

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

С.В.Фалалеев, Н.И.Старцев

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ
НАПРАВЛЯЮЩИХ АППАРАТОВ АВИАЦИОННОГО
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С СОВМЕСТНЫМ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТОВ ANSYS, ADAMS, SOLID
EDGE**

Мет одические указания

Самара, 2006

Составители: *Фалалеев С.В., Старцев Н.И.*

УДК 621.452.221.3.01(075.8)



Инновационная образовательная программа "Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий"

Проектирование регулируемых направляющих аппаратов авиационного газотурбинного двигателя с совместным использованием пакетов Ansys, Adams, Solid Edge: метод. указания / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. *С.В.Фалалеев, Н.И.Старцев*. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. - 33 с.; 29 ил.

В методических указаниях рассмотрены вопросы проектирования одного из кинематических узлов авиационных двигателей (АД) и энергетических установок (ЭУ) – регулируемых направляющих аппаратов (РНА). Дано описание наиболее распространенных систем РНА, конструкции их основных элементов, а также основы расчета и проектирования.

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.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева

Рецензент: *д.т.н., проф. В.Б.Балякин*

Оглавление

Условные обозначения

Предисловие

Введение

1. Обеспечение устойчивости компрессора и роль РНА

2. Конструктивное исполнение РНА

3. Системы управления РНА

4. Проектирование РНА

4.1. Этапы процесса проектирования РНА

4.2. Этап газодинамического проектирования РНА

4.3. Выбор кинематической схемы и системы управления РНА

4.4. Предварительная компоновка РНА

4.5. Методика проектировочного расчета РНА

5. 3D-моделирование системы РНА

6. Компоновка РНА и системы управления в пакете ADAMS, имитация работы РНА

7. Прочностные аспекты проектирования РНА

8. Методические указания по проведению лабораторной работы

Заключение

Библиографический список

Условные обозначения

АД – авиационный двигатель

ЭУ – энергетическая установка

ТВаД – турбовальный двигатель

ТРДД – турбореактивный двигатель двухконтурный

НА – направляющий аппарат

РНА – регулируемый направляющий аппарат

Предисловие

Создание современного авиационного двигателя (АД) - сложный процесс, включающий деятельность многих специалистов различных областей знаний. Высокие показатели качества АД закладываются в процессе его проектирования и доводки на основе тесного сотрудничества конструкторов, технологов, металлургов, испытателей, владеющих современными информационными технологиями. Конструктор должен целенаправленно использовать свои знания и 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 проектированию РНА предназначены для использования при преподавании учебной дисциплины «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, формирующей всестороннюю подготовку конструкторов по авиационным двигателям и энергетическим установкам, 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 лабораторных работ овладеть приемами проектирования кинематических узлов авиационных газотурбинных двигателей и энергоустановок на базе использования современных компьютерных технологий. Комплексное использование пакетов объемного моделирования, кинематического и прочностного анализа позволит существенно улучшить понимание физики явлений и подготовиться к проектированию двигателя с использованием IT-технологий. Авторам не известны подобные методические разработки в ведущих университетах России и зарубежных стран.

Методическое обеспечение разработано для пользователей, владеющих пакетами объемного моделирования, кинематического и прочностного анализа (типа ANSYS, ADAMS, Solid Edge). Выполнение лабораторной работы с использованием методических указаний позволит перейти на качественно другой уровень, а именно, дополнительно к анализу конструктивного исполнения РНА вскрывать технические проблемы и искать пути их решения. Это, безусловно, повысит качество усвоения материала и позволит по иному построить самостоятельную работу студентов и методику проведения лабораторных работ.

Такие лабораторные работы формируют навык конструирования сложных узлов АД и ЭУ и определяют глубокое изучение предмета. Результат обучения - высокая профессиональная выучка, широкий спектр знаний и минимальное время адаптации в рабочем коллективе.

Авторы выражают искреннюю благодарность ведущим специалистам ОАО «СНТК им.Н.Д.Кузнецова» Г.Н.Чурсанову, М.Г. Михееву, В.Ф.Пасконину за помощь, оказанную при подготовке разделов 4.2 и 5. В подготовке материалов и написании разделов 5, 6 и 7 участвовали студенты Бусырев В.А., Сенатенко Д.С., Чирков А.В.

Введение

Методические указания «Проектирование регулируемых направляющих аппаратов авиационного газотурбинного двигателя с совместным использованием пакетов Ansys, Adams, Solid Edge», являющиеся одним из модулей методического обеспечения по конструкции и проектированию авиационных двигателей (АД) и энергетических установок (ЭУ), входят компонентой в прогрессивную систему формирования инженера-конструктора, реализованную в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П.Королева. Идея этой системы состоит в том, что выпускник должен уметь проектировать авиационные газотурбинные двигатели и их элементы, а также создавать оригинальные проекты других сложных изделий, уметь находить новые инженерные решения и в совершенстве владеть современными компьютерными технологиями проектирования.

Проектирование и конструирование кинематических узлов авиационных двигателей, таких как РНА, требуют обширных знаний. Кинематические узлы авиационного двигателя имеют ряд характерных особенностей:

- 1) Элементы узлов находятся в газодинамическом тракте, и, соответственно, испытывают в процессе работы нагрузки от газовых сил. Так как авиационный двигатель – машина многорежимная, все элементы кинематического узла (тяги, подшипники шарниров и т.д.) в процессе работы нагружены переменными по величине и направлению силами.
- 2) Условия работы кинематических узлов могут меняться во время полета. Кинематический узел должен работать надежно и без заклинивания при любых условиях полета.
- 3) Управление кинематическими узлами может быть различным. Чаще всего для управления используется гидравлическая система, управляющим элементом в которой является гидроцилиндр.
- 4) Техническими условиями на кинематический узел четко регламентируются временные параметры работы.

В процессе проектирования и конструирования кинематических узлов необходимо добиться работоспособности кинематической схемы, рассчитать на прочность элементы кинематического узла при действии реальных газовых сил, провести расчет изнашивания подшипников шарниров, рассчитать потребное давление и геометрические параметры гидропривода, обеспечить для спроектированного кинематического узла выполнение заданных временных параметров, смоделировать возможные нештатные ситуации и нерасчетные режимы работы кинематического узла. Решение указанных задач усложняется в связи с комплексным нагружением кинематического узла, а также сложными условиями работы.

Возможность охватить весь спектр указанных задач, решаемых при проектировании кинематических узлов, дает совместное использование пакетов ANSYS и ADAMS. Характерной особенностью такого решения является то, что производится непосредственно моделирование работы узла, результат расчета – любые кинематические и динамические характеристики в любой точке (или шарнире) кинематического узла. Кроме того, при подобном подходе имеется возможность комплексного подхода к проектированию – кинематический узел проектируется совместно с гидравлической системой управления, последующее моделирование работы узла происходит наиболее естественным способом – через управляющее давление в гидроцилиндре и с учетом всех нагрузок на элементы кинематического узла. С помощью объемных моделей можно имитировать срабатывание механизма с получением необходимых временных зависимостей.

Совместное использование систем твердотельного моделирования, систем расчета кинематики и динамики объемных механизмов и систем расчета на прочность позволяет создать полноценный “виртуальный стенд” для испытания системы РНА авиационного двигателя.

1. Обеспечение устойчивости компрессора и роль РНА

В двигателях устанавливаются элементы, повышающие эксплуатационные характеристики компрессора на нерасчетных режимах. Под этим понимается обеспечение запасов газодинамической устойчивости по режимам работы двигателя, исключение образования льда на входном устройстве, ребрах передней опоры компрессора и лопатках ВНА с помощью противообледенительной системы, достижение заданного температурного режима отдельных узлов и деталей двигателя путем охлаждения воздухом, отбираемым из отдельных ступеней компрессора.

Авиационный двигатель - машина многорежимная, и для поддержания в этих условиях устойчивой (бессрывной) работы компрессора, настроенного на один расчетный режим, необходимы специальные конструктивные меры: устройство для перепуска воздуха, регулируемые НА, устройство для предотвращения вращающегося срыва, элементы “отсечки” присоединенных объемов и др.

Очень часто РНА работают совместно с устройствами для перепуска воздуха. Эти отборы также влияют на положение рабочих точек на характеристике компрессора. На лопатках первой группы ступеней срыв потока происходит со спинки профиля, а на последней группе ступеней с корытца, в итоге падает напорность ступени, $\pi_{ст}$ и КПД. Нестационарные срывные явления приводят к возникновению нерасчетных колебаний лопаток, снижают их вибрационную прочность. Перепуск воздуха из средних ступеней увеличивает расход воздуха через первую группу ступеней, которые, таким образом, выходят из зоны неустойчивой работы за счет уменьшения угла атаки, увеличиваются π_k и КПД.

РНА устанавливаются на одну или несколько первых ступеней (рис. 1) и в ряде случаев одновременно и на нескольких последних ступенях (рис.2).

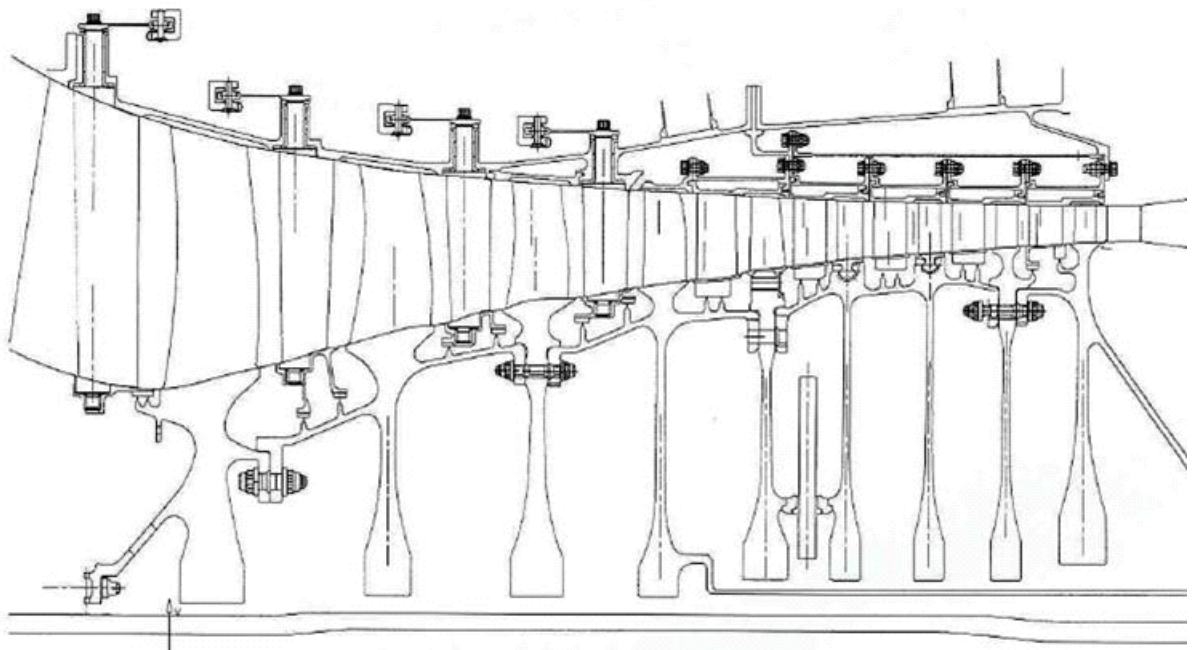


Рис. 1. Компрессор высокого давления фирмы MTU с РНА на первой группе ступеней

Изменяя угол установки лопаток впереди стоящего НА, возможно управлять углами атаки на лопатках рабочего колеса и, таким образом, влиять на запас газодинамической устойчивости и расход воздуха. На рис. 3 показано положение лопаток РНА первой группы

ступеней в расчетном (открытом) и пусковом (прикрытом) положении, и треугольники скоростей, соответствующие трем положениям РНА: расчетному, нерасчетному, и приведенному к расчетному по углу атаки на первых ступенях (уменьшение i). На последней группе ступеней кинематика РНА с целью повышения к.п.д. обеспечивает на нерасчетных режимах раскрытие, то есть увеличение проходного сечения межлопаточных каналов и увеличение угла атаки i до расчетного.

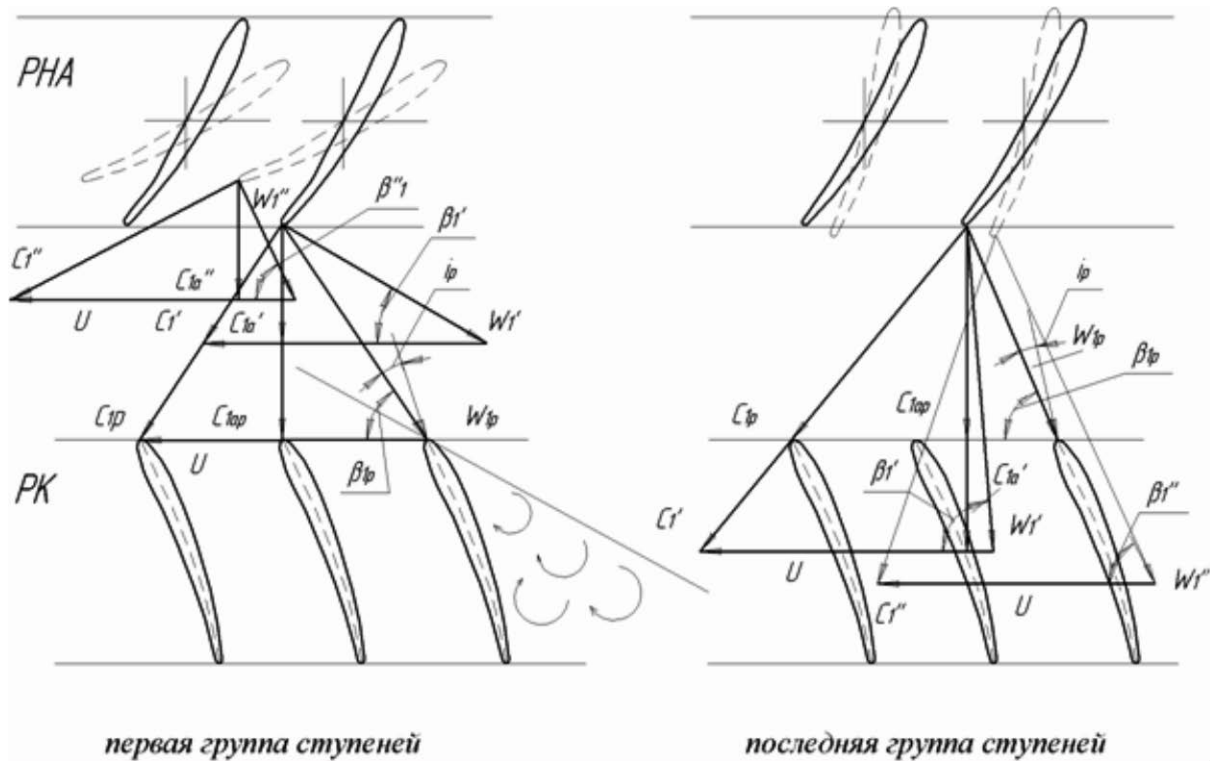


Рис. 3. Восстановление угла атаки поворотом лопаток РНА на первой и последней группе ступеней на нерасчетном режиме

C_{1p} , C_{1ap} , W_{1p} - расчетные скорости на входе в рабочее колесо;

C_1 , C_{1a} , W_1 - скорости на входе в рабочее колесо при снижении пропускной способности турбины;

C_1'' , C_{1a}'' , W_1'' - скорости на входе в рабочее колесо при повороте лопаток РНА.

Управление РНА может быть ступенчатым («открыто-закрыто») или бесступенчатым, когда каждому режиму работы двигателя соответствует свое оптимальное положение поворотных лопаток.

При газодинамическом проектировании рассматривается физическая картина рассогласования работы отдельных групп ступеней осевого компрессора и определяются необходимые углы поворота лопаток РНА.

Конструктор должен решить проблему идентичности положения лопаток после поворота на нужный угол, исключения задержки (заедания) при движении механизма поворота и обеспечении ресурса системы управления, которая под действием общей вибрации подвергается сильному изнашиванию.

2. Конструктивное исполнение РНА

Исходя из анализа функций РНА, сформулируем требования к его конструкции:

- точность поворота лопаток,
- идентичность положения всех лопаток после поворота,
- исключение задержки (заедания) в кинематических связях при повороте приводного кольца,
- обеспечение надежности (ресурса), включая систему управления, с учетом последовательного соединения большого числа деталей.

Эволюция конструкции регулируемых НА позволяет выделить ряд этапов: от управления одной ступенью до управления 7...10 ступенями и от механизма управления, расположенного на внутреннем кольце, до общепринятого теперь управления приводным кольцом, размещенным снаружи. И здесь рубежом является серийный ТРДДФ J-79 фирмы Дженерал Электрик, конструкции РНА (7 ступеней из 17) которого оказалась удачной настолько, что в разных вариациях использована на многих двигателях разных фирм (рис. 4).

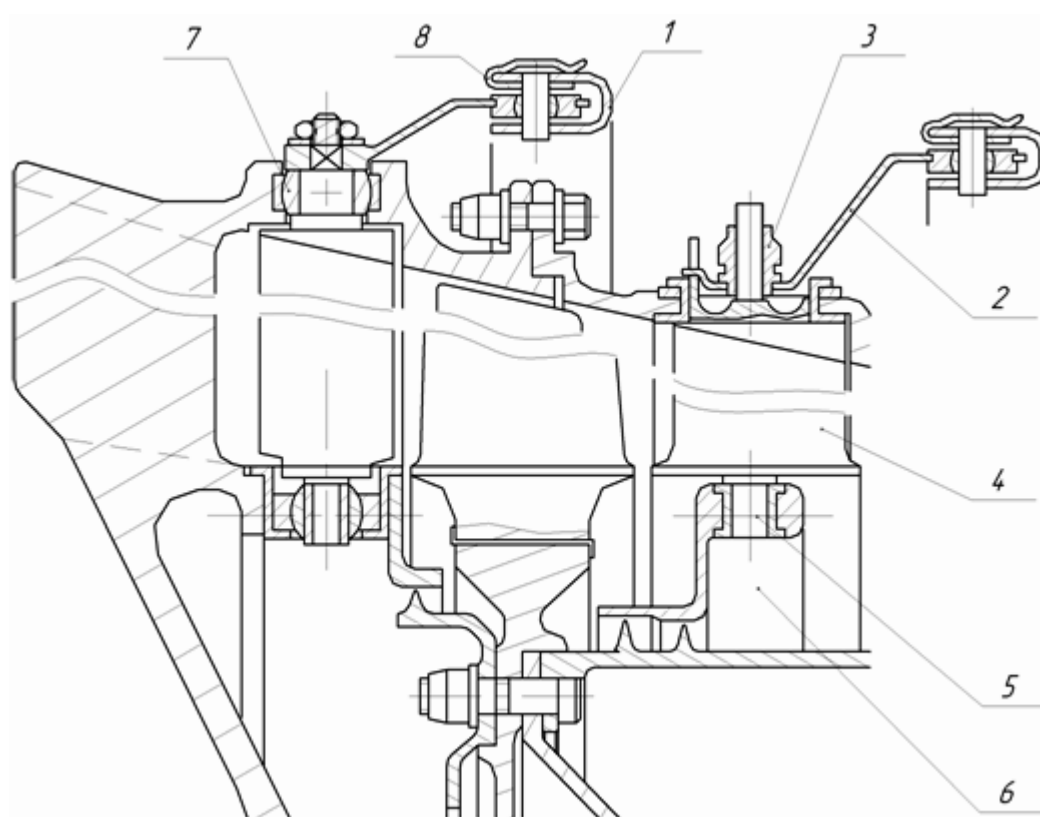


Рис. 4. Конструкция РНА ТРД J-79 фирмы Дженерал-Электрик:

1 – управляющее кольцо; 2 – рычаг (поводок); 3 – подшипник скольжения (периферийная опора); 4 – лопатка; 5 – подшипник скольжения (нижняя опора); 6, 7 – сферические опоры; 8 – фиксатор оси рычага

РНА могут быть двухопорными и консольными. Конструкция консольных внешне проще, но выбор осложняется требованиями жесткости и прочности, работоспособностью подшипника. Ограничения в использовании консольных РНА те же, что и для НА.

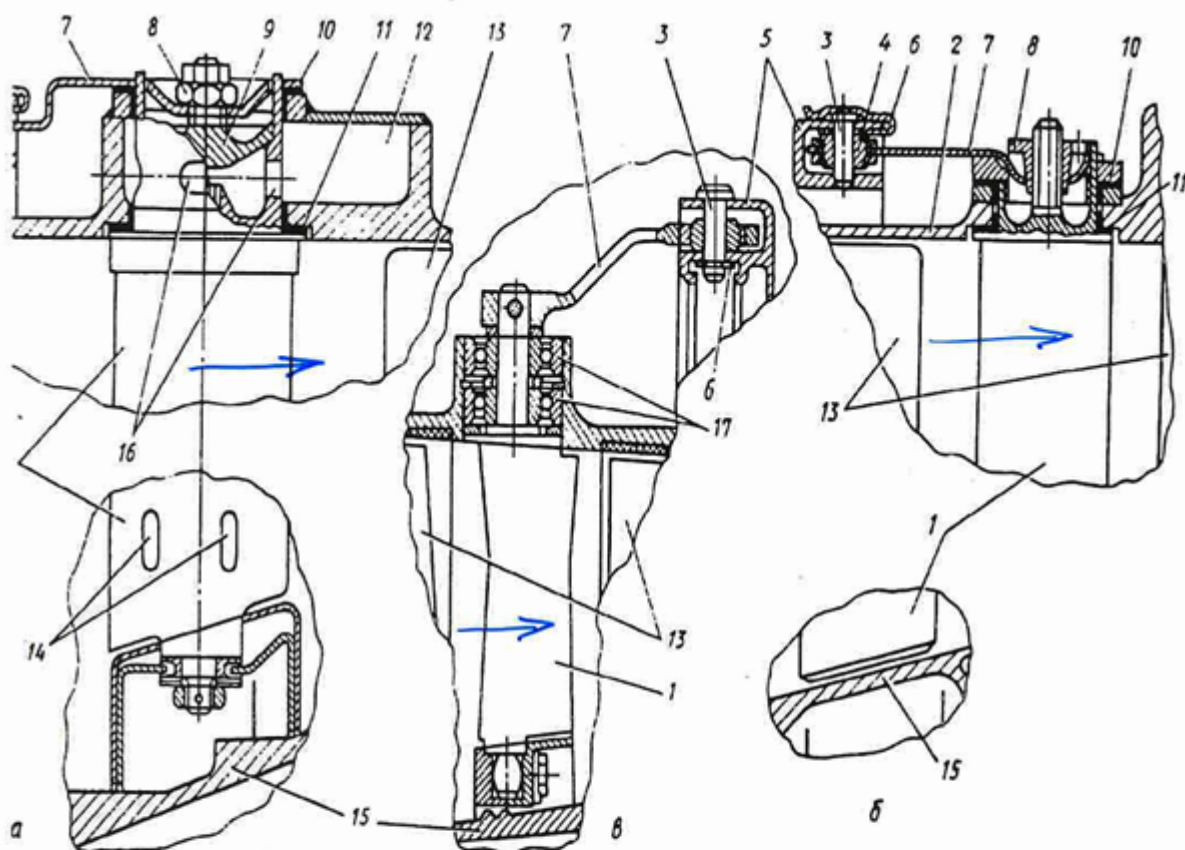
При формировании конструкции пера одна из задач правильно выбрать конструкцию элементов оси: размещение «пяточка» и его размеры позволяют увеличить площадь сопряжения пера с осью, а ось должна быть расположена таким образом, чтобы равнодействующая газовых сил создавала крутящий момент, направленный на раскрытие НА, что позволяет выдержать точность угла установки профиля и исключить срывные явления.

Оси или цапфы лопаток опираются на подшипники, которые выполняются обычно

как подшипники скольжения (подшипники качения использованы только в компрессоре ТВад ТВ2-117, рис.5).

Подбор материалов в паре «цапфа-подшипник» одна из сложных задач: необходимо исключить «прихватывание», снизить коэффициент трения, износы подшипников и цапф и обеспечить демпфирование колебаний лопаток. Часто опорные втулки делают из фторопласта. Наилучшие результаты показала разработка сотрудников кафедры КиПДЛА СГАУ с использованием материала МР (изготавливается из проволоочной спирали) с наполнителями типа графита и дисульфита молибдена. Путем хаотической укладки спирали формируется заготовка, в которую вводится наполнитель. Затем она помещается в пресс-форму и прессуется вхолдную до размеров готовой детали. Дальнейшей механической обработке деталь не подвергается. Диаметр проволоки 0.05...0.3 мм, диаметр спирали 0.2...3.0 мм, материал Х18Н10Т, Х12Н20ТЗР.

Длина наружной цапфы выбирается из учета исключения заедания при повороте из-за деформаций РНА от действия сил, приходящих от системы управления и от газовых сил, когда внутреннее кольцо смещается относительно наружного, т.е. конструкция изгибается. Для этого же случая часто цапфу во внутреннем кольце выполняют бочкообразной или устанавливают сферический подшипник.



Узлы поворотных направляющих лопаток:

- а — двухопорной с подшипниками скольжения; б — консольной с подшипниками скольжения; в — двухопорной на подшипниках качения; 1 — направляющая поворотная лопатка; 2 — корпус направляющих аппаратов компрессора; 3 — штифт; 4 — сферический подшипник, завальцованный в рычаг; 5 — тяговое кольцо (из двух половинок), поворачивающее рычаги; 6 — замок стопорения штифта; 7 — рычаг, поворачивающий лопатку; 8 — самоконтрящаяся гайка; 9 — доньшко цапфы лопатки; 10 — верхняя втулка подшипника скольжения из полимерного материала; 11 — нижняя втулка подшипника скольжения из полимерного материала; 12 — полость подвода теплого воздуха для обогрева лопаток во избежание обледенения; 13 — рабочие лопатки; 14 — выходные отверстия для отвода обогревающего воздуха в проточную часть; 15 — ротор; 16 — отверстия в цапфе лопатки для подвода внутрь ее теплого воздуха; 17 — шарикоподшипники.

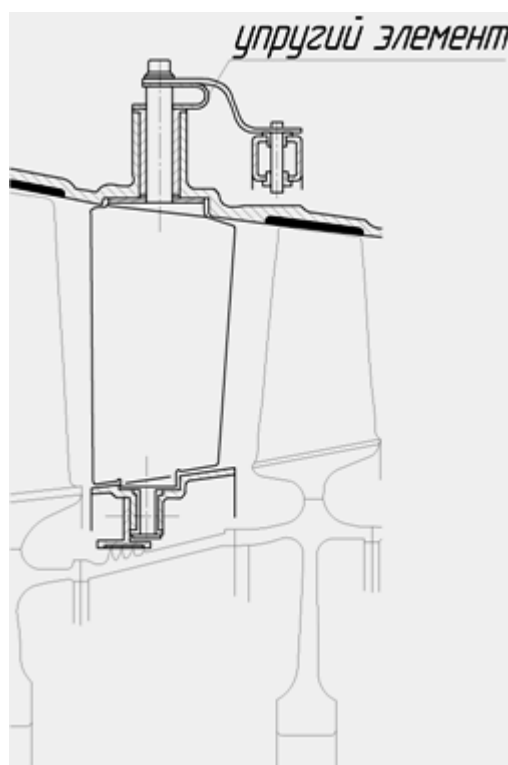
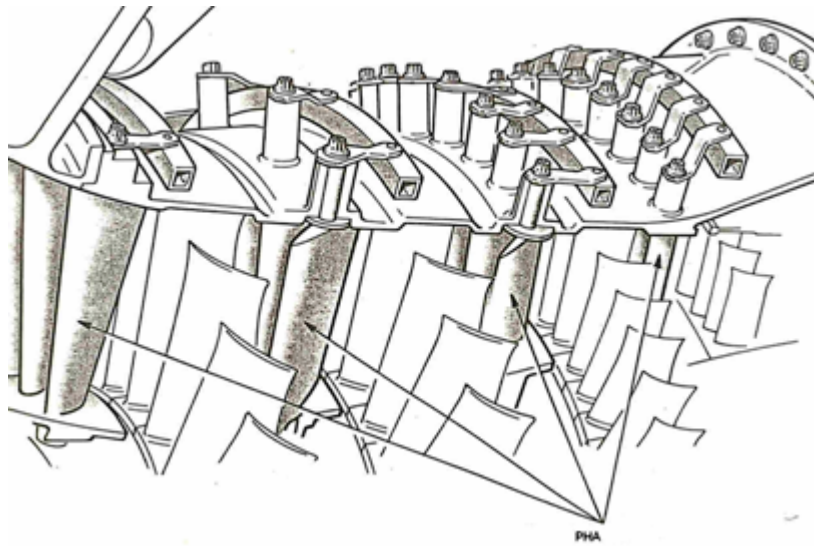


Рис. 5. Конструктивное исполнение РНА

Сборка двухпорных РНА может быть выполнена, если одно или оба кольца разъемные, положение половин должно быть зафиксировано штифтами или центрирующими элементами.

При установке лопатки в наружное кольцо важно исключить люфт лопатки в радиальном направлении, чтобы выдержать зазор по втулочному сечению. С этой целью в ряде конструкций РНА (V2500, RB432) вводится упругий элемент (рис. 5).

Связь рычагов с управляющим кольцом определяется способом центрирования кольца относительно оси двигателя. Закрепление кольца может быть непосредственно на рычагах без связи с корпусом компрессора, с ориентированием по центрирующему пояску на корпусе компрессора (кольцо с роликами или без них) и с центрированием по пояску корпуса осями рычагов. При центрировании по пояску на корпусе есть опасность защемления кольца из-за выбора зазора между корпусом и кольцом от теплового расширения корпуса. Поэтому есть примеры размещения РНА внутри полости (НК-93), образованной в корпусе с двойной стенкой: температура кольца и корпуса в этом случае разнится мало, но осложняется управление кольцом через стенку.

Рычаг связывается с кольцом через ось. Для исключения защемления рычага в кольце во многих конструкциях используется шаровой шарнир (сферический подшипник), гарантирующий свободу во взаимном положении рычага и кольца.

Элементы поворота: кольцо, ось и рычаг находятся под воздействием общей вибрации двигателя и подвергаются при этом сильному изнашиванию из-за взаимных перемещений с высокой частотой. При этом рычаги являются усилителями колебаний кольца, т.к. оно возбуждается кинематически.

Проблема состоит в том, что для устранения заедания в сочленениях оси и рычага делают зазоры, а при наложении вибрации в этом случае резко возрастает изнашивание по контактным поверхностям. Изнашивание оси рычага бывает настолько велико, что требует замены при обслуживании. Такие же явления имеют место и в сочленениях элементов системы управления. Задача конструктора устранить эти дефекты.

Колебания лопаток РНА возбуждаются газовыми силами, и поэтому одна из задач – обеспечение отстройки от резонансов и демпфирование колебаний лопаток. Отстройка производится общими приемами, а демпфирование подбором материала подшипников или введением специальных демпфирующих устройств.

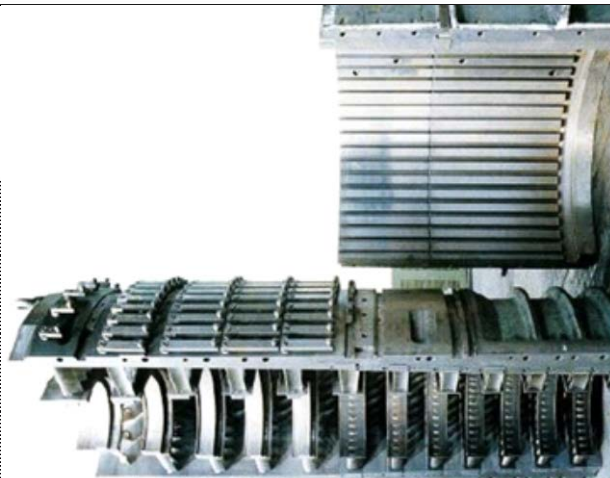
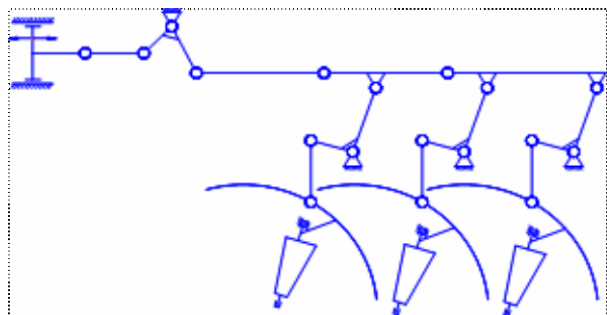
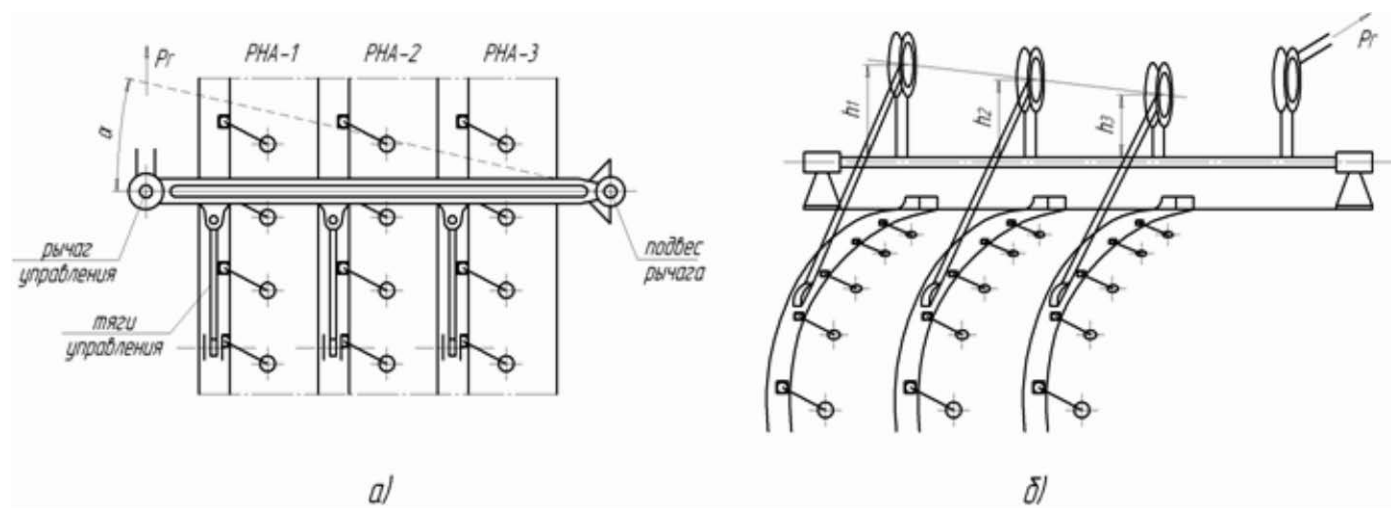
Значимость критерия надежности можно показать, если рассматривать РНА с позиций теории надежности. Структурная схема РНА – это схема с последовательными соединениями множества элементов, когда отказ одного из них приводит к отказу всей системы. Действительно, если принять число лопаток РНА в среднем 100, число деталей для каждой лопатки 7, а число ступеней РНА-5, то общее число деталей достигает 3500! Вероятность отказа в этом случае велика.

3. Системы управления РНА

Управление РНА единичной ступени обычно осуществляется одним агрегатом с гидравлическим или электрическим приводом с непосредственной связью с приводящим кольцом.

При большем числе РНА используется несколько схем управления: привод рычагом с управлением углом поворота и расстоянием от точки опоры (ТРДД CFM56), разновысокие рычаги на общей оси с получением нужного угла поворота за счет высоты рычага (ТРДД ПС-90А), рычажная система с приводом от одного гидроцилиндра (ТВаД ТВ2-117). Часто используется схема с уголковым рычагом, что позволяет сделать конструкцию более компактной в малом объеме (АЛ-31Ф). Первые две схемы, а также схема с использованием уголкового рычагов представлены на рис. 6. На рис. 6,г изображено конструктивное исполнение системы управления РНА одного из малоразмерных двигателей фирмы Роллс-Ройс с поворотным корпусом. Корпус, очевидно, изготовлен из легкого сплава или из композиционного материала. Требуемые углы поворота лопаток различных ступеней обеспечиваются длинами поворотных рычагов.

Если силу от исполнительного механизма прикладывать к приводному кольцу в одной точке окружности, то неизбежно смещение кольца относительно оси двигателя и его деформация, что может вызвать нарушение связи рычагов с кольцом. Поэтому при диаметре кольца 700 мм и более делается двойной привод.



в)

г)

Рис. 6. Схемы управления РНА:

- а) - управление рычагом, перемещаемым гидроцилиндром (сила P_r) на угол α ,
б) - управление валиком с разновысокими плечами, в) - управление с использованием уголкового рычагов, г) - управление с использованием поворотного корпуса

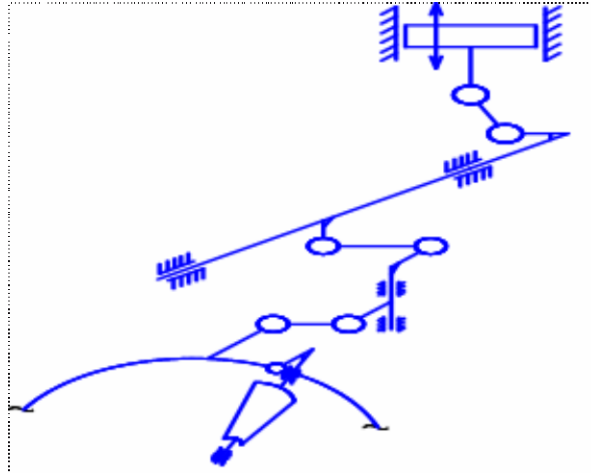


Рис. 7. Кинематическая схема системы РНА 2 ступени КСД двигателя НК-38СТ

В КСД двигателя НК-38СТ система РНА размещена внутри полости, образованной в корпусе с двойной стенкой (рис. 7). Температура кольца и корпуса в этом случае практически одинаковы, но осложняется управление кольцом через стенку.

4. Проектирование РНА

4.1. Этапы процесса проектирования системы РНА

Процесс проектирования РНА можно представить так:

1. Анализируются условия работы РНА и требования к нему на основании ТЗ.
2. Газодинамическим расчетом формируются исходные данные: профили лопаток, треугольники скоростей для характерных режимов, диапазон регулирования по углу, закон регулирования.
3. Проводится предварительное проектирование.
 - 3.1. Выбирается место установки оси на профиле, диаметр и длина цапф и «пяточков». Проверяется отсутствие задевания пера за наружную поверхность тракта при повороте лопатки.
 - 3.2. Определяются газовые силы, составляется расчетная схема и производится оценка напряжений и запасов прочности, проектируются размеры цапф и при необходимости перепрофилируется лопатка.
 - 3.3. Выбором конструкции опор и условий сборки, конструкции крепления рычага на оси и радиальной фиксацией лопатки завершается формирование конструкции РНА.
 - 3.4. Принимается решение о центрировании приводного кольца и конструкции сочленения рычага с кольцом. Выбирается схема и конструкция системы управления РНА. Производится оптимизация параметров кинематической схемы.
4. Производится уточнение параметров, для этого выполняется поверочный расчет.
 - 4.1. Выполняется объемная модель кинематического устройства.
 - 4.2. Определяются граничные условия и нагрузки.
 - 4.3. Определяются усилия в элементах. Рассчитываются деформации элементов.
 - 4.4. Оценивается работоспособность узла при наличии деформаций и возможности выполнения тактико-технических требований.
 - 4.5. Проводится оценка ресурса узла.
 - 4.6. Оптимизируется конструкция деталей узла.

4.2. Этап газодинамического проектирования РНА

Проводится термогазодинамический расчет компрессора, профилируются рабочие лопатки и лопатки направляющих аппаратов. При анализе полученной (например, с помощью программного комплекса «АСТРА») характеристики компрессора (рис. 8) определяются режимы, на которых необходима коррекция углов атаки на рабочих лопатках. Для этого определяется запас газодинамической устойчивости ΔK_y . За предельно допустимое значение принимается $\Delta K_{y_{min}} = 15\%$. Режимы проверяются, начиная с $n = 100\% n_{max}$ (номинальный режим) и до $n = 0\% n_{max}$ (останов) с шагом в $5\% n_{max}$. Для первого неудовлетворяющего этому условию режима (на рис. 8 - $n = 85\% n_{max}$, $\Delta K_y = 14,5\%$) определяются ступени НА, которые следует перевести в РНА.

Первоначально принимается, что регулируемым будет только входной направляющий аппарат. В дальнейшем можно будет увеличить количество РНА.

Необходимо определить угол поворота лопаток РВНА. Для выбранного режима работы задаются углами поворота РВНА ($\Delta \gamma_{РВНА}$). Для первого расчета рекомендуется взять угол $\Delta \gamma_{РВНА} = 5^\circ$, а в дальнейшем, в случае необходимости, рекомендуется увеличивать его значение до 30° с шагом 5° .

Рассчитывается РВНА (если РВНА отсутствует, то расчет начинается для 1-ой ступени). Результатом являются углы треугольника скоростей, которые необходимы для последующего расчета первой ступени компрессора, а также давление и температура p_1^* , T_1^* (в случае отсутствия РВНА задаются непосредственно). При расчете стоит отметить, что обычно РВНА выполняют конфузурным в связи с необходимостью закрутки потока и снижения Маха потока в относительном движении, что позволяет использовать более “тонкие” профили лопаток рабочего колеса первой ступени.

Рассчитывается 1-ая ступень компрессора с учетом выбранных $\Delta \gamma_{РВНА}$ (если ВНА имеется) и $\Delta \gamma_{РНАi}$, где в качестве РНА₁ выступает НА этой ступени. Рассчитывается следующая ступень, считая, что входными параметрами для нее являются выходные предыдущей; если НА какой-то ступени является регулируемым, то учитывается $\Delta \gamma_{РНАi}$ для этой ступени. Этот расчет продолжается до тех пор, пока не будет рассчитан весь компрессор.

В итоге получается точка новой характеристики компрессора. Чтобы получить всю характеристику, изменяют расход G и повторяют расчеты для выбранного угла поворота РНА (РВНА). В результате получается новая характеристика компрессора (рис. 8, линия 3). На ней проводится линия совместной работы. Определяются запасы газодинамической устойчивости. Если $\Delta K_y < 15\%$, то весь расчет надо повторить, скорректировав $\Delta \gamma_{РНАi}$ или введя РНА на последующей ступени.

После получения необходимых запасов газодинамической устойчивости на заданном режиме переходят на следующий режим, где наблюдаются малые ΔK_y , и расчет повторяется.

Выбор количества направляющих аппаратов, которые делают регулируемыми, зависит от многих факторов, главными из которых являются: опыт КБ по проектированию РНА, требования минимального веса, надежность конструкции, конструктивные ограничения, связанные с проектированием РНА на слишком большие углы поворота $\Delta \gamma_{РНА}$ (необходимо также учитывать, что при больших углах поворота увеличиваются потери давления из-за раззаворивания РНА).

С точки зрения газодинамики предпочтительнее весь компрессор делать регулируемым. С точки зрения конструкции - регулирование должно быть минимальным.

В настоящее время стремятся применять РНА только на время доводки двигателей. Особенно это относится к газотурбинным приводам для наземного применения.

Максимальную величину угла поворота лопаток РНА следует назначить, исходя из условия обеспечения оптимальных параметров работы компрессора и механических возможностей системы регулирования. Обычно величина угла поворота не превышает 30° . Для проектной работы рекомендуется максимальный угол поворота РВНА выполнять 25° , для первого РНА -15° , для второго -12° и уменьшать на 2° для каждого последующего. Общее количество РНА (включая РВНА) не должно превышать 3-5 (меньшее значение берется для коротких компрессоров, большее - для длинных).

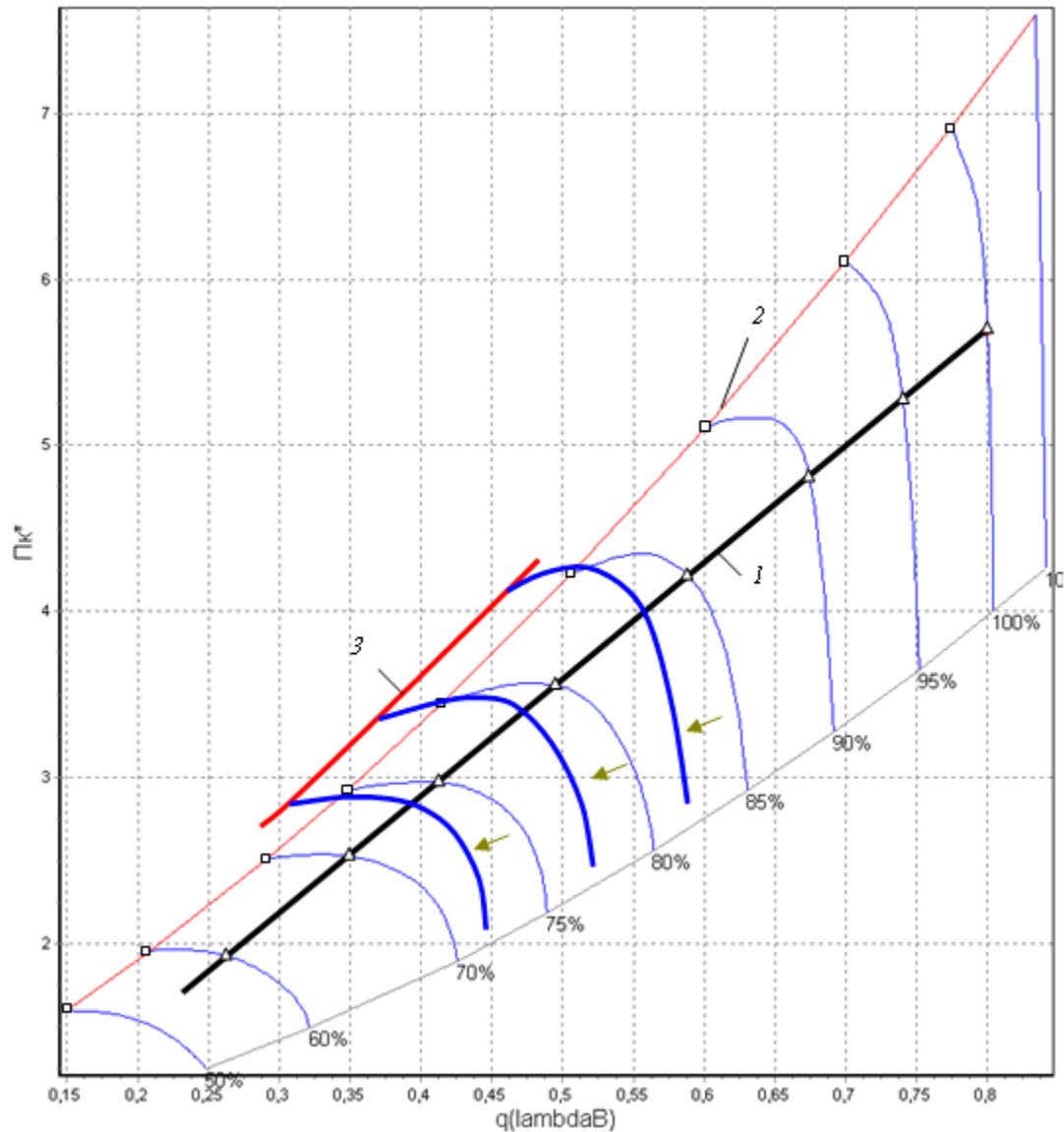


Рис. 8. Характеристика компрессора: 1 - линия совместной работы, 2 - линия границы помпажа, 3 - деформированная линия границы помпажа

4.3. Выбор кинематической схемы и системы управления РНА

Техническими условиями на двигатель регламентируются временные параметры работы РНА. Кинематическая схема должна обеспечить надежную работу узла без заклинивания. Управление кинематическими узлами может быть различным. Чаще всего для управления используется гидравлическая система, управляющим элементом в которой является гидроцилиндр.

Для проектирования системы РНА необходимо провести синтез механизма передачи усилия от управляющего поршня к лопаткам РНА. При этом используются только простейшие связи элементов – шарниры и опоры скольжения.

Методика синтеза механизмов подробно изучается в курсе «Теория машин и механизмов». Основной целью синтеза является получение схемы механизма и геометрических параметров звеньев, позволяющих выполнить заданные функции при заданном уровне надежности и минимальном весе. В нашем случае необходимо обеспечить заданный угол поворота лопаток РНА. Примеры кинематических схем систем управления РНА показаны на рис. 6 и 7.

В процессе создания модели, если она слишком сложная и содержит много элементов, целесообразно сначала создать стержневую модель, которая полностью отражает исходную, но гораздо проще в восприятии и идеально подходит для анализа характера соединений между элементами. Такое моделирование, непременно, является более привычным для инженера, создающего новую конструкцию, чем проектирование модели сразу со всеми сложными твердотельными технологическими элементами. Составление стержневой кинематической схемы системы РНА удобно производить в пакете ADAMS.

4.4. Предварительная компоновка РНА

Предварительная компоновка РНА включает в себя:

- выбор места расположения осей на профиле лопатки (периферия, втулка);
- выбор высоты осей, диаметра, конструкции опоры, рычага крепления (на лопатке и управляющем кольце).

Место расположения оси на профиле лопатки (рис. 9) необходимо выбирать ближе к входной кромке, чем центр давления ($(1/3...1/4)b$). Это обеспечивает раскрытие РНА при отказе системы управления и не вызывает аварийной ситуации.

Диаметры и высота осей и «пятачков». Диаметр оси можно назначить равным $d=6...10$ мм, «пятачка» $D=(1,5...2,5)d$. В ряде случаев диаметр оси увеличивают до диаметра «пятачка». Высота оси при двухопорном креплении: на периферии $l=(1,5...3)d$, у втулки $l=(1,0...1,5)d$, при консольном закреплении $l=(2...4)d$.

Выбор конструкции опор лопатки. Опора лопатки РНА обычно представляет собой подшипник скольжения, поэтому важным является подбор пар трения с минимальными коэффициентами трения для лопаток (особенно титановых).

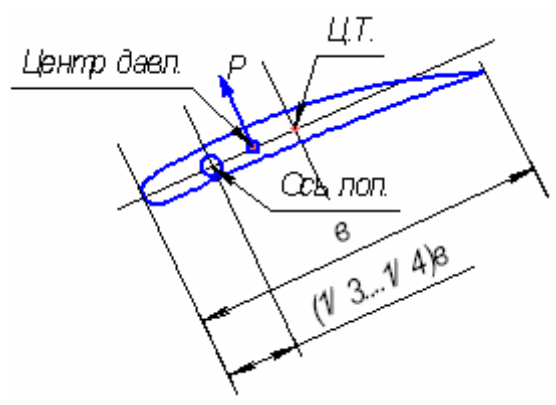


Рис. 9. К выбору места расположения оси на профиле лопатки

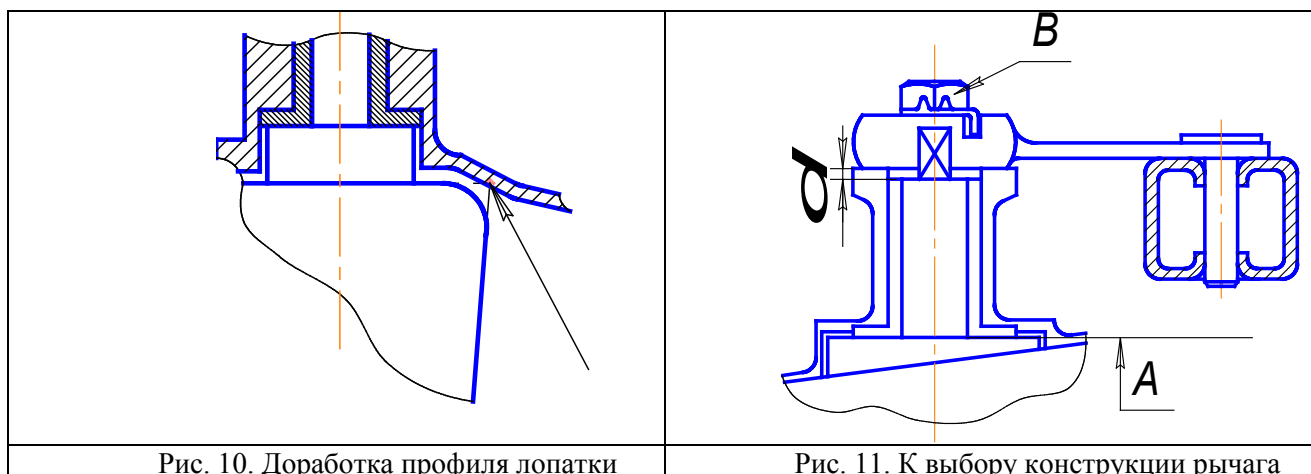
Конструктивно подшипник представляет собой втулку с фланцем, которая воспринимает как радиальные, так и осевые нагрузки. Толщина 1,2...2 мм. Подшипник фиксируется в окружном и осевом направлении.

Втулочная опора проектируется с учетом деформации лопатки от действия газовых сил. При малых деформациях используется такая же втулка с фланцем, как и в периферийном сечении, но с длиной, равной диаметру, и с увеличенным зазором, или сферические элементы. В этом случае должен быть подобран стандартный сферический подшипник.

После этого необходимо проверить, какие точки профиля ограничивают поворот лопатки, и при необходимости доработать профиль (рис. 10).

Выбор конструкции рычага. Необходимо решить задачи соединения рычага с осью лопатки, рычага с управляющим кольцом и фиксации лопатки в радиальном направлении (рис. 11).

Фиксация рычага с лопаткой должна обеспечить прижатие лопатки к торцу А, гарантию поворота лопатки, контровку винта В. При соединении с управляющим кольцом необходимо учесть, что поворот на заданный угол лопаток РНА обеспечивается варьированием длины рычага или перемещением управляющего кольца. В первую очередь необходимо исключить заедание оси в опорах кольца при перекосах или деформациях кольца. Это достигается центрированием кольца и использованием сферических опор.



Проблема центрирования управляющего кольца важна для колец любых диаметральных размеров, но при критических значениях диаметра определяется жесткостью кольца и желателен переход к схеме с двумя и более точками приложения приводного усилия, т.е. по окружности корпуса располагается два или три исполнительных механизма.

Проектирование управляющего кольца. Конструктивно кольцо представляет собой набор опор для осей рычагов, места присоединения приводных тяг и элементы центрирования кольца относительно оси компрессора. Из условия монтажа кольцо часто бывает разрезным. Центрирование управляющего кольца необходимо потому, что смещение его оси относительно оси двигателя (компрессора) вносит искажение углов поворота лопаток РНА. Используются различные приемы центрирования: установка кольца на роликах (НК-38СТ), на рычагах поворотных лопаток (АЛ-31Ф и др.), на центрирующих поясках корпуса, когда устанавливается зазор между корпусом и элементами кольца (ПС-90, V2500 и др.). Величина зазора определяется тепловыми деформациями кольца и корпуса – главное, чтобы зазор сохранялся на всех режимах работы двигателя.

Выбор конструкции опоры рычага в управляющем кольце. Самое простое решение – подшипник скольжения. Однако, при отсутствии гарантий центрирования управляющего кольца и его деформации во время поворота лопаток возможны отказы (торможение, защемление и т.д.). В этом случае используют сферический подшипник.

Обеспечение монтажа РНА. При двухопорной схеме лопаток монтаж РНА в наружный корпус возможен при разъемном внутреннем или, наоборот, при разъемном наружном и неразъемном внутреннем корпусе. Это определяется архитектурой наружного корпуса компрессора.

4.5. Методика проектировочного расчета РНА

Определение усилий в механизме управления. Расчет выполняется в следующем порядке:

1. Определение газовых сил на лопатках.

Величину газовых сил можно приближенно определить по формуле:

$$P_{\text{лоп}} = (p_2 - p_1)F_{\text{лоп}} + (W_2 - W_1) \cdot G_2;$$

площадь пера лопатки определим как произведение длины профиля корытца на высоту лопатки.

$$F_{\text{лоп}} = l_{\text{кор}} \cdot h_{\text{лоп}};$$

величины давления и скорости потока за и перед лопатками РНА вычисляются при проведении газодинамического расчета в курсе ТРЛМ.

2. Определение реакций в опорах.

Будем считать, что газовая сила приложена в центре масс лопатки. В этом случае лопатку РНА можно представить в виде балки, нагруженной сосредоточенной силой. Сечение балки в месте заделки представляет собой окружность с диаметром, равным диаметру цапфы. При таком виде нагружения балка будет испытывать чистый изгиб, при котором максимальные напряжения будут наблюдаться в месте заделки. Методами теоретической механики находим реакции в опорах и изгибающий момент M_{u_MAX} . Далее, зная предел прочности материала $[\sigma]$ цапфы и принимая коэффициент запаса $n = \frac{\sigma_{MAX}}{[\sigma]}$, где $\sigma_{MAX} = \frac{M}{W}$, определим момент сопротивления изгибу по формуле:

$$W = \frac{n \cdot M_{u_MAX}}{[\sigma]}.$$

Тогда допустимый диаметр цапфы равен:

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot W}{\pi}}.$$

Проверка прочности на срез производится из соотношения:

$$\tau = \frac{R_{\text{ц}}}{\pi \cdot D_{\text{ц}}^2} < [\tau] = 0.6 \cdot [\sigma], \text{ где } R_{\text{ц}} - \text{реакция в опоре.}$$

3. Определение моментов трения. Момент трения в цапфе определяется по формуле:

$$M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot r_{\text{ц}} = \mu \cdot R_{\text{ц}} \cdot r_{\text{ц}}. \text{ Коэффициент трения определяется комбинацией материалов.}$$

4. Определение суммарного усилия поворота.

Для поворота лопатки нужно преодолеть момент силы трения цапфы. Поворот каждой лопатки осуществляется при помощи поводка длиной $l_{\text{пов}}$. Разделив значение момента на длину поводка, вычислим усилие поворота одной лопатки. Суммарное усилие равно:

$$F_{\text{пов}_Z} = F_{\text{пов}_1\text{лоп}} \cdot Z_{\text{РНА}}$$

Выбор схемы и конструкции системы поворота ведущего кольца.

1. Часто используется схема с уголковым рычагом (например, АЛ-31Ф), что позволяет сделать конструкцию более компактной в малом объеме. Однако, это не уменьшает привлекательность других схем.

2. При выбранных углах поворота лопаток, геометрии рычагов определяется требуемое линейное перемещение ведущего кольца и по нему перемещение тяги исполнительного механизма. Принимая, что все n ступеней РНА приводятся в действие одним механизмом и углы поворота лопаток изменяются по оборотам по линейному закону, необходимо построить график $\alpha = f(n)$, что позволяет определить закон перемещения управляющего элемента по оборотам (рис. 12). На практике переключки РНА по оборотам

обычно выполняется ступенчато и графики на рис. 12 представляют собой ступенчатый вид.

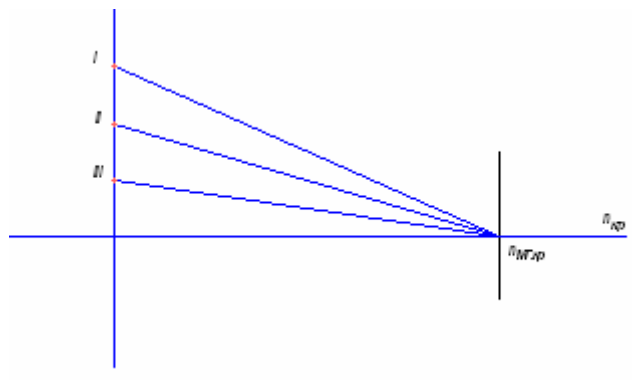


Рис. 12. Определение законов перемещения управляющих колец 3-х ступеней РНА

3. Для компрессоров с диаметром ведущего кольца $D_{ксп} \geq 500 \dots 550$ мм выбирается управление двумя механизмами.

4. После выбора числа исполнительных механизмов определяется их геометрия. Если это гидропривод, то по половине суммарного усилия поворота определяется диаметр гидроцилиндра и выполняется его компоновка.

5. 3D-моделирование системы РНА

Моделирование системы РНА проходит в несколько этапов.

На первом этапе производится моделирование отдельных элементов конструкции, составление номенклатуры крепежных элементов. Параллельно с моделированием производится упрощение геометрических элементов деталей РНА для того, чтобы при проведении дальнейших расчетов избежать неоправданных затрат машинного времени.

На втором этапе выполняются подборки элементов РНА в узлы. Наличие таких подборок, из которых в дальнейшем будет состоять общая сборная модель системы РНА необходимо для того, чтобы увеличить быстродействие при проведении общей сборки системы.

Третий, заключительный этап заключается в сборке всей системы РНА из подборок и проверки модели на наличие ошибок (как конструкционных, так и программных).

Процесс создания геомет рической т рехмерной модели РНА рассмотрим на примере РНА КСД НК-38СТ.

Каждая программа по трехмерному моделированию использует свой формат моделей, из-за чего непременно возникает проблема совместимости форматов. Примером решения этой проблемы могут служить созданные стандарты на форматы трехмерных моделей, такие как, IGES, Parasolid и STEP. Так как пакеты кинематического анализа и прочностного расчета работают практически со всеми форматами, то необходимо определить - какой формат позволяет произвести перенос модели наиболее точно. Проведение тестовых переносов моделей из одного формата в другой показало, что наиболее удобно работать в пакете Solid Works. Также объемные модели можно создавать в пакетах Solid Edge и КОМПАС 3D. Например, в пакете КОМПАС 3 D формат моделей - m3d (для КОМПАС-деталей), a3d (для КОМПАС-сборок), а формат, используемый для переноса моделей в другие пакеты - x_t (Parasolid). Таким образом, достигаются наиболее комфортные условия для моделирования, однако появляется главный недостаток такой методики - модель нельзя параметризовать полностью. То есть, если возникает необходимость какого-либо изменения геометрической модели уже в ходе работы в пакете кинематического анализа или прочностного расчета, то приходится возвращаться назад в среду трехмерного геометрического редактора и менять геометрию там, после чего опять повторять процедуру переноса модели.

Рекомендации по выполнению геомет рического моделирования РНА.

При наличии чертежей узла РНА естественно стремление построения моделей деталей, не прибегая к упрощениям. Но все скругления, фаски и канавки, резьбовые соединения и соединения по эвольвентному профилю являются очень трудоемкими, к тому же существенно возрастает время обработки модели. Поэтому следует упростить модели в пределах разумного.

Мет одика пост роения модели дет али. Сначала необходимо создать эскиз - это контур будущей модели, посредством вращения которого вокруг своей оси или выдавливанием можно получить требуемую объемную геометрическую форму. Практически все современные системы 3D-моделирования построены на этом принципе. Исключение составляют дизайнерские программы, где оперировать приходится не эскизами, а конкретными простыми фигурами, посредством вытягивания и изменения, а так же БЭФ-суммирования или БЭФ-разности получают сложные модели, или же в другом случае полигональным отображением, изменяя форму и количество отображаемых полигонов (например, 3D Studio Max). Для инженерных программ это не подходит, так как не гарантирует потребной точности и качества создаваемых моделей. Так же при этих методах намного вероятнее риск появления ошибки, например, когда тело состоит из большого количества простых фигур. Отображается правильно, а передается в другие программы

неверно.

Рассмотрим пример построения модели детали - вала. Строится обычный двумерный контур (рис. 13), который и будет служить опорой создаваемой нами детали. Указываем осевую линию, относительно которой нужно вращать контур.



Рис. 13. Построение двумерного эскиза

Далее создается тело вращения, в основе которого будет лежать данный эскиз. Создаются необходимые изменения формы. При этом, пользуясь эскизами и вытягиванием эскизов сквозь тело или вращением, делается БЭФ-разность в базовой модели (рис. 14).

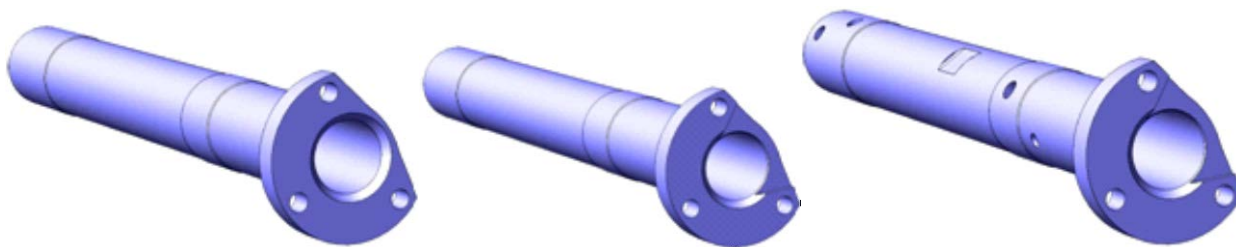


Рис. 14. Этапы построения трехмерной модели:
создание среза и крепежных отверстий; создание прорези на торце вала;
пробивка отверстий под передающие усилие коромысла и создание среза

После выполнения трехмерных моделей деталей необходимо объединить детали в сборку, задавая положение одних моделей относительно других. При очень сложных и больших сборках при добавлении нового элемента программа автоматически перестраивает всю сборку. Поэтому удобнее сборку разбивать на под сборки, что значительно ускоряет процесс моделирования.

Как уже указывалось ранее, рекомендуется уйти от подробного моделирования болтовых соединений и упростить шаровые шарниры.

В итоге получится, несмотря на упрощения, довольно точная, насколько это возможно, модель РНА (рис. 15).

Рассмотрим конструкции узлов сборки и трудности, с которыми студенты могут столкнуться в процессе их создания.

Сборка пневмоцилиндра (рис.16). Этот узел был смоделирован наиболее подробно, так как он передает усилие с поршня на все группы лопаток РНА. В этом узле можно моделировать перекосы и т.п.

Узел вала приводов с тягами (рис.17). С этим узлом проблем практически не было. Его можно упростить. Это связано в первую очередь с тем, что рассчитывалась считалась одна ступень РНА, а вал передает усилие на четыре ступени. С целью экономии машинного времени компьютера можно убрать лишние серьги, заменив их точечными силами сопротивления вращению.

Тяга (рис.18). С тяговым узлом проблем практически не возникало, кроме той, что снова же сделан он был излишне подробно. Следовало упростить этот узел, потому что,

например, сверления под контрольное закрепление проволокой только усложняют геометрию. Это было сделано в дальнейшем.

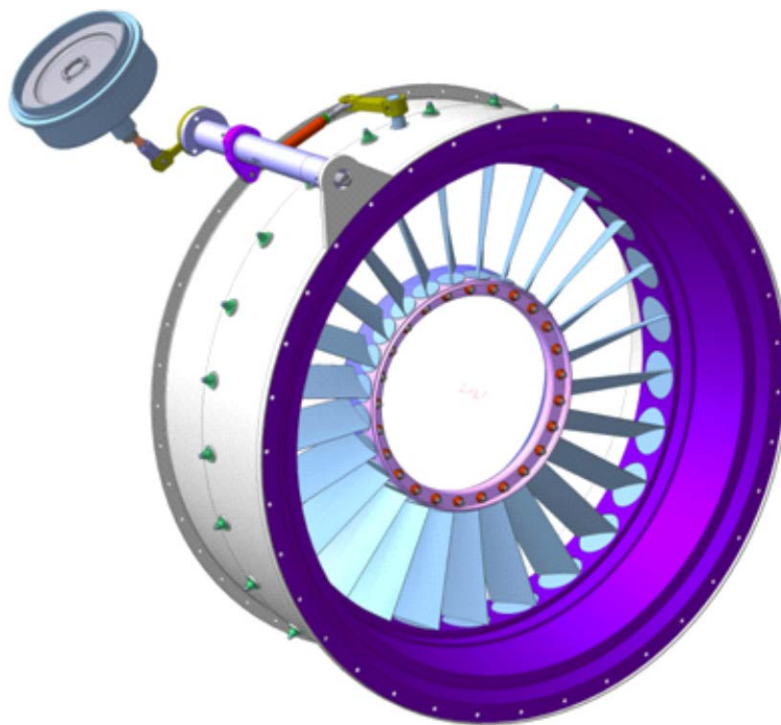


Рис. 15. Внешний вид модели системы РНА с пневмоприводом

Узел передачи усилия с тяги на лопатки (рис.19). В процессе работы данная сборка претерпела множество изменений. Этот узел не является беспроблемным. Поэтому необходимо провести работу над созданием оптимальной его конструкции. С уверенностью можно сказать - компьютерный расчет точнее, проще, быстрее, легче и что самое главное - достовернее и нагляднее показывает полную картину событий, происходящих при работе того или иного механизма. Но это будет видно из следующей части расчета трехмерной модели в пакете-симуляторе ADAMS.

6. Компоновка РНА и системы управления в пакете ADAMS, имитация работы РНА

[Видео 1](#), [Видео 2](#), [Видео 3](#), [Видео 4](#), [Видео 5](#), [Видео 6](#).

Следующим этапом после построения геометрической модели является её экспорт в пакет кинематического и динамического анализа. Сразу же **после** экспорта возникла проблема - полная утрата моделями своих свойств. Т.е., если в пакете геометрического моделирования был задан материал детали, то при переносе вся информация, касающаяся свойств, исчезала. Поэтому проектирование РНА начиналось с задания каждому геометрическому элементу свойств, таких как его имя, материал, плотность, модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Причем свойства необходимо задать каждому элементу. Здесь мы сталкиваемся с трудностью - несмотря на все упрощения, сделанные при построении геометрической модели, количество составных деталей РНА более 350. К сожалению, автоматизировать процесс задания свойств и “переименования” моделей нет никакой возможности. Поэтому, было еще раз доказано, что внесение в модель РНА элементов, непосредственно не участвующих в передаче движения, лишь “отяжеляет” модель, занимает память и просто отнимает время у конструктора.

После того как каждый элемент стал иметь хоть какое-то осмысленное название и иметь свойства, появляется возможность кинематического анализа.

Следующий этап - задание движения. Первоначально была поставлена задача - выполнить перекладку РНА на земле на неработающем двигателе. То есть, это означало, что задается движение пневмоцилиндра - из-за чего начинают переключаться лопатки, а давление воздуха на сами лопатки равно нулю. Далее задача усложняется - определить давление в пневмоцилиндре от действия газового потока на лопатки при переключении с учетом сил трения, причем действие потока переменное, так как сила давления меняется от угла поворота лопаток.

Однако вернемся к нашей модели. Кроме движения пневмоцилиндра необходимо задать взаимодействие деталей друг с другом. Делается это посредством шарниров. Необходимо соединить все элементы так, чтобы они двигались подобно своим реальным прототипам. Использовались самые примитивные шарниры - вращательные, цилиндрические и сферические (рис.20).

Остановимся более подробно на задании шарниров. В качестве примера рассмотрим задание взаимодействия элементов в узле гидроцилиндра.

Итак, для начала нам необходимо сделать **корпус гидроцилиндра** неподвижным. Для этого соединим его с **Землей** посредством **Жесткого соединения**(Fixed Joint):

1. На панели инструментов (рис. 21) выберите кнопку **Шарниры**.
2. Щелкните правой кнопкой мыши и в появившемся меню выберите **Fixed Joint** (1 на рис.22).
3. Укажите **Корпус гидроцилиндра**.
4. Укажите **Землю** (выведите курсор на пустое место, появится надпись **Ground**, щелкните по ней).
5. Укажите место соединения. В принципе, для жесткого соединения неважно место соединения, тем не менее, чтобы не заставлять ADAMS выполнять пустые расчеты, связанные с приведением к центру масс тела, укажем **центр масс корпуса гидроцилиндра**.
6. Жесткое соединение создано.

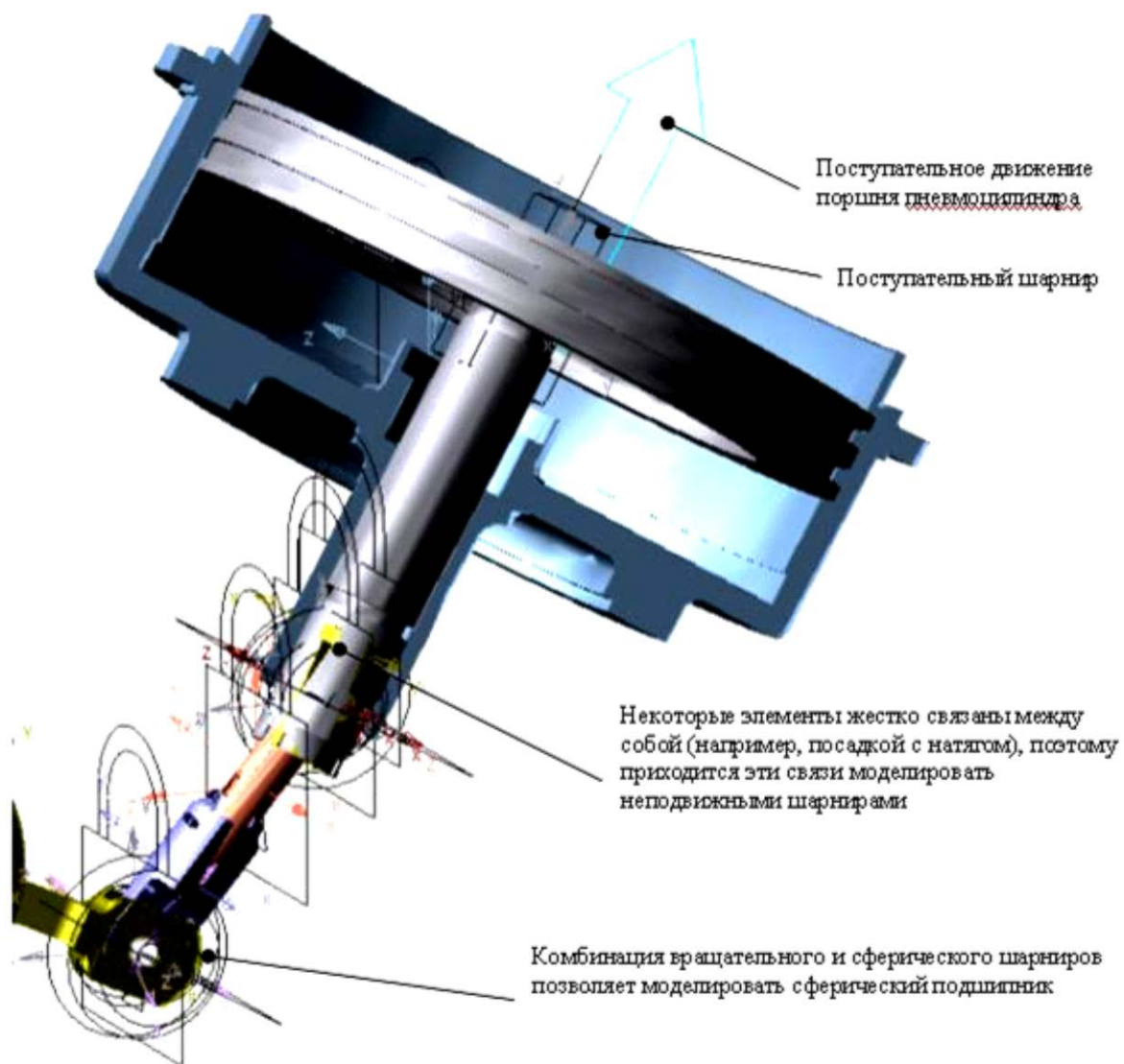


Рис. 20. Задание шарниров на узле пневмоцилиндра



Рис. 21. Панель инструментов



Рис. 22. Панель шарниров:

1 - Жесткое соединение (Fixed Joint); 2 - Вращательный шарнир (Revolute Joint); 3 - Поступательный шарнир (Translational Joint); 4 - Цилиндрический шарнир (Cylindrical Joint); 5 - Сферический шарнир (Spherical Joint)

Если необходимо соединить тело не с **Землей**, а с другим телом, то в пункте 5 в качестве точки соединения указывается либо центр масс первого тела, либо центр масс второго.

Теперь, когда корпус гидроцилиндра закреплен, зададим поступательный характер движения поршня относительно корпуса с помощью **поступательного шарнира** (Translational Joint).

1. На панели инструментом (рис.21) выберите кнопку **Шарниры**.

2. Щелкните правой кнопкой мыши и в появившемся меню выберите **Translational Joint** (3 на рис.22).
3. Укажите **Поршень гидроцилиндра**.
4. Укажите **Корпус гидроцилиндра**.
5. В качестве места соединения укажите **центр масс поршня**.
6. Поступательное соединение создано.

Продолжая соединять элементы гидроцилиндра, соединим **Вилку с Поршнем** с помощью неподвижного соединения.

Более сложным вопросом является задание шарниров в подшипниках скольжения. Рассмотрим некоторые моменты задания шарниров в сферических подшипниках. Охватываемая деталь - **наконечник** может свободно вращаться в двух плоскостях относительно сферического тела **шароподшипника**, в то время как сам **шароподшипник** имеет свободу вращаться относительно оси - **пальца шароподшипника**, проходящей через него, которая в свою очередь неподвижно запрессовывается в охватывающую деталь - **вилку**. Для задания такого сложного поведения нам потребуется 1 **жесткое соединение** (Fixed Joint), 1 **сферический** (Spherical Joint) и 1 **вращательный шарниры** (Revolute Joint).

1. На панели инструментом (рис. 21) выберите кнопку **Шарниры**.
2. Щелкните правой кнопкой мыши и в появившемся меню выберите **Fixed Joint** (1 на рис.22).
3. Закрепите **палец подшипника в вилке** (место соединения - **центр масс пальца**).

Примечание. Существуют так называемые активные и пассивные тела. И если задание шарниров идет по цепочке, т.е. если задается первое тело (активное), а потом второе (пассивное), то следующий шарнир должен задаваться таким образом, чтобы первым телом было то, что в предыдущем шарнире было вторым. В данном случае если написано соединить **палец подшипника с вилкой**, то это означает, что сначала указывается палец подшипника, а затем вилка.

4. Выберите **Revolute Joint**.
5. Соедините **шароподшипник с пальцем шароподшипника** (в качестве места соединения укажите **центр масс шароподшипника**).
6. Выберите **Spherical Joint**.
7. Наконец, соедините **наконечник с шароподшипником** (в качестве места соединения укажите **центр масс шароподшипника**).
8. Шароподшипник задан.

Дальнейшее соединение элементов ([рис.23](#), [рис.24](#), [рис.25](#)) проводится аналогично описанному выше. Более подробное описание шарниров и способов задания приведено в пособиях /4-6/.

Еще одна особенность задания шарниров - это их **ориентирование** в пространстве. Для того, чтобы правильно сориентировать шарнир, необходимо правильно выбрать плоскость, в которой будет происходить задание шарнира. Поясним, что подразумевается под "выбором плоскости". При создании шарнира модель повернута под определенным углом к пользователю. Именно нормально к этой плоскости и будет создан шарнир. Если быть более точным, задание этой плоскости происходит на последнем этапе - в момент указания места соединения.

Стоит заметить, что для **жестких соединений** и **сферических шарниров** не важна эта плоскость, потому что в первом случае закрепление происходит по всем трем осям, а во втором - вращательная свобода шарнира обеспечивает вращение также по всем трем осям, т.е. все направления для этих шарниров равнозначны. Однако для того, чтобы как-то упорядочить хотя бы их отображение, рекомендуется выбрать какую-то одну фиксированную плоскость, например, фронтальную плоскость.

Рассмотрим, как выполняется ориентирование для других шарниров.

Для **вращательного шарнира** указание оси вращения непосредственно не

производится - ей становится направление, перпендикулярное плоскости экрана (т.е. по направлению взгляда пользователя).

Для **поступательного и цилиндрического шарниров** указание направления поступательного движения производится непосредственно после задания места соединения. Целесообразно выбирать в качестве оси перемещения соответствующую ось центра масс детали.

Некоторые трудности могут возникнуть в случаях, когда необходимо повернуть шарниры на четко заданный угол. В нашем случае возникли проблемы с заданием цилиндрических шарниров у поворотных лопаток. Если производить указание направления плоскопараллельного движения вручную относительно центра масс лопатки, то могут возникнуть неточности, которые в итоге приведут к заклиниванию всего РНА. Для исключения таковой возможности и применяется четкое позиционирование шарниров в пространстве с помощью средств редактирования. Рассмотрим на примере 25-ой поворотной лопатки процесс поворота шарнира:

1. Выберите созданный поворотный шарнир (в данном случае **Cil_Skol25**).
2. Щелкните правой кнопкой мыши на выбранном шарнире и выберите **Modify** (рис. 26).
3. В появившемся окне **Modify Joint** нажмите кнопку **Change Position** (рис.27).
4. В появившемся окне **Precision Move** в поле 1 (рис.28) введите 30.
5. Нажмите кнопку 2 (рис.28), чтобы изменить направление вращения на обратное.
6. Нажмите кнопку 3 (рис.28), чтобы повернуть шарнир вокруг оси X на 30° по часовой стрелке.
7. Шарнир повернут.



Рис. 26. Выделение шарнира и его модификация

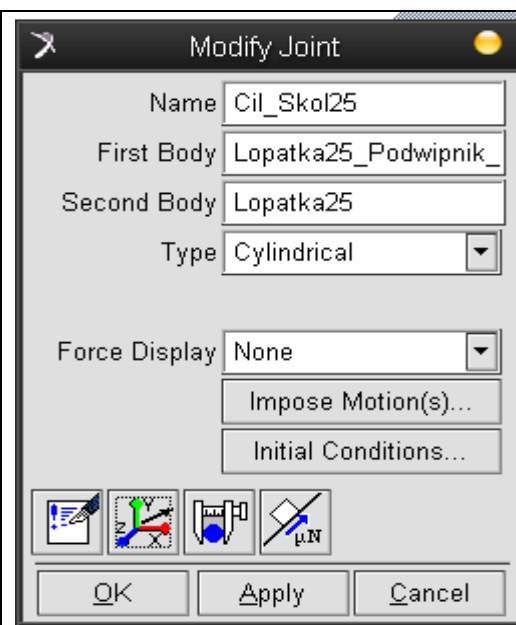


Рис. 27. Окно изменения шарнира

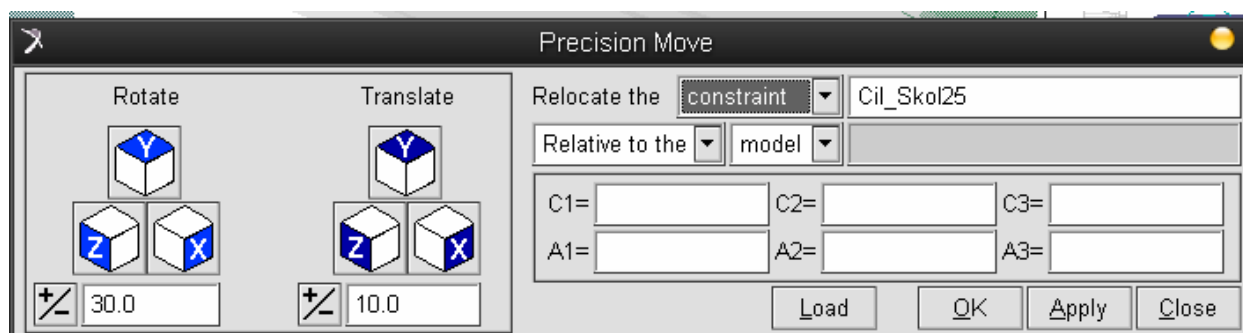


Рис. 28. Окно перемещения и поворота шарнира

При моделировании необходимо точное назначение углов установки элементов шарнира (рис.25). Так, при перекосе вращательных шарниров хотя бы на 1° происходит заклинивание.

После соединения всех моделей деталей посредством шарниров получаем переключаемый регулируемый направляющий аппарат. Расчетные результаты, полученные при полном перемещении поршня пневмоцилиндра, показали, что максимальный угол поворота лопаток составляет около 6° (рис.29).

Следующим этапом является прикладывание нагрузки на лопатки от действия газового потока в тракте двигателя. Рассмотрим тестовый пример. При нагружении одной лопатки ее в начале перекладки заедает, причем наблюдается один пик. Если же нагрузить две лопатки, то пик смещается влево и имеет обратную величину (рис.30). И, наконец, если нагружены три рядом стоящие лопатки, то наблюдается заклинивание.

Чтобы модель РНА работала правильно, необходимо учесть наличие активных и пассивных тел при задании шарниров. И если задание шарниров идет по цепочке, т.е. если задается первое тело (активное), а потом второе (пассивное), то следующий шарнир должен задаваться таким образом, чтобы первым телом было то, что в предыдущем шарнире было вторым. В этом случае в ADAMS правильно формируется система уравнений. Чтобы избежать заклинивания, необходимо использовать более сложные шарниры, позволяющие кроме обычного движения задавать и некоторую упругость шарнира в других направлениях.

Исправить сложившуюся ситуацию помогает возможность ADAMS показывать соединения элементов между собой (рис.31).

Далее полученные нагрузки на элементы необходимо передать в пакет для расчета на прочность.

7. Прочностные аспекты проектирования РНА

В настоящее время конечно-элементный комплекс ANSYS представляет собой многоцелевой пакет проектирования и анализа, признанный во всем мире. Как правило, такие программы позволяют вводить команды через командную строку и дублируют в текстовый файл команды графического меню. Это значительно расширяет функциональность комплекса и облегчает пользователю прочностное проектирование путем создания своих небольших расчетных подпрограмм. Эти подпрограммы могут использоваться на всех этапах работы: от построения модели до визуализации результатов. Команды, используемые в ANSYS, дополненные некоторыми функциями, образуют полноценный фортраноподобный язык программирования, называемый ANSYS Parametric Design Language (APDL).

В программе ANSYS предусмотрена возможность непосредственного построения 3D-модели детали, но наиболее удобным является импортирование готовой 3D-модели, выполненной в программе твердотельного 3D-моделирования. В нашем случае мы воспользовались моделью, представленной на [рис.14](#).

Как уже было сказано ранее, импортирование модели производится путем перевода ее в формат parasolid.

Далее производится задание свойств материала детали, назначение типа элементов, разбижка модели и задание нагрузок и граничных условий. Точность результатов зависит от размеров и размещения конечных элементов. Использование моделей с крупной сеткой дает результаты, заниженные на 20-40 процентов по сравнению с действительными значениями. Уменьшение размеров элемента до приемлемого уровня обеспечивает нужную детализацию расчетной модели и получение более достоверных результатов. Программа ANSYS при разбижке на конечные элементы автоматически производит довольно рациональную сетку конечных элементов, однако зачастую, из-за сложности геометрической формы исследуемой детали, необходимо произвести регулирование сетки конечных элементов путем изменения возможного числа и плотности распределения элементов на отдельных линиях. Конечно-элементная модель вала представлена на рис. 32.

После генерации сетки конечных элементов производится задание граничных условий и нагрузок. Модель закрепляется по поверхностям, которые являются установочными для детали в узле. Нагрузки прикладываются в виде сил, моментов, температур и нагрузок, распределенных по заданному закону либо непрерывно по поверхности. Нагрузки получены в результате расчетов в среде ADAMS.

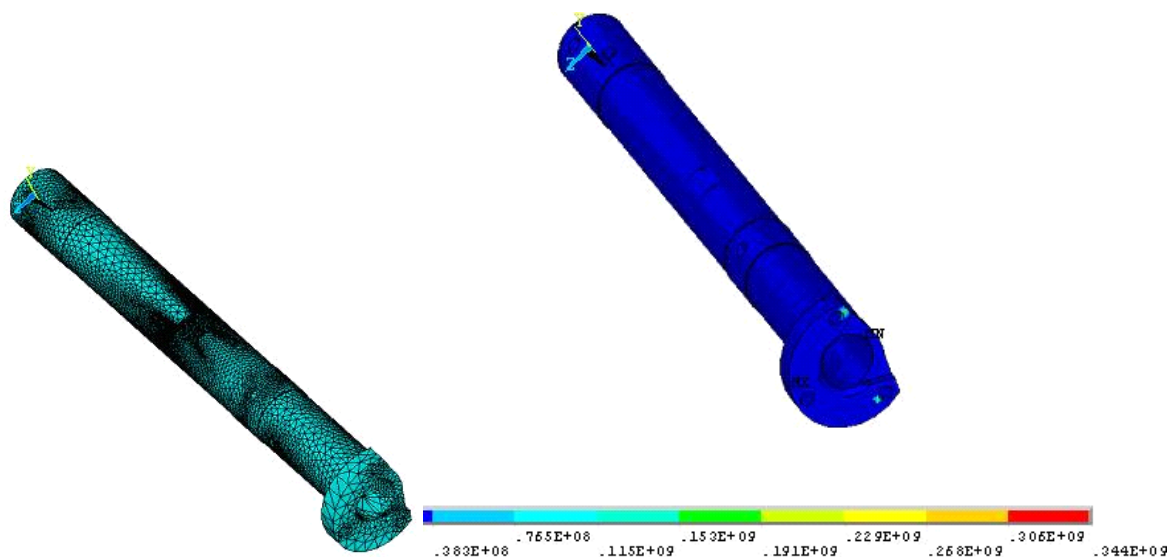


Рис. 32. Конечно-элементная модель и действующие напряжения в детали ([Видео 7](#))

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния визуализируются в виде распределения деформаций, температур, напряжений и коэффициентов запаса по детали. Поле действующих напряжений в детали показано на рис. 32.

Как видно из рисунка, максимальные напряжения равны 344 МПа, что ниже предела прочности для материала вала.

Для проведения расчета на прочность целесообразно создавать LOG-файл с параметрами. Если при дальнейшем проектировании возникнет необходимость произвести еще раз расчет на прочность с другими величинами действующих нагрузок, то, используя созданную подпрограмму, процесс пересчета займет считанные минуты. Также существенно сократится время, необходимое для изменения места приложения нагрузок и их характера.

При проектировании системы РНА необходимо рассчитать ее поведение в различных нештатных ситуациях. Например, можно задать в нескольких подшипниках опор лопаток повышенные значения сил трения. В пакете ADAMS задать движение управляющего цилиндра и определить возникающие в элементах системы РНА нагрузки. Далее в пакете ANSYS определяются напряжения и деформации в каждом отдельном элементе. Делается заключение о прочности. Далее, заложив возникающие деформации в модель РНА в ADAMS, проверяем работоспособность системы.

8. Методические указания по проведению лабораторной работы

Лабораторная работа имеет три уровня сложности:

1 уровень. Изучить функции РНА в составе газотурбинного двигателя (двигатель задается преподавателем), конструктивное исполнение РНА и системы управления РНА.

2 уровень. Провести предварительное проектирование системы РНА газотурбинного двигателя (двигатель задается преподавателем):

1. По заданию преподавателя выбрать исходные данные: диаметральные размеры тракта, степень повышения давления в ступени, профили лопаток, треугольники скоростей для характерных режимов, диапазон регулирования по углу, закон регулирования.

2. Выбрать место установки оси на профиле, диаметр и длину цапф и «пятачков». Проверить отсутствие задевания пера за наружную поверхность тракта при повороте лопатки.

3. Определить газовые силы, составить расчетную схему и произвести оценку напряжений и запасов прочности, спроектировать цапфы.

4. Выбрать конструкцию опор, конструкцию крепления рычага на оси и радиальную фиксацию лопатки РНА.

5. Выбрать способ центрирования приводного кольца и конструкцию сочленения рычага с кольцом, выбрать схему и конструкцию системы управления РНА.

3 уровень. Провести поверочный расчет системы РНА газотурбинного двигателя (двигатель задается преподавателем) с использованием пакетов ANSYS и ADAMS:

1. Выполнить объемную модель системы РНА.

2. Определить граничные условия и нагрузки.

3. Определить усилия в элементах. Рассчитать деформации элементов.

4. Оценить работоспособность узла при наличии деформаций и возможности выполнения тактико-технических требований.

5. Провести расчет динамического состояния узла.

6. Рассчитать параметры, необходимые для оценки надежности узла. Оценка ресурса узла.

7. Оптимизировать конструкцию деталей узла с целью минимизации уровня деформаций и повышения надежности.

Задание на лабораторную работу может содержать пункты из различных уровней сложности.

Заключение

В методических указаниях воспроизведен весь процесс проектирования РНА. Процессы в них зависят от технических требований к срабатыванию данных элементов, а также определяются свойствами газа, тепловым состоянием, изнашиванием и коррозией, воздействием сил и моментов, вибрационным состоянием и т.д.

Совместное использование пакетов ANSYS и ADAMS дает возможность проведения комплексного проектирования РНА и учесть особенности их применения в современных АД.

Для того чтобы проверить представленную технологию проектирования, создаются объемные модели кинематических узлов. С помощью таких моделей можно имитировать срабатывание механизма с получением необходимых временных зависимостей.

Используя получившиеся параметризованные модели, можно выполнить анализ конструкции, произвести изменения, рассчитать и сравнить новый вариант конструкции с уже существующим. Более того, можно, опираясь на уже существующую модель, произвести синтез с использованием пакета кинематики и динамики. В процессе создания параметризованной модели, если она слишком сложная и содержит много элементов, целесообразно сначала создать стержневую модель, которая полностью отражает исходную, но гораздо проще в восприятии и идеально подходит для анализа характера соединений между элементами. Такое моделирование, непременно, является более привычным для инженера, создающего новую конструкцию, чем проектирование модели сразу со всеми сложными твердотельными технологическими элементами.

Освоение студентами предлагаемой технологии проектирования позволит им в дальнейшем создавать высокоэффективные кинематические устройства для АД.

Библиографический список

1. Старцев Н.И. Конструкция и проектирование турбокомпрессора ГТД/ Учебное пособие. – Самара, 2006. – 216с.
2. Кулагин В.В. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. – М.: Машиностроение, 2002. – 616 с.
3. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Теория и расчёт авиационных лопаточных машин: Учебник. – Самара: ФГУП “Изд-во “Самарский Дом печати”, 2003. – 336 с.
4. Гвоздев А.С., Мелентьев В.С. ADAMS/View, Post Processor. Краткий справочник пользователя/ Учебное пособие. – Самара, 2006. – 112с.
5. Лежин Д.С., Гвоздев А.С., Мелентьев В.С. Методические указания к лабораторным работам по использованию пакета ADAMS. - Самара, 2006. – 39с.