpp1, C_JR_vsp2_JR_vpp2, JC_vpz11_vpp1, JC_vpz12_vpp2, C_JR_vsz2_JC_vpp2, C_JR_vsz1_JC_vpp1, JF_vpz11_vpz1, JF_vpz12_vpz2, JF_vkrp1_vpz1, JF_vkrp2_vpz2, JF_vkrz1_vpz1, JF_vkrz2_vpz2 (приведение в движение сверхзвуковых створок);</p> <p>JC_vpzj11_vsz18, JC_vpzjr1_vsz1, JC_vpzj12_vsz1, JC_vpzjr2_vsz2, JR_vpzj1_vpz1, JR_vpzj2_vpz2, JS_vpzj1_vpzj11, JS_vpzj1_vpzjr1, JS_vpzj2_vpzj12, JS_vpzj2_vpzjr2 (система синхронизации сверхзвуковых створок);</p> <p>JC_colco_v_G, JC_colco_n_G (обеспечение осевого движения управляющих колец)</p>

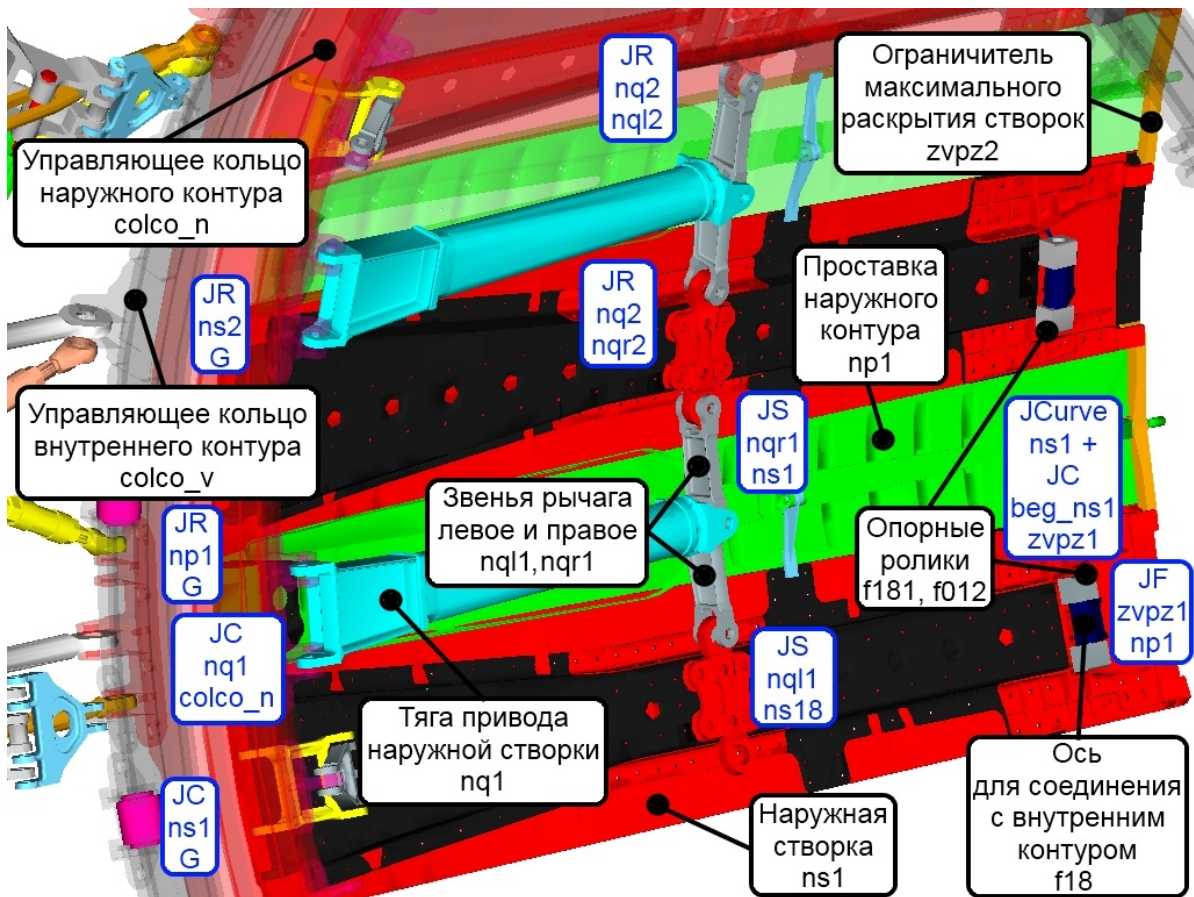


Рис. 6. Вид 3D-модели с обозначениями (наружный контур, зона створок)

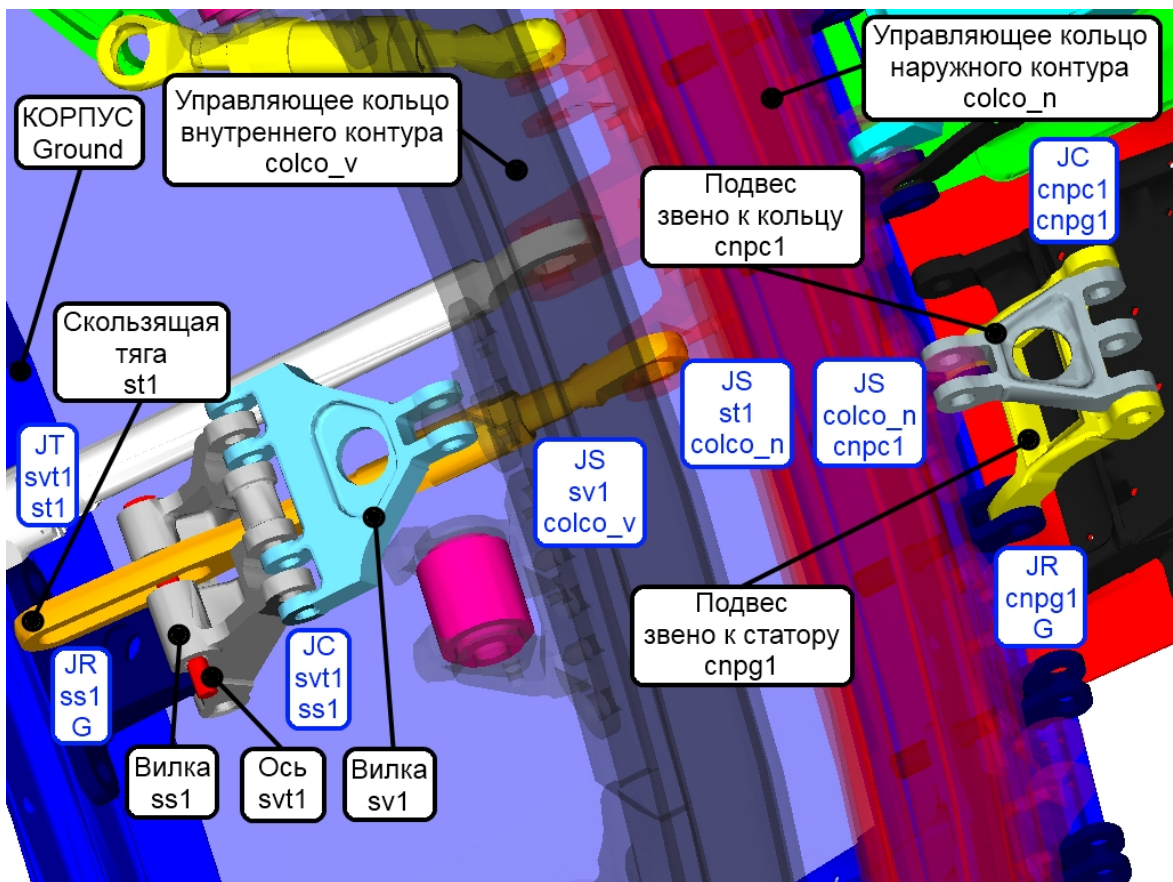


Рис. 7. Вид 3D-модели с обозначениями (наружный контур, зона подвеса колец)

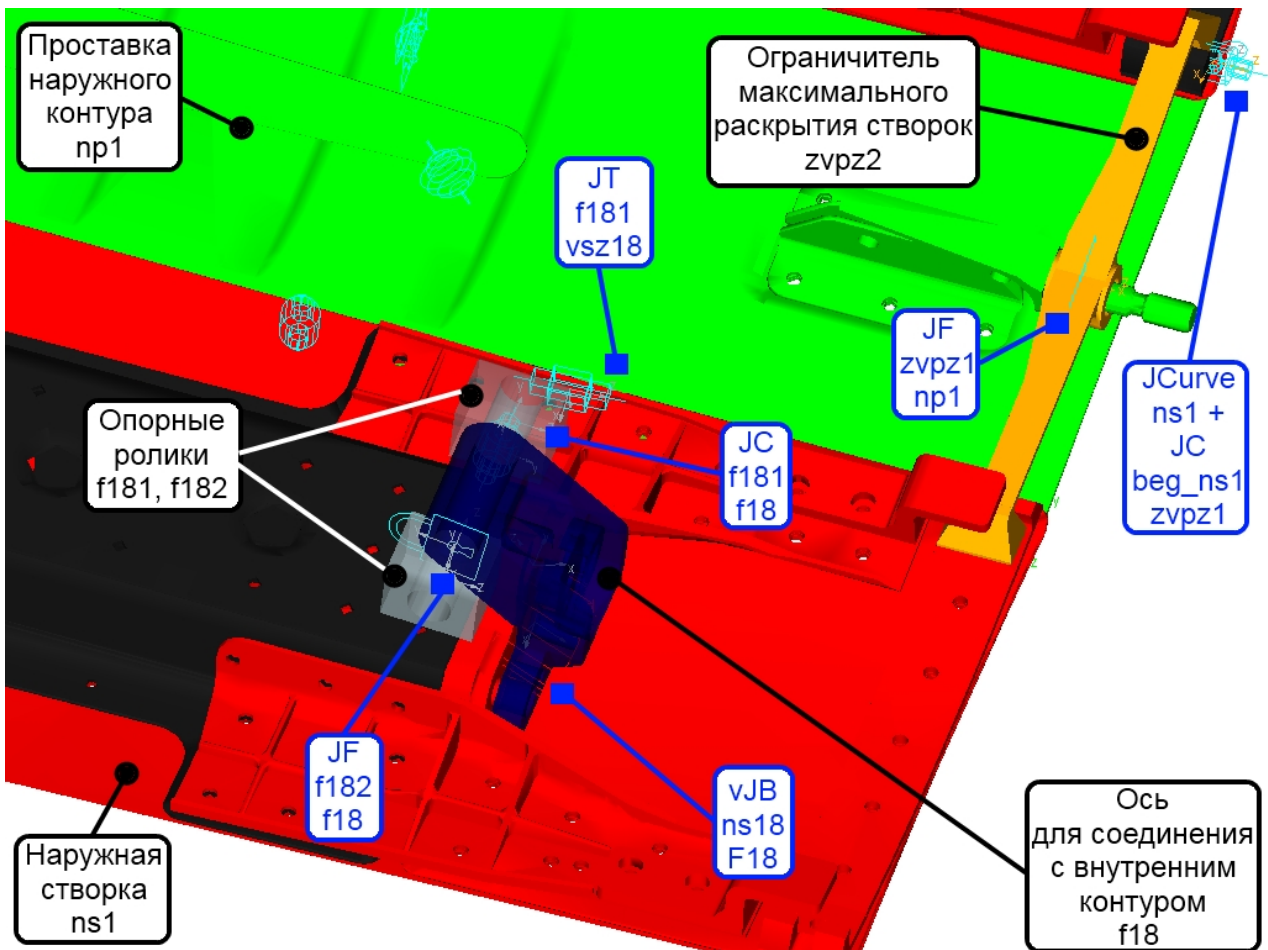


Рис. 8. Вид 3D-модели с обозначениями (наружный контур, зона синхронизации створок)

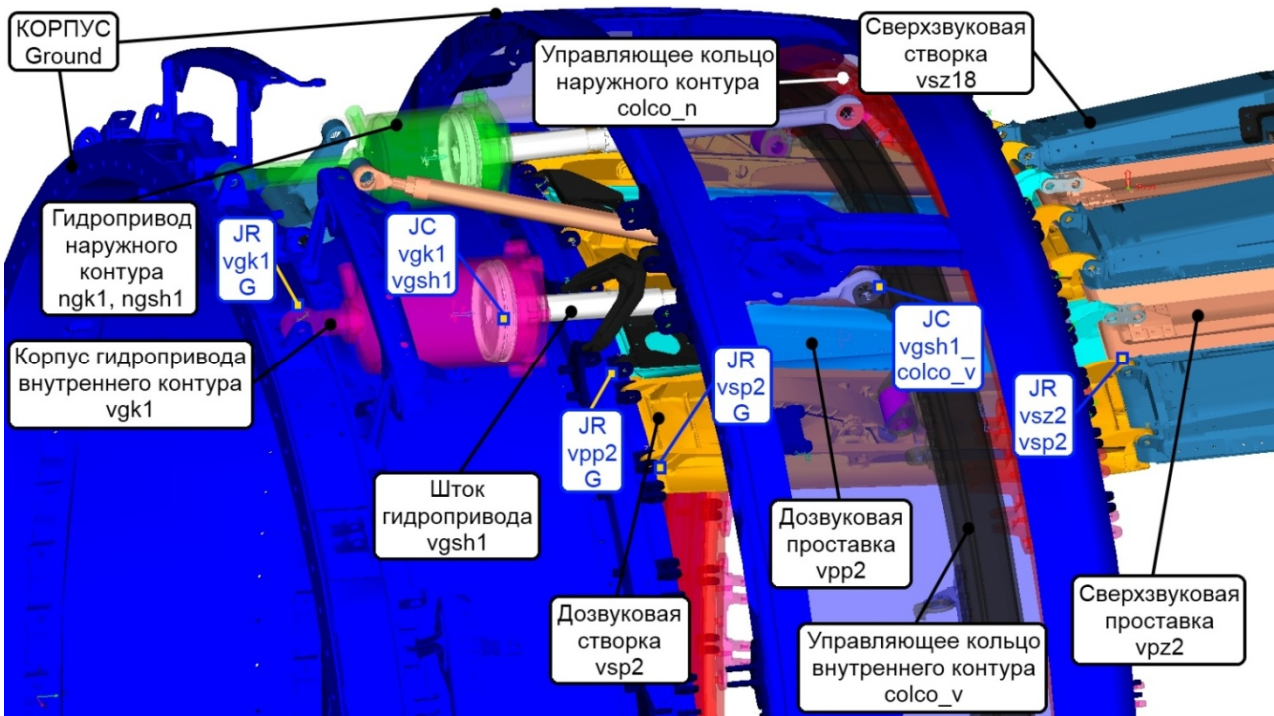


Рис. 9. Вид 3D-модели с обозначениями (внутренний контур, зона гидроприводов)

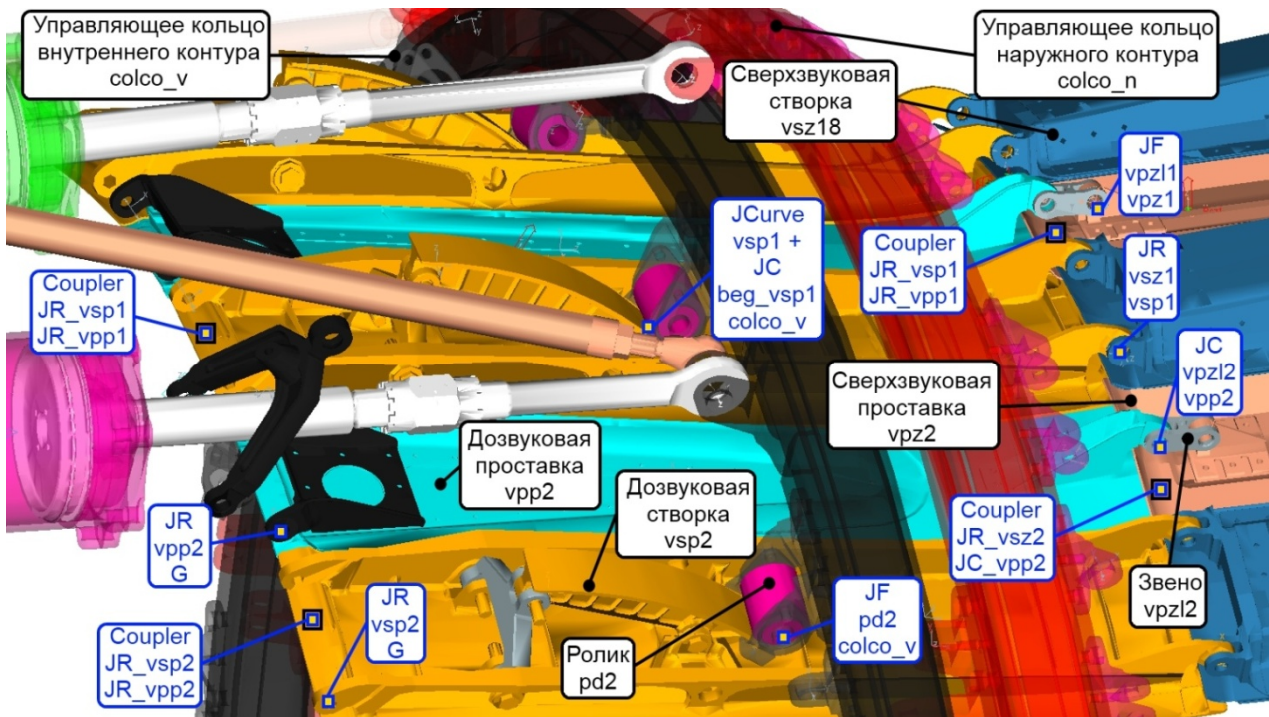


Рис. 10. Вид 3D-модели с обозначениями (внутренний контур, зона дозвуковых створок)

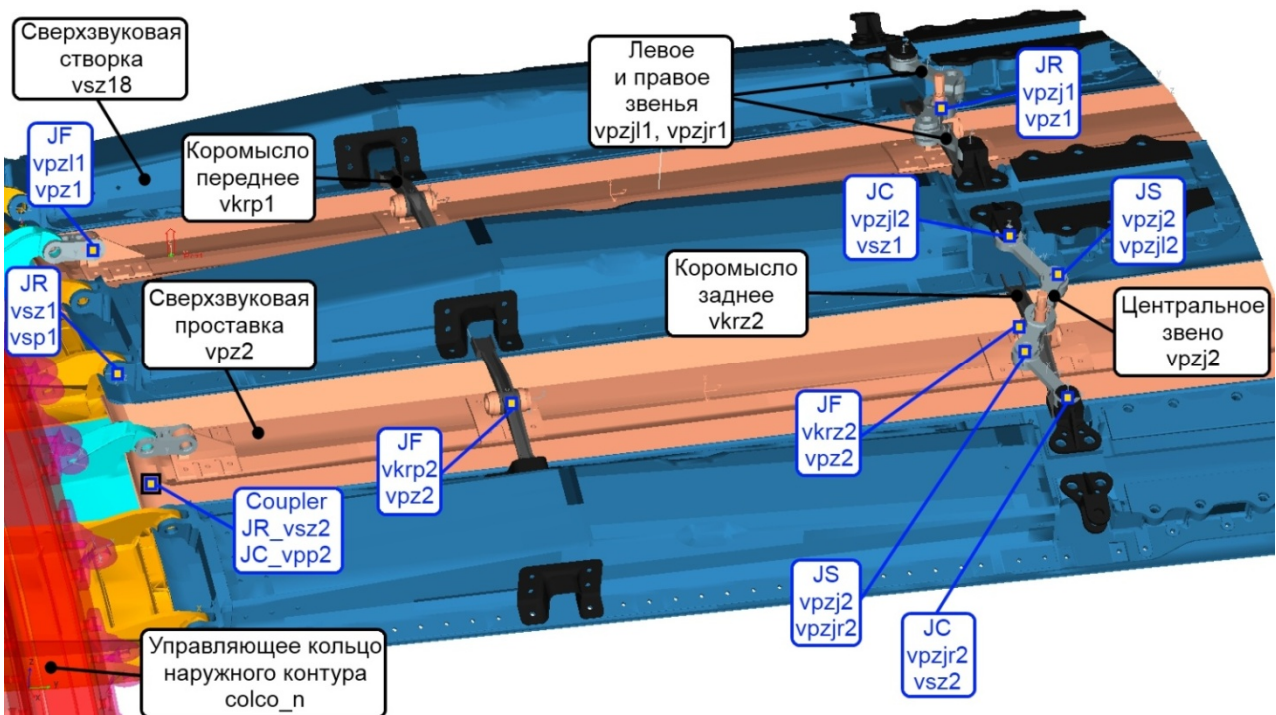







Рис. 11. Вид 3D-модели с обозначениями (внутренний контур, зона сверхзвуковых створок)



После знакомства и изучения спецификации используемых в 3D-модели кинематических связей необходимо найти и выделить на выданной преподавателем исследуемой модели основные функциональные зоны реактивного сопла: зону сверхзвуковых створок, зону дозвуковых створок, зону гидроприводов, зону синхронизации створок, зону подвеса управляющих колец, а также отдельные элементы, входящие в состав внутреннего и наружного контуров сопла.

ЗАНЯТИЕ 3. ПРИЛОЖЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

При создании объёмной динамической модели сопла принят ряд допущений.

I. Из анализа динамической схемы (см. приложение) видно, что не все шарниры соответствуют тем, что установлены на реальной конструкции. Во многих местах сферические шарниры  заменены на цилиндрические  или вращательные  и наоборот. Такая замена возможна потому, что данные шарниры обеспечивают вращательное движение деталей относительно друг друга (активного тела относительно реактивного). Замены выполнены для того, чтобы избежать избыточных связей и заклиниваний, вызванных неизбежными погрешностями 3D-деталей и сборки. Погрешности эти, разумеется, присутствующие и на реальных деталях, в натурной конструкции практически не оказывают влияния за счёт небольших деформаций элементов в пределах допусков, которые позволяют деталям двигаться относительно друг друга и избегать заклинивания, а также присутствующему в каждом соединении естественному конструкционному демпфированию за счёт сил трения. В твердотельной модели деформаций нет, поэтому во избежание заклинивания требуется давать дополнительные степени свободы шарнирам (при условии, что это не нарушает правильность движения механизма, т.е. другие шарниры ограничивают перемещение всей модели или отдельных её частей в указанных направлениях). Демпфирование же в соединениях должно задаваться отдельно и только там, где это важно для работы модели (поскольку оно, во-первых, должно предварительно определяться; во-вторых, сильно замедляет расчёт). В других случаях трение в отдельных деталях заменяется интегральной силой или интегральным моментом трения.

В качестве двух ярких примеров можно обратить внимание на замену сферического шарнира  в точке крепления корпуса внутреннего гидропривода к корпусу на вращательный  "JR_vgk_G". Эта замена никак не препятствует повороту корпуса в рабочей плоскости, но отсекает две лишние степени свободы, из-за которых корпус в отсутствие трения может закручиваться относительно оси. В наружных же гидроприводах удалось сохранить сферический шарнир, поскольку закручивание корпуса не наблюдалось.

В соединении звена F со створкой наружного контура (рис. 8) фиксирующий шарнир  заменён на упруго-демпфирующий элемент  "vJB_ns_F", поскольку, вследствие соединения наружного и внутреннего контура в этом месте, происходит накопление незначительных отклонений в движениях деталей от одного и от другого контура. В результате этого обстоятельства смещение по "запрещённым" степеням свободы в шарнире превышает допустимый предел. В процессе расчёта выдаётся сообщение "Simulation operation failed" (прерывание расчёта) и в Message Window... (окне сообщений MSC.ADAMS) указывается причина "Locked up", означающее


заклинивание или разрыв в шарнире, невозможный для твердотельной геометрии.

Выходами из данной ситуации являются как упоминавшееся ранее изменение типов шарниров в модели (в том числе и на упругие элементы), так и снижение требований к точности расчёта.

Таким образом, выбор степеней свободы в каждом соединении является строго индивидуальным и проверяется путём запуска модели на расчёт и наблюдения за движением деталей при данной комбинации шарниров. Если движение элементов соответствует физической модели, то далее анализируется распределение реакций в основных шарнирах, которое также должно соответствовать натурной модели.

II. Особую сложность представляет моделирование систем, где в реальности действуют контактные силы. Моделировать их напрямую довольно сложно, поскольку неизвестны параметры контакта, а задание контакта "по умолчанию" вызывает сильное искажение результатов расчёта, при этом резко повышая вычислительную нагрузку. В объекте исследования к таким системам относятся:

- а) системы синхронизации на срезе сопла (рис. 12);
- б) системы подвеса обеспечения движения проставок (рис. 13);

Для случая а) было найдено решение, похожее на описанное выше для взаимодействия роликов "pd" и направляющих на створке "vsp". Отличие состояло в том, что кромка на направляющей створки "ns" не является одной линией, а состоит из трёх участков. Для таких кромок (с вершинами на кромке) соединение "JCurve"  не работает.

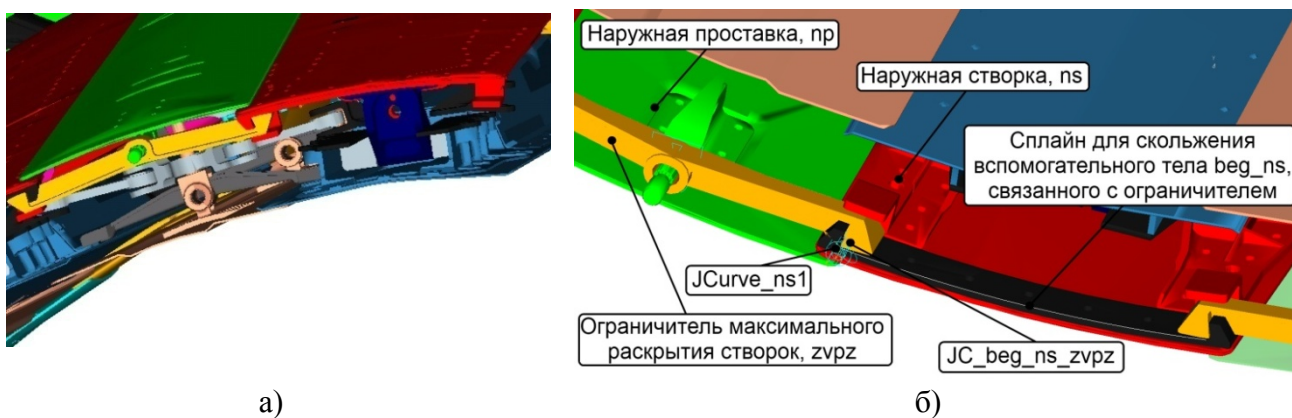














Рис. 12. Система синхронизации на срезе сопла: а) общий вид; б) организация движения ограничителя максимального раскрытия створок "zvpz"

Поэтому по точкам (вершинам) на кромке был создан отдельный B-сплайн , привязанный к створке командой "Rename". На конце сплайна (находящемся рядом с концевой точкой ограничителя максимального раскрытия створок "zvpz") создано вспомогательное тело "beg_ns", представляющее собой сферу  малого радиуса. Данное тело соединено со сплайном шарниром безотрывного скольжения "JCurve_ns" , а с ограничителем максимального раскрытия створок "zvpz" цилиндрическим

шарниром "JC_beg_ns_zvpz" , ось которого ориентирована по боковой кромке направляющей (т.к. важно для всех створок выбирать одинаковые кромки во избежание несоосности) и в первоначальном (максимально открытом) состоянии близка к оси сопла. После построения отображение вспомогательных тел "beg_ns" скрываются командой "Appearance".

Подобная комбинация связей заменяет контактную силу в соединении и позволяет ограничителю максимального раскрытия створок "zvpz" плавно скользить по направляющей наружной створки "ns". При этом функция именно ограничения достигается за счёт того, что центр масс (он же маркер привязки) вспомогательного тела "beg_ns" не может выйти за пределы созданного сплайна в силу свойств связи "JCurve" .

В случае б) рассматривались два варианта - первый: б.1) - Коромысла (рис. 13) из расчёта исключены, а синхронизацию движения створок и проставок обеспечивает шарнир "Coupler" , искусственно выравнивающий угловые перемещения створок и проставок. Шарнир "Coupler"  относится к сложным и связывает не тела, а другие шарниры (вращательного, либо поступательного типа). В таблице 4 данная связь маркируется "C_JR_vsz2_JC_vpp2" , "C_JR_vsz1_JC_vpp1" , и как следует из названия, связывает вращательный шарнир "JR_vsz_vsp"  между дозвуковой "vsp" и сверхзвуковой "vsz" створкой и цилиндрический  или вращательный  шарнир "JC(JR)_vpzl_vpp" между дозвуковой проставкой "vpp" и соединительным элементом к сверхзвуковой проставке "vpzl".

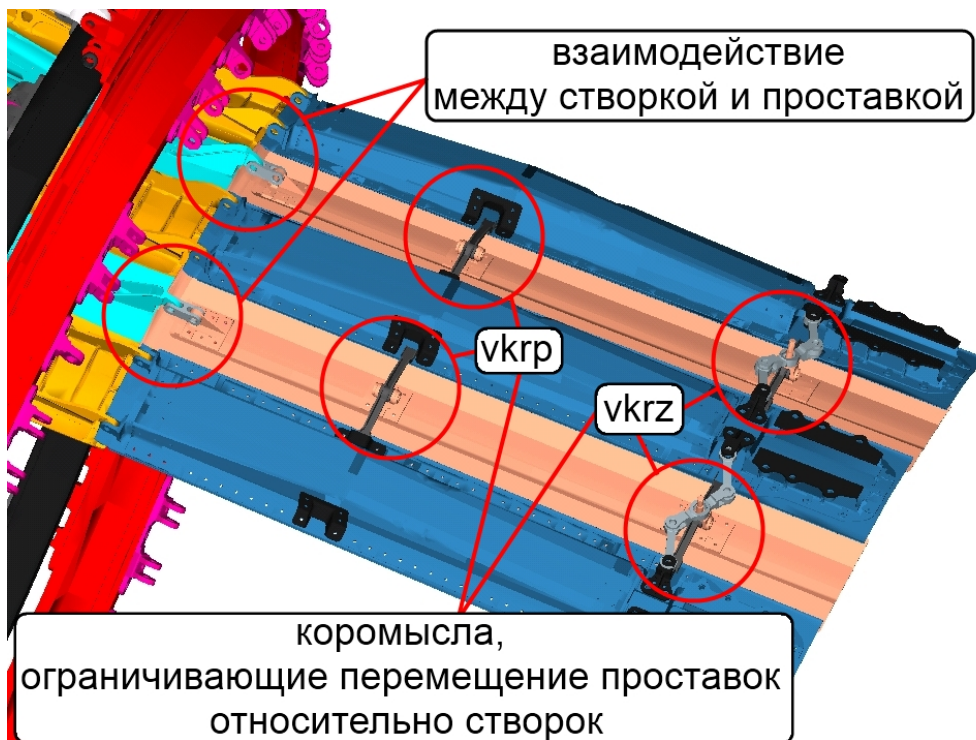




Рис. 13. Зоны взаимодействия проставок и створок внутреннего контура

Движение самого звена "vpzl" также упрощено в связи с данным ограничением. Вместо двух вращательных шарниров на концах "vpzl" в

дополнение к описанному выше шарниру "JC(JR)_vpzl_vpp"  другая часть звена "vpzl" жёстко прикреплена к сверхзвуковой проставке "vpz" шарниром "JF_vpzl_vpz" . Это позволило избежать качания створок на этих элементах при исключении коромысел из силовой схемы.

III. В модели присутствует тяга с прорезью "st" (рис. 14), длина которой подбирается в процессе сборки натурального сопла для обеспечения нормальной работы.



Рис. 14. Изменение расстояния между осью и концом тяги

При сборке 3D-модели не было возможности оценить диапазоны движения оси (болта) в прорези тяги "st", вследствие чего тяга оказалась слишком короткой и на некоторых режимах происходило внедрение оси в материал тяги "st", что обнаружилось лишь на этапе кинематического расчёта, когда уже была сформирована модель с соединениями.

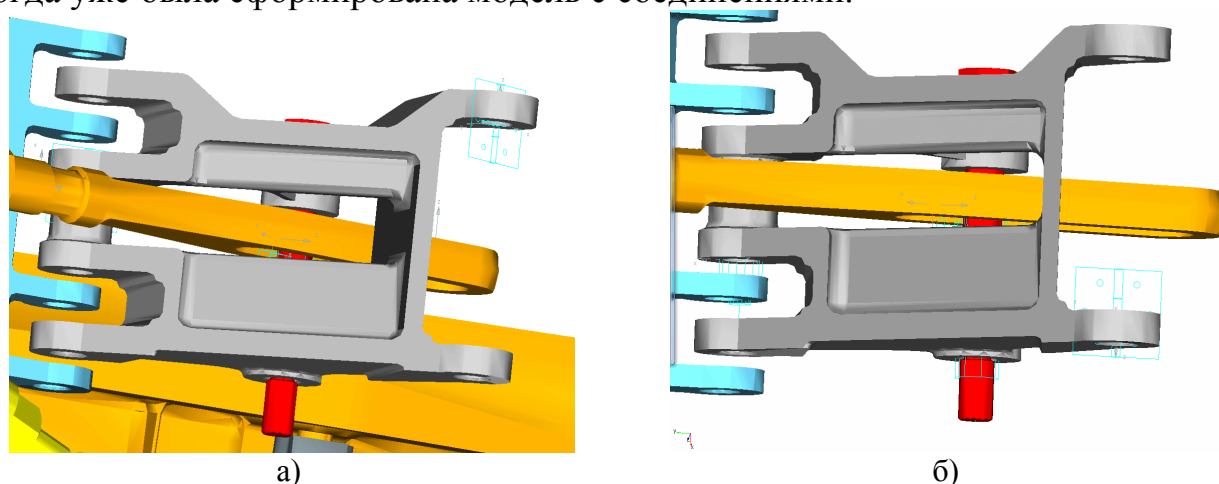


Рис. 15. Расстояние между осью и концом тяги: а) со смещением; б) без смещения

Подбор длины тяги осуществляется поворотом резьбовой части. Поскольку в модели все части тяги объединены в единое целое (резьба не моделировалась), необходимо было сместить геометрию детали "st...SOLID..." на 3,5 мм от конца детали. При включении гидроприводов винт должен находиться в крайних положениях.

Движение осуществлялось относительно специально созданного маркера в центре окружности на проточке детали (рис. 14). Ось X задавалась по ребру проточки, ось Y перпендикулярно проточке. Координата по Y (глобальная) центра масс болта должна быть равной 0.2986397891 м.

На рис. 15 хорошо видно изменение расстояния между осью и краем проточки тяги "st".

ЗАНЯТИЕ 4. ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЁТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возможно два варианта проведения расчёта: сравнение с проведённым экспериментом по времени открытия/закрытия створок сопла и по величине давления в управляющих гидроцилиндрах. Первый вариант проще реализуем и потому далее взят за основу виртуального эксперимента в среде MSC.ADAMS.

Полученное в результате эксперимента давление P_B пересчитывается в вектор газовой силы F_T по формуле

$$F_T = k \cdot P_B \cdot A_{\Pi},$$

где A_{Π} [м²] - площадь поршня гидропривода, а k - коэффициент, учитывающий отличие между физической и виртуальной моделями сопла.


$$A_{\Pi} = \pi \cdot D_{\Pi}^2 / 4,$$

где D_{Π} - диаметр поршня гидропривода, который можно измерить по 3D-модели.

Приблизительно значение k можно определить из выражения

$$k = \frac{m_M \cdot n}{n_M \cdot m},$$

где m_M - число створок и проставок в модели; n_M - число гидроприводов в модели; $m = 72$ и $n = 18$ - полное число створок и проставок и гидроприводов объекта исследования. Для модели, показанной на рис. 5-11 $m_M = 10$ и $n_M = 2$, поэтому k можно принять равным 1,25. В действительности, коэффициент k может отличаться из-за наличия силы трения в подвижных соединениях сопла и разности инерционных характеристик створок и проставок.

Сила F_T прикладывается к поршням гидроприводов в виде однокомпонентного вектора силы  вдоль их осей (см. рис. 9, 16).

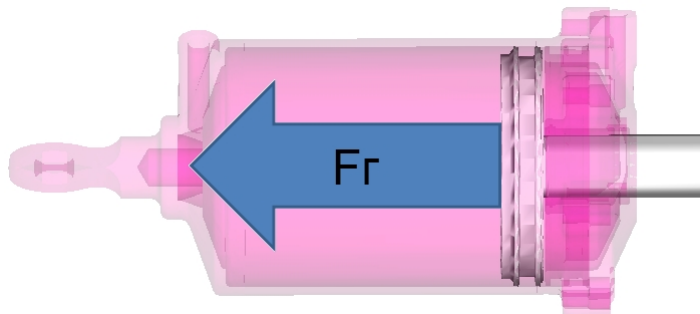


Рис. 16. Схема приложения газовой силы к гидроприводу сопла

Если необходимо обеспечить подачу давления в разные моменты времени отдельно на гидроприводы наружного и внутреннего контура, можно

воспользоваться функцией "STEP", когда до определённого момента времени значение силы F_r на выбранный гидропривод равно нулю.

Синтаксис функции "STEP" (рис. 17):

$$\text{STEP}(\text{time}, q_1, f_1, q_2, f_2)$$

где:

time - переменная, куда записывается текущее время расчёта

q_1 - начальное значение для time; f_1 - начальное значение для f;

q_2 - конечное значение для time; f_2 - конечное значение для f.

Здесь $q_1 < q_2$

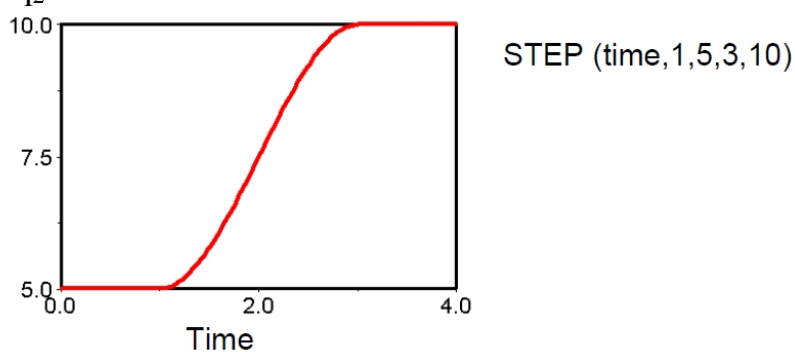


Рис.17. Пример функции "STEP"

Также функцию "STEP" следует использовать для изменения знака силы на противоположный, чтобы открытие сопла сменилось закрытием. Например,

$$F_r - \text{STEP}(\text{time}, t_0, 0, t_0+0.1, 2 * F_r).$$

Затем проводится расчёт и определяются расчётные величины времени открытия t_{op} и закрытия $t_{зп}$ сопла, которые затем сравниваются с экспериментальными путём определения величины расхождения ε , %.

$$\varepsilon = \frac{|(t_0 + t_3) - (t_{op} + t_{зп})|}{t_0 + t_3} \cdot 100\%$$

Модельное время расчёта t_p (time) в секундах берётся в 1,5...2 раза больше, чем полученные в эксперименте $(t_0 + t_3)$.


Число шагов итераций следует подбирать из соображений обеспечения нужной точности и быстродействия. Число шагов не должно быть кратно времени расчёта. Начальное число шагов итераций (steps) можно определить из выражения

$$\text{steps} = 1 + 100 \cdot t_p.$$

При расчёте следует использовать решатель (Integrator) "WSTIFF" с формализацией (Formulation) "I3", Corrector - Modified и допустимой величиной сходимости по перемещениям 10^{-3} м. Параметры решателя настраиваются в MSC.ADAMS специально для решения динамических задач (Главное меню - Settings - Solver - Dynamics...).

Для того, чтобы скрыть отображение анимации работы механизмов сопла в ходе расчёта, что способно на порядок его ускорить, можно в меню Settings - Solver - Display... в поле "Update Graphics" поставить значение "Never". Чтобы снова отобразить анимацию работы при расчёте, верните указанное значение на "At Output Step".

Для определения сил или времени открытия/закрытия створок сопла используется модуль MSC.ADAMS/PostProcessor (запускается нажатием клавиши F8 в рабочем окружении модуля MSC.ADAMS/View или значком на главной панели инструментов "Main Toolbox").

Делается это следующим образом. Сначала пиктограммой  создаётся отдельная страница для текущего набора данных (в данном случае, графика). Под «страницей» в MSC.ADAMS/PostProcessor подразумевается набор анимаций, графиков и настроек, которые выводятся на экран за один раз. Новую страницу (Page_...) можно переименовать латинскими символами в древе результатов (по умолчанию, слева). Затем на панели выбора результатов (по умолчанию, внизу) в поле "Source" выбирается "Objects" (Объекты), в поле "Filter" (Фильтр) - "Constraint" для работы только со связями (при этом, тела и силы не показываются в результатах). В поле "Object" выбирается требуемый шарнир, в разделе "Characteristic" (Выводимый параметр) выбирается "Element_Force" (Усилие в элементе) и в поле "Component" выбирается ось, по проекции вектора усилий на которую строится график. По умолчанию все графики строятся в зависимости от времени расчёта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы была изучена конструкция и работа механизма реактивного сверхзвукового сопла. Произведён его кинематический расчёт, получены и сравнены с экспериментом время открытия/закрытия сопла, величина давления в управляющих гидроприводах.

В процессе расчёта рассмотрено движение и определены кинематические параметры всех деталей. Проверены кинематические зазоры в конструкции.

Получены навыки создания кинематических групп на базе 3D-геометрии, приложения связей и ограничений, составления кинематической и динамической схем конструкции сопла, приложения нагрузок, проведение расчёта движения модели и анализа результатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мелентьев В.С., Гвоздев А.С. ADAMS/View, ADAMS/PostProcessor: краткий справочник пользователя : учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосмического ун-та, 2006. 106 с.: ил.
2. Мелентьев В.С., Гвоздев А.С., Лёжин Д.С. Лабораторный практикум по использованию пакета ADAMS : метод. указания. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 44 с.: ил.
3. Гвоздев А.С., Мелентьев В.С. Изучение конструкции двигателей с использованием 3D-моделей их элементов : метод. указания. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 23 с.
4. Гвоздев А.С., Мелентьев В.С. Изучение конструкции авиационных ДВС с совместным использованием пакетов ANSYS, ADAMS, SolidEdge : метод. указания. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 53 с.: ил.
5. Иванов А.А. MSC.ADAMS: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования : учеб. пособие. Москва: Московское представительство MSC.Software GmbH, 2003.
6. Filippone A. (2006) Flight Performance of Fixed and Rotary Wing Aircraft. *ELSEVIER*, Great Britain, 2006, pp. 565.
7. Гвоздев А.С., Мелентьев В.С. Комплексное изучение конструкции двигателей в среде инженерных пакетов [Электронный ресурс] // *LAP LAMBERT Academic Publishing*, Saarbrucken, Germany, 2014. – (URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/fr/book/978-3-659-55385-1/Комплексное-изучение-конструкции>) дата обращения 27.02.17 .
8. Gvozdev A and Melentjev V (2014) The kinematics of aircraft's regulated output devices by use software MSC.ADAMS. *Proceedings of the 2nd International Academic Congress "Fundamental and Applied Studies in America, Europe, Asia and Africa"* (USA, New York, 27 September 2014), Vol. II. - New York: Columbia Press.
9. Гвоздев А.С., Мелентьев В.С., Лёжин Д.С. Изучение конструкции авиационных двигателей и энергетических установок с использованием 3D-моделей их элементов : электрон. учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

10. *Мелентьев В.С., Гвоздев А.С., Лёжин Д.С.* Лабораторный практикум по использованию MSC.ADAMS : электрон. метод. указания. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
11. *Гвоздев А.С., Мелентьев В.С.* Изучение конструкции авиационных двигателей и энергетических установок с совместным использованием пакетов ANSYS, ADAMS и SolidWorks : электрон. учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
12. *Мелентьев В.С., Гвоздев А.С.* Научный подход к созданию динамической модели двигателя // Динамика и виброакустика машин : сб. трудов международной научно-технической конференции с участием молодых ученых. Самара : Изд-во СГАУ, 2012.
13. *Мелентьев В.С., Гвоздев А.С.* Проектирование компонентов авиационных двигателей и энергетических установок на базе виртуального прототипирования // Проблемы и перспективы развития авиации и авиастроения России : сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции. Уфа : Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2013.
14. *Михайловский А.К., Мелентьев В.С., Гвоздев А.С.* Разработка и анализ «Виртуального сопла» турбореактивного двухконтурного форсажного двигателя // Вестник Совета молодых учёных и специалистов СГАУ. 2013. №2(1).
15. *Гвоздев А.С., Мелентьев В.С.* Виртуальное прототипирование выходных устройств форсированных турбореактивных двухконтурных двигателей с выходом на прочностной анализ // Климовские чтения : перспективные направления развития авиадвигателестроения : сб. докладов международной научно-технической конференции. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.
16. *Мелентьев В.С., Гвоздев А.С., Паровай Ф.В.* Проектирование конструкции «виртуального двигателя» : электрон. учеб. пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2011. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Динамическая схема 3D-модели сопла

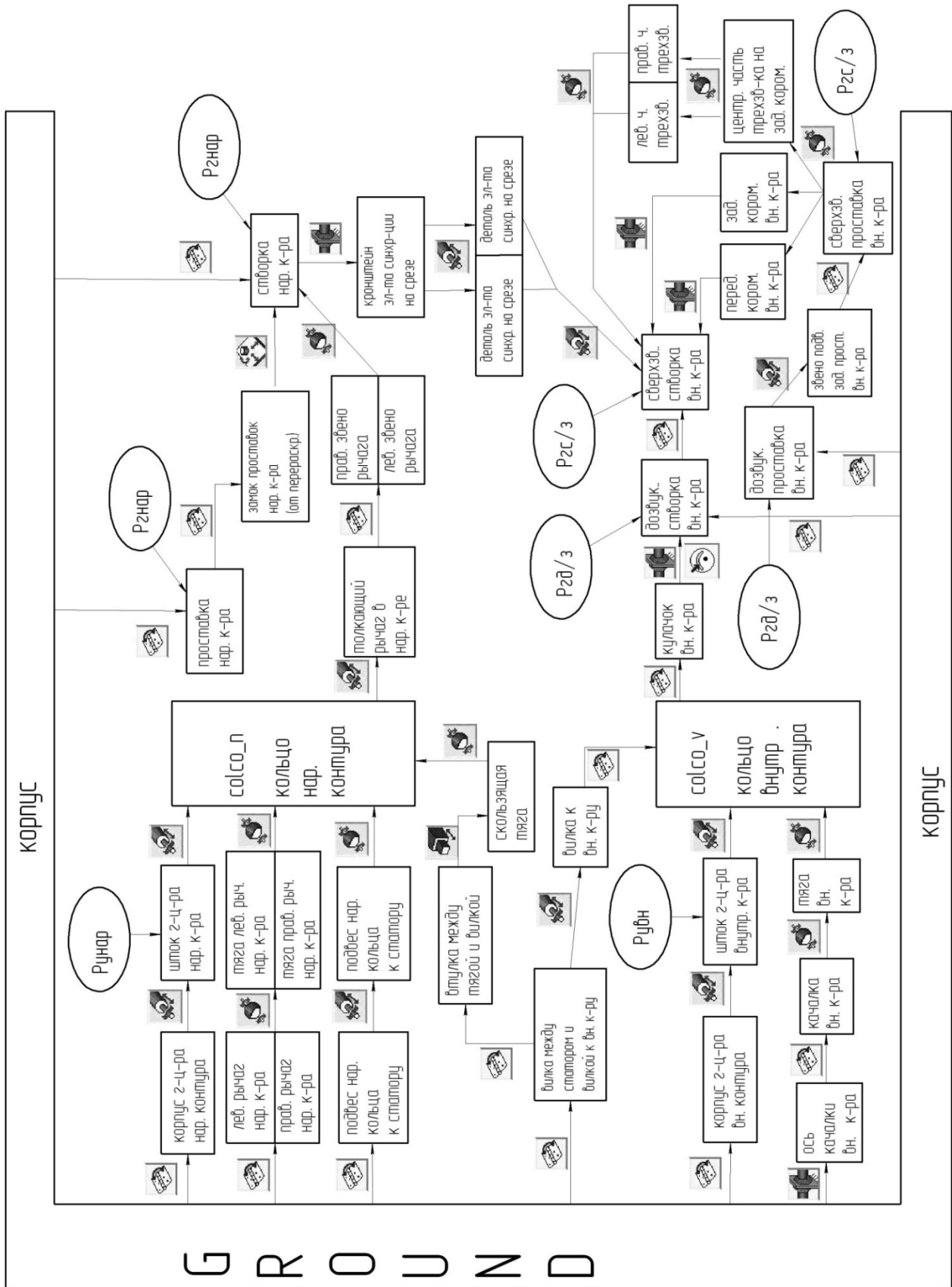


Рис. А.1. Динамическая схема 3D-модели сопла, исходный вариант

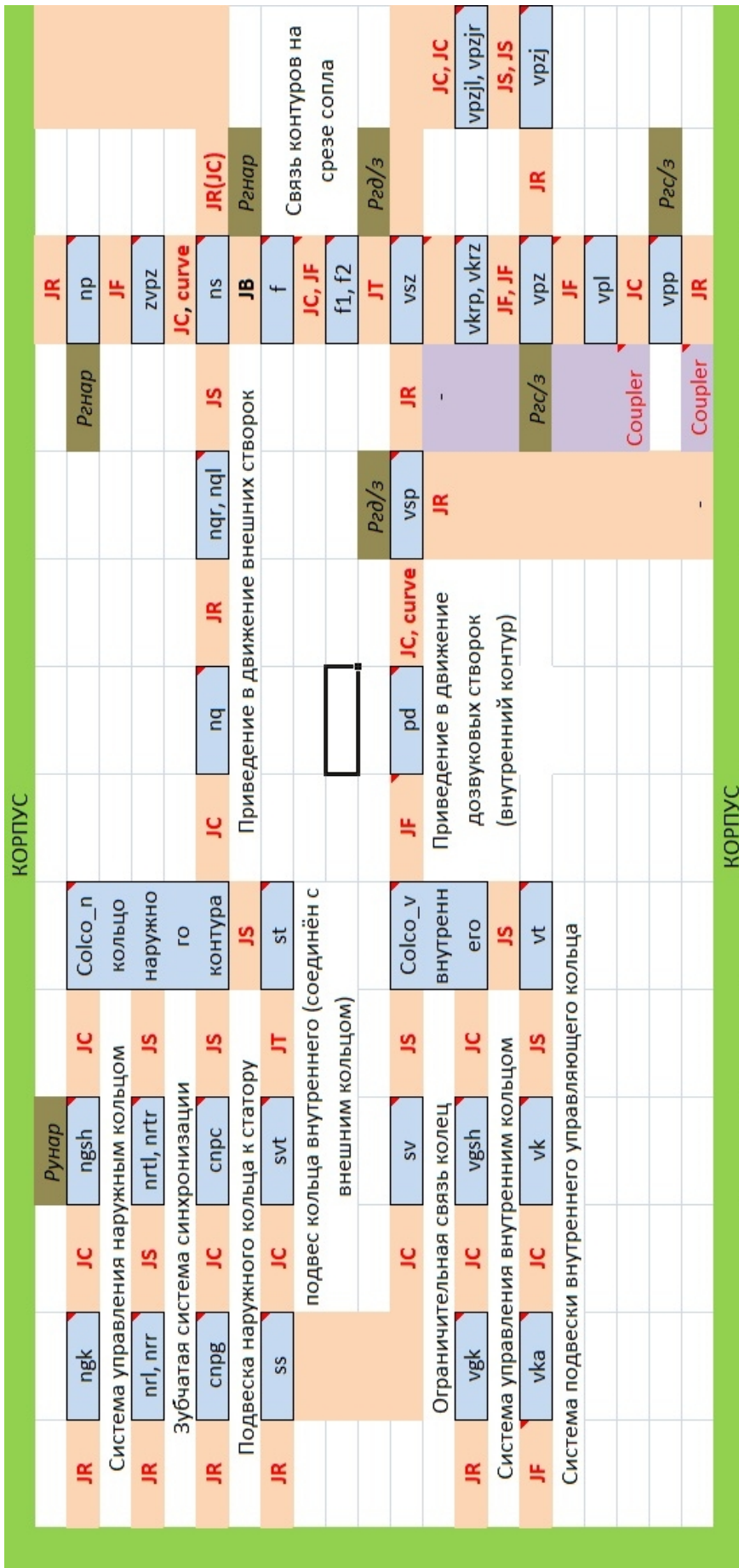


Рис. А.2. Динамическая схема одного из секторов реактивного сопла