

А.А. Соколов
А.С. Башилов



**ГИДРОКОМПЛЕКС
ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ
«БУРАН»**

Федеральное агентство по образованию
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(государственный технический университет)

А.А. СОКОЛОВ
А.С. БАШИЛОВ

ГИДРОКОМПЛЕКС ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ «БУРАН»

Под редакцией
академика РАН *А.М. Матвеевко*

Москва
Издательство МАИ
2006

С59 Соколов А.А., Башилов А.С. Гидрокомплекс орбитального корабля «Буран» / Под ред. А.М. Матвеевко. — М.: Изд-во МАИ, 2006. — 288 с.: ил.

ISBN 5-7035-1650-1

В книге приведены конструктивное описание гидрокомплекса ОК «Буран»; общие принципы построения моделирующих алгоритмов систем и элементов; расчетные схемы; математические модели; алгоритмы их реализации на ЭВМ и общие направления перспективных теоретических разработок.

Представлены инженерные методики расчета, синтеза и оценки основных параметров гидрокомплекса, характеризующие работу его систем при различных комбинациях отказов по гидропитанию. Особый интерес представляют работа на участке орбитального полета, возникшие при этом проблемы и методы их решения, изложенные в третьей главе книги. Приведены результаты работы гидрокомплекса при первом полете орбитального корабля «Буран».

Книга рассчитана на специалистов в области авиации, космонавтики, а также будет полезна студентам технических вузов и широкому кругу читателей.

ISBN 5-7035-1650-1

© Московский авиационный институт
(государственный технический университет), 2006

© Соколов А.А., Башилов А.С., 2006

Книга рассказывает об устройстве, проектировании и функционировании гидросистемы управления (в дальнейшем гидрокомплекс) орбитального корабля «Буран». ОК «Буран» входит в много-разовую космическую систему «Энергия-Буран», поэтому в главе I приведены основные сведения по составным частям данной системы в целом и ОК «Буран» — в частности. Поскольку ОК «Буран» обладает свойствами и планера, и космического корабля, авторы, учитывая нетрадиционность и новизну технических решений, кроме описания его конструкции, областей применения и использования компоновки самолетного типа, делающей возможными спуск и посадку на ВПП, решили рассказать о проблемах, возникших при создании гидрокомплекса, и методах их решения, которые позволили осуществить благополучный запуск и посадку корабля «Буран» в первом беспилотном полете.

В книге рассмотрен конструктивный облик гидрокомплекса; показаны общие принципы построения моделирующих алгоритмов его элементов и систем; приведены конкретные расчетные схемы; математические модели; алгоритмы их реализации на ЭВМ и общие направления перспективных теоретических разработок. На основе разработанных моделей и методов их реализации приведены конкретные инженерные методики синтеза и анализа по оценке основных параметров рабочих процессов, характеризующие функционирование рулевых поверхностей при различных комбинациях отказов по гидропитанию. Результаты их реализации на основе анализа теоретических и экспериментальных исследований воплощены в конкретных конструктивных решениях гидрокомплекса.

Изложены также материалы, описывающие работу гидрокомплекса и касающиеся проблем, возникающих на орбитальном участке. В космическом полете при неработающем ГК конструкция орбитального корабля охлаждается до температуры -130 град; для поддержания работоспособности гидрокомплекса применяется изоляция агрегатов и трубопроводов от конструкции орбитального корабля; электрообогрев и прокачка их рабочей жидкостью, подогретой в нагревательных теплообменниках, использующих тепло приборных отсеков; прокачка насосами малой мощности с приво-

дом от электродвигателя, установленными в каждом канале гидросистемы.

В связи с жесткими требованиями к рабочим характеристикам насосных станций по потребляемому току и напряжению основную проблему представляет выбор прокачных характеристик агрегатов и систем гидрокомплекса в процессе изготовления и испытаний. Теоретической основой данной проблемы являются методы математического моделирования с учетом проливочных характеристик агрегатов и систем гидрокомплекса. Качественно отличный от традиционных разработанный метод синтеза требуемых характеристик потребителей по критерию заданной мощности насосной станции, основанный на использовании математических методов «невязок» и «стягивания в точку», позволил не только провести реальную конструкторскую доработку прокачных характеристик систем гидрокомплекса, но и проводить численные эксперименты вместо большого объема натурных испытаний.

Интерес для читателя представляют и материалы экспериментальной отработки систем гидрокомплекса «Бурана».

В книге использованы материалы личных разработок авторов, разработки соответствующих коллективов НПО «Молния» и многих отраслей промышленности.

Авторы выражают большую благодарность коллективу НПО «Молния»; всем, кто принимал участие в разработке гидрокомплекса ОК «Буран»: Матвеевко А.М., Звереву И.И., Швейкусу К.М., Серегину С.Ф., Набойщикову Г.Ф., Балашову М.П., Розембейм Л.М., Коломенскому И.М., Черкесову В.Б., Ширенину А.С., Асидуллаеву Ф.А., Соболевой О.С., Стрункиной О.В., Данченко О.А., Снаткину А.В., Кочкиной Н.М., Копьеву Д.Е., Саенко В.И., Янкину И.М., Некрасову О.Н., Горбатенко В.В., Ермакову С.А., Солововой Н.Н., Фомину М.Б., Смольянинову А.Б., Кирюхину А.Н., Стеколыщикову А.А., Тетеревятниковой Т.А., Воробьевой О.М., Приходько С.М., Аниканову В.Ф., Репникову Г.А., Солоду С.С., Согриной Т.И., а также всем, кто оказал неоценимую помощь в подготовке рукописи к изданию.

ВВЕДЕНИЕ

Создание космической системы многоразового использования с пилотируемым орбитальным кораблем «Буран» и РН «Энергия» позволило определить требования и к системам, обеспечивающим спуск и посадку ОК по заданной траектории в заданную точку, а также методы их реализации. Управление ОК «Буран» на участках спуска и посадки обеспечивается аэродинамическими поверхностями, управляемыми гидравлическими приводами, питающимися от гидросистем гидрокомплекса. Разработке этих систем, проблемам, связанным с их резервированием, а также синтезу их основных параметров и методам исследований и посвящена настоящая книга.

В *первой главе* содержится описание облика космического многоразового орбитального корабля «Буран»; принципы и методы построения его компоновочной схемы; состав систем планера и его бортовых систем; требования к компоновке и конструкции с учетом аэродинамики, а также требования к резервированию, конструктивным схемам ГК и принципы построения логики управления бортовыми системами по обеспечению программы полета и безопасности экипажа и пассажиров (если такие имеются). Кроме того, в конце главы содержатся материалы, отражающие программу полета и некоторые практические аспекты ее реализации.

Вторая глава, посвященная принципам и методам построения моделирующих алгоритмов агрегатов и систем гидрокомплекса ОК «Буран», содержит:

- методики разработки математических моделей, элементов и систем;
- методики разработки упрощенных и расчетных гидравлических схем гидрокомплекса и входящих в него ГС;
- математические модели элементов и систем гидрокомплекса, а также алгоритмы их реализации, представленные блок-схемами.

В целом вторая глава указывает и обосновывает пути дальнейших теоретических работ в области создания и исследований гидросистем управления космических кораблей многоразового использования.

Третья глава содержит созданные на основе положений главы 2 конкретные инженерные методики синтеза и оценки основных параметров гидрокомплекса. Показано, что необходимые скорости движения рулевых поверхностей могут быть обеспечены только исходя из реальных энергетических возможностей ГК.

Практическое использование разработанной математической модели на основе положений главы 2 и алгоритма ее реализации позволили не только оценить максимально располагаемые скорости движения аэродинамических поверхностей, при которых соблюдается энергобаланс при двух отказах по гидропитанию, но увеличить их уровень на основе принципа рекуперации и введения в СУ более рационального закона управления рулевыми поверхностями. Кроме того, глава 3 содержит разработанную для оперативного решения задач динамики полета ОК «Буран» математическую модель гидрокомплекса, позволяющую учитывать взаимовлияние ГС и РС при математическом моделировании системы управления.

Результаты теоретических исследований по приведенным в главе 3 моделям и алгоритмам, а также их сравнение с экспериментальными исследованиями приведены на диаграммах и графиках в этой же главе.

Несомненный интерес представляет функционирование гидрокомплекса на участке орбитального полета, когда температура конструкции ОК охлаждается до -130 град. и работоспособность ГК поддерживается не только изоляцией и электрообогревом, но и прокачкой агрегатов, систем и трубопроводов теплой рабочей жидкостью насосными станциями малой мощности.

С учетом весьма жестких требований по давлению и расходу насосной станции, наличия громадного числа прокачиваемых агрегатов, систем и большой протяженности трубопроводов задача синтеза основных параметров ГК в режиме его работы СГО потребовала новой методики расчета, целью которой явилось:

- разработка математических моделей;
- создание новых методов их практической реализации;

- оценка основных параметров ГК в режиме СГО;
- проведение теоретических исследований и необходимых расчетов с конкретной, по данным расчетов, доработкой агрегатов и систем ГК.

Вышеперечисленные цели достигнуты в разработках *четвертой главы*, где содержатся математические модели, алгоритмы и методы исследований систем СГО по разработанным алгоритмам; результаты их практической реализации приведены в многочисленных таблицах.

Пятая глава посвящена вопросам, связанным с проведением отработочных испытаний агрегатов и систем гидрокомплекса ОК «Буран». Здесь перечислен весь объем автономных, комплексных и исследовательских испытаний. Показано, что для проведения комплексных испытаний было изготовлено шесть полноразмерных макетов, летающие лаборатории и летающий аналог ОК-ГЛИ и, кроме того, уникальные стенды ПРСО, КСШ (комплексный стенд шасси) и ПДСТ и многочисленное другое уникальное оборудование, причем многие экземпляры не имели аналогов в мире, например — комплексы тепловакуумных и трибологических испытаний [19].

На примере элементов гидрокомплекса, таких, как пневмогидроаккумуляторы баков гидросистем и пневмогидроаккумуляторы самих гидросистем, подробно рассмотрены методы проведения автономных испытаний. Приведены принципиальные гидравлические схемы испытательных стендов и оборудования для конкретного вида рассматриваемого испытания. Глава 5 содержит таблицы, в которых приведен перечень испытательного оборудования (табл. 5.1), основные режимы испытаний (табл. 5.2), графики, отражающие законы управления испытаниями, а также различные схемы и чертежи агрегатов гидрокомплекса и оборудования, участвующих в рассматриваемых испытаниях.

Приведенные в конце книги подробные выводы отражают наиболее важные результаты разработок и их практическое применение в процессе создания «Бурана», позволившие провести первый успешный полет и впервые в мире осуществить спуск и посадку в полностью автоматическом режиме.

В заключительной части подробно отражены наиболее важные результаты исследований и разработок агрегатов и систем гидро-комплекса ОК «Буран», свидетельствующие о высочайшем качественном уровне разработок космической и авиационной отраслей.

Авторы надеются, что книга будет полезна не только специалистам-разработчикам космической и авиационной техники, студентам технических вузов, но и широкому кругу читателей, интересующихся недавним славным прошлым нашей страны, не утративших чувство гордости за ее достижения в области космических исследований.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АИ	— автономные испытания
АИК	— автоматизированный испытательный комплекс
АО	— агрегатный отсек
АСОТР	— автономные средства системы обеспечения теплового режима
АСУП	— автоматизированная система управления полетом
БДУ	— блок двигателей управления
БДУ- Н	— блок двигателей управления носовой
БИИТ	— блок индикации ионного тока
БКС	— бортовая кабельная сеть
БК СУРЗ	— бортовой комплекс управления створками, радиаторами и замками
БКУ	— бортовой комплекс управления
БО	— бытовой отсек
БРТК	— бортовой радиотехнический комплекс
БС	— бортовая система
БТК	— бортовой телевизионный комплекс
БЦВК	— бортовой цифровой вычислительный комплекс
БЦВМ	— бортовая цифровая вычислительная машина
БЩ	— баланси́ровочный щиток
ВПП	— взлетно-посадочная полоса
ВСУ	— вспомогательная силовая установка
ГЛИ	— горизонтальные летные испытания
ГС	— гидравлическая система
ГК	— гидрокомплекс
ЖРД	— жидкостный ракетный двигатель
ЖСОТР	— жидкостная система обеспечения теплового режима
ИВК	— информационный вычислительный комплекс
ИСЗ	— искусственный спутник Земли
ИСЖО	— индивидуальные средства жизнеобеспечения
КА	— космический аппарат
КК	— космический корабль
КИ	— комплексные испытания
КО	— командный отсек
КСШ	— комплексный стенд шасси

КПЭО	— комплексная программа экспериментальной отработки
КТ	— ключевая точка
МК	— модуль кабины
МО	— математическое обеспечение
МРКК	— многоразовый ракетно-космический комплекс
МТКК	— многоразовый транспортно-космический корабль
МТКС	— многоразовая транспортно-космическая система
НАД	— накопления при атмосферном давлении
НКУ	— наземный комплекс управления
НЧФ	— носовая часть фюзеляжа
ОДУ	— объединенная двигательная установка
ОИ	— объект испытаний
ОК	— орбитальный корабль
ОПГ	— отсек полезного груза
ОС	— орбитальная ступень
ОТК	— отдел технического контроля
ПГ	— полезный груз
ПЗ	— представительство заказчика
ПМЛ	— программно-маршрутный лист
ПДСТ	— пилотажно-динамический стенд тренажер
ПО	— программное обеспечение
ПРСО	— полноразмерный стенд оборудования
ПТУ	— парашютно-тормозная установка
РН	— ракета-носитель
РСУ	— реактивная система управления
РТО	— радиационный теплообменник
СБИ	— система бортовых измерений
СЖО	— средства жизнеобеспечения
СМ	— стыковочный модуль
СНВП	— система наддува и вентиляции
СОИ	— система отображения информации
СОТР	— система обеспечения теплового режима
СТР	— система терморегулирования
СУ	— система управления
СУБС	— система управления бортовыми системами

СУД	— система управления движением
СЧФ	— средняя часть фюзеляжа
СЭП	— система электропитания
ТЗ	— техническое задание
ТЗП	— теплозащитное покрытие
ТК	— технический комплекс
ТМИ	— телеметрическая информация
ТПО	— типовая полетная операция
УД	— управляющий двигатель
ХЧФ	— хвостовая часть фюзеляжа
ЦУП	— центр управления полетами
ЭГК	— электрогидроклапан
ЭМ	— электромеханизмы
ЭО	— экспериментальная отработка
ЭПК	— электропневмоклапан
ЭХГ	— электрохимический генератор тока

ГЛАВА 1.

ОРБИТАЛЬНЫЙ КОРАБЛЬ «БУРАН»: СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1. ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТОК

Орбитальный корабль «Буран» — пилотируемый космический аппарат многоразового использования, предназначенный для проведения различных операций на орбите по обслуживанию, ремонту, дооснащению различных космических кораблей и орбитальных комплексов, а также для доставки на орбиту разнообразных грузов и экипажей и возвращения их на Землю.

Находящиеся на орбитах различные космические корабли и аппараты ограничены располагаемыми ресурсами по срокам их работы и запасам расходуемых материалов, и на любом из вышеперечисленных КА может произойти отказ в работе или авария, что потребует выведения на орбиту нового космического аппарата взамен отказавшего или, что более предпочтительно, ремонта корабля непосредственно на орбите с доставкой на него всего необходимого с земли каким-то другим транспортным средством.

Доставка грузов на орбиту требует значительно меньших затрат, чем изготовление и выведение на орбиту нового космического аппарата. До появления ОК «Буран» транспортные операции «Земля- орбита» и обратно выполнялись только специализированными космическими аппаратами. Для доставки и возвращения экипажей применялся пилотируемый космический корабль «Союз», а для доставки грузов, при весьма ограниченной возвращаемой массе — космический корабль «Прогресс». Модули, доставившие на орбиту оборудование, не могли вернуть его на землю. При таких условиях использование ОК «Буран» позволило бы решить многие проблемы по транспортировке на орбиту различных грузов до 30 тонн и обратно — до 20 тонн.

Кроме того, возвращение на землю многоразового космического корабля и посадка его на ВПП предполагает наличие суще-

ственных преимуществ по сравнению с другими типами невозвращаемых космических аппаратов, а именно:

- 1) прибытие на базу с оборудованием для обслуживания;
- 2) наличие необходимых условий посадки на ВПП;
- 3) отсутствие проблем с поиском и доставкой экипажей и грузов.

Аналогичные решения были приняты и для системы «Спейс Шаттл», но, в отличие от нее, ОК «Буран» может осуществлять беспилотные пуски и посадки, практически мало зависящие от погодных условий, тогда как «Спейс Шаттл» на это не рассчитан.

Проведение полета любого космического корабля предполагает наличие средств выведения его на орбиту, наземных средств подготовки, запуска и обеспечения полета. ОК «Буран» и его ракета-носитель (РН) образуют единый многоразовый ракетно-космический комплекс (МРКК), являющийся самостоятельной структурной единицей с логикой работы, необходимой для участка выведения, в конце которого начинается автономный полет, затем сход с орбиты, спуск и посадка.

Настоящая книга посвящена вопросам, связанным с разработкой гидрокомплекса ОК «Буран», обеспечивающего спуск и посадку корабля в самолетном режиме, но чтобы описание всей системы было понятным для читателя, рассмотрим здесь некоторые характеристики РН и других составных частей системы МРКК [14].

1.2. СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ МРКК

Ракета-носитель «Энергия» представляет собой двухступенчатую ракету с продольным делением ступеней и состоит из центрального ракетного блока (блок Ц) и четырех блоков (блоки А), двигатели которых работают с момента старта.

После отделения первой ступени выведение продолжается с помощью центрального блока Ц. Полезная нагрузка, выводимая РН на орбиту, устанавливается на центральном блоке.

Общая принципиальная схема РН приведена на рис. 1.1, а ее основные характеристики — в табл. 1.1.

Жидкостные ракетные двигатели используют чистые компоненты топлива (кислород-водород на блоке Ц). Установка четырех

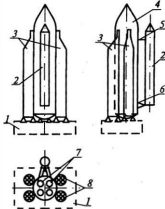


Рис. 1.1. Схема ракеты носителя:

- 1 — стартовый стыковочный блок; 2 — полезный груз (ПГ);
 3 — боковые блоки первой ступени (А); 4 — центральный блок (Ц);
 5 — передние узлы связи ПГ с РН; 6 — задние узлы связи;
 7 — двигатель центрального блока; 8 — двигатели боковых блоков

двигателей блока Ц и каждой камеры четырехкамерного двигателя блока А в карданных подвесках обеспечивает отклонение (с помощью рулевых машин) их осей от оси ракеты, что создает управляющие моменты по всем трем (тангаж, рысканье, крен) каналам управления.

Ракета-носитель вместе с полезным грузом, оснащенная необходимыми для полета системами, транспортируется в монтажно-заправочный комплекс (МЗК) и затем — на старт в горизонтальном положении по рельсовому пути, имеющему систему для перевода РН в вертикальное положение и установки в пусковое устройство.

Технический комплекс предназначен для сборки и различных видов испытаний орбитального корабля и ракеты-носителя в двух монтажно-испытательных корпусах и на площадке огневых, контрольных испытаний ВСУ систем ОК. Комплекс оснащен система-

Параметр	Значение или характеристика*
Стартовая масса МРКК, т в том числе масса ОК (полезного груза)	2400 105
Максимальная суммарная полезная мощность двигательных установок, развиваемая в полете, млн. л. с.	170
Вид топлива: блок Ц блок А	Кислород-водород Кислород-керосин
Габаритные размеры, м: <u>ракеты-носителя</u> : высота ширина <u>блока Ц</u> : длина диаметр <u>блока А</u> : длина диаметр	 60 18 58,1 7,7 38,3 3,9
Тяга двигателей, тс: общая блока Ц блока А	 4000/3500** (190,0/142,5)**х 4 806/640**
Удельный импульс двигателей, с: блока Ц (в пустоте) блока А	 454 336/308**
* Значения округлены в пределах возможных отклонений. ** В числителе — у земли, в знаменателе — в пустоте.	

ми обработки информации и необходимым технологическим оборудованием.

Монтажно-заправочный комплекс позволяет окончательно снаряжать МРКК; служит для заправки ОК «Буран» топливом и рас-

ходными материалами, для установок на ОК полезного груза, а также для проведения других, предполетных операций и послеполетного обслуживания.

Стартовый комплекс служит для предпусковой подготовки МРКК, включая заправку топливом систем ОК на спуске.

Универсальный комплекс стэнд-старт (УКСС) предназначен для проведения огневых испытаний ракеты-носителя и отдельных ракетных блоков; отличается от КС схемой отвода газа (лоток вместо газопроводов), конструкцией башни обслуживания и др.

Посадочный комплекс орбитального корабля (ПКОК) — специализированный аэродром, предназначенный для автоматической посадки.

Автоматизированная система управления полетом (АСУП) представляет собой совокупность взаимодействующих наземных и спутниковых средств по передаче информации между собой и ОК, включая командную, для управления полетом ОК.

1.2.1. МРКК и МТКС «Спейс-Шаттл»

После краткого рассмотрения составных частей МРКК проведем сравнительный анализ системы МРКК и американской системы МТКС «Спейс Шаттл», создание которой началось много раньше.

Разработка МТКС предполагала постоянное присутствие США в космосе и замену практически всех одноразовых РН, в том числе и военных, на МТКС, поэтому была принята следующая схема [14]: многоразовая орбитальная ступень (ОС) 100-кратного применения, имеющая облик самолета, с двигателями ЖРД для выведения на орбиту и посадки на аэродром; одноразовый подвесной топливный отсек (ПТО), питающий ЖРД, и два твердотопливных ускорителя (ТТУ). В МТКС ТТУ являются ракетными блоками первой ступени; ОС и ПТО образуют вторую ступень, причем довыведение на орбиту производится средствами ОС после отделения ПТО; система управления единая и размешена на ОС.

Анализ освоения орбит полетов к дальним планетам показал, что будут востребованы транспортные массы до 100 тонн и более, поэтому не рационально было бы использовать новую систему для выведения на орбиту 30 тонн полезного груза ОК, учитывая, что

одноразовые РН еще надолго останутся экономически выгодными при прогнозируемых темпах пусков. Поэтому была выбрана схема МРКК, в которой, в отличие от МКТС маршевые двигатели участка выведения не устанавливались, предусмотрен ракетный блок второй ступени вместо ПТО.

РН, как составная часть МРКК, продемонстрировала возможности применения как РН тяжелого класса в пуске 15 мая 1988 г. и получила название «Энергия», после чего для МРКК было принято название «Энергия- Буран».

1.3. ОБЛИК ОК «БУРАН». ЕГО КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Выбор проектных параметров ОК основан на анализе полетных задач и синтезируется на основе оптимального выбора параметров, обеспечивающих выполнение программ полетов в беспилотном (в начале) и пилотируемом режимах.

Технические требования к ОК, определяющие его облик, конструкцию и компоновку, можно свести к следующим [19]:

- транспортировка в грузовом отсеке ОК крупногабаритных грузов с разгрузкой их из грузового отсека либо погрузка в отсек на орбите и аэродроме;
- возможность стыковки с другими космическими аппаратами и разгрузка на их борт доставленных крупногабаритных грузов;
- удобное размещение экипажа (два-четыре человека) и до шести пассажиров;
- обеспечение эффективной работы экипажа и пассажиров в отсеках ОК, возможность их перехода в пристыкованный космический аппарат либо орбитальную станцию или выход в открытый космос;
- многократность применения при минимальном времени межполетного обслуживания.

Анализ технических требований к ОК и особенностей его эксплуатации позволил выделить основные этапы разработки его облика и компоновки:

- создание аэродинамической компоновки, т.е. определение формы, общего вида и т.д.;

- разработка состава и взаиморасположения агрегатов и систем в отсеках ОК;
- выбор конструктивных размеров отсеков исходя из их функционального назначения.

Основным, решающим фактором, определяющим облик ОК, являлось требование его спуска и посадки на ВПП аэродрома «по-самолетному». Однако, поскольку проектируемый ОК является еще и грузопассажирским, общую компоновку корабля во многом определяет полезный груз и его установка. Полезные грузы космических аппаратов тяготеют к цилиндрическим формам, которые определяют их размещение в головных блоках РН, и ограничены по размерам при транспортировке и изготовлении на конкретном производстве. При жестко заданном диаметре размер груза зависит только от длины. Для ОК «Буран» был принят груз цилиндрической формы диаметром 4,15 м и длиной 15 м. Для размещения груза требовался отсек длиной около 18 м и диаметром около 5 м, при этом были учтены потребные размеры для выгрузки (погрузки) в ОПГ как агрегатов ОК, так и приспособлений для работы с ПГ. Для выгрузки (погрузки) ПГ на орбите и для наземной подготовки была принята схема с раскрывающимися на две стороны во всю длину отсека створками, обеспечивающими свободный доступ к механизмам ОПГ и размещенным в нем ПГ. Задачами спуска являются: торможение ОК от орбитальной до посадочной скорости, в процессе которого должны обеспечиваться значения перегрузок не выше допустимых; защита от аэродинамического нагрева и посадка ОК в заданном районе.

Решение этих задач требует повышения аэродинамического качества (отношение подъемной силы к силе сопротивления). С увеличением аэродинамического качества происходит [14, 19] снижение перегрузки, т.е. при угле входа в атмосферу около 2° и $K = 0$, перегрузка равна примерно 9; при $K = 0,5$ она падает до 2,5, поэтому для управления ОК при спуске и посадке экипажем ОК в достаточно комфортных условиях аэродинамическое качество должно быть 0,5—1,0 и выше.

Основу компоновочной схемы ОК «Буран» определило размещение в его центре отсека полезного груза, расположенного в наибольшей по размерам средней части фюзеляжа (СЧФ). На СЧФ

установлены консоли крыльев. Кабина размещена в носовой части фюзеляжа (НЧФ). Объединенная двигательная установка (ОДУ) находится в хвостовой части фюзеляжа (ХЧФ), а часть управляющих двигателей (УД) для обеспечения параллельно-поступательного движения ОК при сближении и стыковке — в НЧФ.

По аэродинамической схеме «Буран» — это самолет-бесхвостка, с крылом малого удлинения и большой стреловидности, с наплывами от передней кромки крыла к фюзеляжу, вертикальным оперением и балансировочным щитком, установленным на хвостовой части фюзеляжа.

Требование по балансировке во всем диапазоне скоростей полета обеспечено внешними обводами ОК и выдерживанием положения центра масс на всех этапах полета.

Для обеспечения управления крылья ОК снабжены элевонами, а вертикальное оперение — расходящимся рулем направления, с одновременным выполнением функции воздушного тормоза.

При определении геометрических размеров облика фюзеляжа решались задачи по обеспечению доставки (возврата) крупногабаритных грузов.

Совместное выполнение требований по полету, посадке и выдерживанию на любом этапе полета заданного центра масс определило место расположения грузового отсека ОК в средней части фюзеляжа, а требования к ОК как к планеру определили облик и форму носовой части фюзеляжа и остекления фонаря кабины.

В хвостовой части фюзеляжа с вертикальным оперением размещена объединенная двигательная установка орбитального маневрирования.

Вышеперечисленные факторы в принципе определили размеры и форму поперечных сечений фюзеляжа, абсолютные толщины крыльев, с учетом размещения в них основных стоек шасси, вертикального оперения и балансировочного щитка, с достаточно точной оценкой взлетной и посадочной масс ОК.

При этом параллельно были проведены работы по определению состава и характеристик бортовых систем смежными предприятиями-разработчиками, а также массовые и геометрические параметры систем.

Кроме того, при определении размещения в отсеках бортовых систем ОК различных агрегатов и приборов, а также прокладке трасс связывающих их электрических кабелей и трубопроводов были заложены основы технологии межполетного обслуживания и ремонтпригодности.

Наиболее подробно вопросы, связанные с решением задач по конструкции планера и техническими требованиями к его аэродинамическому облику, изложены в [14, гл. I] и [19, с. 29—43].

1.3.1. Конструкция планера

Опишем кратко основы конструкции планера, место расположения и основные характеристики его бортовых систем, обеспечивающих полет на всех этапах эксплуатации.

В конструкцию планера ОК «Буран» [14] входят:

— герметичный модуль кабины экипажа длиной 5400 мм, шириной более 5000 мм, высотой 5400 мм, представляющий собой цельнометаллический, сварной отсек, в котором размещены места экипажа, пассажиров, аппаратура системы управления (СУ) и оборудование системы жизнеобеспечения (СЖО). Корпус модуля кабины состоит из оболочки, шести шпангоутов, верхнего и нижнего полов. В местах установки крышек люков и иллюминаторов панели из плит алюминиевого сплава подкреплены специальными окантовками, а по границам кривизны корпуса — балками.

Весь объем кабины разделен (по вертикальному размеру) на три отсека: *командный*, в котором находится экипаж и его рабочие места; *бытовой*, где находятся пассажиры и приборы СУ, СЖО, шлюзовая камера; *агрегатный* с вспомогательным оборудованием. Все отсеки сообщаются между собой через специальные люки верхнего и нижнего полов;

— *носовая часть фюзеляжа* длиной 9000 мм, шириной 5500 мм и высотой 6000 мм, предназначенная для установки модуля кабины, носового блока двигательных установок и состоящая из носового кока, верхней и нижней секций, каркаса блока двигателей управления (носового) и входного люка. Носовой кок — обтекатель и пять секций — выполнен из углерод-углеродного композиционного материала (т.к. подвергается высоким температурам при входе ОК в плотные слои атмосферы).

Поперечная силовая конструкция верхней части НЧФ состоит из семи шпангоутов. В каркасе фонаря имеется шесть передних иллюминаторов и два люка для катапультирования.

Нижняя секция НЧФ состоит из 15 шпангоутов с антеннами систем навигации и бортовым радиотехническим комплексом. С левой стороны НЧФ расположен входной люк, открываемый наружу;

— **средняя часть фюзеляжа** длиной 18500 мм, шириной 6000 мм и высотой 5500 мм, представляющая собой отсек полезного груза со створками для погрузки (выгрузки) груза, нишу передней опоры шасси и узел связи с РН. Створки ОПГ являются верхней частью фюзеляжа и выполнены из двух (по левому и правому бортам) частей, состоящих из четырех секций;

— **хвостовая часть фюзеляжа** длиной 3600 мм, шириной 5500 мм и высотой 6000 мм, в которой размещены: оборудование бортовых систем; три вспомогательные СУ, обеспечивающие гидравлической энергией гидравлические системы, системы рулевых приводов, управляющих аэродинамическими поверхностями, остроуправленной антенны и объединенной двигательной установки (ОДУ). Снаружи имеются узлы крепления консолей крыльев, вертикального оперения парашютно-тормозной установки (ПТУ), узлы связи с РН и узел крепления балансировочного щитка;

— **балансировочный щиток** с максимальным углом отклонения 30° . Совместно с элевонами обеспечивает управление орбитальным кораблем по тангажу, в плане имеет трапециевидную форму с размерами $5500 \times 5000 \times 2000$ мм, в поперечном сечении — клин и состоит из неподвижной и подвижной частей. При номинальном угле отклонения нижняя часть балансировочного щитка является продолжением контура фюзеляжа.

Две консоли, центроплан и два наплыва создают крыло ОК, площадь которого (имеется в виду основная трапеция) составляет порядка 250 м^2 при размахе 24 м. Функцию центроплана выполняет нижняя часть фюзеляжа, а наплывы при этом конструктивно отнесены к СЧФ;

— **элевонные щитки**. Состоят из 16 секций паяной сотовой конструкции из титана. Внутри них установлен профиль, по которому движется каретка с роликами, соединенная через систему кинема-

тических тяг с элевонем. Сам элевон крыла состоит из двух секций (внутренней и внешней), подвешенных на трех узлах к хвостовой части крыла. Каждая секция элевона имеет свой автономный гидравлический привод, размещенный в крыле и обеспечивающий отклонение элевона на 35° вверх и на 20° вниз;

— **вертикальное оперение** площадью 39 м^2 . Как аэродинамическая поверхность, обеспечивает управление и устойчивость ОК по курсу и состоит из руля площадью $10,5 \text{ м}^2$.

Руль, при спуске ОК для его балансировки и снижения скорости, выполнен из двух частей, каждая из которых состоит из двух створок. Привод руля обеспечивает его отклонение в режиме управления по курсу на $\pm 23^\circ$ и независимое от этого раскрытие створок каждой части в режиме воздушного тормоза до $\pm 43,5^\circ$;

— **ниши основных стоек шасси**, представляющие собой прямоугольные отсеки. Элементы конструкции крыла в месте расположения ниши усилены специальными балками и окантовкой, створка по периметру крепится восемью замками.

Наиболее полно вопросы, связанные с описанием конструкции планера ОК «Буря», принципами его компоновки, созданием теплозащитных покрытий, а также их технические характеристики изложены в [14, 19].

Разработанная на НПО «Молния» полная математическая модель обводов планера в целом обеспечила выпуск рабочей документации, а внедрение ее по всей кооперации заводов-изготовителей агрегатов и элементов каркаса планера позволило во многих случаях отказаться от плазово-шаблонной увязки.

Проведенное по данной технологии изготовление около 40000 элементов теплозащитного покрытия полностью подтвердило его эффективность, сократило сроки изготовления и повысило его качество (следует отметить, что каждая из 40000 плиток имеет разную форму в плане, плитки различаются кривизной — наружной и внутренней, углами наклона, видом боковых поверхностей, материалом, особенностями раскроя и т.п.).

В процессе определения компоновки, конструктивных размеров, массы ОК и ПГ, диапазона обслуживаемых орбит и других проектных параметров параллельно велись работы по созданию

различных систем ОК «Буран», которые должны обеспечить практически две основные задачи:

1) *многократное использование*, определившее принципиальный подход к построению ОК как летательного аппарата самолетного типа;

2) *многоцелевое использование*, определившее построение ОК как универсального летательного аппарата, предназначенного для доставки различных грузов на орбиту Земли, проведения различных маневров в космосе, сближения и стыковки с другими космическими аппаратами и орбитальными станциями и т.п.

В процессе проектирования ОК «Буран» с учетом его предназначения были определены технические требования принципиального характера к различным системам, условно разделенным на системы планера и бортовые системы. Рассмотрим кратко их назначение и состав.

1.4. СИСТЕМЫ ПЛАНЕРА

Системы планера ОК «Буран» аналогичны имеющимся в авиационной и ракетной технике, однако имеют ряд особенностей, связанных с пребыванием ОК на орбите, высокими требованиями по надежности, безопасности и весьма жесткими по массе.

Системы планера «Буран» включают в себя:

- вспомогательную силовую установку (ВСУ);
- гидравлический комплекс (ГК);
- посадочные устройства;
- систему распределения и коммутации;
- систему управления створками, радиаторами и замками;
- систему наддува и вентиляции.

В состав бортовых систем «Бурана» входят:

- система обеспечения электроэнергетики;
- система управления;
- система работ с полезными грузами;
- система безопасности и жизнедеятельности экипажа и пассажиров (если они есть);
- бортовой радиотехнический комплекс;
- бортовой телевизионный комплекс;

- система бортовых измерений (СБИ);
- система пожаровзрывопредупреждения.

Рассмотрим кратко назначение, принципы действия и состав вышеперечисленных систем. (Наиболее полное описание см. в [12, 14, 19].)

1.4.1. Вспомогательная силовая установка

Вспомогательная силовая установка предназначена для обеспечения энергией систем гидрокомплекса на различных этапах полета ОК «Буран»:

- предстартовая подготовка (проверочный режим);
- выведение на орбиту (дежурный режим);
- проверка работоспособности каналов гидросистем и ВСУ перед выдачей тормозного импульса на орбите;
- спуск и посадка, до момента установки под колеса шасси тормозных колодок.

Конструктивная схема ВСУ «Бурана» принципиально отличается от принятой на «Спейс-Шаттле», в котором рассредоточение агрегатов по ХЧФ оказалось не столь удачным,

Для обеспечения надежности на ОК «Буран» установлены три ВСУ — по одному на каждый из каналов гидросистем, которые гарантируют работу систем управления аэродинамическими поверхностями даже при двух отказах.

При выборе принципиальной схемы подачи топлива, обеспечивающей надежность и безопасность, наиболее предпочтительным был признан вариант с вытеснительной подачей. (В «Спейс-Шаттле» применена принудительная система подачи, обеспечивающая меньшие расходы топлива, но при низком уровне надежности и безопасности.) Каждая ВСУ состоит из двигателя, представляющего собой газотурбинную установку, использующую в качестве топлива гидрозин с разложением его в каталитическом реакторе. Гидрозин поступает в двигатель на регулятор, поддерживающий заданную частоту вращения выходного вала насоса переменной подачи, питающего системы ГК посредством двухступенчатого редуктора, с помощью которого частота вращения турбины 55000 об./мин снижается до 4500 об./ мин на выходном валу насоса НП-113.

Для нормального функционирования предусмотрена обеспечивающая смазку и охлаждение редуктора и опор турбины система циркуляционного типа, а также теплообменник, установленный в гидросистеме для охлаждения масла .

Топливный блок состоит из топливного бака, системы наддува в двигатель, магистралей топливоподачи и дренажа с клапаном заправки (слива). Конструктивно все системы топливного блока выполнены в виде единого модуля, закрытого герметичным кожухом, предотвращающим утечку топлива .

При работе ВСУ газообразный азот под давлением 32 Мпа через блок фильтров, пусковой электропневмоклапан и дроссель-ограничитель расхода азота поступает в газовый редуктор, снижающий давление до 3,5 Мпа, через блок обратных клапанов в топливный бак.

Схема ВСУ и топливного блока приведена в [14, рис. 3.9—3.10], а схема установки ВСУ на борту ОК — в [19].

Из топливного бака топливо через фильтр и электрогидроклапан (ЭКГ) поступает в двигатель, обеспечивая на его входе давление топлива $3,5 \pm 2$ Мпа и расход 0,02 ... 0,16 кг/с в зависимости от режима работы ВСУ. В баке , для предотвращения повышения давления выше допустимого, предусмотрен предохранительный клапан и разрушающаяся мембрана с трубкой сброса давления за борт ОК.

Проблема пожаровзрывобезопасности была решена отработкой имитации пролива гидрозина функционирующей ВСУ с электроподжигом искрой, а затем исследованием условий возникновения факела на выходе из патрубка ВСУ, что позволило

- провести дополнительные конструкторские мероприятия (сварные стыки и изолирующий кожух);
- ввести продувку кожуха газообразным азотом при спуске и посадке;
- разработать метод термовакуумного циклического воздействия на внутренние полости ВСУ с целью удаления остатков топлива после полета;
- доработать основные требования инструкций по работе с ВСУ, гидрозином и объектами котлонадзора.

В целом проведенные разработки вполне могут найти применение при создании ракетно-космических систем, различных летательных и глубоководных аппаратов, а также других изделий и систем, требующих надежных и компактных источников энергии.

1.4.2. Гидрокомплекс ОК «Буран»

Гидрокомплекс ОК «Буран» предназначен для управления аэродинамическими поверхностями, обеспечивая спуск и посадку ОК на ВПП.

Схема работы гидрокомплекса полностью соответствует этапам работы ВСУ, перечисленным выше. ГК включает в себя:

- три независимых канала гидросистем с приводом от ВСУ;
- гидравлические приводы управления аэродинамическими поверхностями (элевонами, рулем направления, воздушным тормозом и балансирующим щитком);
- гидравлическую систему управления левой и правой стойками шасси (ЛОСШ и ПОСШ);
- гидравлическую систему управления передней стойкой шасси (СУС);
- гидравлическую систему управления тормозами.

Исполнительные механизмы вышеперечисленных систем развивают весьма значительные усилия при их высоком быстродействии. Наиболее оптимальной системой, которая может выполнять заданные для управления ОК «Буран» функции, при минимальности веса и объема, является гидравлическая система [15].

Синтез основных параметров и создание структурных схем гидросистем и приводов — одна из основных проблем, решаемых при их разработке, в основе которой задачи:

- выбора количества независимых каналов гидросистем, определяемого минимальной степенью резервирования ее элементов и зависящего от требований обеспечения полетной безопасности ОК;
- выбора количества камер (каналов), управляющих аэродинамическими поверхностями гидравлических приводов, степени их резервирования по управлению и принципу действия;
- разработки логики связи между каналами гидросистем и каналами приводов при обеспечении минимальности веса и объема, а также требуемой надежности и безопасности.

При решении первой задачи в качестве аналогов были рассмотрены тяжелые самолеты (в частности ТУ-144), где в основном применяются четырехканальные гидросистемы с четырехкамерными приводами управления аэродинамическими поверхностями, причем каждая камера привода управления подсоединена к одному из четырех каналов гидросистемы.

При двух отказах по гидропитанию рабочими остаются две гидросистемы из четырех, что приводит к уменьшению располагаемого шарнирного момента на 50% от максимального, и тогда самолет может перейти на другой режим полета с меньшими значениями шарнирных моментов на рулевых поверхностях, в то время как для ОК такое положение недопустимо. Кроме того, применение четырехканальной схемы потребовало бы удвоения мощности и как следствие — значительного увеличения массы ОК.

Таким образом, гидрокомплекс ОК должен быть трехканальным по гидропитанию приводов и обеспечивать требуемые полетные характеристики при двух отказах.

Как отмечалось ранее, четырехканальная система должна обеспечивать приемлемые для полета характеристики рулевых поверхностей при двух отказах по гидропотреблению, т.е. мощность такой системы питания должна быть не менее 200% от номинала. Следовательно, мощность трехканальной системы должна составлять 300% от номинала.

Поскольку мощность одного и того же ОК в 1,5 раза меньше у четырехканальной системы гидропитания, чем у трехканальной, ОК с данной системой, казалось бы, должен быть легче, так как масса пропорциональна мощности. Однако это не так. ОК «Буран» совершает бездвигательный спуск и посадку, причем насосы гидросистем приводятся во вращение ВСУ, масса которой, как известно, не зависит от развиваемой в заданном диапазоне нагрузок мощности.

Поэтому после проведения всестороннего анализа различных вариантов структурных схем гидрокомплекса, а также с учетом того, что применение четвертой ВСУ приведет к значительному увеличению массы гидрокомплекса, была принята трехканальная схема и предложена схема гидропривода с однокамерным цилиндром и переключателем каналов гидросистем, обеспечивающая постоянство

шарнирного момента при любом числе работающих каналов гидрокомплекса.

Наиболее подробно работа переключателя каналов гидросистем питания будет рассмотрена в гл. 3.

Каждый из трех каналов гидравлических систем ОК включает в себя различные агрегаты для создания гидравлической мощности, ее регулирования, контроля, распределения, обеспечения фильтрации, заданного диапазона температуры рабочей жидкости на всех этапах эксплуатации, а также для непосредственного использования мощности силовыми агрегатами и системами, которые функционально объединены в гидрокомплекс.

Каждый канал гидравлической системы состоит из насоса переменной подачи с регулятором по давлению и приводом от ВСУ, бака рабочей жидкости с пневмогидроаккумулятором поддавливания, модуля подготовки рабочей жидкости с системным пневмогидроаккумулятором, теплообменника, фильтров тонкой и грубой очистки рабочей жидкости в линиях нагнетания и слива соответственно, измерительной и контрольной аппаратуры. В качестве рабочей жидкости используется кремнийорганическая жидкость 7-50с-3. При рабочем давлении в системе 20,5 МПа обеспечивается расход рабочей жидкости 240 л/мин, в диапазоне температур от -60 до $+175^{\circ}\text{C}$ [14]. Спуск и посадка на ВПП ОК «Бурани» могут быть осуществлены при отказе двух (из трех) каналов гидросистем.

Для охлаждения рабочей жидкости, разогреваемой при спуске и посадке интенсивной работой приводов управления аэродинамическими поверхностями и от конструкции самого орбитального корабля, в каждом канале гидросистемы установлены водяные охлаждающие теплообменники испарительного типа.

На орбитальном участке конструкция орбитального корабля сильно охлаждается. Поэтому для поддержания гидрокомплекса в рабочем состоянии применяется не только электрообогрев и теплоизоляция агрегатов и систем гидрокомплекса, но и прокачка через них теплой, подогретой в специальных теплообменниках, использующих тепло приборных отсеков, рабочей жидкости насосами малой мощности шестеренчатого типа с приводом от электродвигателя, установленными в каждом канале ГС.

Рассмотрим далее функционирование гидрокомплекса и его систем на всех этапах эксплуатации ОК «Буран», т.е. от предполетной подготовки до завершения полета, затем спуска, посадки и останова на ВПП.

Гидрокомплекс ОК начинает работать перед стартом и работает после запуска 200 с, что должно обеспечить спуск и посадку ОК в случае возникновения аварийных ситуаций. В последующем полете на орбите гидрокомплекс работает в режиме системы гидрообогрева, т.е. прокачивая рабочую жидкость насосами малой мощности через агрегаты и системы гидрокомплекса и поддерживая тем самым необходимый тепловой режим.

Вопросам работы гидрокомплекса на участке орбитального полета посвящена глава 4 настоящей книги.

Непосредственно перед сходом с орбиты гидрокомплекс включается вновь для проверки на функционирование всех агрегатов и систем, затем ВСУ отключаются.

Полет ОК в атмосфере разделен на два участка: спуск и посадка. Условная граница между участками 20 км.

Однако, учитывая условия аэродинамики и возможности управления траекторией полета, можно выделить три участка, наиболее общих практически для всех воздушно-космических аппаратов.

Первый участок — участок гиперзвукового планирования на постоянном угле атаки, соответствующий необходимому значению аэродинамического качества при $M = 28 \dots 10$.

Второй участок — участок перехода от гиперзвукового диапазона скоростей и углов атаки к сверхзвуковому диапазону при $M = 10 \dots 2$. На этом участке снимаются ограничения по теплозащите, а изменение угла атаки происходит по программе, обеспечивающей маневренность и управляемость ОК.

Третий участок — заключительный, соответствует полету в области авиации, т.е. на сверх- и дозвуковых скоростях и высотах ниже 20 км.

Проведенный анализ геометрии крыла, а также носовой и хвостовой частей фюзеляжа позволил выбрать необходимые нулевые моменты тангажа и положения центра давления на гиперзвуковых скоростях, при которых обеспечиваются требования, связанные с

аэродинамической устойчивостью планера и моментной эффективностью управляющих аэродинамических поверхностей.

Изменение момента тангажа осуществляется путем отклонения элевонов, балансировочного щитка и воздушного тормоза, что дает возможность их использования как единого органа, перераспределяющего вклад каждого, с учетом его функционального назначения и влияния на другие аэродинамические характеристики. На гиперзвуковых скоростях такое управление особенно эффективно, так как здесь аэродинамические силы пропорциональны квадрату местного угла атаки поверхности и от положения каждой из вышеперечисленных аэродинамических поверхностей зависит не только ее моментная эффективность (градиент по углу отклонения), но и устойчивость планера (градиент момента тангажа по углу атаки). То есть элевоны служат органами управления и стабилизации ОК по тангажу и крену, причем при решении задач балансировки они должны быть минимально загружены.

Предназначенный для обеспечения оптимального положения элевонов балансировочный щиток на величину аэродинамического качества практически не влияет.

В меньшей степени для продольной балансировки используется раскрытие воздушного тормоза. Более существенно его влияние на путевую, статическую устойчивость по углу скольжения и моментную эффективность руля направления.

Все вышеизложенное позволяет заметить, что на больших гиперзвуковых и сверхзвуковых скоростях элевоны используются только для стабилизации.

При полете на дозвуковых режимах ($M = 0,8$) воздушный тормоз используется только для управления скоростью, а продольная балансировка по моментам тангажа при заданных системой управления программных положениях элевонов обеспечивается отклонением балансировочного щитка.

Подробно вопросы маневренности, аэродинамики и управляемости ОК «Буран» на всех трех участках полета и посадки отражены в [14, 19].

Аэродинамическая компоновка ОК «Буран» имеет, кроме обычных для самолетов аэродинамических поверхностей управления

(элевонов и руля направления), еще и специальные — балансировочный шток и воздушный тормоз, назначение которых для орбитального корабля приведено выше. Причем руль направления и воздушный тормоз объединены в один привод, состоящий из двух створок, которые в режиме руля направления соединены вместе, а в режиме воздушного тормоза расходятся в вертикальной плоскости.

Основными потребителями гидравлической энергии в гидрокомплексе являются рулевые системы управления аэродинамическими поверхностями. Их всего шесть:

- рулевые системы, управляющие концевыми секциями элевонов (PC1) в количестве двух;
- рулевые системы управления корневыми секциями элевонов (PC2) — также в количестве двух;
- рулевая система управления рулем направления и воздушным тормозом (PC3);
- рулевая система управления балансировочным штоком (PC4).

Рулевые системы корневых и концевых секций элевонов выполнены по одинаковой принципиальной гидравлической схеме и представляют собой следящие приводы поступательного типа с силовым золотником, управляемым гидроусилителями типа «сопло-заслонка», соединенные с гидросистемами через гидравлический переключатель, который подключает к приводу один из исправных каналов гидросистем, чем обеспечивается постоянство развиваемого усилия на выходе приводов вне зависимости от количества исправных каналов гидросистем гидрокомплекса. Четырехканальная управляющая часть приводов работает также от одного канала ГС через тот же переключатель.

Принципиальная гидравлическая схема приводов концевых и корневых секций элевонов приведена на рис. 1.2.

Здесь обозначено: $BP_1 \dots BP_3$ — сигнализатор давления; $KO_2 \dots KO_7$ — гидроклапан обратный; $KO_1 \dots KO_7$ — гидроклапан обратный, $KP_1 \dots KP_2$ — гидроклапан прокачки; KP — гидроклапан разности давлений; $D_1 \dots D_4$ — гидродвигатели каналов рулевой машинки; P_1 — клапан переключения гидропитания; $Ц$ — гидроцилиндр; $RP_1 \dots RP_2$ — датчик обратной связи гидроцилиндра; $B_1 \dots B_4 \dots$ —

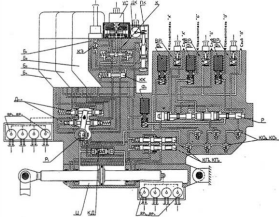


Рис. 1.2. Гидравлическая принципиальная схема рулевых систем управления эскаватором

электрогидравлический блок рулевой машины; УС — усилитель электрогидравлический; КЭ — клапан электрогидравлический; КК — клапан кольцевания; КО — гидроклапан обратный; К — гидроклапан коррекции; ПК — поршень коррекции; ДК — датчик коррекции; $\Phi_1 \dots \Phi_3$ — фильтры рабочей жидкости на входе в привод.

Следует особо отметить, что постоянство развиваемого шарнирного момента достигается небольшим диапазоном рабочего давления на входе в привода, и, естественно, за счет уменьшения скорости перемещения рулевых поверхностей, чем и обусловлен критерий отказа каналов гидросистем по давлению, равный 186 кгс/см^2 , что соответствует давлению 175 кгс/см^2 на входе в рулевые системы. При давлении на входе в РС, меньшем 175 кгс/см^2 , требуемые по ТЗ характеристики разработчиком не гарантируются.

Ранее отмечалось, что и силовой золотник, и четырехканальная управляющая часть рулевых систем РС₁ и РС₂ получают гидроснабжение от гидросистем через гидравлический переключатель каналов, являющийся частью конструкции данных приводов, который подключает к рулевым системам исправный канал гидросистемы вместо отказавшего.

Следует отметить, что все рулевые системы работают по такой же схеме — через такой же переключатель, кроме рулевой системы балансировочного щитка, где управляющие клапаны привода установлены каждый в своем канале гидросистемы.

Учитывая, что переключатель каналов является важнейшим элементом рулевых систем, от безотказной работы которого зависит работа всего гидрокомплекса, была проведена огромная работа по доводке этого элемента. В результате большого числа проектно-конструкторских и экспериментальных работ были решены многие проблемы, в том числе:

- разработан переключатель каналов на большие расходы рабочей жидкости с очень малыми перетечками между каналами как при работающем гидрокомплексе, так и при орбитальном полете;
- обеспечена высокая надежность работы рулевых систем, исключающая разгерметизацию привода за переключателем.

Наиболее подробно вопросы функционирования, принципиальная схема, принципы и методы построения моделирующих ал-

горитмов, а также описание работы гидравлического переключателя рассмотрены в гл. 2.

Привод руля направления- воздушного тормоза (РН-ВТ) выполнен в виде единого агрегата, имеющего два канала: руля направления и воздушного тормоза. Привод РН-ВТ следящий, дроссельного регулирования вращательного типа. Каждый канал привода приводится во вращение от трех гидромоторов, подключенных через силовые золотники к каналам гидросистем. Скорости вращения гидромоторов складываются на двух дифференциальных редукторах, обеспечивающих на выходе постоянный момент независимо от числа подключенных каналов ГС. Затем вращение передается на суммирующий редуктор, где движения руля направления и воздушного тормоза складываются и преобразуются в перемещения створка аэродинамических поверхностей через специальные силовые редукторы, которые одновременно являются элементами крепления поверхностей к вертикальному оперению и фюзеляжу. Четырехканальная часть управления приводов работает аналогично управляющей части привода элевонов, через переключатель каналов ГС.

Принципиальная гидравлическая схема рулевой системы РСЗ (РН-ВТ) приведена на рис. 1.3. Здесь обозначено:

PM1 ... PM4 — рулевая машинка канала руля направления;

PM5...PM8 — рулевая машинка канала воздушного тормоза;

BP1 ... BP3 — блоки распределения канала руля направления;

BP4...BP6 — блоки распределения канала воздушного тормоза;

М — гидромотор;

Р — силовой золотник;

УС — электрогидравлический усилитель;

Ф — фильтр рабочей жидкости;

СТ — стопор;

Т — тормоз;

МТ — муфта тормозная;

КЭ — клапан электромагнитный;

КВк — клапан включения;

КД1 — клапан разности давлений;

КД2 — клапан прокачки для прокачки рулевой системы на участке орбитального полета;

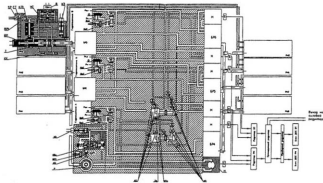


Рис. 1.3. Принципиальная гидравлическая схема привода руля направления—воздушного тормоза

КК — клапан кольцевания;
КО — клапан обратный;
КПр — клапан переключения каналов ГС;
ДР — дроссель;
ВР1...ВР2 — сигнализаторы давления;
РР — датчик обратной связи;
SP — микропереключатель;
В — преобразователь электромеханический;
ДОС РН и ДОС ВТ — блоки датчиков обратной связи по каналам руля направления и воздушного тормоза соответственно;
 P_H , $P_{сл}$ — давление нагнетания и давление слива соответственно.

Релейно-следящий привод балансировочного щитка — вращательного типа; силовая часть аналогична приводу руля направления-воздушного тормоза, но управляющие клапаны установлены каждый в своем канале гидросистемы. На выходе привода балансировочного щитка установлены силовые редукторы, выходные элементы которых служат и узлами крепления аэродинамических поверхностей к фюзеляжу.

Принципиальная гидравлическая схема рулевой системы управления балансировочным щитком приведена на рис. 1.4. Здесь:

КВкЭ — клапан включения электромагнитный;
КВк — клапан включения привода по каждому из каналов гидросистем;
КП — клапан прокачки;
УС (ЭГУ) — электрогидравлический усилитель;
ГМ — гидромотор;
ГТ — тормоз гидравлический;
КР — клапан реверса;
Ф — фильтр рабочей жидкости;
ДНВ — датчик направления вращения;
ДОС — датчик обратной связи.

Как известно, основными потребителями гидравлической энергии являются рулевые системы управления аэродинамическими поверхностями. Для снижения расхода рабочей жидкости, потребляемой приводами, введено ограничение скорости их выходных звеньев по градиенту нарастания входного сигнала от системы управ-

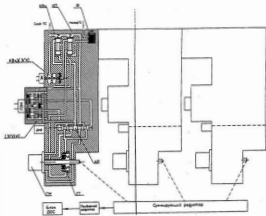


Рис. 1.4. Принципиальная схема привода балансирующего штыря

ления. Поэтому во всем диапазоне малых, средних и помогающих нагрузок скорости приводов постоянны и начинают снижаться только при больших нагрузках. Причем ограничение по скорости меняется в зависимости от числа исправных каналов гидросистем. При безотказной ситуации либо при отказе одного из каналов ГС ограничение скорости приводов остается постоянным, а при отказе двух каналов скорость снижается до 60% от скорости при исправных каналах гидросистем.

Как отмечалось, постоянство шарнирных моментов на выходе приводов предполагает постоянство давления на их входе, которое может быть нарушено только при превышении требуемого расхода над располагаемым. Поэтому для сохранения постоянства давлений на входе в приводы, и, естественно, шарнирных моментов, в систему управления был введен специальный алгоритм распределения скоростей выходных звеньев приводов, использующий приоритет на функционирование аэродинамических поверхностей, соответствующий трем состояниям гидрокомплекса: без отказов ГС, один отказ ГС, два отказа ГС.

Сам механизм работы приоритета построен следующим образом. В каждый момент времени бортовая вычислительная машина системы управления (БЦВМ СУ) рассчитывает требуемую скорость движения выходных звеньев приводов и расход рабочей жидкости, так как он практически прямо пропорционален скорости. Если расход превышает располагаемый, то управляющий сигнал подается на приводы в порядке значимости того или иного органа управления аэродинамической поверхностью.

Первым рассчитывается расход, требуемый на перемещение элевонів, и разность между располагаемым и требуемым расходами. Если она положительна, БЦВМ СУ рассчитывает располагаемую скорость руля направления, воздушного тормоза и балансировочного щитка. Те приводы, для которых не хватает расхода, отработывают свои скорости на следующих тактах работы СУ.

При отказе двух ГС гидрокомплекса располагаемые скорости приводов удалось увеличить за счет введения в систему управления специального дополнительного алгоритма, использующего принцип рекуперации. Наиболее подробно данная проблема, а также пути ее решения изложены в [12] и в гл. 3.

Шасси с базой 12790 мм и колесей 7000 мм имеет две основные и одну переднюю управляемые опоры, расположенные оптимально относительно центра масс, причем каждая опора представляет собой механическую систему с пневмогидравлическим телескопическим амортизатором и двумя колесами высокого давления [14, 19]. Выпуск шасси и открытие створок производятся одновременно от одного гидроцилиндра.

Колеса шасси ОК имеют массу, в два раза меньшую, чем аналогично нагруженные на самолетах, за счет применения бескамерных шин из натурального каучука с высокопрочным кордом (материал СВМ), тормозных дисков из теплоемкого бериллия и углепластиковых накладок.

При отказах каналов гидросистем предусмотрен аварийный выпуск шасси от пиротехнических средств, установленных на замках и гидроцилиндрах выпуска.

Система управления поворотом передней стойкой шасси (СУС) одноканальная, поэтому при ее отказе управление движением на взлетно-посадочной полосе обеспечивается дифференциальным торможением колес основных стоек шасси.

Тормозная система обеспечивает торможение орбитального корабля при пробеге на ВПП после посадки. Двухканальная тормозная система получает гидравлическую энергию от трех каналов гидросистем через переключатель и сохраняет эффективность тормозов при отказе одного канала тормозной системы или одного либо двух каналов ГС.

Минимальная масса гидрокомплекса ОК «Буран» достигнута применением в нем высокопрочных сплавов титана и стали, причем все трубопроводы, гидравлические баки и пневмогидроаккумуляторы изготовлены из титановых сплавов, а силовые редукторы — из высокопрочной стали ВКС-210 с пределом прочности 210 кг/мм. Все неразъемные соединения трубопроводов паяные.

1.4.3. Система распределения и коммутации

Система распределения и коммутации [14, 19] обеспечивает электроэнергией все потребители ОК «Буран» от источников бортового и наземного электропитания и состоит из:

— двух центральных распределительных устройств;

- двух центральных распределительных коробок;
- 19 распределительных устройств;
- 430 жгутов кабельной бортовой сети, выполненной в двухпроводном исполнении.

Центральные распределительные устройства, коробки и распределительные устройства выполнены негерметичными, установлены на термоплатах системы терморегулирования и покрыты экранно-вакуумной теплоизоляцией.

В процессе подготовки ОК к полету и в самом полете контролируется состояние контактов дистанционных переключателей, автоматов защиты и напряжение на шинах всех устройств через систему управления и систему бортовых измерений (СБИ) по сигналам от соответствующих датчиков, расположенных в устройствах и системах.

Надежность системы обеспечивается выполнением электрических связей между элементами и потребителями по «расщепленной» схеме, т.е. когда нужное сечение набирается несколькими проводами, что исключает отказ системы при обрыве или коротком замыкании одного из них; кроме того, плюсовые и минусовые цепи расположены в отдельных жгутах, проложенных по отдельным трассам.

1.4.4. Бортовой комплекс системы управления створками

Бортовой комплекс (БК) системы управления створками, радиаторами и замками (СУСРЗ) обеспечивает открытие и закрытие замковых устройств, створок отсека полезного груза (ОПГ) с расположенными на них радиаторами системы терморегулирования на участке орбитального полета.

Створки грузового отсека ОК «Буран» предназначены для разгрузки (погрузки) и монтажа в грузовом отсеке различных грузов, подлежащих обслуживанию либо возврату на землю, для стыковки ОК с орбитальными станциями и выхода экипажа в космос.

Две симметричные створки (правая и левая) образуют верхнюю поворачивающуюся часть СЧФ, они навешены на шарнирных узлах по бортам ОК и в закрытом положении смыкаются в верхней

его части. При открытых створках сверху в ХЧФ образуется проем от кабины экипажа до ХЧФ длиной 18,5 м и шириной 5,5 м.

БК СУСРЗ во время орбитального полета может работать в автоматическом режиме от СУ, от управления из ЦУП либо из кабины экипажа ОК.

При орбитальном полете в широком диапазоне температурных деформаций конструкции ОК створки с размещенными на них радиационными теплообменниками должны быть открыты, а при запуске и спуске — закрыты, поэтому требования по надежности к БК СУСРЗ весьма высоки, так как неоткрытие створок при выводе на орбиту прекращает полетное задание и требует возвращения на землю, а их незакрытие приводит к невозможности возвращения ОК со всеми вытекающими последствиями.

В процессе открытия створок панели РТО вращаются вместе с ними синхронно, но с меньшей угловой скоростью и при полном открытии створок на угол 178° поворачиваются только на 143° , обеспечивая излучение как с внутренней, так и с внешней поверхностей РТО в окружающую среду. Проведенные статические, ресурсные, комплексные и многие другие испытания позволили отработать прочность механических частей и подтвердить высокую надежность и работоспособность БК СУСРЗ в комплексе с другими системами при испытании реальной конструкции створок и фюзеляжа.

1.4.5. Система наддува и вентиляции

Система наддува и вентиляции, входящая в состав планера, уникальна, не имеет аналогов в обычной авиации и предназначена для поддержания температуры не ниже $+5^\circ\text{C}$ конструкций и элементов систем при наземной эксплуатации, для интенсивного охлаждения конструкций планера после посадки, выравнивания внутреннего давления в отсеках ОК на этапах вывода на орбиту и спуска, а также исключает возможность возникновения пожара на этапах старта и спуска. Это достигается подачей в отсеки ОК газообразного азота с превышением давления на $0,267...0,8$ кПа над статическим, что создает нейтральную среду и исключает подсос воздуха, содержащего кислород, особенно на спуске, где (в ХЧФ) на полную мощность работают ВСУ, ГС и РСУ.

Наиболее подробно вопросы, связанные с описанием конструкций и принципами действия систем планера ОК «Буран», см. в [14, 19].

Многоразовость использования ОК «Буран» определила его самолетный облик и привела к необходимости оснащения его специфическими самолетными системами и средствами.

Другой фактор, определивший ОК как универсальный летательный аппарат — его многоцелевое использование.

Требования по автоматическому режиму полета и посадки позволили определить принципы построения и взаимодействия с другими системами ОК бортовых систем обеспечения энергетики (СЭП), управления (СУ), работ с ПГ, безопасности и жизнедеятельности экипажа, а также основные технические требования к этим системам.

1.4.6. Система электроэнергетики

Электроэнергетика ОК «Буран» была определена исходя из необходимости создания СЭП с генератором мощностью не менее 25 кВт, что явилось принципиальным решением, заложенным в основу построения ОК и его бортовых систем.

Данное требование практически исключило возможность использования солнечных батарей и сняло ограничения на использование в полете различных типов ориентации ОК.

1.4.7. Особенности создания системы управления

Управление ОК потребовало решения ряда проблем, из которых основные следующие:

— создание программно-математического обеспечения управления с учетом возникновения отказов в бортовых системах и алгоритмов логики их преодоления. Это, хотя и усложняет систему управления и программно-математическое обеспечение, но увеличивает эффективность и надежность функционирования ОК, а также безопасность экипажа;

— создание системы обеспечения оперативного анализа параметров ОК при его эксплуатации, принятия решений и нейтрализации внештатных ситуаций, обеспечение безопасности экипажа и выбора оптимальных решений по управлению.

При управлении КА и орбитальными станциями используют три типа управления: автоматический, ручной и по каналу с Земли, поэтому в основу построения управления ОК «Буран» были положены требования обеспечения управления с использованием большого числа программ с учетом всех трех типов управления, а также стыковки управления ОК и МРКК в целом.

Работа с полезными грузами входит в число задач ОК «Буран», пилотируемых КА и орбитальных станций. Многообразие использования ОК «Буран» определила назначение его бортовых систем, которые должны обеспечить решение транспортных задач, обслуживание КА на орбите, их ремонт и исследования с помощью аппаратуры ОК либо находящейся в открытом космосе.

Задача обеспечения безопасности и жизнедеятельности экипажа, учитывая специфику ОК «Буран» как КК многоразового использования, позволила сформулировать основные требования к средствам безопасности и жизнеобеспечения как возможность обеспечения полетов экипажа в составе до 10 чел. с продолжительностью полета до 30 суток, с выходами в открытый космос и проведением работ как внутри ОК, так и в открытом космосе.

С учетом специфики взаимосвязей и необходимости выполнения в процессе полета функций по его реализации в комплекс бортовых систем орбитального корабля «Буран» включены следующие системы и средства, обеспечивающие управление и контроль функционирования ОК в целом:

- система управления;
- средства жизнеобеспечения и обеспечения теплового режима;
- радиотехнические системы;
- система электроснабжения;
- средства обеспечения работ с ПГ и другими КА.

С комплексом бортовых систем неразрывно связаны системы, входящие в состав планера: ОК, ОДУ, ВСУ, ГК, ОПГ и т.д.

1.4.8. Система управления

Система управления «Бурана» — это «сердце» орбитального корабля. От нее зависит функционирование всех систем ОК, она обеспечивает сложные взаимосвязи с другими системами орбиталь-

ного корабля, планером, объединенной двигательной установкой, гидрокомплексом, вспомогательной силовой установкой, реактивной системой управления, агрегатами и системами, состоящими из различных электроприводов, элементов пневмо- и гидроавтоматики и т.д., требующих различных способов дистанционного управления, а также контроля и отображения информации.

Разработанная для ОК «Буран» централизованная система управления принципиально отличается от ранее используемых в космических аппаратах, так как выполняет функции, которые на других КА и ОС обеспечивались самостоятельными системами управления.

Например, для управления бортовым комплексом существовала одна система, а решение логических задач по приему и обработке команд, поступающих с наземного комплекса управления (НКУ), и выдаче их в другие системы выполняла радиотехническая система. Естественно, между этими системами существовали связи, однако они были разработаны как отдельные.

В процессе создания ОК «Буран» была решена сложная научно-техническая задача автоматического контроля, диагностики и на основе их анализа — задача управления всеми бортовыми системами ОК на всех этапах его эксплуатации.

Новизну подходов к решению этой задачи в основном определяли следующие факторы:

- существенные отличия ОК «Буран» от обычных самолетов по программам полета;
- сложность, количество и разнородность комплекса бортовых систем;
- жесткие требования к надежности контроля, управления, к их математическому и программному обеспечению;
- необходимость «увязывания» аппаратно-программного комплекса с множеством предприятий-разработчиков различных бортовых систем.

С учетом данных условий была разработана структура СУ и программно-математическое обеспечение (ПМО), обеспечивающие решение задачи контроля и диагностики основных параметров бортовых систем и формирование на основе их анализа управляющих сигналов по обеспечению программ полета.

Структура СУ построена с учетом трех режимов управления ОК: ручного, автоматического и от наземного комплекса.

Управляющие сигналы вырабатываются на основе двухуровневой системы контроля и диагностики основных параметров бортовых систем (БС):

1) встроенный контроль в каждой БС при помощи специальных блоков управления и контроля, которые, при обнаружении отказов БС, блокируют их, переключая на резервные каналы;

2) автоматический контроль и диагностика с применением вычислительных средств и на основе ПМО реализация управляющих сигналов в системе управления БС, а также сбор контрольно-диагностической информации в необходимом объеме, обеспечиваемый системой бортовых измерений (СБИ).

Система управления ОК «Буран» решает три главные задачи:

— управление траекторией движения ОК в соответствии с программами полета;

— управление бортовыми системами ОК в соответствии с заданными программами полета, а также переход на резервные системы в случае обнаружения в них отказов и принятие решений по изменению режимов либо программ полета;

— контроль и диагностика основных параметров всего комплекса бортовых систем с целью соответствия их нормальной работе и выявления отклонений для принятия мер по выполнению программы полета и безопасности экипажа.

Для орбитального корабля «Буран» решение вышеперечисленных задач представляет собой дополнительную проблему, связанную с требованием обеспечения автономности управления полетом, т.е. независимо от наземных систем управления, однако такая независимость практически невозможна. Данное требование повлекло за собой необходимость увеличения возможностей бортовых расчетно-логических алгоритмов и реализующих их устройств, входящих в систему управления, и, кроме того, увеличения бортового банка данных для решения различных задач по управлению.

Например, вариант автономного управления при сближении и стыковке ОК и КА предусматривает введение в СУ ОК данных о параметрах орбитального полета КА. При этом выбор варианта, ра-

сет места и времени, режимы работы ОДУ и других БС система управления должна реализовывать самостоятельно.

Вариант же смешанного управления связан с реализацией управляющих сигналов при сближении и стыковке. То есть:

— зная параметры движения КА, с которым стыкуется ОК, наземный комплекс управления рассчитывает необходимые маневры сближения и выдает на ОК данные на коррекцию траектории. Причем завершающий этап проводится СУ самостоятельно либо с участием экипажа. Такой вариант предполагает более высокие показатели безопасности и во многих случаях является единственным решением задачи.

Транспортные космические корабли типа «Союз» использовали в режиме сближения и стыковки смешанное управление комплексом бортовых систем. А система управления ОК «Буран» обеспечивает сближение и стыковку как в режиме смешанного, так и в режиме автономного управления полетом.

Еще одна отличительная особенность ОК многократного использования: если, например, ошибка ориентации КК «Союз» составит 10° , спускаемый аппарат все равно вернется на Землю — хотя и в другом районе. Для ОК «Буран» ошибка ориентации перед спуском не может быть более 20° , иначе ОК не сможет совершить посадку на ВПП ПК; при этом, в отличие от самолетов, ОК после схода с орбиты не имеет возможности повторения захода и вынужден производить посадку на ВПП ПК с первого захода.

В состав СУ ОК «Буран» также входят специализированные комплексы и подсистемы. По конструктивному исполнению система управления состоит из ряда крупных электронных блоков, которые размещены в кабине, в других отсеках и агрегатах ОК и установлены на охлаждаемые специальные платы. Многообразные электрические кабели связывают всю аппаратуру ОК с СУ. Подробнее материалы по СУ ОК «Буран» см. в [14, гл. 7].

1.4.9. Радиотехнические системы

Радиотехнические системы предназначены для связи экипажа с наземным комплексом управления и включают в себя: бортовой радиотехнический комплекс, бортовой телевизионный комплекс и систему бортовых измерений. Связь с Землей предусматривает тра-

екторные измерения, обмен информацией между ЦУП и ОК и передачу всей телеметрической информации на Землю.

Принципиальная задача бортового радиотехнического комплекса (БРТК) — обеспечение связи с наземным комплексом управления с использованием искусственных спутников Земли, бортовых остроуправленных антенн и антенных решеток. Большая часть блоков аппаратуры радиотехнического комплекса размещена в кабине, антенны и их фидерные устройства — в корпусе планера и в отсеке полезного груза.

Бортовой телевизионный комплекс обеспечивает работу манипуляторов, работу с полезными грузами, отображение информации экипажу при выходах в ОПГ и работах внутри ОК и в открытом космосе, а также при управлении посадкой, сближением и стыковкой. Аппаратура БТК размещена в кабине экипажа и в отсеке полезного груза.

Система бортовых измерений (СБИ) обеспечивает телеметрический контроль основных параметров систем ОК при его эксплуатации, а ее данные, в системе контроля и диагностики, обеспечивают управление БС и выдачу информации на пульты экипажа. Число измеряемых и контролируемых параметров СБИ примерно равно 10000, что определяет сложность и объемность ПМО и ее составляющих.

Система электроснабжения обеспечивает электроэнергией БС, двигательные установки, агрегаты ОК и построена на базе системы электропитания (СЭП), которая с помощью электрохимических генераторов тока (ЭХГ) обеспечивает переменные режимы работы комплекса БС управления и решает задачу снижения скорости ОК «Буран» с космической до посадочной, т.е. самолетной.

Особо следует отметить, что при первом беспилотном полете электрохимические генераторы не устанавливались и основным источником электропитания была аварийная система электроснабжения.

Весьма сложная по построению и функционированию СЭП с ЭХГ, обеспечивающая мощность в несколько десятков киловатт, планировалась для создания космических кораблей будущего и была разработана на уровне современных мировых достижений.

1.4.10. Средства жизнеобеспечения

Средства жизнеобеспечения (СЖО) и обеспечения теплового режима (СОТР) включают в себя:

- систему газоснабжения (СГ);
- систему наддува и разгерметизации (СНиР);
- систему водообеспечения (СВО);
- систему питания;
- индивидуальные средства жизнеобеспечения (ИСЖО);
- средства медико-биологического обеспечения.

Вышеперечисленные средства и системы предназначены для обеспечения выполнения различных работ экипажа как внутри ОК, так и в открытом космосе, для технического оснащения экипажа средствами перемещения и проведения различных операций по сборке, монтажу оборудования и другим работам с учетом безопасности экипажа, т.е. для контроля герметичности отсеков, наддува, нескольких типов скафандров и т.п., обеспечивающих жизнь и работу экипажа в соответствии с программой полета.

Основные средства обеспечения размещены в кабине ОК и стыковочном модуле. Баллоны с газами, водой, аммиаком и другими запасами необходимых веществ размещены в негерметичных отсеках ОК, причем радиаторы обеспечения теплового режима (СОТР) находятся в ОПГ и имеют общие элементы с его створками. Следует отметить, что теплообменные агрегаты, блоки и различные элементы СОТР находятся во всех без исключения отсеках ОК «Буран».

Более подробные сведения о СЖО и СОТР см. в [14, гл. 6].

В состав средств обеспечения работ с полезными грузами и другими космическими аппаратами входят:

- стыковочный модуль, обеспечивающий выходы членов экипажа в космос, в другие космические корабли и орбитальные станции, оборудованный специальными системами и средствами, необходимыми для проведения работ в соответствии с полетным заданием;
- бортовые манипуляторы, обеспечивающие проведение разгрузочно-погрузочных работ;

- система крепления различных грузов по форме и объему;
- средства освещения, управления, терморегуляции и т.д.

Кроме того, средства обеспечения работ с грузами имеют весь комплекс средств связи с системами, обеспечивающими электропитание, термостатирование, управление и контроль как от бортовых автоматических систем, так и от НКУ.

1.5. ПРОГРАММА ПОЛЕТА ОК «БУРАН» И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ

Полет ОК «Буран» был успешно выполнен 15 ноября 1988 года с посадкой на посадочную полосу, причем впервые в мире — в полностью автоматическом режиме.

Полеты космического корабля многоразового использования выполняются, в основном, в околоземном космосе, т.е. в пределах от 200 до 450 км, и хотя программа полета содержит те же три этапа, что и программа КК «Союз», принципы построения и характеристики этапов существенно различаются.

Первый этап — выведение на орбиту — предусматривает формирование переходной орбиты, которая должна иметь от пуска к пуску близкие значения высоты в апогее (примерно 150 км). Выведение на эту условную орбиту обеспечивает РН, после чего происходит ее отделение, и после двух разгонных импульсов, выполняемых средствами ОК, формируется основная, опорная орбита.

После старта МРКК «Энергия-Буран», через 8 мин на участке выведения происходит отделение РН, и ОК «Буран» начинает свой самостоятельный полет на переходной, условной орбите, на высоте 150 км. Далее, как предусмотрено схемой полета, в течение последующих 40 мин выполняются два маневра довыведения ОК собственными ОДУ на рабочую орбиту. (Величину, направление и время импульса ОДУ рассчитывает БЦВК в соответствии с полетным заданием.)

Орбитальный полет делится условно на различные участки, связанные с выполнением различных целевых задач, причем все системы ОК переводятся из атмосферного состояния в орбитальное, предусматривающее открытие створок ОПГ, радиаторов СОТР

и т.д. Управление и контроль полета на этом участке осуществляется БЦВК, БС, экипажем и ЦУП.

Наиболее общими для программы орбитального полета являются участки: дежурного полета, сближения и стыковки, работы с ПГ и бортовыми манипуляторами.

Так как задачей первого полета ОК «Буран» была проверка функционирования конструкции и БС на наиболее напряженных участках полета (выведение и спуск с орбиты) с минимальной длительностью орбитального участка (два витка), это и определило участок орбитального полета как участок дежурного режима.

По завершении орбитального полета на высоте 100 км начинается самый сложный и ответственный участок — спуск и посадка ОК.

На участке спуска (от 100 до 20 км) управление ОК осуществляется с помощью 20 управляющих двигателей, размещенных в ХЧФ. Аэродинамические органы управления сначала используются только для балансировки ОК, причем по мере нарастания скоростного напора и эффективности органов управления аэродинамическими поверхностями они постепенно берут на себя функции УД, которые отключаются в канале крена, а затем — в продольном канале.

Основная задача системы управления на этом участке — формирование траектории движения ОК, которая удовлетворяла бы всем параметрам движения с учетом ограничений по аэродинамическому нагреву, перегрузкам, скоростному напору, запасам топлива для РСУ и РС и т.д. и обеспечила бы приведение ОК «Буран» на высоту 20 км в заданную область.

Для каждой траектории полета, в каждый момент времени определяется зависимость высоты полета от дальности до «ключевой точки», в качестве основной принимается траектория, у которой разница между располагаемой и потребной мощностью не превышает допустимой величины.

На участке предпосадочного маневрирования ($H = 20 \dots 4$ км), в его начальной точке, СУ формирует с учетом вышеизложенного критерия опорную траекторию, соединяющую положение ОК на высоте 20 км с «ключевой точкой».

Далее начинается участок захода на посадку и непосредственно сама посадка на ВПП. Основная задача — приведение ОК «Буран» в заданную точку касания на ВПП, с заданной точностью.

В соответствии с особенностями ОК «Буран» для захода на посадку с последующим приземлением была принята двухглиссадная схема, при которой вся траектория разделена на четыре участка. Значение угла наклона крутой глиссады $-17...-23^\circ$ при равновесном планировании со скоростью 520 км/ч при угле раскрытия ВТ 55° .

На этом участке отрабатываются ошибки приведения ОК в «ключевую точку».

С высоты 400 м ОК выравнивается с крутой глиссады на пологую с углом наклона траектории -2° .

Участок перехода между глиссадами с углом наклона траектории -10° предназначен для снижения нормальной перегрузки, возникающей при первом выравнивании.

Заключительное выравнивание начинается после прохождения ОК начала ВПП на высоте 20 м. На этом участке, в зависимости от природных условий, формируются параметры процесса касания.

Для ОК «Буран» расчетные параметры в точке касания следующие:

$X_{\text{пск}}$ (продольная дальность от центра ВПП в посадочной системе координат) = $-2200...-400$ м при номинале -1500 м;

$Z_{\text{пск}}$ (боковое отклонение от оси ВПП) = 38 м;

$V_{\text{пут}}$ (путевая скорость касания) = 360 км/ч;

V_y (вертикальная скорость касания) = 3 м/с.

Несмотря на сильный порывистый ветер условия касания ОК «Буран» при первом полете были близки к расчетным:

$X_{\text{пск}} = -1515$ м;

$Z_{\text{пск}} = 5,8$ м;

$V_{\text{пут}} = 263$ км/ч;

$V_y = -0,3$ м/с.

Полет орбитального корабля «Буран» оценивается в целом как выдающееся достижение отечественной науки и техники. Осуществленный в полностью автоматическом режиме, он не имеет аналогов в мире по реализации спуска и посадке на ВПП в заданной точке.

Спуск и посадка ОК «Буря» проведены в бездвигательном режиме, когда управление аэродинамическими поверхностями осуществлялось от гидравлических приводов с питанием от гидрокомплекса, состоящего из трех независимых гидросистем с приводом насосов ГС от ВСУ; вопросы синтеза и исследований основных характеристик гидрокомплекса и выполненные на их основе конструктивные доводки, несомненно, также определили успешный полет, а также спуск и посадку ОК «Буря» с заданной степенью точности. Поэтому вопросы проектирования гидрокомплекса ОК «Буря», рассмотренные в последующих главах настоящей книги, могут быть интересны специалистам в области авиации, космонавтики и других отраслей промышленности, занимающихся проектированием различных гидросистем управления.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИРУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ГИДРОКОМПЛЕКСА ОК «БУРАН»

2.1. ОБОСНОВАНИЕ, АКТУАЛЬНОСТЬ, ЦЕЛЬ И ОБЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТОК

При разработке гидрокомплекса орбитального корабля «Буран» основную проблему представляет синтез и анализ параметров входящих в ГК элементов и агрегатов.

Большое количество агрегатов и систем, протяженность гидролиний различных сечений и в связи с этим наличие множества стыковочных точек, приводящее в конечном счете к изменениям параметров ГК в целом, делают практически невозможным анализ работы ГК в составе «Бурана» на ранних этапах проектирования и исследований.

Имеется много работ (в том числе [1, 2]) по выбору основных параметров гидросистем и расчету отдельных элементов, однако вопросы, рассматриваемые в настоящей главе, нигде не освещались.

Ввиду необходимости постоянного повышения характеристик для обеспечения полета, сокращения сроков разработки, повышения качества, для снижения затрат на создание, доводку, анализ и исследование элементов, агрегатов и гидросистем управления в целом — проектирование и доводка ГК представляют собой сложную проблему.

Поэтому наиболее перспективным следует считать такой подход, который позволяет проектировать и отрабатывать ГК на комплексе проблемно-ориентированных математических моделей, методов исследований и алгоритмов их реализации на ЭВМ на основе последовательного применения ряда математических моделей элементов с различной степенью детализации ГК в целом.

Кроме того, реализация такого подхода к решению вышеизложенной проблемы позволяет:

- сэкономить средства от многократного использования разработанных методов, что существенно сокращает время согласования технических заданий на агрегаты и системы гидрокомплекса, рабочее проектирование и доводочные работы;
- повысить качество разработок за счет использования теоретических исследований эксплуатационных режимов работы ГК и режимов отказных ситуаций, которые не могут быть реализованы в реальном полете;
- снизить затраты на испытания за счет сокращения объема испытаний и частичного отказа от использования сложного и дорогостоящего лабораторного оборудования.

В настоящей главе будут рассмотрены вопросы, связанные с решением различных задач теоретических исследований, предусматривающие синтез и анализ рабочих параметров агрегатов и систем гидрокомплекса как при доводке, так и на ранних этапах разработки и согласования технических заданий.

Сложность вышеперечисленных проблем, жесткие сроки разработок диктуют поэтапное выполнение исследований. Общее, перспективное направление разработок методов построения моделирующих алгоритмов элементов и систем ГК и способов их реализации на ЭВМ должно состоять из четырех взаимосвязанных частей (этапов).

Первая часть должна быть посвящена разработке упрощенной гидравлической схемы ГК; приведению этой схемы к расчетным — в соответствии с поставленными задачами; разработке и систематизации исходных данных (кинематических, гидравлических и конструктивных параметров) входящих в гидрокомплекс элементов и систем.

Например, создание полных математических моделей рулевых систем на основе принципиальных схем, приведенных в гл. 1, сложный, трудоемкий процесс, на реализацию которого уйдет много времени. Поэтому на первом этапе следует разработать математические модели гидросистем и их элементов, ограниченные на выходе клапанами переключения каналов ГС с отказавших на резервные, причем переход по давлению и расходу на выходе клапанов

переключения к рулевым поверхностям следует задавать эквивалентными нагрузками, например коэффициентами перехода, как будет показано далее.

То есть первая часть должна содержать математические модели системы ГС — КП входящих в ее состав элементов и агрегатов и их экспериментальные характеристики и быть предназначена для узкого круга задач, связанных например, с выбором конструктивных параметров гидролиний и их проливочных характеристик при различных температурных и рабочих характеристиках рассматриваемой системы.

Вторая часть должна содержать более точную математическую модель системы ГС — РС с учетом экспериментальных характеристик насосов переменной подачи, рабочей жидкости, фильтров, гидравлических аккумуляторов, модуля подготовки рабочей жидкости и проливочных характеристик РС и предназначаться для синтеза и анализа характеристик рабочих процессов элементов и систем ГК по критерию обеспечения энергетического баланса.

Третья часть должна содержать математическую модель по второй части с упрощенными моделями рулевых систем, позволяющую проводить более углубленный анализ влияния различных эксплуатационных и конструктивных факторов характеристик рабочих процессов системы в целом при имитациях отказов каналов гидросистем и конструктивных изменениях агрегатов и элементов рассматриваемой системы.

Четвертая часть должна содержать наиболее точную модель гидрокомплекса с учетом инерции и сжимаемости рабочей жидкости в гидролиниях ГС и имитировать ее отказы на упрощенной модели РС, непосредственно соединенной с аэродинамическими поверхностями, с учетом шарнирных моментов и жесткости проводки. Данная модель предполагает приближенные оценки динамических характеристик рассматриваемой системы.

Кроме того, эта часть работы должна содержать данные экспериментальных исследований, их сравнение с результатами численного эксперимента, методы реализации предлагаемых математических моделей, а также алгоритмы и программы их реализации на ЭВМ.

Таким образом, целью настоящих разработок является:

- создание комплекса проблемно ориентированных математических моделей элементов ГК орбитального корабля «Буран», позволяющих проводить синтез параметров рабочих процессов ГС, исследование, оценку и анализ характеристик рабочих процессов ГК;
- создание новых методов исследований и синтеза элементов ГК в целом;
- создание методики исследований динамических характеристик рабочих процессов ГК;
- создание методики численного эксперимента по выявлению возможности всей системы и анализу отказных ситуаций, имитация которых на реальном объекте невозможна.

Вся работа рассчитана на длительное время и не ограничена первым полетом, поэтому в книге представлены:

- упрощенные схемы гидрокомплекса;
 - расчетные схемы гидросистемы;
 - математические модели элементов гидросистем;
 - математическая модель клапана переключения гидропитания;
 - математическая модель системы ГС—КП;
 - алгоритм и метод практической реализации вышеизложенных математических моделей на ЭВМ,
- а также систематизированы и обобщены исходные данные.

Приведенные математические модели, методы исследований и алгоритмы их реализации на ЭВМ позволяют проводить анализ влияния характеристик элементов гидрокомплекса на его работу и выявлять места нестыковки с определением параметров требуемой стыковки.

2.2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА

2.2.1. Разработка модели насоса переменной подачи

Синтез и анализ характеристик элементов гидрокомплекса предполагает использование модели насоса переменной подачи,

позволяющей учитывать динамические характеристики насосов, входящих в проектируемую систему. Очевидным и естественным путем получения математической модели, наиболее полно отражающей реальную динамику насоса, представляется подробное описание процессов, происходящих в насосе при совместной работе ГК в целом. Однако создание математической модели такого сложного агрегата, как насос переменной подачи с регулятором по давлению, не оправдывает себя даже с точки зрения использования на ЭВМ и является самостоятельной большой научно-исследовательской работой.

Настоящий раздел посвящен проблеме разработки математической модели насоса переменной подачи с регулятором по давлению, которая, будучи использована в общей математической модели ГК, позволит осуществить синтез и анализ характеристик проектируемой системы наиболее оптимальным образом. Рассмотренная ниже математическая модель, алгоритм ее реализации и некоторые результаты теоретических исследований на ЭВМ дают возможность выявить те принципы, которые целесообразно применять для разработки математических моделей насосов переменной подачи с регулятором по давлению, входящих в состав питания широкого круга гидросистем.

Авторами предлагается качественно отличная от традиционных [1] модель насоса переменной подачи с регулятором по давлению, использующая экспериментальные характеристики (рис. 2.1—2.3), представляющая собой аппроксимирующую функцию для данного типа насосов:

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + \frac{dQ}{dt} B = A[p(Q) - p(t)], \quad (2.1)$$

где p и Q — давление и подача насоса; $p(Q)$ — статическая характеристика насоса (см. рис. 2.1); A и B — параметры, характеризующие тип насоса; $p(t)$ — текущее давление на выходе насоса; $A[p(Q) - p(t)]$ — диссипативный член; само уравнение описывает «инерционность» насоса при переходном процессе.

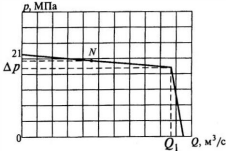


Рис. 2.1. Статическая характеристика насоса

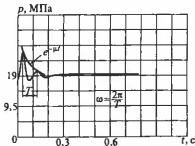


Рис. 2.2. Переходный процесс насоса по давлению

Тип насоса определяют параметры A и B , выбираемые с помощью ЭВМ по экспериментальным характеристикам (рис. 2.1–2.3).

Рассматривая уравнение (2.1), можно видеть, что правая часть A является аналогом силы, т.е. реакцией регулятора, где сигналом к регулированию служит рассогласование между давлением подачи насоса и некоторым эталонным, представляющим собой статическую характеристику (рис. 2.1).

В соответствии с вышеизложенным задачу можно сформулировать как определение параметров A и B модели, удовлетворяющих следующим критериям:

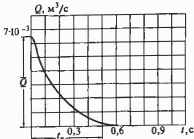


Рис. 2.3. Переходный процесс насоса по расходу

$$\begin{aligned} |Q(t, x_m) - Q_{\text{эксн}}(t, x_m)| &\rightarrow 0; \\ |\rho(t, x_m) - \rho_{\text{эксн}}(t, x_m)| &\rightarrow 0, \end{aligned}$$

где $Q(t, x_m)$ и $\rho(t, x_m)$ — реальные подача и давление насоса в сечении x_m ;

$Q_{\text{эксн}}(t, x_m)$ и $\rho_{\text{эксн}}(t, x_m)$ — требуемые давление и подача насоса в сечении x_m .

Однако, прежде чем приступить к синтезу параметров A и B насоса переменной подачи, необходимо ограничить области изменения этих параметров исходя из экспериментальных характеристик (см. рис. 2.1—2.3), полученных при испытаниях на стенде, гидравлическая принципиальная схема которого приведена на рис. 2.4.

В нашем распоряжении имеется насос переменной подачи, обладающий статической характеристикой вида рис. 2.1 и динамическими характеристиками вида рис. 2.2—2.3.

Пусть исходное состояние насоса находится на кривой BC в т. N (см. рис. 2.1). Для данной кривой участок BC описывается уравнением

$$\rho(Q) = -\bar{\alpha}Q + \bar{p}, \quad (2.2)$$

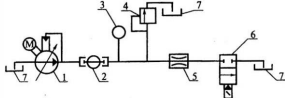


Рис. 2.4. Принципиальная гидравлическая схема стенда:
 1 — регулируемый насос; 2 — датчик расхода типа ТДР; 3 — датчик давления типа ДД-10; 4 — предохранительный клапан; 5 — дроссель; 6 — электромагнитный клапан; 7 — бак

где $\bar{\alpha} > 0$, $\bar{\alpha} = \frac{\Delta p}{Q_1} = \frac{\Delta p}{Q}$.

Теперь, в соответствии с рис. 2.3, предполагаем, что вид данной кривой соответствует зависимости

$$p(t) = \bar{p} + (A_p \sin \omega_p t) e^{-\mu t}, \quad (2.3)$$

где A_p , ω_p и μ определяются из данных эксперимента.

Следует отметить, что кривая $Q(t)$ (см. рис. 2.2) учитывает объемные потери (рис. 2.5), т.е. характеристику $Q_{\text{н}} = f(p_{\text{н}})$.

Тогда: $Q_{\text{н}} = ap + b$ при $1 \leq p \leq p_1$;

$$Q_{\text{н}} = a_1 p + (a - a_1) p_1 + b \quad p_1 \leq \bar{p}. \quad (2.4)$$

Пусть $p(t)$ определено (2.3); $p(Q)$ соответствует рис. 2.1, а $p(t)$ соответствует рис. 2.2. Найдём решение уравнения (2.1). При данных условиях и начальном положении насоса, соответствующем т. N на кривой BC статической характеристики $p(Q)$ (см. рис. 2.1), получим уравнение (2.1) в виде

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} + B \frac{dQ}{dt} + A \bar{\alpha} Q = -A A_p e^{-\mu t} \sin \omega_p t. \quad (2.5)$$

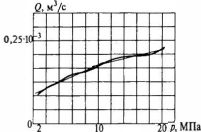


Рис. 2.5. Объемные потери насоса переменной подачи в зависимости от давления на выходе из насоса

Частное решение находим в виде

$$Q = C_1 e^{-\mu} \sin \omega_p t + C_2 e^{-\mu} \cos \omega_p t, \quad (2.6)$$

где

$$C_1 = \frac{AA_p \alpha}{\alpha^2 + \beta^2}; \quad C_2 = \frac{AA_p \beta}{\alpha^2 + \beta^2};$$

$$\alpha = \mu^2 - \omega_p - B\mu; \quad \beta = B\omega_p - 2\mu\omega_p,$$

или

$$Q = \frac{AA_p}{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\mu} [\alpha \sin \omega_p t - \beta \cos \omega_p t]. \quad (2.7)$$

Теперь решение уравнения (2.5) можно записать как

$$Q = C_3 e^{-\left\{ \frac{B}{2} + \sqrt{\left(\frac{B}{2} \right)^2 - A\bar{a}} \right\} t} + C_4 e^{-\left\{ \frac{B}{2} - \sqrt{\left(\frac{B}{2} \right)^2 - A\bar{a}} \right\} t} +$$

$$+ \frac{AA_p}{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\mu} [\alpha \sin \omega_p t - \beta \cos \omega_p t], \quad (2.8)$$

где C_3 и C_4 — постоянные, определяемые из начальных условий.

Из эксперимента имеем, что за время t_k (см. рис. 2.3) происходит несколько колебаний давления. Следовательно, если (2.8) есть решение уравнения (2.5), то на рис. 2.2 должны быть колебания Q с частотой ω_p . Однако там их нет, поэтому можно считать, что выполняется следующее условие:

$$C_3 e^{\left\{ \frac{B}{2} + \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 - 4\alpha} \right\} t} + C_4 e^{\left\{ \frac{B}{2} - \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 - 4\alpha} \right\} t} \gg \frac{AA_p}{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\mu t} [\alpha \sin \omega_p t - \beta \cos \omega_p t]. \quad (2.9)$$

Здесь C_3 и C_4 имеют порядок Q и, следовательно, (2.9) эквивалентно (2.10), т.е.

$$\frac{AA_p}{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\mu t} [\alpha \sin \omega_p t - \beta \cos \omega_p t] < \frac{Q}{\gamma}, \quad (2.10)$$

где γ — число, выбираемое таким образом, чтобы точность не превышала заданной.

Возьмем конкретные значения A_p , μ и ω_p из экспериментальных графиков переходных процессов насоса переменной подачи:

$$Q = 100 \text{ л/мин}, \quad A_p = 120 \text{ кг/см}^2; \quad \mu = 10 \text{ 1/с}; \quad \omega_p = 60 \text{ 1/с}. \quad (2.11)$$

Тогда из (2.10) и (2.11) при условии $|\alpha| > |\beta|$ получим

$$\begin{cases} \frac{AA_p}{|\alpha|} < \frac{Q}{\gamma}; \\ |\mu^2 - \omega_p^2 - B\mu| > \omega_p |B - 2\mu|. \end{cases} \quad (2.12)$$

Однако из (2.6) и (2.11) следует, что $\mu^2 - \omega_p^2 - B\mu < 0$, тогда (2.12) можно записать в следующем виде:

при $B > 2\mu$

$$\begin{cases} \frac{AA_p}{-\mu^2 + \omega_p + B\mu} < \frac{\bar{Q}}{\gamma}; \\ -\mu^2 + \omega_p^2 + B\mu > \omega_p(B - 2\mu); \end{cases} \quad (2.13)$$

при $B < 2\mu$

$$\begin{cases} \frac{AA_p}{-\mu^2 + \omega_p^2 + B\mu} < \frac{\bar{Q}}{\gamma}; \\ -\mu^2 + \omega_p^2 + B\mu > \omega_p(2\mu - B). \end{cases} \quad (2.14)$$

Выразим из вторых уравнений (2.13) и (2.14) зависимости для $B > 2\mu$. Подставив их в первые уравнения (2.13) и (2.14), получим зависимости для областей изменения параметров A и B модели насоса при $|\alpha| > |\beta|$ в следующем виде:

из (2.13)

$$\begin{cases} 2\mu < B < \frac{-\mu^2 + \omega_p^2 + 2\mu\omega_p}{\omega_p - \mu}; \\ A < \frac{(-\mu^2 + \omega_p^2)\bar{Q}}{\gamma A_p} + \frac{2\mu^2\bar{Q}}{\gamma A_p}; \end{cases} \quad (2.15)$$

из (2.14)

$$\begin{cases} 2\mu > B > \frac{2\mu\omega_p + \mu^2 - \omega_p^2}{\mu + \omega_p}; \\ A < \frac{(-\mu^2 + \omega_p^2)\bar{Q}}{\gamma A_p} + \frac{\mu\bar{Q}}{\gamma A} \left[\frac{2\mu\omega_p + \mu^2 - \omega_p^2}{\mu + \omega_p} \right]. \end{cases} \quad (2.16)$$

Вторым членом в уравнении (2.16) можно пренебречь ввиду его малости, и тогда (2.16) можно записать как

$$\begin{cases} 0 < B < 2\mu; \\ A < \frac{(-\mu^2 + \omega_p^2)\bar{Q}}{\gamma A_p}. \end{cases} \quad (2.17)$$

Далее получим зависимости областей изменения параметров A и B модели насоса для случая $|\beta| > |\alpha|$.

Исследования проводим аналогично (2.12) — (2.17).

При $|\beta| > |\alpha|$ из (2.10) и (2.11) имеем

$$\begin{cases} \frac{AA_p}{|\beta|} < \frac{\bar{Q}}{\gamma}; \\ |\mu^2 - \omega_p^2 - B\mu| < \omega_p |B - 2\mu|, \end{cases} \quad (2.18)$$

но из (2.6) и (2.11) $\mu^2 - \omega_p^2 - B\mu < 0$. Тогда (2.18) примет следующий вид:

при $B > 2\mu$

$$\begin{cases} \frac{AA_p}{\omega_p(B - 2\mu)} < \frac{\bar{Q}}{\gamma}; \\ -\mu^2 + \omega_p^2 + B\mu > \omega_p(B - 2\mu); \end{cases} \quad (2.19)$$

при $B < 2\mu$

$$\begin{cases} \frac{AA_p}{\omega_p(2\mu - B)} < \frac{\bar{Q}}{\gamma}; \\ -\mu^2 + \omega_p^2 + B\mu < \omega_p(2\mu - B). \end{cases} \quad (2.20)$$

Подстановка зависимости для $B > 2\mu$ в первое уравнение (2.20) не имеет смысла, поэтому остается одна область изменения параметров A и B модели насоса в виде

$$\begin{cases} \frac{-\mu^2 + \omega_p^2 + 2\mu\omega_p}{\omega_p - \mu} < B; \\ \frac{\omega_p \bar{Q}}{\gamma A_p} \left[\frac{-\mu^2 + \omega_p^2 + 2\mu\omega_p}{\omega_p - \mu} \right] - \frac{2\mu\omega_p \bar{Q}}{\gamma A_p} > A. \end{cases} \quad (2.21)$$

Таким образом, исследование областей изменения параметров насоса переменной подачи по критерию минимальности колебаний подачи при переходном процессе (см. рис. 2.2 и последующий рис. 2.9) позволило выявить три области изменения параметров A и B , а именно (2.15), (2.17) и (2.21). Для примера выпишем области изменения параметров A и B , учитывая (2.11), рис. 2.2, 2.3 и 2.5.

Из (2.15) имеем:

$$\begin{cases} 20 < B < 100, \\ 0 < A < 360 \end{cases} \quad \text{при } |\alpha| > |\beta|; \quad (2.22)$$

из (2.17) имеем:

$$\begin{cases} 0 < B < 20, \\ 0 < A < 360 \end{cases} \quad \text{при } |\alpha| > |\beta|; \quad (2.23)$$

из (2.21) имеем:

$$\begin{cases} B > 94, \\ A < 464 \end{cases} \quad \text{при } |\alpha| < |\beta|. \quad (2.24)$$

Теперь настоящая задача может быть сформулирована как определение при помощи дополнительного анализа по критерию соответствия вида кривой давления переходного процесса той един-

ственной области изменения параметров A и B модели насоса переменной подачи с регулятором по давлению, из которой могут быть определены сами параметры.

2.2.2. Метод определения областей изменения параметров модели насоса переменной подачи

Рассмотрим корни характеристического уравнения

$$x_{1,2} = -\frac{B}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 - A\bar{\alpha}}.$$

Учитывая (2.11), имеем в области (2.22) действительные корни при

$$20 < B < 100; A < 360; |\alpha| > |\beta|.$$

Физический смысл модели насоса переменной подачи (2.5) предполагает уменьшение времени переходного процесса с уменьшением B и увеличением A . Поэтому для оценки возможности использования корней характеристического уравнения принимаем

$$A\bar{\alpha} = \left(\frac{B}{2}\right)^2.$$

В этом случае решение уравнения (2.5) можно записать как

$$Q = C_3 e^{-\frac{B}{2}t} + C_4 t e^{-\frac{B}{2}t} + \frac{AA_p}{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\mu t} [\alpha \sin \omega_p t - \beta \cos \omega_p t]. \quad (2.25)$$

Последним членом в уравнении (2.25), ввиду его малости, можно пренебречь, и тогда решение (2.5) получим в виде

$$Q = C_3 e^{-\frac{B}{2}t} + C_4 t e^{-\frac{B}{2}t} \quad (2.26)$$

при $t=0$; $Q = \bar{Q}$; $\frac{dQ}{dt} = 0$; $C_3 = \bar{Q}$; $C_4 = \frac{B}{2} \bar{Q}$.

Подставив полученные выражения в (2.26), получим решение в виде

$$Q = \bar{Q} e^{-\frac{B}{2}t} \left[1 + \frac{B}{2} \right]. \quad (2.27)$$

За время переходного процесса $\sim 0,5$ с (см. рис. 2.3) при $p = p_{\max}$ и $Q = Q_{\text{угечек}}$, которые составляют $\sim 5\%$ от $\bar{Q}$, для определения B получим (2.27) в следующем виде:

$$\frac{1}{20} \bar{Q} = \bar{Q} e^{\frac{B}{4}} \left[1 + \frac{B}{2} \right]. \quad (2.28)$$

Чтобы (2.28) было справедливо, необходимо иметь $B > 20$. Но, так как в (2.22) и (2.23) $A < 360$, в предельном случае (2.26) принимает вид

$$\frac{Q}{4} e^{-15t} + \frac{3}{4} \bar{Q} e^{-5t} = 0,$$

откуда при $t = 0$ $Q > \frac{1}{20} \bar{Q}$.

Следовательно, действительные корни характеристического уравнения из области (2.22) не подходят. В области (2.24) $B > 94$ при $|\alpha| < |\beta|$, поэтому действительные корни из этой области также не подходят. Из приведенных рассуждений видно, что корни характеристического уравнения модели насоса переменной подачи с регулятором по давлению следует искать среди комплексных корней.

Рассмотрим область (2.24), где возможны наибольшие значения параметра B . Однако при $\left(\frac{B}{2}\right)^2 < 4\delta$ и даже при $A > 464$ $B < 19$, но и $|\alpha| > |\beta|$, поэтому остается одна единственная область измене-

ния параметров насоса переменной подачи (2.23), т.е. $A \rightarrow 300$, $B \rightarrow 15$.

Исходя из вышесказанного, параметры модели насоса переменной подачи с регулятором по давлению следует подбирать из области

$$\begin{aligned} 200 < A < 400; \\ 10 < B < 20. \end{aligned} \quad (2.29)$$

После определения области изменения параметров модели насоса переменной подачи A и B задача по созданию модели насоса переменной подачи может быть сформулирована как синтез параметров модели A и B по экспериментальным характеристикам рис. 2.1—2.3 из области (2.29).

2.2.3. Идентификация параметров модели насоса переменной подачи по экспериментальным характеристикам

Синтез значений параметров модели насоса переменной подачи по экспериментальным характеристикам предполагает наличие математической модели движения рабочей жидкости в гидролиниях испытательного стенда (см. рис. 2.4).

Основы теории неустановившегося движения рабочей жидкости в гидролиниях разработаны Л. Эйлером [3], Н.Е. Жуковским [4] и развиты в работах Л.М. Тарко [5], А.И. Чарного [6], Д.Н. Попова [7], В.Н. Прокофьева [8] и др.

Авторами предлагается методика математического описания движения рабочей жидкости в гидролиниях, основанная на делении длинных гидролиний на участки, описании участков типовыми дифференциальными уравнениями и сведении системы уравнений к задаче Коши, отличающаяся от традиционных учетом влияния давления подачи на плотность рабочей жидкости.

При разработке математической модели движения рабочей жидкости на участке гидролинии были приняты следующие предположения и допущения:

- состояние рабочей жидкости определяется ее плотностью, т.е. предполагается наличие зависимости $\rho = f(t, p)$, где ρ — плотность рабочей жидкости; p — давление рабочей жидкости;
- температура рабочей жидкости постоянна;
- стенки трубопроводов непроницаемы;
- скорость рабочей жидкости постоянна по сечению гидролинии;
- сопротивление движению равномерное по длине гидролинии в соответствии с расчетной схемой (рис. 2.6).

Тогда для участка сечения X уравнение движения рабочей жидкости в дифференциальной форме примет вид

$$\rho F dx \frac{dv}{dt} = -F \frac{\partial p}{\partial x} dx - F \xi v^2 (\text{sign } v) dx, \quad (2.30)$$

где $\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial x} v + \frac{\partial v}{\partial t}$.

Подставив выражение для $\frac{dv}{dt}$ в уравнение (2.31), получим уравнение движения рабочей жидкости на участке гидролинии:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + (\text{sign } v) \frac{\xi}{\rho} v^2 = 0. \quad (2.31)$$

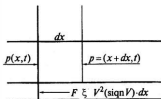


Рис. 2.6. Расчетная схема движения рабочей жидкости на участке гидролинии

Уравнение неразрывности запишем в известной форме:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0. \quad (2.32)$$

Уравнение состояния в соответствии с [9] запишем в виде

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{p}{E} \right). \quad (2.33)$$

Итак, в принятых предположениях и допущениях движение рабочей жидкости на участке гидролинии полностью определяется тремя уравнениями: уравнением движения (2.31), уравнением неразрывности (2.32) и уравнением состояния (2.33).

После несложных преобразований получим систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, которые вместе с граничными и начальными условиями полностью определяют параметры движения рабочей жидкости на участке гидролинии:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{E}{\rho_0(E+p)} \frac{\partial p}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial x} - (\text{sign } v) \frac{\xi E}{\rho_0(E+p)} v^2; \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -(E+p) \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial p}{\partial x}, \end{cases} \quad (2.34)$$

где v — скорость рабочей жидкости в гидролинии; p — давление; E — приведенный модуль упругости; ξ — коэффициент сопротивления; ρ — плотность рабочей жидкости.

Расчетная схема задачи синтеза параметров насоса переменной подачи представлена на рис. 2.7 и эквивалентна схеме испытательного стенда рис. 2.4.

Введем координату X по длине гидролинии с началом отсчета в точке A подсоединения насоса.

Теперь в соответствии с (2.35) задачу синтеза параметров A и B насоса переменной подачи можно сформулировать следующим

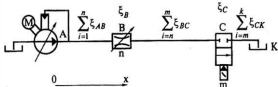


Рис. 2.7. Расчетная схема испытательного стенда

образом: при заданных гидравлической и расчетной схемах испытательного стенда, существующих ограничениях по расположению его элементов, в соответствии с принятыми предположениями, допущениями и экспериментальными характеристиками насоса (см. рис. 2.1—2.3) определить коэффициенты A и B модели насоса переменной подачи, удовлетворяющие критериям (2.35), системе дифференциальных уравнений в частных производных (2.36) с граничными условиями (2.37) и начальными условиями (2.38)—(2.40):

$$\begin{aligned} |Q(t, x_m) - Q_{\text{экс}}(t, x_m)| &\rightarrow 0; \\ |p(t, x_m) - p_{\text{экс}}(t, x_m)| &\rightarrow 0. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Здесь $Q_{\text{экс}}(t, x_m)$ и $p_{\text{экс}}(t, x_m)$ — требуемые подача насоса и давление в сечении x_m (см. рис. 2.4); $Q(t, x_m)$ и $p(t, x_m)$ — расчетные подача насоса и давление в сечении x_m ;

$$\begin{cases} F \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{EF^2}{\rho_0(E+p)} \frac{\partial Q}{\partial x} + Q \frac{\partial Q}{\partial x} + (\text{sign} Q) \frac{\xi_0 E}{\rho_0(E+p)} Q^2 = 0, \\ F \frac{\partial p}{\partial t} + (E+p) \frac{\partial Q}{\partial x} - Q \frac{\partial p}{\partial x} = 0; \end{cases} \quad (2.36)$$

$$\begin{cases} \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{d^2 Q(t, 0)}{dt^2} + B \frac{dQ}{dt} + B \frac{dQ(t, 0)}{dt} = A \{p[Q(t, 0) - p(t, 0)]\}, \\ Q(t, x) = 0; \end{cases} \quad (2.37)$$

при $t = 0$

$$p \left[Q(0, x) + b + a \left(\sum_{i=1}^k \xi_i \right) Q^2(0, x) \right] - \left(\sum_{i=1}^k \xi_i \right) Q^2(0, x) - \bar{p}a = 0; \quad (2.38)$$

$$\frac{dp}{dx} = -\xi Q^2(0, x); \quad (2.39)$$

$$p(0, x) = p \left[Q(0, x) + b + a \left(\sum_{i=1}^k \xi_i \right) Q^2(0, x) \right], \quad (2.40)$$

где $Q_{\text{гр}} = ap + b$: при $p(t, 0) < \bar{p}$ $a = a_1$, $b = -a_1$;

при $p(t, 0) > \bar{p}$ $a = a_2$, $b = (a_1 - a_2) - b_1$.

Коэффициенты сопротивлений ξ_i представляют собой не что иное, как потери давления на единичном участке, т.е.:

$$\xi_i = \frac{\xi_{AB}}{AB}.$$

Очевидно, что при определении начальных условий необходимо решить уравнение (2.38) относительно $Q(0, x)$. Ясно, что решение (2.39) с начальными условиями (2.40) может быть записано в виде

$$p(0, x) = p \left[Q(0, x) + b + a \left(\sum_{i=1}^k \xi_i \right) Q^2(0, x) \right] - \xi Q^2(0, x)x. \quad (2.41)$$

Что касается критериев (2.36), то они могут быть различны, но в данном случае

$$\max |Q(t, x_m) - Q_{\text{эсп}}(t, x_m)| \rightarrow \min.$$

Теперь на основании (2.36)–(2.40) разобьем модель на участки в соответствии с расчетной схемой (см. рис. 2.7) и, после при-

ведение метода решения к разностной схеме, получим математическую модель синтеза параметров насоса переменной подачи с регулятором по давлению в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 Q}{dt^2} + a\ddot{p}_1 + B\dot{Q}_1 + Ba\dot{p}_1 &= A[p(Q_1) + ap_1 + b - p]; \\ \frac{dQ_i}{dt} &= -Q_i \frac{Q_i - Q_{i-1}}{F_i \Delta l} - \frac{EF}{\rho_0(E + p_i)} \frac{p_i - p_{i-1}}{\Delta l} - \\ &\quad - (\text{sign } Q_i) \frac{E\bar{\epsilon}_{AB} Q_i}{\Delta l n \rho F_i (E + p_i)}; \quad i = 2, \dots, n-1, \end{aligned} \quad (2.42)$$

где $Q_n = 0$, $\frac{dp_i}{dt} = -\frac{E + p_i}{F_i} \frac{Q_i - Q_{i-1}}{\Delta l} - Q_i \frac{p_i - p_{i-1}}{F_i \Delta l}$.

Обозначим $\frac{dQ}{dt} = X$, $\frac{dp_1}{dt} = Y$ и подставим значения для $\frac{dp_1}{dt}$ и

$\frac{d^2 p_1}{dt^2}$ в первое уравнение системы (2.42). Полученная таким образом система уравнений в частных производных сводится к задаче Коши и в этой форме принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{a(2Q_1 - Q_2)}{(F\Delta l)^2} [(E + p_1)(Q_2 - Q_1) + Q_1(p_2 - p_1)] - \\ &\quad - \frac{Q_1 a}{(F\Delta l)^2} [(Q_2 - Q_1) + Q_2(p_2 - p_1)] - \frac{a(E + p_1)}{F\Delta l} \left[\frac{Q_2(Q_2 - Q_1)}{F\Delta l} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{EF(p_2 - p_1)}{\rho_0(E + p_2)\Delta l} + (\text{sign } Q_2) \frac{E\bar{\epsilon}_{AB} Q_2^2}{n\rho_0 F(E + p_2)} \right] - \left[B - \frac{a(E + 2p_1 - p_2)}{F\Delta l} \right] X + \\ &\quad + \frac{aB}{F\Delta l} (Q_2 - Q_1)(E + p_1) + BaQ_1 \frac{p_2 - p_1}{F\Delta l} + A[p(Q_1) + ap_1 + b - p]; \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = X; \quad (2.44)$$

$$\frac{dQ_i}{dt} = Q_i \frac{Q_i - Q_{i-1}}{F \Delta l} - \frac{EF}{\rho_0 (E + p_i)} \frac{p_i - p_{i-1}}{\Delta l} - (\text{sign } Q_i) \frac{E \xi_{AB} Q_i^2}{n \rho_0 F (E + p_i)}; \quad (2.45)$$

(i = 2, ..., n-1)

$$Q_n = 0;$$

$$\frac{dp_i}{dt} = -(E + p_i) \frac{Q_i - Q_{i-1}}{F \Delta l} - Q_i \frac{p_i - p_{i-1}}{F \Delta l}; \quad (2.46)$$

(i = 2, ..., n)

$$\frac{dp_1}{dt} = -(E + p_1) \frac{Q_2 - Q_1}{F \Delta l} - Q_1 \frac{p_2 - p_1}{F \Delta l} \quad (2.47)$$

Здесь a и b — коэффициенты утечек насоса (см. рис. 2.5); Q_i — подача на границе i -го участка гидролинии; p_i — давление на границе i -го участка гидролинии; E — приведенный модуль упругости; Δl — длина участка разбиения гидролинии; F_i — площадь сечения i -го участка гидролинии; ρ — плотность рабочей жидкости; n — количество участков разбиения; $\xi_{AB} = \sum_{i=1}^n \xi_i$ — суммарные коэффициенты сопротивления участка гидролинии; A и B — параметры, характеризующие тип насоса переменной подачи.

Для определения начальных условий на участках гидролинии необходимо решить уравнение (2.48) относительно Q :

$$p[Q + b + a(\xi_{AB})Q^2] - p_a = 0. \quad (2.48)$$

Здесь выражение в квадратных скобках представляет собой функциональную зависимость $p = p(Q)$ насоса переменной подачи (см. рис. 2.1) с учетом утечек (см. рис. 2.5), причем

$$\begin{cases} a = a_1 \\ b = b_1 \end{cases} \quad \rho_a + \sum_{i=1}^k \xi_i Q^2 < \bar{p};$$

$$\begin{cases} a = a_2 \\ b = b_2 \end{cases} \quad \rho_a + \sum_{i=1}^k \xi_i Q^2 > \bar{p}.$$

Теперь при $t = 0$ определяем начальные условия на границах участков:

$$Q_1 = \dots = Q_{n-1} = Q, \quad Q_n = 0, \quad x = 0;$$

$$p_{i-1} = p + \frac{\sum_{j=1}^k \xi_j}{m-1} Q^2, \quad i = m, \dots, k,$$

$$p_m = p_m + \xi Q^2;$$

$$p_n = p_n + \left(\xi_{\beta} + \sum_{j=m}^n \xi_j \right) Q^2; \quad (2.49)$$

$$p_{i-1} = p_i + \frac{\sum_{j=1}^n \xi_j}{n} Q^2, \quad i = 2, \dots, n-1;$$

$$p_k = p_a.$$

Таким образом, задача синтеза параметров A и B сводится к интегрированию системы дифференциальных уравнений (2.42)—(2.47) с начальными условиями (2.48)—(2.49), удовлетворяющую критериям (2.35).

Найденные в результате синтеза по экспериментальным характеристикам (см. рис. 1.2 и 1.3) параметры насоса переменной подачи A и B определяют вид аппроксимирующей функции (1.5), которая, будучи использована в общей математической модели ГК, позволяет осуществлять синтез, анализ и исследования гидрокомплекса и его систем наиболее оптимальным образом.

2.2.4. Алгоритм и блок-схема идентификации параметров модели насоса переменной подачи по экспериментальным характеристикам



На основании описанной в предыдущих разделах настоящей главы математической модели синтеза параметров A и B насоса переменной подачи с регулятором по давлению по экспериментальным характеристикам разработаны алгоритм и блок-схема реализации предложенной модели на ЭВМ (рис. 2.8—2.10).

Опишем кратко основные блоки алгоритма.

1, 2 — пуск и ввод исходных данных. Блок содержит таблицы экспериментальных характеристик насоса переменной подачи (рис. 2.1—2.3 и 2.5), постоянные коэффициенты для определения начальных условий системы дифференциальных уравнений (2.42)—(2.47) и параметры, определяющие работу стандартных программ;

3 — определение начальных условий для системы дифференциальных уравнений по (2.48)—(2.49). Блок детализирован на рис. 2.9. Алгоритм решения сводится к многократному применению метода, известного в литературе как метод «стягивания в точку»;

Рис. 2.8. Блок-схема автоматизированного синтеза параметров модели насоса переменной подачи по экспериментальным характеристикам

4 — стандартная программа интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге—Кутты;

5 — блок интерполяции, производящий реализацию экспериментальных характеристик (блоки 1-2) путем интерполяции табличных значений, занесенных в оперативную память ЭВМ;

6 — автоматизированный синтез параметров A и B насоса переменной подачи по экспериментальной характеристике (см. рис. 2.3). Блок детализирован на рис. 2.10. Особенности алгоритма синтеза параметров A и B заключаются в минимизации отклонений реаль-

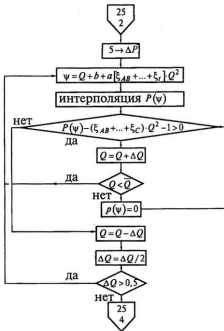


Рис. 2.9. Детализация блока №3 (рис. 2.8)

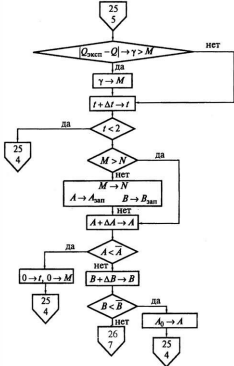


Рис. 2.10. Детализация блока №6 (рис. 2.8)

ных характеристик насоса переменной подачи от требуемых с заданной степенью точности;

7— печать результатов вычислений, массивы результатов интегрирования и параметры насоса переменной подачи A и B обрабатываются стандартными программами и печатаются в виде таблиц.

Таким образом, созданная математическая модель насоса переменной подачи с регулятором по давлению в виде дифференциального уравнения второго порядка с постоянными параметрами A и B , алгоритм и некоторые результаты ее исследований на ЭВМ дают возможность выявить те принципы и подходы, которые целесообразно применять для разработки математических моделей насосов переменной подачи, входящих в блоки питания различных типов гидросистем.

Кроме того, использование модели такого типа весьма удобно при разработке математических моделей различных гидросистем и способов их реализации, как правило, представляющих собой решение систем дифференциальных уравнений.

2.2.5. Методы построения математических моделей ВСУ и пневмогидроаккумулятора

Привод насоса переменной подачи может осуществляться различными механизмами: электродвигателем, двигателями внутреннего сгорания и т.д., имеющими свои нагрузочные характеристики.

Орбитальный корабль «Буран» осуществляет «безмоторный» спуск и посадку, и для работы аэродинамических поверхностей источником первичной энергии, осуществляющей привод насосов переменной подачи, служит вспомогательная силовая установка, представляющая собой газотурбинную установку, работающую на однокомпонентном топливе и поддерживающую заданную частоту вращения выходного вала равную 4500 об/мин.

Пусть вспомогательная силовая установка обладает характеристиками, представленными на рис. 2.11 и 2.12.

При $\omega = \bar{\omega}$, $M = \bar{M}$ $M = \alpha\omega + B$, где $B = -\alpha\bar{\omega}$.

Отсюда

$$\bar{M} = \alpha\bar{\omega} - \alpha\bar{\omega}, \quad \alpha = \frac{\bar{M}}{\bar{\omega} - \bar{\omega}} \quad (2.50)$$

или

$$M = \frac{\bar{M}}{\bar{\omega} - \bar{\omega}} (\omega - \bar{\omega}). \quad (2.51)$$

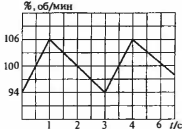


Рис. 2.11. Обороты ВСУ в % от номинальных

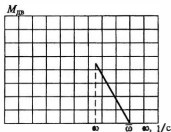


Рис. 2.12. Нагрузочная характеристика ВСУ

Теперь уравнение вспомогательной силовой установки можно записать в следующем виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M(\omega) - M_n, \quad (2.52)$$

где J — момент инерции ВСУ; ω — угловая скорость ВСУ, равная скорости насоса, жестко связанного с выходным валом ВСУ; M_n — момент на насосе переменной подачи,

$$M_n = 0,159 \Delta p_n q_n; \quad q_n = \frac{Q_n \pi}{30\omega}, \quad (2.53)$$

где Δp_n — перепад давления на насос переменной подачи.

Тогда с учетом (2.52) и (2.53) модель ВСУ можно записать в виде

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{\bar{M}}{\omega - \bar{\omega}} (\omega - \bar{\omega}) - 0,159 \Delta p_n \frac{Q_n \pi}{30\omega}. \quad (2.54)$$

Учитывая вышеизложенное, математическую модель системы «ВСУ — насос» представим в следующем виде:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = \frac{A}{G_1} [p(q) - p(t)], \quad \sigma_1 = \frac{60\omega}{2\pi}, \quad J \frac{d\omega}{dt} = M(\omega) - M_n \quad (2.55)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d^2 Q_n}{dt^2} + B \frac{dQ_n}{dt} &= A[p(Q) - p(t)], \\ J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{\bar{M}}{\omega - \bar{\omega}} (\omega - \bar{\omega}) - 0,159 \Delta p_n \frac{Q_n \pi}{30\omega}. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Здесь $p = p(t)$ — текущее давление в системе, зависящее от давления в пневмогидроаккумуляторе, где давление в его газовой полости описывается известной зависимостью [10]

$$p_A w_A^k = \text{const} \quad \text{или} \quad p_0 w_0^k = p_i w_i^k. \quad (2.57)$$

Однако решение системы нелинейных дифференциальных и алгебраических уравнений представляет определенные трудности, поэтому представим уравнение (2.57) в дифференциальном виде:

$$\frac{dp_A}{dt} = -K \frac{p_i}{w_i} \frac{dw_i}{dt}. \quad (2.58)$$

Таким образом, система «ВСУ — насос — пневмогидроаккумулятор» описывается системой трех дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{\bar{M}}{\omega - \bar{\omega}} (\omega - \bar{\omega}) - M_n; \\ \frac{d^2 Q}{dt^2} + B \frac{dQ}{dt} = A[p(Q) - p(t)]; \\ \frac{dp_A}{dt} = -K \frac{p_i}{w_i} \frac{dw_i}{dt}; \quad p(t) = p_A - \xi_i Q_n^2. \end{array} \right. \quad (2.59)$$

Рассмотрим случай, когда в системе применен поршневой пневмогидроаккумулятор. К системе уравнений (2.59) добавляется уравнение движения поршня

$$\frac{d^2 x_n}{dt^2} = \frac{1}{m_n} [(p_A - p_i) 2S_n - F_{тр} - \sigma], \quad (2.60)$$

и тогда, с учетом (2.60) и (2.61) получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\omega}{dt} = M(\omega) - M_n; \\ \frac{d^2 Q}{dt^2} + B \frac{dQ}{dt} = A[p(Q) - p(t)]; \\ \frac{dp_A}{dt} = -K \frac{p_A}{w_A} \frac{dw_A}{dt}; \\ \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{m} [(p_A - p_i) 2S_n - F_{тр} - \sigma]. \end{array} \right. \quad (2.61)$$

Однако, если мы желаем пользоваться математическим описанием системы, учитывающей распределенные параметры рабочей жидкости, то удобнее всего представить аккумулятор участком трубопровода большого диаметра. Такая замена вполне правомерна, так как не противоречит физическому смыслу рабочих процессов, происходящих при функционировании пневмогидроаккумулятора.

С учетом (2.34) математическая модель пневмогидроаккумулятора в соответствии с расчетной схемой (рис. 2.13) и [10] может

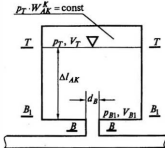


Рис. 2.13. Расчетная схема модели пневмогидроаккумулятора

быть представлена следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dv_{B1}}{dt} = -\frac{E}{\rho_0(E + p_T)} \left[\frac{p_{B1} - p_T}{\Delta l_{AK}} + (\text{sign } v_T) \frac{\xi}{\Delta l_{AK}} v_T^2 \right] - v_T \frac{v_{B1} - v_T}{\Delta l_{AK}}; \quad (2.62)$$

$$\frac{dp_T}{dt} = -(E + p_T) \frac{v_{B1} - v_T}{\Delta l_{AK}} - v_T \frac{p_{B1} - p_T}{\Delta l_{AK}}; \quad (2.63)$$

$$v_T = -\frac{(E + p_T)v_{B1}\alpha}{\Delta l_i + \alpha(p_{B1} - p_T) - \alpha(E + p_T)}, \quad (2.64)$$

где

$$\alpha = \frac{w^{k+1}}{K \cdot \text{const} \cdot F_{AK}}; \quad (2.65)$$

$$w^{k+1} = w_0 + F_{AK} \int_0^t v_T dt; \quad (2.66)$$

$$p_B = p_{B_1} - (\text{sign } v_{B_1}) v_B^2 \sum_{i=1}^n \xi_i v_B^2; \quad (2.67)$$

$$v_B = \frac{F_{AK}}{F_B} v_{B_1}. \quad (2.68)$$

Здесь p_i — давление рабочей жидкости в i -м сечении трубопровода; v_i — скорость рабочей жидкости в i -м сечении трубопровода; E — модуль упругости рабочей жидкости; плотность рабочей жидкости; F_i — площадь i -го сечения трубопровода; const — уравнение состояния пневмогидроаккумулятора (2.57); w_i — текущий объем газа в пневмогидроаккумуляторе; Δl — участок условного трубопровода; F_{AK} — площадь сечения условного трубопровода.

В уравнении (2.62) для нашего случая имеем

$$(\text{sign } v_i) \frac{\xi_i E}{\rho_0 (E + p_i)} v_i^2 \rightarrow 0,$$

так как при движении рабочей жидкости в трубопроводе большого диаметра гидравлические коэффициенты сопротивлений $\xi_i = 0$.

Таким образом, математическую модель пневмогидроаккумулятора можно представить двумя обыкновенными дифференциальными уравнениями с начальными, граничными условиями и уравнениями связи, причем (2.62) и (2.63) описывают движение рабочей жидкости в условном трубопроводе. Уравнение (2.64) — граничное условие на газо-жидкостной границе, а (2.65) — уравнение связи.

В настоящем разделе, посвященном методам построения математических моделей ВСУ и пневмогидроаккумулятора, приведены три различных метода математического описания рабочих процессов, происходящих при функционировании пневмогидроаккумулятора, рассмотрены три математические модели пневмогидроаккумулятора и показаны направления их реализации с помощью ЭВМ:

- математическая модель мембранного пневмогидроаккумулятора — (2.57) и (2.58);
- математическая модель поршневого пневмогидроаккумулятора — (2.61);
- математическая модель пневмогидроаккумулятора, учитывающая распределенные параметры рабочей жидкости, (2.62)— (2.68).

При использовании последней модели для поршневого пневмогидроаккумулятора следует к модели (2.62)—(2.68) добавить (2.60).

Таким образом, приведенные методы построения математических моделей элементов ГС могут быть использованы для решения широкого круга задач, связанных с проектированием и исследованиями изделий и агрегатов, системой энергетики в которых являются гидросистемы.

2.3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛАПАНА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ГИДРОПИТАНИЯ РУЛЕВЫХ СИСТЕМ

2.3.1. Общая постановка задачи и цель разработки

Гидравлическая принципиальная схема ОК «Буран» состоит из большого числа гидролиний различных длин и диаметров, регулирующей, контрольной и фильтрующей аппаратуры, поэтому математическое описание системы ГС—КП для решения исследовательских задач комплекса в целом представляет определенные трудности в части реализации. Гидравлическая принципиальная схема, приведенная в первой главе настоящей работы, сведена к расчетной (рис. 2.14) и может быть использована при условии равенства гидравлических сопротивлений в реальной и расчетной гидравлических схемах.

При разработке математической модели ГС—КП были сделаны следующие предположения и допущения:

- давление, скорость и плотность рабочей жидкости постоянны по сечению трубопровода;

- сжимаемость рабочей жидкости не учитывается — кроме случаев математического описания, когда это необходимо;
- стенки трубопроводов не деформируемы;
- температура рабочей жидкости постоянна;
- гидравлическое сопротивление в трубопроводах зависит от числа Re .

Для местных сопротивлений (фильтры, дроссели, клапаны и т.д.), основываясь на проливочных либо паспортных характеристиках, можно записать

$$\xi_i = \frac{\Delta p}{Q^2}, \quad (2.69)$$

где Δp — проливочный, или паспортный перепад давления на i -м агрегате при проливочной или паспортной подаче рабочей жидкости через рассматриваемый агрегат; Q — подача рабочей жидкости.

Величина потерь по длине при движении рабочей жидкости в гидролиниях может быть вычислена исходя из известной зависимости:

$$\xi_{\text{дл}} = \lambda \frac{L_i}{d_i} \frac{\rho}{2} \frac{1}{F_i^2} Q_i^2, \quad (2.70)$$

где L_i — длина гидролинии; d_i — диаметр гидролинии; ρ — плотность рабочей жидкости; F_i — площадь сечения гидролинии; Q_i — средний расход по сечению в гидролинии; λ — коэффициент, зависящий от числа Re .

С учетом вышеннеложенного задачу моделирования системы ГС—КП можно сформулировать следующим образом:
при заданных принципиальных и монтажных гидравлических схемах ГС, существующих ограничениях по ее конструкции, характеристиках входящих в ГС элементов и агрегатов, а также размеров золотников клапана переключения гидроситания рулевых систем, заданных характеристиках насосов переменной подачи и приводных двигателей разработать математическую модель системы ГС—КП, по-

звolyющую проводить анализ и исследование по влиянию различных конструктивных и функциональных факторов на рабочие характеристики системы ГС—КП в целом.

Считаем известными коэффициенты K_1 , K_2 , K_3 , как случайные отказы в виде функций:

$$K_1 = f(p_1), \quad K_2 = f(p_2), \quad K_3 = f(p_3). \quad (2.71)$$

Расчетная схема ГС, показывающая подключение гидроснабжения к рулевым системам, приведена на рис. 2.14.

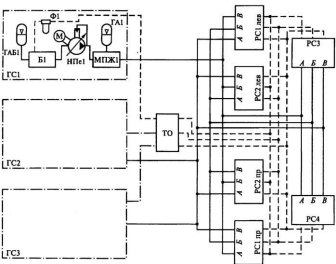


Рис. 2.14. Расчетная схема системы ГС—РС

Здесь ГАБ1 — гидроаккумулятор бака первой ГС; Б1 — бак первой ГС; Ф1 — блок фильтров первой ГС; НПел — насос переменной подачи первой ГС; МПЖ1 — модуль подготовки жидкости первой ГС; ГА1 — гидроаккумулятор первой ГС; ТО — теплообмен-

ник; РС1, РС2 — рулевые системы, управляющие концевыми и корневыми секциями элевонров; РС3 — рулевая система, управляющая рулем направления (РН) и воздушным тормозом (ВТ); РС4 — рулевая система, управляющая балансировочным щитком (БЩ); ГС1, ГС2, ГС3 — гидросистемы.

Клапан переключения рулевых систем предназначен для автоматического переключения гидропитания при отказе одной из питающих гидросистем, т.е. с отказавшей ГС на исправную и обратно (случай восстановления неисправной ГС).

Принципиальная схема клапанов переключения предполагает независимость градиента падения давления в отказавшей ГС на время переключения. Расчетная схема клапана переключения рулевых систем приведена на рис. 2.15.

Разработка математической модели клапана переключения гидропитания ведется с целью анализа работы гидросистем (см. рис. 2.14). Модель позволяет имитировать отказы по гидропитанию с целью исследований характеристик рабочих процессов в стыковочных точках («ВСУ—НПе», «НПе—ГА», «ГС—КП», «КП—Нагрузка рулевых поверхностей»); кроме того, возможно использование модели для определения надежности переключения.

При разработке более точной математической модели с целью синтеза и исследований внутренних характеристик клапана переключения (перетечки и способы их уменьшения, влияние на величины перетечек и утечек размеров золотников и зазоров в золотниковых парах, влияние на величину перетечек размеров гидростатических канавок золотников и т.д.) были сделаны следующие допущения и предположения:

- давление на входе и выходе клапана переключения во всех трех ГС одинаково;
- утечки по зазорам золотниковой пары (в первом приближении) отсутствуют;
- трением в золотниковых парах можно пренебречь;
- температура рабочей жидкости постоянна.

Рассмотрим работу клапана переключения в соответствии с расчетной схемой рис. 2.15 на примере изменения проводимостей дроссельных щелей золотников 1 и 3. Под *проводимостью дроссельной щели* условимся понимать коэффициент ξ_i из зависимости (2.63).

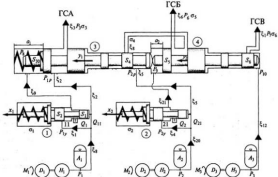


Рис. 2.15. Расчетная схема клапанно-переключения рулевых систем;

1, 2 — ускорительные золотники; 3, 4 — основные золотники клапана переключения; S_i — площади всечения; x_i и y_i — перемещения; Д.Н.А. — ВСУ, двигатели, насосы и аккумуляторы соответственно; ξ_i — гидравлические сопротивления внутренние клапанов клапана переключения; σ_i — проводимости отверстий в золотниках

Изменение проводимости дроссельной щели ГСА (основной гидросистемы питания) (при $y_1 \leq \underline{y}_1$, $\xi_3 = \text{const}$, при $y_1 \geq \bar{y}_1$, $\xi_3 = \infty$, при $\xi_3 = f(y_1)$, $\underline{y}_1 < y_1 < \bar{y}_1$) представлено на рис. 2.16.

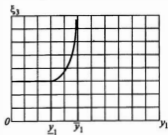


Рис. 2.16. Изменение проводимости дроссельной щели ГСА

На рис. 2.17 показано изменение проводимости дроссельной щели ГСА в зависимости от движения ускорительного золотника I (при $x_1 \leq \underline{x}_1$, $\xi_3 = \text{const}$, при $x_1 \geq \bar{x}_1$, $\xi_3 = \infty$, при $\xi_3 = f(x_1)$, $\underline{x}_1 < x_1 < \bar{x}_1$).

Рассмотрим работу системы при рабочем процессе, происходящем при переключении с ГСА на любую другую гидросистему, на примере ГСА. Работа системы при вышеизложенных условиях

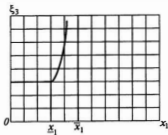


Рис. 2.17. Изменение проводимости дроссельной щели ГСА в функции ускорительного золотника I

приведена на рис. 2.18 (при $x_1 < \underline{x}_1, \xi_1 = \infty$, при $x_1 > \bar{x}_1, \xi_1 = \text{const}$, при $\xi_1 = f(x_1), \underline{x}_1 < x_1 < \bar{x}_1$).

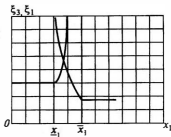


Рис. 2.18. Переключение с ГСА

На рис. 2.16—2.18: ξ_2 — проводимость дроссельной щели основного золотника 3 гидросистемы ГСА;

ξ_1 — проводимость дроссельной щели ускорительного золотника 1 гидросистемы ГСА;

x_1 — перемещение ускорительного золотника 1 гидросистемы ГС1.

Таким образом, из рис. 2.16—2.18 можно видеть, что применение безрасходных ускорительных золотников 1, 2 (см. рис. 2.15) позволило значительно повысить быстродействие рулевых систем при их переключении с отказавшей гидросистемы на резервную.

Рассмотрим теперь методы построения математической модели переключающих золотников клапана переключения гидроснабжения при отказе ГС1 и переключении на ГС2.

2.3.2. Математическая модель золотника, переключающего гидроснабжение с ГСА на ГСВ

Уравнение движения золотника 3 в соответствии с расчетной схемой (см. рис. 2.15) запишем в следующем виде:

$$M_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} = S_4 p_9 - S_3 p_8 - C_1 y_1 - R_{гд3} - R_{гд4}, \quad (2.72)$$

где M — масса золотника 3;

y — перемещение золотника 3;

S — соответствующие площади сечений золотников рабочих камер;

C — жесткость пружин;

R — гидродинамические силы, действующие на золотник в соответствующих камерах;

p — давление в соответствующих рабочих камерах золотников.

Уравнение баланса расходов в управляющей полости для золотника 1 запишем в виде

$$Q_1 = S_3 \frac{dy_1}{dt} + S_2 \frac{dx_1}{dt} + \frac{E}{w_1} \frac{dp_8}{dt}. \quad (2.73)$$

С другой стороны, уравнение баланса расходов в управляющей полости с учетом проводимости дроссельной щели σ_1 можно записать как

$$Q_1 = \sigma_1 \sqrt{p_1 - p_8}$$

или

$$Q_1 = \sigma_1 \sqrt{p_1 - \xi_8 (Q_{H_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_1 (Q_{H_1} + Q_{A_1} - Q_{11})^2 - \xi_9 \left(S_3 \frac{dy_1}{dt} \right)^2}. \quad (2.74)$$

Изменение давления в управляющей полости основного золотника 3 из (2.73)—(2.74) получим в виде

$$\frac{dp_8}{dt} = \left[\sigma_1 \sqrt{p_1 - \xi_8 (Q_{H_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_1 (Q_{H_2} + Q_{A_2} - Q_{11})^2 - \xi_9 \left(S_3 \frac{dy_1}{dt} \right)^2} - \right.$$

$$-S_3 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_1}{dt} \left] \frac{w_1}{E}, \quad (2.75)$$

где

$$\sigma_1 = \mu_1 b_1 (x_{10} \pm x_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}};$$

$$w_1 = a_1 S_3; \quad (2.76)$$

Уравнение баланса расходов и изменения давления в другой управляющей полости золотника 3 по аналогии с (2.74)–(2.77) можно записать как

$$Q_2 = S_4 \frac{dy_1}{dt} + S_2 \frac{dx_2}{dt} + \frac{E}{w_2} \frac{dp_2}{dt} \quad (2.77)$$

или

$$Q_2 = \sigma_2 \sqrt{p_2 - \xi_{10} (Q_{H_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_{14} (Q_{H_2} + Q_{A_2} - Q_{21})^2 - \xi_{11} \left(S_4 \frac{dy_1}{dt} \right)^2}. \quad (2.78)$$

Отсюда получаем

$$\frac{dp_2}{dt} = \left[\sigma_2 \sqrt{p_2 - \xi_{10} (Q_{H_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_{14} (Q_{H_2} + Q_{A_2} - Q_{21})^2 - \xi_{11} \left(S_4 \frac{dy_1}{dt} \right)^2} - \right.$$

$$\left. - S_4 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_2}{dt} \right] \frac{w_2}{E}, \quad (2.79)$$

где

$$\sigma_2 = \mu_2 b_2 (x_{20} \pm x_2) \sqrt{\frac{2}{\rho}};$$

$$w_2 = a_2 S_3 + y_1 S_4. \quad (2.80)$$

В приведенных зависимостях (2.73)—(2.80) были приняты следующие обозначения:

Q_{n_i} — подача на выходе насосов;

Q_{A_i} — расход в пневмогидроаккумуляторах;

x_i, y_i — перемещение соответствующих золотников;

σ_i — проводимости дроссельных щелей золотников;

ξ_{κ} — гидравлические коэффициенты сопротивлений в каналах клапана переключения;

S_i — площади сечений соответствующих золотников;

E — объемный модуль упругости рабочей жидкости;

w_i — объемы управляющих полостей основного золотника 3;

μ_i — коэффициенты расхода дроссельных щелей золотников;

ρ_i — плотность рабочей жидкости;

b_i — ширина щелей ускорительных золотников;

a_i — линейные размеры;

Q_i — расходы в соответствующих полостях золотников.

Далее, с учетом вышензложенного и рис. 2.15 запишем:

$$p_{1p} = p_1 - \xi_{\kappa} (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_2 \left[Q_{n_1} + Q_{A_1} - S_3 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_1}{dt} - \frac{E}{w_1} \frac{dp_k}{dt} \right]^2. \quad (2.81)$$

Отсюда

$$Q_{11} = \sigma_3 \times \\ \times \sqrt{p_1 - \xi_{\kappa} (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_2 \left[Q_{n_1} + Q_{A_1} - S_3 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_1}{dt} - \frac{E}{w_1} \frac{dp_k}{dt} \right]^2 - p_3}, \\ \sigma_3 = \mu_3 b_3 (y_{10} \pm y_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}}. \quad (2.82)$$

Аналогично (2.81) баланс расходов в ГСБ запишем как

$$Q_{21} = \sigma_4 \times \\ \times \sqrt{\rho_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_5 \left(Q_{n_2} + Q_{A_2} - S_4 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_2}{dt} - \frac{E}{w_2} \frac{dp_9}{dt} \right)^2};$$

(2.83)

$$\sigma_4 = \mu_4 b_4 (y_{10} \pm y_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}}.$$

Уравнение движения ускорительного золотника 1 в принятых обозначениях можно записать в виде

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \left[\rho_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_2 Q_{11}^2 \right] S_1 + \\ + \left[\rho_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_1 Q_1^2 \right] S_2 - R_{1Д_1} - C_{11} x_1$$

(2.84)

или

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \left[\rho_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_2 Q_{11}^2 \right] S_1 + \\ + \left[\rho_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_1 (Q_{n_1} + Q_{A_1} - Q_{11})^2 \right] S_2 - R_{1Д_1} - C_{11} x_1.$$

(2.85)

Для ускорительного золотника 2 (см. рис. 2.15) по аналогии с (2.85) уравнение движения запишем в виде

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = \left[\rho_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_5 Q_{21}^2 \right] S_1 + \\ + \left[\rho_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_4 (Q_{n_2} + Q_{A_2} - Q_{21})^2 \right] S_2 - R_{2Д_2} - C_{21} x_2.$$

(2.86)

Уравнение движения золотника 4 по аналогии с предыдущим выразим в виде

$$m \frac{d^2 y_2}{dt^2} = p_{10} S_6 - p_9 S_3 - R_{гД_4} - C_{21} y_2. \quad (2.87)$$

Рассматривая вышесказанные выкладки, можно заметить, что во всех уравнениях движения золотников присутствуют так называемые гидродинамические силы, представляющие собой аксиальные силы, вызываемые реактивным действием потока жидкости в дроссельных щелях золотников и препятствующие открытию щелей золотников.

Как известно [11], рассматриваемая гидродинамическая сила в основном является функцией двух переменных — перепада давления рабочей жидкости и открытия окна золотника и действует под углом к оси плунжера в направлении, обратном направлению скорости потока, величина угла которого для идеальной жидкости может быть принята равной 69° . То есть действие жидкости, проходящей через щель, образованную кромками плунжера и окон втулки, аналогично действию пружины, стремящейся вернуть плунжер в нейтральное положение.

Запишем уравнения для гидродинамических сил, присутствующих в уравнениях золотников клапана переключения гидропитания, в известном виде:

$$\begin{aligned} R_{гД_1} &= 2\mu_1 b_1 (x_{10} \pm x_1) (p_{1p} - p_8) \cos 69^\circ; \\ R_{гД_2} &= 2\mu_2 b_2 (x_{20} \pm x_2) (p_{2p} - p_9) \cos 69^\circ; \\ R_{гД_3} &= 2\mu_3 b_3 (y_{10} \pm y_1) (p_{1p} - p_3) \cos 69^\circ; \\ R_{гД_4} &= 2\mu_4 b_4 (y_{20} \pm y_2) (p_{2p} - p_6) \cos 69^\circ; \\ R_{гД_6} &= 2\mu_6 b_6 (y_{20} \pm y_2) (p_{10} - p_7) \cos 69^\circ. \end{aligned} \quad (2.88)$$

где

$$\begin{aligned}
\rho_{10} &= \rho_3 - \xi_{12} (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2; \\
\rho_{1y} &= \rho_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_{11} (Q_{n_1} + Q_{A_1} - Q_{11})^2; \\
\rho_{2y} &= \rho_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_{14} (Q_{n_2} + Q_{A_2} - Q_{21})^2; \\
Q_6 &= \mu_6 b_6 (y_{20} \pm y_2) \sqrt{\frac{2}{p}} \sqrt{\rho_{10} - \rho_7}.
\end{aligned} \tag{2.89}$$

2.4. МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИРУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ СИСТЕМЫ ГС—КП

Применение математических моделей и методов их реализации на ЭВМ, позволяющих учесть существенные нелинейности, позволяет проводить всевозможные исследования уже на ранних этапах разработки с целью определения влияния различных экспериментальных и конструктивных факторов на характеристики проектируемых систем в целом. Кроме того, применение математических моделей помогает сократить объем лабораторных испытаний за счет реализации математических моделей, учитывающих реальные характеристики ее элементов, и проводить исследования проектируемых систем при работе в экстремальных режимах, которые практически невозможно (либо слишком сложно) реализовать при проведении лабораторных испытаний — не говоря уже о натурных испытаниях, где реализация таких режимов просто невозможна.

Таким образом, моделирование на ЭВМ является эффективным средством исследования систем, поскольку, как увидим ниже, позволяет использовать модели, содержащие существенные нелинейности и ряд функциональных зависимостей, определяемых экспериментальным путем.

Математическую модель системы ГС—КП, учитывающую экспериментальные характеристики входящих в систему элементов, в принятых обозначениях можно представить в следующем виде:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_1} \left[K_1 M(\omega) - M_{n_1} \right];$$

$$\frac{d^2 q_1}{dt^2} = \frac{A}{Q_1} \left[\rho_1(q_1) - \rho_1(t) \right];$$

$$\rho_1 w_{A_1}^k = \text{const};$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} \left[K_2 M(\omega_2) - M_{n_2} \right];$$

$$\frac{d^2 q_2}{dt^2} = \frac{A}{Q_2} \left[\rho_2(q_2) - \rho_2(t) \right];$$

$$\rho_2 w_{A_2}^k = \text{const};$$

$$\frac{d\omega_3}{dt} = \frac{1}{J_3} \left[K_3 M(\omega_3) - M_{n_3} \right];$$

$$\frac{d^2 q_3}{dt^2} = \frac{A}{Q_3} \left[\rho_3(q_3) - \rho_3(t) \right];$$

$$\rho_3 w_{A_3}^k = \text{const};$$

$$w_{A_1} = w_{01} - \int_0^t Q_{A_1} dt;$$

$$w_{A_2} = w_{02} - \int_0^t Q_{A_2} dt;$$

$$w_{A_3} = w_{03} - \int_0^t Q_{A_3} dt;$$

$$M_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} = S_4 p_9 - S_3 p_8 - C_1 y_1 - R_{T \Pi_3} - R_{T \Pi_4};$$

$$M_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = S_6 p_{10} - S_5 p_9 - R_{T \Pi_6};$$

$$\frac{dp_8}{dt} = \frac{w_1}{E} \left[\sigma_1 \sqrt{p_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_1 (Q_{n_2} + Q_{A_2} - Q_{11})^2 - \xi_3 \left(S_3 \frac{dy_1}{dt} \right)^2} \right] -$$

$$-S_3 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_1}{dt} \Big];$$

$$\frac{dp_3}{dt} = \frac{w_3}{E} \left[\sigma_2 \sqrt{p_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_{14} (Q_{n_2} + Q_{A_2} - Q_{21})^2 - \xi_{11} \left(S_4 \frac{dy_1}{dt} \right)^2 - \right. \\ \left. - S_4 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_2}{dt} \right];$$

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = \frac{1}{m_1} \left\{ \left[p_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_2 Q_{11}^2 \right] S_1 + \right. \\ \left. + \left[p_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_1 (Q_{n_1} + Q_{A_1} - Q_{11})^2 \right] S_2 - R_{гД_1} - C_{11} x_1 \right\};$$

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{1}{m_2} \left\{ \left[p_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_5 Q_{21}^2 \right] S_1 + \right. \\ \left. + \left[p_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_{14} (Q_{n_2} + Q_{A_2} - Q_{21})^2 \right] S_2 - R_{гД_2} - C_{21} x_2 \right\}. \quad (2.90)$$

Уравнения связи представим в виде:

$$M_n = 0,159 \Delta p_n \frac{Q_n \pi}{30 \omega_i};$$

$$M(\omega_i) = f \left\{ \frac{\bar{M}}{\omega_i - \bar{\omega}_i} (\omega_i - \bar{\omega}_i) \right\};$$

$$G_i = \frac{60 \omega_i}{2 \pi};$$

$$q_i = \frac{Q_i \pi}{30 \omega_i};$$

$$R_{\Gamma \Pi_3} = 2\mu_3 b_3 (y_{10} \pm y_1) (p_{1p} - p_3) \cos 69^\circ;$$

$$p_{1p} = p_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_2 \left[Q_{n_1} + Q_{A_1} - S_3 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_1}{dt} - \frac{E}{w_1} \frac{dp_8}{dt} \right]^2;$$

$$w_1 = a_1 S_3;$$

$$R_{\Gamma \Pi_4} = 2\mu_4 b_4 (y_{20} \pm y_2) (p_{2p} - p_6) \cos 69^\circ;$$

$$p_{2p} = p_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_5 \left[Q_{n_2} + Q_{A_2} - S_4 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_2}{dt} - \frac{E}{w_2} \frac{dp_9}{dt} \right]^2;$$

$$w_2 = a_2 S_3 + S_4 y_1;$$

$$R_{\Gamma \Pi_6} = 2\mu_6 b_6 (y_{20} \pm y_2) (p_{10} - p_7) \cos 69^\circ;$$

$$p_{10} = p_{n_3} - \xi_{12} (Q_{n_3} + Q_{A_3})^2;$$

$$\sigma_1 = \mu_1 b_1 (x_{10} \pm x_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}};$$

$$\sigma_2 = \mu_2 b_2 (x_{20} \pm x_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}};$$

$$Q_{11} = \mu_3 b_3 (y_{10} \pm y_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|p_{1p} - p_3|};$$

$$Q_{21} = \mu_4 b_4 (y_{20} \pm y_2) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|p_{2p} - p_6|};$$

$$R_{\Gamma \Pi_1} = 2\mu_1 b_1 (x_{10} \pm x_1) (p_{1p} - p_8) \cos 69^\circ;$$

$$R_{\Gamma \Pi_3} = 2\mu_2 b_2 (x_{20} \pm x_2) (p_{2p} - p_9) \cos 69^\circ;$$

$$\begin{aligned}
p_{1y} &= p_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_1 (Q_{n_1} + Q_{A_1} - Q_{11})^2; \\
p_{2y} &= p_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_4 (Q_{n_2} + Q_{A_2} - Q_{21})^2; \\
Q_6 &= \mu_6 b_6 (y_{20} \pm y_2) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|p_{10} - p_7|}.
\end{aligned} \tag{2.91}$$

Неизвестные:

$$\begin{aligned}
\omega_1, \omega_2, \omega_3, q_1, q_2, q_3, w_{A1}, w_{A2}, w_{A3}, y_1, y_2, \dot{y}_1, \dot{y}_2, p_8, p_9, \\
x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3.
\end{aligned}$$

Таким образом, в полученной системе уравнений количество уравнений соответствует количеству неизвестных (учитывая второй порядок), то есть математическая модель системы ГС—КП сводится к системе 22 дифференциальных уравнений с 22 неизвестными и 21 уравнением связи.

2.5. АЛГОРИТМ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КЛАПАНА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ГИДРОПИТАНИЯ

Рассмотрим алгоритм работы золотников клапана переключения гидропитания с учетом разработанной ранее математической модели системы ГС—КП и рис. 2.15.

Примем, что условие $x_1 > \underline{x}_1$ соответствует открытию окна ускорительного золотника 1 для подачи расхода в управляющую камеру золотника 3.

Условие $x_1 < \underline{x}_1$ соответствует тому, что управляющая полость основного золотника 3 соединена со сливом.

Условие $x_2 > \underline{x}_2$ соответствует открытию золотника 2 и подаче расхода в управляющую камеру, расположенную между золотниками 3 и 4.

Условие $x_2 < \underline{x}_2$ соответствует соединению этой полости со сливом.

Условие $\bar{x}_1 > x_1 > \underline{x}_1$ соответствует включению либо выключению ГС1.

Условие $\bar{x}_2 > x_2 > \underline{x}_2$ соответствует включению либо выключению ГС2.

Условие $y_1 > y_2$ соответствует раздельному движению золотников 3 и 4.

Условие $y_1 = y_2$ соответствует совместному движению золотников 3 и 4.

Теперь рассмотрим условия и порядок включения гидросистем, учитывая что их всего семь.

1. Вкл. ГС«А», ГС«Б», ГС«В».
2. -»- ГС«А», ГС«В», ГС«Б».
3. -»- ГС«Б», ГС«А», ГС«В».
4. -»- ГС«Б» ГС«В» ГС«А».
5. -»- ГС«В» ГС«А» ГС«Б».
6. -»- ГС«В» ГС«Б» ГС«А».
7. Все вместе.

Рассмотрим теперь условия отказов по гидропитанию, т. е. порядок выключения отказавших гидросистем.

Отказ

1. ГС«А» $\rightarrow$ ГС«Б».
2. ГС«А» $\rightarrow$ ГС«В».
3. ГС«Б» $\rightarrow$ ГС«В».

Заметим, что за счет пружины основные золотники клапана переключения гидропитания 3 и 4 всегда находятся в правом крайнем положении, которое сохраняется и при включении ГС«А».

Рассмотрим математические модели при различных комбинациях включения гидросистем.

При включении ГС«Б», если уже включена ГС«А», модель работы клапана переключения выглядит следующим образом:

$$\Gamma C \leftarrow A \rightarrow + \Gamma C \leftarrow B \rightarrow + \Gamma C \leftarrow B \rightarrow$$

$$\begin{cases} M_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} = S_4 p_9 - S_3 p_8 - R_{\Gamma \Pi_3} - R_{\Gamma \Pi_4} - C_1 y_1; \\ M_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = S_6 p_{10} - S_5 p_9 - R_{\Gamma \Pi_6}; \\ p_{10} = \text{const}; R_{\Gamma \Pi_6} = 0; x_1 = \bar{x}_1; p_8 = \text{const}. \end{cases} \quad (2.92)$$

$$\Gamma C \leftarrow B \rightarrow + \Gamma C \leftarrow A \rightarrow$$

$$\begin{cases} M_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} = S_3 p_8 - (S_5 - S_4) p_9 + S_6 p_{10} - R_{\Gamma \Pi_3} - R_{\Gamma \Pi_4} - R_{\Gamma \Pi_6} - C_1 y_1; \\ M_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = S_6 p_{10} - S_5 p_9 - S_3 p_8 + S_4 p_9 - R_{\Gamma \Pi_3} - R_{\Gamma \Pi_4} - R_{\Gamma \Pi_6} - C_2 y_2; \\ p_8 = \text{const}; x_1 = \bar{x}_1; x_2 = \bar{x}_2; p_9 = \text{const}. \end{cases} \quad (2.93)$$

$$\Gamma C \leftarrow B \rightarrow + \Gamma C \leftarrow A \rightarrow + \Gamma C \leftarrow B \rightarrow$$

$$\begin{cases} M_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} = S_3 p_8 - S_4 p_9 + C_1 y_1 - R_{\Gamma \Pi_3} - R_{\Gamma \Pi_4}; \\ y_2 = \text{const}; p_6 = p_{\text{сн}}. \end{cases} \quad (2.94)$$

Заметим, что после включения гидropитания в системе ГСЗ основные золотники 3 и 4 остаются в том же положении, если давление в ГС1 и ГС2 равно рабочему, т. е. в пределах, заданных ТЗ на ГС — 186...216 кгс/см².

$$\Gamma C \leftarrow B \rightarrow + \Gamma C \leftarrow A \rightarrow$$

$$\begin{cases} M_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} = S_6 p_{10} - (S_5 - S_4) p_9 - S_3 p_8 - R_{\Gamma \Pi_3} - R_{\Gamma \Pi_4} - C_1 y_1; \\ M_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = S_6 p_{10} - S_5 p_9 - S_3 p_8 + S_4 p_9 - R_{\Gamma \Pi_3} - R_{\Gamma \Pi_4} - C_1 y_1; \\ \bar{x}_1 > x_1 > \underline{x}_1; p_9 = \text{const} = p_{\text{сн}}; x_2 = \text{const}. \end{cases} \quad (2.95)$$

ГС«В» + ГС«А» + ГС«Б».

После включения гидросистемы в ГС«А» оба основных золотника находятся в правом крайнем положении.

ГС«В» + ГС«Б».

$$\begin{cases} M_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} = S_4 p_9 - S_3 p_8 - R_{\tau \Delta_4} - C_1 y_1; \\ M_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = S_6 p_{10} - S_5 p_9 - R_{\tau \Delta_6}; \\ \bar{x}_2 > x_2 > \underline{x}_2; \quad p_8 = \text{const} = p_{cn}; \quad x_1 = \text{const}. \end{cases} \quad (2.96)$$

Далее, сравнивая вышеприведенные зависимости (2.92) — (2.96), можно заметить, что все режимы работы клапана переключения гидросистемы можно свести всего к двум режимам.

1. При $y_1 > y_2$ — движение золотника 3 клапана переключения гидросистемы (см. рис. 2.15).

2. При $y_1 = y_2$ — совместное движение золотников 3 и 4 клапана переключения гидросистемы.

Тогда при $y_1 > y_2$

$$\begin{cases} M_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} = S_4 p_9 - S_3 p_8 - R_{\tau \Delta_3} - R_{\tau \Delta_4} - C_1 y_1; \\ M_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = S_6 p_{10} - S_5 p_9 - R_{\tau \Delta_6}; \\ \bar{x}_1 > x_1 > \underline{x}_1; \quad \bar{x}_2 > x_2 > \underline{x}_2; \\ \frac{dp_8}{dt} = \left[\mu_1 b_1 (x_{01} - x_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_8 - p_{cn}} - S_3 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_1}{dt} \right] \frac{w_1}{E}. \end{cases} \quad (2.97)$$

При $y_1 = y_2$

$$\begin{cases} M_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} = (S_5 - S_4) p_9 - S_3 p_8 - S_6 p_{10} - R_{гД_3} - R_{гД_4} - R_{гД_6} - C_1 y_1; \\ M_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = S_6 p_{10} - (S_5 - S_4) p_9 - S_3 p_8 - C_1 y_1; \\ \bar{x}_1 > x_1 > \underline{x}_1; \quad \bar{x}_2 > x_2 > \underline{x}_2; \\ \frac{dp_8}{dt} = \left[\mu_1 b_1 (x_{01} - x_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_8 - p_{сн}} - S_3 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_1}{dt} \right] \frac{w_1}{E}; \\ \frac{dp_9}{dt} = \left[\mu_2 b_2 (x_{02} - x_2) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_9 - p_{сн}} - S_4 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_2}{dt} \right] \frac{w_2}{E}. \end{cases} \quad (2.98)$$

2.6. ПОЛНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ГС—КП

Так как в математическую модель системы ГС—КП, кроме обыкновенных дифференциальных уравнений, входят и уравнения алгебраические, что сильно усложняет ее реализацию, желательно модель пневмогидроаккумулятора переписать в известной дифференциальной форме, что позволит свести данную модель (2.90)—(2.91) к задаче Коши, которую можно решить методом дифференциально-разностной аппроксимации, т. е. получить решение однозначным образом.

В соответствии с (2.57)—(2.58) и [12] запишем математическую модель пневмогидроаккумулятора в следующем виде:

$$\begin{aligned} p_a W_a^k &= \text{const}; \\ p_d W_0^k &= p_i W_i^k \end{aligned} \quad (2.99)$$

или

$$\frac{dp_i}{dt} = -K \frac{p_i}{W_i} \frac{dW_i}{dt};$$

$$\frac{dW_i}{dt} = Q_{Ai};$$

$$Q_{Ai} = Q_{ii} + S_i \frac{dx_i}{dt} + S_i \frac{dy_i}{dt} + S_{i+1} \frac{dx_i}{dt} - Q_{ni}. \quad (2.100)$$

Для большей наглядности перепишем выражение (2.100) для ГС1, ГС2 и ГС3 в функции расхода пневмогидроаккумулятора:

$$\begin{aligned} Q_{A_1} &= Q_{11} + S_1 \frac{dx_1}{dt} + S_2 \frac{dx_1}{dt} + S_3 \frac{dy_1}{dt} - Q_{n_1}; \\ Q_{A_2} &= Q_{21} + (S_1 + S_2) \frac{dx_2}{dt} + S_4 \frac{dy_1}{dt} + S_5 \frac{dy_2}{dt}; \\ Q_{A_3} &= Q_6 - Q_{n_3}. \end{aligned} \quad (2.101)$$

Следует заметить, что в общую модель системы ГС—КП (2.90)—(2.91) следует включить дренаж из системы в виде функции $Q_{др} = f(\Delta p)$, которую можно задавать для каждого из расчетных случаев, а также предохранительный клапан для ограничения забросов давления в гидросистемах в известном виде [13]:

$$\begin{aligned} Q_{кл} &= K_4 \sqrt{\frac{\Delta p_{кл}}{\xi_{кл}}}; \\ Q_{др} &= \sqrt{\frac{\Delta p_{др}}{\xi_{др}}}, \end{aligned} \quad (2.102)$$

где $Q_{кл}$ — расход через предохранительный клапан; $\Delta p_{кл}$ — перепад давления на предохранительном клапане; $\xi_{кл}$ и $\xi_{др}$ — гидравлические проводимости клапана и магистрали соответственно; $Q_{др}$ — расход дренажа; $\Delta p_{др}$ — перепад давления гидролинии дренажа; K_4 — условие выключения или включения предохранительного клапана.

При $p_{A_1} < p_{\text{св}}$; $K_4 = 0$; при $p_{A_1} \geq p_{\text{св}}$; $K_4 = 1$; $Q_{\text{ГС}} = Q_{\text{св}}$.

Окончательно перепишем (2.99) с учетом (2.100)–(2.102) и, после простых преобразований, получим математическую модель пневмогидроаккумулятора:

$$\frac{dp_{A_1}}{dt} = -K \frac{p_{A_1} \left[Q_{11} + (S_1 + S_2) \frac{dx_1}{dt} + S_3 \frac{dy_1}{dt} - Q_{n1} - \right.}{W_{01} - \int_0^t \left[Q_{11} + (S_1 + S_2) \frac{dx_1}{dt} + S_3 \frac{dy_1}{dt} - Q_{n1} - \right.} \\ \left. \left. - \sqrt{p_{A_1} - p_{\text{св}}} \left(\sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{зпр}}}} + K_4 \sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{св}}}} \right) \right] dt}{\left. - \sqrt{p_{A_1} - p_{\text{св}}} \left(\sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{зпр}}}} + K_4 \sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{св}}}} \right) \right] dt} \quad (2.103)$$

Таким образом, совместная математическая модель всех трех гидросистем и клапана переключения в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, выраженных относительно производных неизвестных параметров, сводится к задаче Коши, что позволяет реализовать данную математическую модель на ЭВМ численными методами, т.е. получить решение однозначным образом.

Обозначив в (2.103) выражение в квадратных скобках как Q_{A_1} , перепишем математическую модель пневмогидроаккумулятора в следующем виде:

$$\frac{dp_{A_1}}{dt} = -K \frac{p_{A_1} Q_{A_1}}{W_0 - \int_0^t Q_{A_1} dt}, \quad (2.104)$$

где

$$Q_{A_1} = Q_{11} + (S_1 + S_2) \frac{dx_1}{dt} + S_3 \frac{dy_1}{dt} - Q_{n1} - \sqrt{p_{A_1} - p_{\text{св}}} \left(\sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{зпр}}}} + K_4 \sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{св}}}} \right).$$

Теперь, объединив все предыдущие зависимости, запишем окончательно общую математическую модель всех трех гидросистем совместно с клапаном переключения гидропитания:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_1} [K_1 M(\omega_1) - M_{n_1}];$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} [K_2 M(\omega_2) - M_{n_2}];$$

$$\frac{d\omega_3}{dt} = \frac{1}{J_3} [K_3 M(\omega_3) - M_{n_3}];$$

$$\frac{d^2 q_1}{dt^2} = \frac{A}{G_1} [p_1(q_1) - p_1(t)];$$

$$\frac{d^2 q_2}{dt^2} = \frac{A}{G_2} [p_2(q_2) - p_2(t)];$$

$$\frac{d^2 q_3}{dt^2} = \frac{A}{G_3} [p_3(q_3) - p_3(t)];$$

$$\frac{dp_{A_1}}{dt} = -K \frac{p_{A_1} Q_{A_1}}{W_{01} - \int_0^t Q_{A_1} dt};$$

$$\frac{dp_{A_2}}{dt} = -K \frac{p_{A_2} Q_{A_2}}{W_{02} - \int_0^t Q_{A_2} dt};$$

$$\frac{dp_{A_3}}{dt} = -K \frac{p_{A_3} Q_{A_3}}{W_{03} - \int_0^t Q_{A_3} dt};$$

$$\begin{aligned}
\frac{d^2 x_1}{dt^2} &= \frac{1}{m_1} \left\{ \left[p_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_2 Q_{11}^2 \right] S_1 + \right. \\
&+ \left. \left[p_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_1 (Q_{n_1} + Q_{A_1} - Q_{11})^2 \right] S_2 - R_{\Gamma D_1} - C_{11} x_1 \right\}; \\
\frac{d^2 x_2}{dt^2} &= \frac{1}{m_2} \left\{ \left[p_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_5 Q_{21}^2 \right] S_1 + \right. \\
&+ \left. \left[p_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_4 (Q_{n_2} + Q_{A_2} - Q_{21})^2 \right] S_2 - R_{\Gamma D_2} - C_{21} x_2 \right\}; \\
\frac{dp_8}{dt} &= \frac{w_1}{E} \left[\sigma_1(x_1) \sqrt{p_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_1 (Q_{n_2} + Q_{A_2} - Q_{11})^2 - \xi_9 \left(S_3 \frac{dy_1}{dt} \right)^2} - \right. \\
&\quad \left. - S_3 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_1}{dt} \right]; \\
\frac{dp_9}{dt} &= \\
&= \frac{w_2}{E} \left[\sigma_2(x_2) \sqrt{p_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_4 (Q_{n_2} + Q_{A_2} - Q_{21})^2 - \xi_{11} \left(S_4 \frac{dy_1}{dt} \right)^2} - \right. \\
&\quad \left. - S_4 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_2}{dt} \right]; \\
\frac{d^2 y_1}{dt^2} &= \frac{1}{M_1} \left[S_4 p_9 - S_3 p_8 - C_1 y_1 - R_{\Gamma D_3} - R_{\Gamma D_4} \right]; \\
\frac{d^2 y_2}{dt^2} &= \frac{1}{M_2} \left[S_6 p_{10} - S_5 p_9 - R_{\Gamma D_6} \right];
\end{aligned}
\tag{2.105}$$

$$M_n = 0,159 \Delta p_{ni} \frac{Q_{ni} \pi}{30 \omega_i};$$

$$M(\omega_i) = f \left\{ \frac{\bar{M}}{\omega_i - \bar{\omega}_i} (\omega_i - \bar{\omega}_i) \right\};$$

$$G_i = \frac{Q_i \pi}{30 \omega_i};$$

$$R_{\Gamma \Pi_3} = 2\mu_3 b_3 (y_{10} \pm y_1) (p_{1p} - p_3) \cos 69^\circ \cdot \text{sign} |p_{1p} - p_3|;$$

$$p_{1p} = p_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_2 \left[Q_{n_1} + Q_{A_1} - S_3 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_1}{dt} - \frac{E}{w_1} \frac{dp_8}{dt} \right]^2;$$

$$w_1 = a_1 S_3;$$

$$R_{\Gamma \Pi_6} = 2\mu_6 b_6 (y_{20} + y_2) (p_{10} - p_7) \cos 69^\circ \cdot \text{sign} |p_{10} - p_7|;$$

$$p_{10} = p_{n_3} - \xi_{12} (Q_{n_3} + Q_{A_3})^2;$$

$$R_{\Gamma \Pi_4} = 2\mu_4 b_4 (y_{20} + y_2) (p_{2p} - p_6) \cos 69^\circ \cdot \text{sign} |p_{2p} - p_6|;$$

$$p_{2p} = p_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_5 \left[Q_{n_2} + Q_{A_2} - S_4 \frac{dy_1}{dt} - S_2 \frac{dx_2}{dt} - \frac{E}{w_2} \frac{dp_9}{dt} \right]^2;$$

$$w_2 = a_2 S_5 + S_4 y_1;$$

$$\sigma_1 = \mu_1 b_1 (x_{10} \pm x_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}};$$

$$\sigma_2 = \mu_2 b_2 (x_{20} \pm x_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}};$$

$$Q_{11} = \mu_3 b_3 (y_{10} + y_1) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|p_{1p} - p_3|};$$

$$Q_{21} = \mu_4 b_4 (y_{20} + y_2) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|p_{2p} - p_6|};$$

$$R_{\Gamma \Pi_1} = 2\mu_1 b_1 (x_{10} + x_1) (p_{1y} - p_8) \cos 69^\circ \cdot \text{sign} |p_{1y} - p_8|;$$

$$R_{\Gamma \Pi_2} = 2\mu_2 b_2 (x_{20} + x_2) (p_{2y} - p_9) \cos 69^\circ \cdot \text{sign} |p_{2y} - p_9|;$$

$$p_{1y} = p_1 - \xi_8 (Q_{n_1} + Q_{A_1})^2 - \xi_1 (Q_{n_1} + Q_{A_1} - Q_{11})^2;$$

$$p_{2y} = p_2 - \xi_{10} (Q_{n_2} + Q_{A_2})^2 - \xi_4 (Q_{n_2} + Q_{A_2} - Q_{21})^2;$$

$$Q_6 = \mu_6 b_6 (y_{20} + y_2) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{|p_{10} - p_7|};$$

$$Q_{A_1} = Q_{11} + (S_1 + S_2) \frac{dx_1}{dt} + S_3 \frac{dy_1}{dt} - Q_{n_1} - \sqrt{p_{A_1} - p_{\text{сн}}} \left(\sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{зп}}}} + K_4 \sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{кн}}}} \right);$$

$$Q_{A_2} = Q_{21} + (S_1 + S_2) \frac{dx_2}{dt} + S_4 \frac{dy_1}{dt} + S_5 \frac{dy_2}{dt} - \sqrt{p_{A_2} - p_{\text{сн}}} \left(\sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{зп}}}} + K_4 \sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{кн}}}} \right);$$

$$Q_{A_3} = Q_6 - Q_{n_3}. \quad (2.106)$$

Неизвестные:

$$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, q_1, q_2, q_3, p_{A1}, p_{A2}, p_{A3}, \\ x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, y_1, y_2, \dot{y}_1, \dot{y}_2, p_8, p_9.$$

Количество уравнений соответствует числу неизвестных (учитывая второй порядок).

Таким образом, общая математическая модель трех гидросистем и клапана переключения гидропитания сводится к системе 22 дифференциальных уравнений с 22 неизвестными (2.105) и 24 уравнениями связи (2.106). Систему уравнений (2.105) удалось выразить относительно производных неизвестных, что позволит, при наличии конструктивных данных и необходимых конкретных функциональных зависимостей типа (рис. 2.1, 2.2, 2.3) и т.д., реализовать данную модель численными методами с помощью ЭВМ однозначным образом.

Выводы

1. Разработана качественно отличная от традиционных модель насоса переменной подачи входящего в состав гидросистемы питания ОК «Буран», использующая экспериментальные характеристики насоса и представляющая собой аппроксимирующую функцию, вид которой определяют параметры, выбираемые с помощью ЭВМ по экспериментальным характеристикам. Полученная таким образом аппроксимирующая функция в виде дифференциального уравнения второго порядка, алгоритм и блок-схема его реализации на ЭВМ позволяют использовать данную модель в математических моделях гидрокомплекса ОК «Буран» для решения широкого круга задач, связанных с проектированием и исследованиями элементов и систем гидрокомплекса, например, осуществить синтез параметров элементов гидросистем наиболее оптимальным образом.

2. Разработана методика математического описания движения рабочей жидкости в гидролиниях, основанная на делении гидролиний на участки, описании участков типовыми дифференциальными уравнениями и сведении полученной системы уравнений к задаче Коши, отличающаяся от традиционных учетом влияния давления подачи на плотность рабочей жидкости.

3. Разработана математическая модель вспомогательной силовой установки, учитывающая экспериментальные характеристики вида (рис. 2.11 и 2.12).

4. Показаны различные методы построения математических моделей различных типов пневмогидроаккумуляторов, их привяз-

ка к моделям насосов переменной подачи и ВСУ и пути их реализации.

5. Разработаны расчетные схемы (рис. 2.14 и 2.15); приведено описание работы золотников клапана переключения на примере изменения проводимостей дроссельных щелей основных и ускорительных золотников (см. рис. 2.16—2.18); построен алгоритм рабочего процесса клапана переключения; показан метод математического описания и способы его реализации с применением ЭВМ.

6. Разработаны метод математического описания и математическая модель всех трех гидросистем с привязкой к клапану переключения гидропитания, где выходными характеристиками рассмотренной модели являются давление и расход на выходе клапана переключения гидропитания. Показано, что разработанная математическая модель в виде обыкновенных дифференциальных уравнений может быть сведена к задаче Коши, что гарантирует ее решение численными методами с применением ЭВМ.

Приведенные в настоящей главе принципы и методы построения моделирующих алгоритмов элементов и систем гидрокомплекса ОК «Буран» указывают и обосновывают пути дальнейших теоретических разработок в области создания и исследований гидросистем управления космических кораблей многоразового использования, для которых способ возвращения на Землю — планирующий спуск в атмосфере и посадка «на крыльях» на аэродром.

Учитывая приведенные принципы и методы построения моделирующих алгоритмов, а также пути их дальнейших теоретических разработок, необходимо продолжать решение важной задачи по созданию проблемно-ориентированного расчетно-теоретического комплекса с отладкой разрабатываемых математических моделей и алгоритмов их реализации на ЭВМ по специально созданным для этой цели программам экспериментальных исследований.

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА ОК «БУРАН» С УЧЕТОМ АЛГОРИТМА ПРИОРИТЕТА РАБОТЫ РУЛЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

3.1. ОБОСНОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ПОЛЕЗНОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМЫХ РАЗРАБОТОК

Как известно [14], автоматическая посадка ОК «Буран» явилась весьма сложной задачей и потребовала решения многочисленных проблем, связанных с громадным объемом конструкторских, экспериментальных и теоретических исследований.

Наиболее отчетливо особенность ОК «Буран», сочетающего в себе характеристики космического аппарата и самолета, проявилась в решении задач управления при спуске в атмосфере в диапазоне высот от 100 до 20 км и посадке на ВПП.

Ясно, что решение данной задачи требует безотказного обеспечения устойчивости и управляемости ОК «Буран» на всех режимах полета. Проблема обеспечения устойчивости и управляемости, в свою очередь, имеет ряд существенных особенностей, определяемых задачами управления и динамикой самого ОК «Буран» и его управляющих систем, основными из которых являются:

- устойчивость и управляемость на всех траекториях спуска — от почти вакуума на высоте 100 км до «самолетных» условий на высоте 20 км, где плотность атмосферы высока и динамика ОК «Буран» определяется в основном его аэродинамическими характеристиками;
- наличие участков одновременной работы управляющих двигателей и аэродинамических поверхностей, что требует четкой синхронизации их работы;

- необходимость ограничения скоростей изменения управляющих команд на рулевые системы, перемещающие аэродинамические поверхности, с учетом приоритета работы одних аэродинамических поверхностей перед другими, с целью уменьшения расхода топлива ВСУ и энергопотребления гидросистем, питающих рулевые системы управления аэродинамическими поверхностями;
- выполнение основной задачи обеспечения успешного спуска и посадки ОК «Буран» при любых двух отказах в системе спуска и посадки, в том числе отказа двух гидросистем из трех, при которых располагаемые скорости отклонения элевонов и руля направления значительно уменьшаются.

Учитывая все вышеизложенное, а также то, что управление ОК «Буран» на спуске и посадке на ВПП обеспечивается элевонами, рулем направления, воздушным тормозом и балансировочным щитком, тормозной системой и системой управления передней стойкой шасси, исполнительные механизмы которых развивают значительные усилия и обеспечивают высокое быстродействие, можно заключить, что наиболее оптимальной системой, способной выполнять указанные функции при минимальном весе и объеме, конечно же, является гидравлическая система [15].

Основными потребителями гидравлической энергии являются гидравлические приводы управления аэродинамическими поверхностями (элевоны, руль направления, воздушный тормоз и балансировочный щиток). Приводы элевонов секционные (по две секции с автономным приводом на каждой консоли), приводы рулем направления и воздушным тормозом выполнены в виде единого агрегата. (Напомним, что приводы элевонами, рулем направления, воздушным тормозом — следящие, а привод управления балансировочным щитком — релейно-следящий.)

Каждый привод аэродинамических поверхностей управления через клапан переключения питается от трех каналов гидросистем. С учетом ограниченных мощностных характеристик каналов гидросистем для уменьшения потребляемого приводами расхода рабочей жидкости введено изменение скорости их выходных звеньев путем ограничения градиента нарастания входных сигналов от си-

стемы управления. Практически во всем диапазоне помогающих, малых и средних нагрузок располагаемая скорость приводов одинакова и начинает снижаться до нуля [14] при нагрузках выше 65% от максимальных.

Величина предельной скорости приводов зависит от количества исправных каналов гидросистем. Естественно, при трех и двух работающих каналах гидросистем скорость приводов максимально возможная в соответствии с ТЗ, а при одном работающем канале снижается до величины, обеспечивающей безаварийный спуск и посадку на ВПП.

Приводы элевонров — поступательного типа, состоят из силового цилиндра с силовым золотником, управляемым гидроусилителем типа «сопло — заслонка», соединенных с гидросистемой через гидравлический клапан переключения (как и все другие приводы), подключающий к приводам один из исправных каналов гидросистем, что обеспечивает постоянство развиваемого усилия на выходе привода вне зависимости от количества исправных каналов гидросистем. Четырехканальная часть привода работает также от одного канала гидросистемы через тот же переключатель.

Привод «руль направления — воздушный тормоз» — вращательного типа, работает от гидромоторов, подключенных каждый к своему каналу гидросистемы. Скорости вращения гидромоторов складываются на двух дифференциальных редукторах, обеспечивающих на выходе постоянный развиваемый момент независимо от числа исправных каналов гидросистем. Четырехканальная часть приводов работает аналогично управляющей части элевонров через гидравлический клапан переключения каналов гидросистем.

Релейно-следящий привод балансировочного щитка вращательного типа по силовой части аналогичен приводу «руль направления — воздушный тормоз».

На выходе приводов «руль направления — воздушный тормоз» и балансировочного щитка установлены силовые редукторы, передающие вращение от привода к аэродинамическим поверхностям. Следует отметить, что редукторы одновременно являются элементами крепления аэродинамических поверхностей к вертикальному оперению и фюзеляжу.

При совместной работе приводов для ограничения потребляемой мощности в систему управления введен специальный алгоритм под названием «приоритет», позволяющий при необходимости снижать скорости отдельных приводов. В первую очередь приоритетом пользуются элевоны и руль направления, затем воздушный тормоз и балансировочный щиток, при этом «приоритет» работает в зависимости от числа исправных каналов гидросистем.

Основу настоящей главы составляет описание практического применения разработок, рассмотренных в гл. 2, т.е. практической реализации принципов и методов построения моделирующих алгоритмов систем гидрокомплекса.

Рассмотрен гидрокомплекс ОК «Буран» и основные характеристики рабочих процессов, определяющие функционирование аэродинамических поверхностей при различных отказах гидросистем. Показано, что необходимые скорости движения рулевых систем могут быть обеспечены только на основе реальных энергетических возможностей гидрокомплекса.

Разработки настоящей главы представляют созданные на основе гл. 2 инженерные методики синтеза и оценки основных параметров гидрокомплекса при его работе в самых тяжелых условиях (т.е. при двух отказах по гидропитанию) с использованием методов математического моделирования с применением вычислительной техники по моделям, отлаженным по результатам экспериментальных исследований.

Все результаты теоретических исследований подтверждены экспериментальными данными, полученными при испытаниях на полноразмерном стенде оборудования (ПРСО), позволяющем проводить полунатурное моделирование полета на этапе спуска и посадки в реальном масштабе времени с реальными приводами и имитацией шарнирных моментов на аэродинамических поверхностях. Кроме того, на ПРСО проводятся автономные и комплексные испытания отдельных агрегатов и систем гидрокомплекса с использованием реальных управляющих сигналов от реальной СУ.

Применение алгоритма приоритета еще на ранних этапах разработки различных типов гидросистем управления позволяет оптимальным образом выбрать характеристики входящих в проекти-

руемую систему агрегатов и элементов, а также мощностные параметры системы в целом, что в конечном счете уменьшает весовые, объемные и энергетические характеристики проектируемой системы еще на этапах согласований ТЗ.

Задачи предлагаемых разработок следующие:

1. Создание проблемно ориентированной математической модели гидрокомплекса на основе положений главы 2 настоящей работы.
2. Создание инженерной методики оценки основных параметров гидрокомплекса с учетом алгоритма приоритета.
3. Проведение необходимых вычислений на основе созданной инженерной методики.
4. Проведение экспериментальных исследований на стенде ПРСО по подтверждению результатов теоретических вычислений.
5. Обобщение и анализ результатов теоретических и экспериментальных разработок с целью возможности их использования при решении различных задач, связанных с функционированием гидрокомплекса в составе ОК «Буран».

Особый интерес при реализации поставленных задач представляет случай отказа двух каналов гидросистем, когда максимально заданные по ТЗ скорости рулевых систем обеспечены быть не могут. Поэтому основной ставилась задача выбора, с учетом алгоритма приоритета, максимальных скоростей движения выходных звеньев рулевых систем и времени движения на данных скоростях при коэффициенте одновременности, равном 1, таким образом, чтобы при оптимальном управлении выполнялись следующие соотношения:

$$\begin{aligned} t_1 \text{ при } p \geq p_1 & \begin{cases} \dot{\delta}_{\text{эл}} = \dot{\delta}_1, \\ \dot{\delta}_{\text{р.н}} = \dot{\delta}_2; \end{cases} \\ t_2 \text{ при } p \leq p_2 & \begin{cases} \dot{\delta}_{\text{эл}} = \dot{\delta}_3, \\ \dot{\delta}_{\text{р.н}} = \dot{\delta}_4. \end{cases} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Здесь p — текущее значение давления в точке подсоединения пневмогидроаккумулятора на модуле подготовки рабочей жидкости

(МПЖ); $p_1 - p_2$ — предельно допустимый диапазон изменения давлений по ТЗ на гидросистему; $\dot{\delta}_{\text{эл}}$ — скорость движения выходных звеньев рулевых систем элевонов; $\dot{\delta}_{\text{р.н}}$ — скорость движения руля направления.

Для большей наглядности условие (3.1) представлено на рис. 3.1.

Под *оптимальным управлением* понимается метод, основанный на анализе колебаний давления в заданной области при движении рулевых поверхностей с заданными скоростями.

Методы исследований. Теоретической основой исследований являются методы математического моделирования с применением вычислительной техники с учетом отлаженных по результатам экспериментальных исследований математических моделей агрегатов, элементов и систем гидрокомплекса.

Достоверность результатов теоретических исследований подтверждается их сходимостью с данными, полученными в результате испытаний на стенде ПРСО, и данными математического моде-

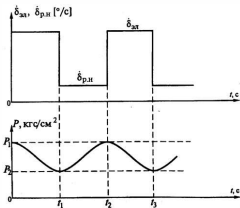


Рис. 3.1. Графическое изображение условия (3.1)

лирования на БЦВМ спуска и посадки ОК «Буря» с учетом условия (3.1), а также тем, что результаты настоящих исследований не нарушают представлений, сложившихся на основе применения в моделях зависимостей, отражающих реальные физические процессы, происходящие при работе гидрокомплекса с учетом принятых предположений и допущений.

Практическая полезность. Рассмотренные в настоящей главе математические модели, алгоритмы и программы их конкретной реализации позволяют:

- 1) осуществлять синтез основных параметров элементов и систем гидрокомплекса на основе соблюдения располагаемого энергобаланса;
- 2) производить оценку основных параметров гидрокомплекса для задач, связанных с выбором алгоритма приоритета работы рулевых поверхностей при различных степенях отказов гидросистем в целом, а также отдельных агрегатов и систем гидрокомплекса;
- 3) производить проектировочные и проверочные вычисления по выбору длин и сечений гидролиний, различных агрегатов и систем при различных температурах рабочей жидкости и т.д.

Описанные здесь разработки и методы, а также алгоритмы их конкретной реализации на ЭВМ обеспечивают решение широкого круга задач, связанных с проектированием различных гидросистем управления, причем, как упоминалось ранее, особый интерес представляет случай энергодефицита, который может быть преодолен с помощью алгоритма приоритета и оптимального управления, выбор которого основан на принципе рекуперации.

Глава состоит из четырех взаимосвязанных частей. Первая часть содержит общую формализацию задачи с учетом принятых предположений и допущений и описание математических моделей элементов и систем гидрокомплекса.

Вторая часть содержит общую, проблемно-ориентированную математическую модель гидрокомплекса. Здесь рассмотрена инженерная методика оценки основных параметров гидрокомплекса с учетом алгоритма приоритета работы рулевых поверхностей и выбора оптимального закона управления для преодоления энергодефицита гидрокомплекса при двух отказах по гидропитанию, осно-

ванного на принципе рекуперации, а также инженерная методика синтеза основных параметров гидрокомплекса при вышеуказанных исходных данных.

Третья часть посвящена практической реализации предлагаемых математических моделей. В этой части, показывающей практические возможности разработанных моделей и алгоритмов их практической реализации на ЭВМ, содержатся конкретные примеры, иллюстрированные графиками сравнительных характеристик результатов численных и экспериментальных исследований, а также выводы по этим результатам.

Четвертая часть содержит разработку упрощенной математической модели гидрокомплекса, созданную для оперативного решения задач динамики ОК «Буран», ее адекватность и область применения.

В заключении отражены основные, наиболее важные выводы по предлагаемым разработкам, а также обобщение и анализ результатов теоретических и экспериментальных разработок с целью возможности их использования в различных задачах, связанных с функционированием гидрокомплекса в составе ОК «Буран».

3.2. ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА ОК «БУРАН» С УЧЕТОМ ВЫБОРА АЛГОРИТМА ПРИОРИТЕТА РАБОТЫ РУЛЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Учитывая сложность конструкций входящих в гидрокомплекс агрегатов и систем, жесткость требований к их характеристикам, а также постоянное сокращение финансовых затрат на проектирование и различные исследования, наиболее приемлемым и перспективным можно считать такой подход, который позволяет проектировать и проводить различные исследования на комплексе проблемно ориентированных математических моделей на основе их последовательного применения с различной степенью детализации проектируемой системы с применением ЭВМ.

Реализация такого подхода к решению вышеизложенной проблемы позволяет не только сэкономить значительные средства от

многократного использования математических моделей и алгоритмов, но и повысить качество за счет теоретических исследований отказных ситуаций, имитация которых при натурных испытаниях практически невозможна, а в лабораторных условиях требует создания весьма сложного, дорогостоящего оборудования, тогда как реализация вышеизложенного подхода значительно сокращает объемы лабораторных и натурных испытаний.

Оценка основных параметров гидрокомплекса ОК «Буран» на основе соблюдения энергетического баланса сводится к решению функциональных и интегрированию дифференциальных уравнений. При решении данной задачи использована математическая модель, разработанная на основе положений гл. 2, использующая математические модели элементов гидрокомплекса, реальные конструктивные параметры гидролиний и экспериментальные характеристики агрегатов и систем.

3.2.1. Формализация задачи оценки основных параметров гидрокомплекса

Задачу оценки основных параметров гидрокомплекса ОК «Буран» можно сформулировать следующим образом. При заданной принципиальной гидравлической схеме (рис. 3.2), существующих ограничениях по расположению элементов и систем, а также экспериментальных и эксплуатационных характеристиках отдельных систем и агрегатов выбрать скорости движения рулевых поверхностей таким образом, чтобы при оптимальном управлении в каждый момент времени выполнялось условие (3.1).

Напомним, что под *оптимальным законом управления* понимается анализ работы гидрокомплекса по функциональным критериям колебаний давления в заданной области при движении рулевых поверхностей с заданными скоростями, основанный на принципе «рекуперации» (см. рис. 3.1).

Следует отметить, что несоблюдение условия (3.1) приведет к падению давления в гидрокомплексе ниже заданного по ТЗ на гидросистему, что повлечет за собой нарушение выходных характеристик на рулевых поверхностях.

3.2.2. Математические модели элементов гидрокомплекса

При разработке моделей элементов гидрокомплекса были сделаны следующие предположения и допущения:

- давление, скорость и плотность рабочей жидкости постоянны по сечению гидролинии;
- рабочая жидкость несжимаема;
- стенки трубопроводов недеформируемы;
- вязкость и удельный вес рабочей жидкости являются функцией температуры и имеют вид, представленный на рис. 3.3 и 3.4 соответственно;
- гидравлические сопротивления трубопроводов зависят от режима течения рабочей жидкости;
- экспериментальная статическая характеристика насоса переменной подачи зависит от температуры и имеет вид, представленный на рис. 3.5. и в табл. 3.1.

После перехода к расчетной схеме рабочая модель может быть представлена следующим образом.

Пусть система в момент времени t находится в каком-либо состоянии $\Gamma(t)$, которое характеризуется некоторым числом пара-

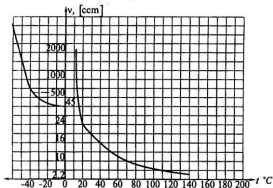


Рис. 3.3. Зависимость вязкости рабочей жидкости 7-50-C3 от температуры

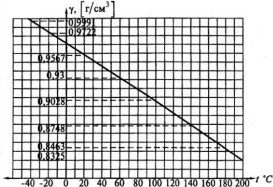


Рис. 3.4. Зависимость удельного веса рабочей жидкости 7-50-C3 от температуры

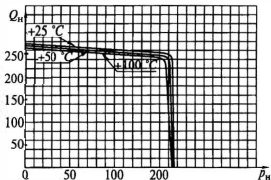


Рис. 3.5. Статическая характеристика насоса переменной подачи НП-113

метров. Через промежуток времени $(t + \Delta t)$ система переходит в следующее состояние $\Gamma(t + \Delta t)$. Из числа параметров, характеризующих систему, выбирается тот, по которому производится сравнение с эталонным. За такой параметр может быть выбран любой,

+25°C		+100°C		+150°C	
p	Q	p	Q	p	Q
60	267,5	60	265	60	263,5
100	265	100	262	100	260
150	260	150	255	150	253
190	255	190	249	190	246
195	255	195	248	195	244
200	254	200	247	200	243
205	253	205	246	205	242
210	243	210	240	210	240
210,5	240	212	180	211	180
211	180	214	120	212	180
212,5	120	214	100	213	100
215	40	215	30	214	30
216	20	216	12	216	12
217	10	—	—	—	—

однако для нашего случая удобен параметр $p(t)$, т.е. текущее давление в системе.

Теперь, перейдем к разработке математических моделей элементов, учитывая положения гл. 2.

Условимся под элементом гидракомплекса понимать агрегат либо условное устройство, выполняющее отдельную функцию, и

перейдем к рассмотрению математических моделей элементов, входящих в состав гидрокомплекса.

Величина гидравлических сопротивлений в трубопроводах может быть вычислена по известной зависимости [16]

$$\Delta p_i = \lambda(Re) \frac{L_i}{d_i} \frac{\rho}{2} v_i^2, \quad (3.2)$$

где Δp_i — перепад давления на участке трубопровода; L_i — длина участка трубопровода; d_i — диаметр трубопровода; Re — число Рейнольдса; v_i — скорость рабочей жидкости в трубопроводе, причем

$$Re = f(t^\circ C); \quad \rho = \rho(t^\circ C).$$

Для местных сопротивлений (фильтры, дроссели, клапаны и т.д.), основываясь на требованиях ТЗ на агрегаты в соответствии с [16], после простых преобразований можно записать

$$\Delta p_{\text{мр}} = \frac{\Delta p_1 a_1^2 \gamma_2}{a_2^2 \gamma_1 Q_1^2} Q_2^3, \quad (3.3)$$

где Δp_1 и Q_1 — гидравлическое сопротивление и расход по ТЗ на агрегат; γ_1 и γ_2 — удельный вес рабочей жидкости при температурах t_1 и t_2 °C соответственно; a_1 — коэффициент, являющийся функцией

$$a_1 = f\left(\frac{v_1}{v_{20}}\right),$$

где v_1 — кинематическая вязкость рабочей жидкости при t °C (ТЗ); v_{20} — кинематическая вязкость рабочей жидкости при $t_1 = 20$ °C;

$$a_2 = f\left(\frac{v_2}{v_{20}}\right),$$

где ν_2 — кинематическая вязкость при температуре $t^\circ\text{C}$; $p_{\text{агр}}$, Q_2 — текущие значения перепадов давлений и расходов на агрегатах.

Технические характеристики по ТЗ на некоторые агрегаты представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Названия агрегатов и элементов	Технические характеристики (ТЗ)		
	p , кгс/см ²	Q , л/мин	t , °C
ТО	3,2	240	50
МПЖ	3,5	240	50
ФС	3,5	240	20

Пневмогидроаккумулятор. Состояние пневмогидроаккумулятора в соответствии с положениями гл. 2 запишем в виде

$$p_A W_A^K = \text{const},$$

где p_A — давление газа в газовой полости пневмогидроаккумулятора; W_A — объем газа в газовой полости пневмогидроаккумулятора; K — коэффициент политропы.

После простых преобразований получим

$$\frac{dp_A}{dt} = -K \frac{p_A}{W_0 + \int_0^t Q_A dt} Q_A, \quad (3.4)$$

где W_0 — начальный объем газа при давлении зарядки $p = 65$ кгс/см²; Q_A — расход пневмогидроаккумулятора.

Для нашего случая (т.е. при наличии в системе поршневого пневмогидроаккумулятора), а также в соответствии с положениями гл. 2 (см. (2.61)–(2.62)) и [12] получим окончательно:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{1}{m}[(p_A - p_n)2S_n - F_p - \sigma]; \\ \frac{dp_i}{dt} &= \frac{E}{W} \left(Q_n - 2xS_n - \sum_{j=1}^n K_j \dot{\delta}_j - \sum_{j=1}^K Q_{y_{Tj}} \right); \\ \frac{dp_A}{dt} &= -K \frac{p_A \left[\sum_{j=1}^n K_j \dot{\delta}_j - Q_n(p_n) \right]}{W_0 + \int_0^t \left(\sum_{j=1}^n K_j \dot{\delta}_j - Q_n(p_n) \right)}.\end{aligned}\quad (3.5)$$

Так как гидравлическая схема ОК «Буран» состоит из гидрочастей различных длин и длин и сечений, то, естественно, скорости движения рабочей жидкости на каждом из участков гидрочастей различны и зависят от расходов, потребляемых рулевыми приводами, которые можно, в соответствии с ТЗ на РС и экспериментальными характеристиками, представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}Q_{РС1П} &= K_1 \dot{\delta}_1 + Q_{y_{T1П}}; \\ Q_{РС2Л} &= K_2 \dot{\delta}_2 + Q_{y_{T2Л}}; \\ Q_{РС1Л} &= K_1 \dot{\delta}_1 + Q_{y_{T1Л}}; \\ Q_{РС2П} &= K_2 \dot{\delta}_2 + Q_{y_{T2П}}; \\ Q_{РС3} &= K_3 \dot{\delta}_3 + K_4 \dot{\delta}_4 + Q_{y_{T3П}} + Q_{y_{T3Л}}; \\ Q_{РС4} &= K_4 \dot{\delta}_4 + Q_{y_{T4БШ}};\end{aligned}\quad (3.6)$$

где $Q_{РСi}$ — расходы, потребляемые соответствующими рулевыми системами; $Q_{y_{Ti}}$ — утечки соответствующих рулевых систем; K_i — коэффициенты расхода (по данным экспериментальных проливов) соответствующих рулевых систем, зависящие от числа работающих гидросистем; $\dot{\delta}_i$ — скорости движения соответствующих рулевых поверхностей.

Следует напомнить, что распределение расходов по участкам гидросистем зависит от степени отказов гидросистем и числа работающих рулевых поверхностей (см. рис. 3.2).

Давление на выходе насоса переменной подачи, зависящее от числа работающих рулевых приводов, может быть вычислено исходя из следующей зависимости:

$$p_n = \sum_{i=1}^n \Delta p_{i\text{дл}} + \sum_{j=1}^n \Delta p_{j\text{акр}} + \sum_{k=1}^n \Delta p_{k\text{м}} + p_A, \quad (3.7)$$

где n_i, n_j, n_k — количество: участков гидролиний, агрегатов и систем, местных гидравлических сопротивлений соответственно; p_A — давление в газовой полости пневмогидроаккумулятора,

Давление на сливе соответствующей рулевой системы

$$\Delta p_{\text{сл}} = \sum_{i=1}^n \Delta p_{i\text{дл}} + \sum_{j=1}^n \Delta p_{j\text{акр}} + \sum_{k=1}^n \Delta p_{k\text{м}} + p_{\text{бак}}. \quad (3.8)$$

Здесь $p_{\text{бак}}$ — давление в баке гидросистемы; $\Delta p_{k\text{м}}$ — % от перепада давлений [16].

3.3. РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ СХЕМ

Общая расчетная принципиальная гидравлическая схема на рис. 3.2 весьма сложна для проведения при численном эксперименте на ЭВМ быстрого анализа результатов расчетов из-за большого количества разветвлений в гидросистемах, большого числа трубопроводов различных длин и диаметров и наличия множества регулирующих, контролирующих и управляющих гидравлических агрегатов.

Поэтому схема, приведенная на рис. 3.2, представлена расчетными схемами для различных отказных вариантов гидросистем, причем на этих схемах показаны участки гидролиний с указанием реальных длин и сечений гидрокомплекса ОК «Буран».

Переработанная принципиальная гидравлическая схема представлена на рис. 3.6—3.14.

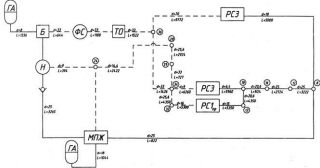


Рис. 3.6. PC1, без отказов

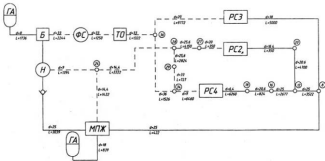


Рис. 1.7. ГС2. Без отклика

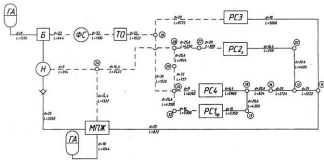


Рис. 3.9. ГЦ1; серия ГЦ2

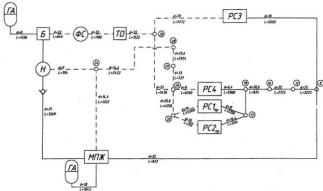


Fig. 3.10. FCL, other FCL

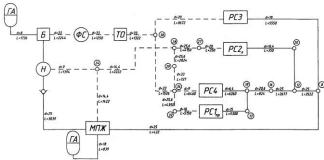


FIG. 3.11. PC2, versus PC1

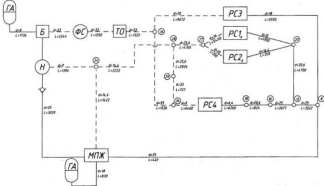


Рис. 3.12. ГД1, отходя ГД2

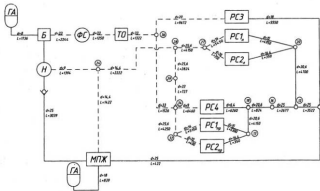


Рис. 3.13. ГСЗ, 2-го рода (ГС1 и ГС2)

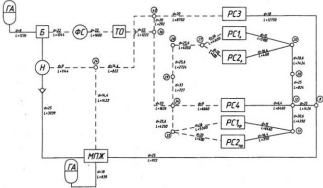


Рис. 3.14. PC3, 2 выхода (PC1 и PC2)

Проведенный анализ этих расчетных схем позволил сделать вывод, что гидросистема № 3 по конструктивным параметрам отлична от гидросистем №1 и №2 и, естественно, наиболее общим расчетным случаем является случай отказа двух гидросистем (рис. 3.13). На схемах номера в кружочках соответствуют началу либо концу участков гидролиний, т.е. это узловые точки, в которых происходит разветвление расходов по потребителям.

Сверху и снизу каждой гидролинии проставлены диаметры и длины участков. Обозначения на схемах соответствуют списку принятых сокращений, приведенному в начале книги. Все вышесказанное относится к схемам, изображенным на рис. 3.6—3.14.

Использование данных схем значительно упрощает процесс программирования и анализ результатов теоретических исследований, так как полученные результаты относятся именно к той гидросистеме, принципиальная гидравлическая схема которой является основой для расчета.

Естественно, данный подход предполагает большой объем конструкторских работ, но при этом значительно сокращает время на обработку полученных результатов от вышеперечисленных исследований.

3.4. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА ПРИ ДВУХ ОТКАЗАХ ПО ГИДРОПИТАНИЮ

Как упоминалось ранее, при наличии в гидрокомплексе двух отказов гидросистем скорость движения рулевых поверхностей возможно увеличить, используя принцип рекуперации, т.е. энергию пневмогидроаккумуляторов, при учете приоритета работы рулевых поверхностей.

Учитывая изложенное выше, а также положения главы 2, модель оценки основных параметров гидрокомплекса ОК «Буран» можно представить в следующем виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{m}[(p_A - p_i)2S_n - F_{тр} - G];$$

$$\frac{d^2 Q_n}{dt^2} = A \left[p_n(Q_n, i^\circ C, n) - p(t) \right] - B \frac{dQ_n}{dt};$$

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{E}{W} \left(Q_n - 2\alpha S_n - \sum_{j=1}^n K_j \dot{\delta}_j - \sum_{j=1}^K Q_{\gamma j} \right);$$

$$\frac{dp_A}{dt} = -K \frac{p_A \left[\sum_{j=1}^n K_j \dot{\delta}_j - Q_n \right]}{W_0 + \int_0^t \left(\sum_{j=1}^n K_j \dot{\delta}_j - Q_n \right) dt};$$

$$Q_n = f(p_n, i^\circ C, n);$$

$$p_n = f(\Delta p_{\text{мг}}, \Delta p_{\text{тр}}, \Delta p_{\text{м}}, \Delta p_A);$$

$$\sum_{j=1}^K K_j \dot{\delta}_j = 2K_{\text{PC1}} \dot{\delta}_{\text{PC1}} + 2K_{\text{PC2}} \dot{\delta}_{\text{PC2}} + K_{\text{PH}} \dot{\delta}_{\text{PH}} + K_{\text{BT}} \dot{\delta}_{\text{BT}} + K_{\text{БШ}} \dot{\delta}_{\text{БШ}};$$

$$\sum_{j=1}^K Q_{\gamma j} = 2Q_{\gamma \text{ PC1}} + 2Q_{\gamma \text{ PC2}} + Q_{\gamma \text{ PH}} + Q_{\gamma \text{ BT}} + Q_{\gamma \text{ БШ}};$$

$$\Delta p_{\text{мг} i} = \lambda \frac{L_i}{d_i} \frac{\rho(t)}{2} \frac{Q_i^2}{F_i^2};$$

$$\Delta p_{\text{м}} = \frac{\Delta p_1 a_1^2 Q_2^2 \gamma_2(i^\circ C)}{a_2^2 Q_1^2 \gamma_1(i^\circ C)};$$

$$\lambda = f(\text{Re}); \quad \rho = \rho(i^\circ C); \quad a_1, a_2 = f(i^\circ C, \nu). \quad (3.9)$$

Здесь p_A и p_n — давление в газовой полости пневмогидроаккумулятора и на выходе насоса переменной подачи; S_n — площадь пор-

шня пневмогидроаккумулятора; E — модуль упругости рабочей жидкости; K — коэффициент политропы; $p_{дл}$, $p_{агр}$, p_m — гидравлические потери по длине, на агрегатах и местные соответственно; $p_{бзк}$ — давление в баке; p — давление на выходе одного из рулевых приводов; p_n — давление на выходе насоса переменной подачи; K_i — коэффициент расхода соответствующих рулевых систем; δ_i — скорости движения соответствующих рулевых систем; $Q_{ут i}$ — утечки соответствующих гидравлических приводов рулевых систем; L , d_i , F_i — длина, диаметр и площадь сечения гидролинии соответственно; Δp_1 , Q_1 — перепад давления и расход по ТЗ на гидравлические агрегаты; Q_2 — текущий расход по каналу гидросистемы; Re — число Рейнольдса, критерий режима течения рабочей жидкости; ν — кинематический коэффициент вязкости рабочей жидкости; γ_1 — удельный вес рабочей жидкости при температуре по ТЗ на агрегат; γ_2 — удельный вес рабочей жидкости при заданной температуре; t °C — температура рабочей жидкости, °C; m и G — масса и вес поршня пневмогидроаккумулятора; F — сила трения; t — время.

Таким образом, практическая реализация приведенной математической модели гидрокомплекса, учитывающая экспериментальные характеристики некоторых агрегатов и конструктивные параметры гидросистем, сводится к решению функциональных и интегрированию дифференциальных уравнений, а также позволяет решать широкий круг задач, связанных с энергетическими возможностями проектируемой системы и анализом ее основных параметров, реально действующих в составе гидрокомплекса ОК «Буран».

Кроме того, использование предлагаемой методики делает возможным проведение теоретических исследований, которые весьма сложно реализовать при лабораторных и тем более при натурных испытаниях.

Блок-схема алгоритма реализации предлагаемой методики, отражающая основные особенности алгоритма, приведена на рис. 3.15.

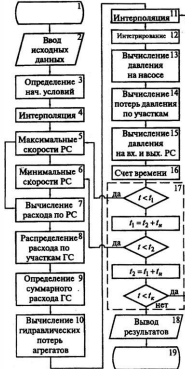


Рис. 3.15. Блок-схема алгоритма практической реализации математической модели (3.9)

3.4.1. Блок-схема реализации инженерной методики оценки основных параметров гидрокомплекса

Опишем кратко основные блоки алгоритма реализации математической модели (3.9) — рис. 3.15.

1, 2 — блоки пуска и ввода исходных данных, содержат параметры насоса переменной подачи (см. табл. 3.1), графики зависи-

мостей (см. рис. 3.3 и 3.4), длины гидролиний и их сечения в соответствии с расчетными схемами (рис. 3.6—3.14) в зависимости от вариантов расчета, количество участков гидролиний, параметры пневмогидроаккумулятора, экспериментальные характеристики агрегатов, параметры, определяющие работу стандартных программ и т. д.;

3 — блок определения начальных условий для решения системы дифференциальных уравнений;

4, 11 — блоки интерполяции, в которых производится реализация соответствующих характеристик путем интерполяции табличных значений, внесенных в оперативную память ЭВМ;

5, 6 — блоки уровня скоростей движения рулевых поверхностей;

7—10, 12—16 — блоки вычисления расходов, гидравлических сопротивлений по трубопроводам и агрегатам, текущего давления в газовых полостях пневмогидроаккумуляторов, давлений на входе и выходе рулевых систем и т. д.;

17 — блок управления релейным режимом движения рулевых поверхностей (с целью обеспечения располагаемого энергетического баланса питающих гидросистем);

18 — блок вывода результатов вычислений, в котором результаты расчета обрабатываются стандартными программами и выводятся на печать в виде различных таблиц и графиков.

3.5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА ПРИ ДВУХ ОТКАЗАХ ПО ГИДРОПИТАНИЮ

Исходя из разработанных гидравлических принципиальных расчетных схем (рис. 3.6—3.14) математической модели гидрокомплекса (3.9) — без учета распределенных параметров рабочей жидкости в гидролиниях, алгоритма, блок-схемы (рис. 3.15) и программы его практической реализации с помощью ЭВМ, выбирают уровни скоростей и время движения рулевых поверхностей на выбранных скоростях по критерию равенства мощностных характеристик

питающей гидросистемы при двух отказах по гидропитанию, т.е. чтобы выполнялось условие (3.1).

Результаты проведенных теоретических исследований приведены на рис. 3.16 — 3.21, подтверждены специальными комплекс-

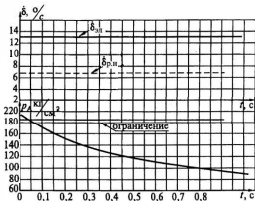


Рис. 3.16. Результаты теоретических исследований

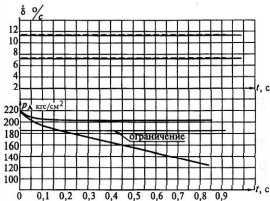


Рис. 3.17. Результаты теоретических исследований

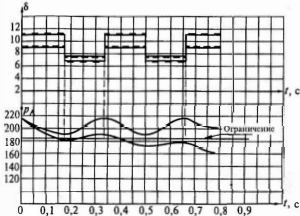


Рис. 3.18. Результаты теоретических исследований

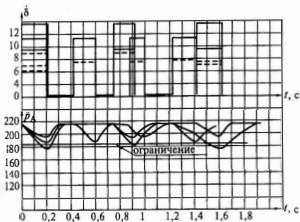


Рис. 3.19. Результаты теоретических исследований

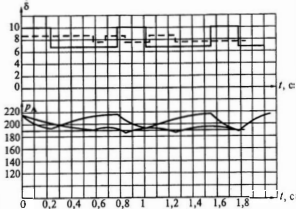


Рис. 3.20. Результаты теоретических исследований

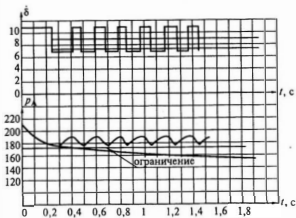


Рис. 3.21. Результаты теоретических исследований

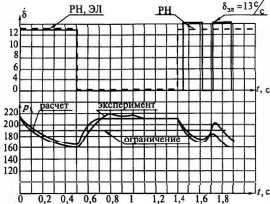


Рис. 3.23. Результаты экспериментальных исследований

3.5.1. Результаты теоретических исследований и их сравнение с экспериментом

Рассмотрим более подробно результаты приведенных расчетов, изображенных на рис. 3.16—3.21.

На рис. 3.16 показаны результаты вычислений при движении рулевых поверхностей с коэффициентом одновременности, равным единице, со следующими скоростями:

$$\dot{\delta}_{PC1n} = \dot{\delta}_{PC1n} = \dot{\delta}_{PC2n} = \dot{\delta}_{PC2n} = 13 \text{ град/с},$$

$$\dot{\delta}_{PH} = 7 \text{ град/с},$$

$$\dot{\delta}_{BT} = 0,$$

$$\dot{\delta}_{\text{вщ}} = 0.$$

В нижней части рисунка показано изменение давления в системе (точка подсоединения пневмогидроаккумулятора на блоке МПЖ) в реальном масштабе времени.

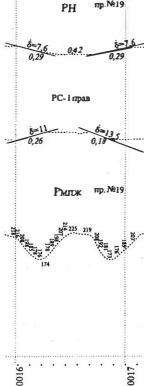


Рис. 3.24. Результаты экспериментальных исследований

Горизонтальной линией показано ограничение давления, ниже которого рулевые поверхности «не держат» требуемых шарнирных моментов.

Из рисунка видно, что при движении рулевых поверхностей с вышезаданными скоростями уже через 0,175 с давление в системе

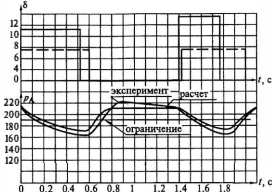


Рис. 3.25. Результаты экспериментальных исследований

становится ниже заданного по ТЗ на гидрокомплекс, поэтому реализация данных скоростей движения рулевых поверхностей при заданной энергетике не представляется возможной.

Следующий рисунок, 3.17, показывает, что при уменьшении скоростей движения элеваторов даже на 2 град/с, а руля направления — на 0,5 град./с, при движении остальных рулевых поверхностей с теми же скоростями, что и на рис. 3.16, условие баланса нарушается уже через 0,2 с.

Далее мы пропустим множество расчетных вариантов и покажем конкретный (см. верхнюю линию изменения давления на рис. 3.17 и нижнюю линию изменения скоростей движения рулевых поверхностей).

Результаты проведенных вычислений позволяют сделать вывод, что условие баланса выполнимо только при движении рулевых поверхностей (учитывая двухотказную ситуацию и коэффициент работы равный единице) со скоростями

$$\dot{\delta}_{PC1n} = \dot{\delta}_{PC1n} = \dot{\delta}_{PC2n} = \dot{\delta}_{PC2n} = 8 \text{ град/с},$$

$$\dot{\delta}_{PH} = 8 \text{ град/с},$$

$$\dot{\delta}_{BT} = 0,$$

$$\dot{\delta}_{БЩ} = 0,$$

и оно нарушается при любых больших скоростях движения рулевых поверхностей через различные промежутки времени.

На рис. 3.18 изображено изменение параметров системы при работе системы управления в релейном режиме с частотой изменения входного сигнала 1,5 Гц. Из графика видно, что соблюдение энергобаланса возможно при движении рулевых поверхностей (при коэффициенте одновременности, равном единице) со скоростями:

все элевоны:	1) $\dot{\delta}_{\Sigma} = 9 \text{ град/с},$	2) $\dot{\delta}_{\Sigma} = 7 \text{ град/с},$
	$\dot{\delta}_{PH} = 9 \text{ град/с},$	$\dot{\delta}_{PH} = 7 \text{ град./с},$
	на $t = 0,25 \text{ с.}$	на $t = 0,35 \text{ с.}$

Следует заметить, что увеличение скорости движения рулевых поверхностей всего на 1 град/с вызывает падение давления в системе на 25 кгс/см^2 уже через 1 с, если не учитывать падение давления через 0,4 с на 2 атм., и на время 0,1 с.

Интерес представляет работа системы управления в релейном режиме, когда падение скоростей движения рулевых поверхностей происходит с различных задаваемых уровней до нуля. Данный режим работы весьма наглядно показывает работу пневмогидроаккумуляторов по восстановлению рабочего давления в системе и степень ее готовности к следующим рабочим режимам. На рис. 3.19 пунктирная линия соответствует движению руля направления, сплошная — движению элевонов. Рисунок наглядно иллюстрирует принцип рекуперации, который позволяет увеличить потребные скорости движения рулевых поверхностей за счет использования при оптимальном управлении энергии пневмогидроаккумулятора по самовосстановлению запаса мощности.

Из анализа приведенных на рис. 3.19 режимов работы рулевых поверхностей следует, что при движении рулевых поверхностей со скоростями $\dot{\delta}_{\Sigma} = 13,2; 11; 9$ град/с и $\dot{\delta}_{PH} = 9; 7; 6$ град/с, на время 0,2 с (а далее рулевые поверхности стоят примерно 0,25 с) падения давления в системе при различных режимах работы рулевых поверхностей различаются только по значению и не зависят от времени. Однако следует отметить, что при таком ступенчатом управлении давление в системе не падает ниже заданного в ТЗ даже при движении элевонів со скоростями $\dot{\delta}_{\Sigma} = 11,2$ град/с и $\dot{\delta}_{PH} = 7,2$ град/с, причем время восстановления давления в системе от 0,1 до 0,15 с.

На рис. 3.20 и 3.21 также показано изменение давления в системе при различных режимах совместной работы рулевых поверхностей с различными скоростями.

По результатам настоящих теоретических исследований проводилось математическое моделирование спуска и посадки ОК «Буран»; из множества вариантов был выбран наиболее приемлемый, по которому проведены испытания на стенде ПРСО. Адекватность предлагаемой математической модели реальному гидрокомплексу оценивалась по результатам испытаний в объеме программы по оценке энергетических возможностей гидрокомплекса аналога ОК «Буран», предназначенного для горизонтальных летных испытаний (ГЛИ) с целью отработки алгоритмов управления при посадке ОК. За показатель уровня адекватности принято время снижения давления в системе (на модуле подготовки жидкости, МПЖ) до минимального значения, заданного в ТЗ на гидросистему, т.е. падение давления при расчете по математической модели и испытаниях реального гидрокомплекса произойдет с одинаковой интенсивностью только в том случае, если протекающие рабочие процессы в них идентичны.

Задача была решена следующим образом. По приведенной в п. 3.4 математической модели (3.9) и блок-схеме ее реализации (рис. 3.15) в соответствии с требованиями ТЗ на рулевые системы, с учетом алгоритма приоритета работы рулевых поверхностей, ха-

рактических по ТЗ на агрегаты и их экспериментальных характеристик были проведены теоретические исследования, в результате которых получен закон изменения давления на МПЖ в ГС1 при двух отказах по гидропитанию, т.е. когда ГС2 и ГС3 не функционируют.

Экспериментальные исследования проводились на стенде ПРСО, причем скорости движения рулевых поверхностей задавались от реальной системы управления. Графики задаваемых скоростей движения рулевых поверхностей и изменения давления в системе, по данным телеметрической информации при экспериментальных исследованиях, приведены на рис. 3.22; результаты экспериментальных исследований (рис. 3.22) и их сравнение с теоретическим экспериментом приведены на рис. 3.23; сравнительные характеристики по рис. 3.24 — на рис. 3.25.

Следует отметить, что скорости движения рулевых поверхностей задаваемые в экспериментальных исследованиях по математической модели и эксперименте на стенде ПРСО, идентичны и соответствуют рис. 3.22—3.24; изменения давления в системе при заданных скоростях, представленные на рис. 3.23—3.25, соответствуют рис. 3.22—3.24.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, приведенных на рис. 3.23 и 3.25, позволяет сделать следующие выводы:

- уровень адекватности теоретических и экспериментальных исследований составляет 0,05—0,015 с (рис. 3.23);
- амплитуда изменения давления в системе при принятом уровне адекватности не превышает 4 кгс/см^2 (рис. 3.23);
- превышение значения давления в системе при экспериментальных исследованиях на рис. 3.23, объясняется тем, что в процессе выхода рулевых поверхностей на заданный системой управления расчетный режим, когда скорость отработки управляющего сигнала становится равной заданной, потребление рабочей жидкости в работающей системе существенно ниже производительности насоса переменной подачи, что приводит к некоторому подъему давления в системе с последующим снижением до уровня, соответствующего ТЗ на гидрокомплекс.

Анализ режимов работы гидрокомплекса (рис. 3.24, 3.25) и сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований (рис. 3.25) показывает, что при скоростях движения рулевых поверхностей, соответствующих данным экспериментальных исследований, уровень адекватности математической модели и эксперимента лежит в пределах 0,005 с при амплитуде изменения давления в системе 7 кгс/см². Горизонтальная линия на графике изменения давления в системе соответствует минимальному уровню давления в системе, при котором гарантируются требуемые шарнирные моменты на рулевых поверхностях. Естественно, ось ординат на рис. 3.23—3.25 представляет собой скорость движения рулевых поверхностей, а ось абсцисс — время движения рулевых поверхностей на этих скоростях.

Графики рис. 3.24, 3.25 показывают, что при скоростях движения рулевых поверхностей с данными скоростями (рис. 3.25) уровень адекватности математической модели и эксперимента находится в пределах 0,001—0,002 с при амплитуде от 2 до 7 кгс/см².

3.5.2. Выводы по результатам оценки основных параметров гидрокомплекса при двух отказах по гидропитанию

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования различных режимов работы гидрокомплекса позволили сделать следующие выводы.

1. При двух отказах по гидропитанию энергетический баланс гидрокомплекса может быть обеспечен только при движении рулевых поверхностей со скоростями не более:

$$\dot{\delta}_{\text{м}} = \dot{\delta}_{\text{РН}} = 10 \text{ град/с на } t = 0,25 \text{ с;}$$

$$\dot{\delta}_{\text{м}} = \dot{\delta}_{\text{РН}} = 10 \text{ град/с на } t = 0,5 \text{ с.}$$

2. Сравнение экспериментальных и теоретических исследований показывает, что принятый критерий адекватности теоретических и экспериментальных исследований гидрокомплекса составляет 0,015—0,05с.

3. Амплитуда изменения давления в системе при принятом критерии адекватности не превышает 4—7 кгс/см².

4. Все вышеприведенные выводы позволяют предположить, что предлагаемая математическая модель (3.8) и алгоритм (см. рис. 3.15) ее реализации на ЭВМ вполне приемлемы для решения различных задач, связанных с проектированием и исследованиями различных режимов работы гидрокомплекса в составе ОК «Буран».

5. Для более точного исследования работы ГК и его динамических характеристик необходимо учитывать не только динамические характеристики насосов переменной подачи, но и распределенные параметры рабочей жидкости в гидролиниях и различных агрегатах в соответствии с рекомендациями главы 2.

6. В связи с приемлемой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований разработанные в настоящей главе математические модели и алгоритмы их реализации с помощью ЭВМ на основе соблюдения энергетического баланса, с вышеуказанной степенью точности можно использовать при доводке и различных исследованиях без проведения дорогостоящих натурных испытаний и испытаний на стенде ПРСО.

3.6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГК ПРИ ДВУХ ОТКАЗАХ ПО ГИДРОПИТАНИЮ ДЛЯ ЗАДАЧ СИНТЕЗА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СОБЛЮДЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО ЭНЕРГОБАЛАНСА

Предлагается задачу синтеза основных параметров гидрокомплекса ОК «Буран» сформулировать следующим образом. При заданной принципиальной гидравлической схеме, существующих ограничениях по конструкции агрегатов и систем, их заданных характеристиках выбрать параметры насосов переменной подачи, объемы пневмогидроаккумуляторов, длины и сечения гидролиний и т.д. таким образом, чтобы при рациональном законе управления в каждый момент времени на основе принципа рекуперации выполнялись следующие соотношения:

$$\left| \sum_{i=1}^n Q_i p_i - \sum_{j=1}^k \dot{\delta}_j M_{\text{ш } j} \right| \rightarrow \epsilon; \quad (3.10)$$

$$\left| \dot{\delta}(t + \Delta t) - \dot{\delta}_{\text{эт}}(t) \right| \rightarrow \epsilon$$

и выбранная целевая функция (например, вида (3.11) либо (3.12)) стремилась к экстремуму:

$$\sum_{i=1}^n C_{i \text{ агр}} + \sum_{j=1}^k C_{j \text{ тр}} \rightarrow \text{extr}; \quad (3.11)$$

$$\sum_{i=1}^n m_{i \text{ агр}} + \sum_{j=1}^k m_{j \text{ тр}} \rightarrow \min, \quad (3.12)$$

где $C_{i \text{ агр}}$ — стоимость i -го агрегата; $C_{j \text{ тр}}$ — стоимость j -го трубопровода; n — количество агрегатов; k — количество трубопроводов; $m_{i \text{ агр}}$, $m_{j \text{ тр}}$ — масса i -го агрегата и j -го трубопровода; $\dot{\delta}$ — скорости движения рулевых поверхностей; ϵ — принятая степень точности.

Само управление может также осуществляться при помощи введения дополнительного регулируемого гидравлического сопротивления таким образом, чтобы

$$\left| \dot{\delta}(t + \Delta t) - \dot{\delta}_{\text{эт}}(t) \right| \rightarrow \epsilon, \quad (3.13)$$

где $\dot{\delta}_{\text{эт}}$ — эталонные скорости движения рулевых поверхностей. Причем эталонные скорости задаются в виде таблиц либо графиков со значениями по требованиям ТЗ на рулевые привода, либо по данным, полученным в результате математического моделирования натуральных применений.

Учитывая вышесказанное, на основе инженерной методики оценки основных параметров гидрокомплекса ОК «Буран», а также (3.9)—(3.13) разработаны алгоритм и блок-схема его реализации, изображенная на рис. 3.26—3.27.

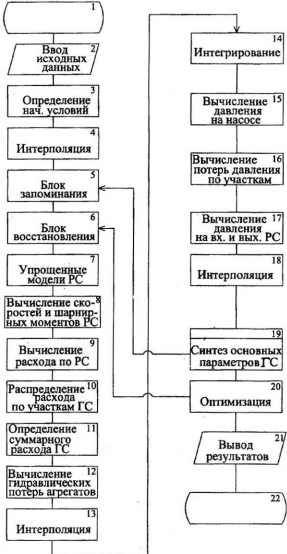


Рис. 3.26. Блок-схема реализации алгоритма синтеза

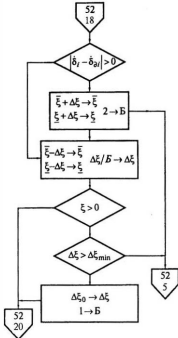


Рис. 3.27. Блок-схема детализации блока 19 на рис. 3.26

3.6.1. Блок-схема алгоритма синтеза основных параметров гидрокомплекса

На основании всего вышесказанного опишем основные блоки алгоритма:

5 — блок запоминания, сохраняющий начальные условия для решения дифференциальных уравнений, и параметры, обеспечивающие работу стандартных программ;

6 — блок восстановления, меняющий начальные условия для решения системы дифференциальных уравнений и параметров, определяющих работу стандартных программ при синтезе основных параметров на следующем этапе вычислений;

18 — блок интерполяции заданных законов движения рулевых поверхностей, в котором реализация законов движений производится интерполяцией табличных значений эталонных скоростей внесенных в оперативную память ЭВМ.

19 — блок синтеза основных параметров гидрокомплекса. Блок детализирован на рис. 3.27, где синтез основных параметров гидрокомплекса производится минимизацией отклонений требуемых законов движения рулевых поверхностей от реальных и основан на регулировании гидравлических сопротивлений на входе в рулевые приводы;

20 — блок оптимизации, в котором результаты вычислений проверяются на условие экстремальности выбранной целевой функции. При невыполнении этих условий происходит обновление исходных данных, и процесс вычислений повторяется вновь, до тех пор, пока не выполнится одно из условий экстремальности.

Остальные блоки приведенного на блок-схеме алгоритма соответствуют описанным в п. 3.4.1.

Следует отметить, что вышеприведенный алгоритм и его практическая реализация могут быть использованы для различных исследовательских задач гидрокомплекса. Например: при заданных характеристиках основных параметров гидрокомплекса ОК «Буран» определить влияние параметров, входящих в гидрокомплекс элементов на энергетические возможности гидрокомплекса в целом для выявления дополнительных ресурсов по энергоотдаче.

Данная задача решается на основе применения ряда математических моделей в общей модели гидрокомплекса с различной степенью детализации исследуемой системы на основе выбранного критерия баланса располагаемой и желаемой мощности [11, 17].

В общем, описание алгоритма решения вышеприведенной задачи не представляет особого интереса, однако он весьма и весьма трудоемок в части подготовки исходных данных и скрупулезном математическом описании, так как принципиальная гидравлическая схема гидрокомплекса ОК «Буран» содержит большое число

трубопроводов различных длин и сечений, агрегатов, соединительной аппаратуры (тройников, переходников и т. д.); кроме того, расходы по участкам различны, зависят от условий работы рулевых приводов, насосов переменной подачи и температуры рабочей жидкости, изменяющейся при функционировании рассматриваемой системы в довольно широком диапазоне.

Приведенные здесь математические модели и алгоритмы их реализации представляют собой комплекс проблемно ориентированных решений и позволяют проводить большой объем работ по различным исследованиям и синтезу параметров гидрокомплекса на основе соблюдения требуемого энергетического баланса.

3.7. РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ ГИДРОКОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ ПОЛЕТА ОК «БУРАН»

Системный подход при разработке современных летательных аппаратов предусматривает весьма тщательный анализ отдельных функциональных узлов и систем ОК, их декомпозицию по слабым связям и учет существующих связей при наличии сильных функциональных зависимостей. Завершающим этапом системных исследований является комплексное математическое моделирование, объединяющее динамику всех взаимодействующих систем и агрегатов ОК «Буран».

Решение задачи по учету влияния динамики всех систем гидрокомплекса на систему управления ОК «Буран» проводилось на основании математических моделей рулевых приводов управления аэродинамическими поверхностями элевонов, руля направления, воздушного тормоза и балансировочного щитка. Следует заметить, что данные математические модели не учитывают изменение давления питания рулевых приводов от расхода в системе, что ограничивает область их применения.

Результаты испытаний на стенде ПРСО и натурные испытания на аналоге ОК «Буран» для горизонтальных летных испытаний показали наличие глубокого взаимовлияния между энергетическими возможностями гидрокомплекса и допустимым быстродействием органов управления. В связи с этим для проведения

моделирования системы управления на режимах, требующих от гидрокомплекса максимального энергопотребления, динамические математические модели рулевых приводов необходимо дополнить упрощенной математической моделью питающей гидросистемы, позволяющей учитывать динамику взаимовлияния рулевых приводов и гидросистемы.

Жесткие требования, предъявляемые разработчиками системы управления к шагу интегрирования (с целью сокращения времени счета при наборе статистики), в значительной мере определяют конечную структуру любой упрощенной математической модели, предназначенной для математического моделирования динамики пилота ОК «Буран». Ограниченность применения математической модели диапазоном частот управления (0—2 Гц) позволяет не учитывать тонкой структуры реальных узлов и агрегатов гидрокомплекса и свести упрощенную модель гидрокомплекса к двум последовательным звеньям (в реальном гидрокомплексе это насос переменной подачи и пневмогидроаккумулятор) — рис. 3.28.

В данной математической модели насос переменной подачи задан статической характеристикой $Q_{\text{нас}} = Q(p_{\text{нас н}})$, определяемой следующими соотношениями:

$$Q_n = \begin{cases} 0 & \text{при } p_n \geq p_{\text{max}}, \\ (p_{\text{max}} - p_n) \frac{Q_{\text{изл}}}{p_{\text{max}} - p_{\text{изл}}} & \text{при } p_{\text{изл}} \leq p_n < p_{\text{max}}, \\ Q_{\text{изл}} + (p_{\text{изл}} - p_n) \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{изл}}}{p_{\text{изл}}} & \text{при } 0 \leq p_n < p_{\text{изл}}. \end{cases} \quad (3.14)$$

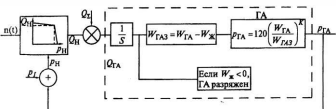


Рис. 3.28. Структурная схема математической модели канала гидросистемы

Здесь $p_{\max}$ — давление рабочей жидкости при нулевой подаче насоса, т. е. $Q = 0$; p — давление рабочей жидкости на выходе насоса переменной подачи; $Q_{\text{изл}}, p_{\text{изл}}$ — производительность насоса переменной подачи и давление рабочей жидкости при установке регулировочной шайбы насоса на упор (точка излома статической характеристики); $Q_{\text{нас max}}$ — максимальная производительность насоса переменной подачи при $p_{\text{нас}} = 0$.

Пневмогидроаккумулятор представлен блоком, входной сигнал которого равен разности между располагаемым $Q_{\text{нас}}$ и потребляемым расходами в системе Q :

$$Q_{\Gamma\Lambda} = Q_{\text{н}} - Q_{\Sigma}.$$

Выходной сигнал соответствует давлению нагнетания на входе рулевых приводов без учета гидравлических потерь в трубопроводах $p_{\Gamma\Lambda}$.

Связь между $p_{\Gamma\Lambda}$ и $Q_{\Gamma\Lambda}$ установлена соотношениями:

$$\begin{aligned} V_{\Sigma} &= \int_0^t (Q_{\text{н}} - Q_{\Sigma}) dt, \\ V_{\text{газ}} &= V_{\Gamma\Lambda} - V_{\Sigma}, \\ p_{\Gamma\Lambda} &= p_{\text{зар}} \left(\frac{V_{\Gamma\Lambda}}{V_{\text{газ}}} \right)^k; \\ p_{\Sigma} &= p_{\Gamma\Lambda} + p_1, \end{aligned} \quad (3.15)$$

где V_{Σ} — объем рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторе; $V_{\text{газ}}$ — объем газа в пневмогидроаккумуляторе; $p_{\text{зар}}$ — давление зарядки пневмогидроаккумулятора; p_1 — потери давления в трубопроводах на участке от насоса до пневмогидроаккумулятора; k — коэффициент политропы.

При $V_{\Sigma} = 0$ в модели формируется признак «ГА разряжен».

Располагаемый расход насоса переменной подачи пропорционален скорости вращения его выходного вала n . Характер изменения оборотов выходного вала насоса переменной подачи определяется стабильностью работы его силового привода, результаты испытаний которого приведены на рис. 2.11.

Структурная схема математической модели гидрокомплекса приведена на рис. 3.29.



Рис. 3.29. Структурная схема упрощенной модели гидрокомплекса

Так как в упрощенных математических моделях рулевых приводов давление питания в явном виде отсутствует, а параметры выбраны из условия $p_n = 190 \text{ кгс/см}^2 = \text{const}$, переход к $p_n(Q)$ осуществляется следующим пересчетом:

$$M_{ш}^* = M_{ш \max}^* \frac{p_{\text{пит}}}{190};$$

$$\dot{\delta} = \dot{\delta}_{\max} \sqrt{\frac{p_{\text{пит}}}{190}}; \quad (3.16)$$

$$p_{\text{пит}} = p_{\text{ТА}} - p_2,$$

где $M_{ш \max}^*$ — максимальный шарнирный момент, развиваемый рулевой поверхностью; $\dot{\delta}_{\max}$ — максимальная скорость движения рулевых поверхностей при $M_{ш} = 0$; p_2 — потери давления в трубо-

проводах на участке от пневмогидроаккумулятора до рулевых приводов.

Связь суммарного потребляемого расхода рулевых приводов с их скоростью установлена соотношениями, определяемыми данными завода-изготовителя. Методический подход к разработке предлагаемой математической модели и алгоритм ее реализации позволяют проектировать параметры системы управления аэродинамическими поверхностями с учетом располагаемых энергетических возможностей гидрокомплекса ОК «Буран».

3.7.1. Адекватность упрощенной математической модели для оперативного решения задач динамики полета ОК «Буран»

Оценка адекватности математической модели реальному гидрокомплексу проводилась по результатам испытаний на стенде ПРСО в объеме программы испытаний по оценке энергетических возможностей гидрокомплекса — аналога ОК «Буран», специально созданного для горизонтальных летных испытаний по отработке режимов спуска и посадки.

Испытания велись при одновременной синхронной работе корневых и концевых секций элевонов и руля направления с учетом алгоритма приоритета работы рулевых поверхностей.

Сигналы на перемещения рулевых поверхностей подавались от штатной системы управления.

В качестве показателя уровня адекватности принято время падения давления $t_{сн}$ на блоке МПЖ с начала падения давления до уровня 186 кгс/см^2 , соответствующего минимальному по ТЗ на гидросистему (что соответствует уровню 175 кгс/см^2 на входе в рулевые приводы). При этом следует отметить, что при давлении, меньшем 175 кгс/см^2 , стабильность характеристик рулевых приводов разработчиками и изготовителями рулевых приводов не гарантируется.

Падение давления при реализации математической модели и в реальном гидрокомплексе произойдет с одинаковой интенсивностью, если протекающие в них процессы идентичны. Это и обусловило выбор критерия адекватности в следующем виде:

$$\left| \dot{r}_{\text{ПРСО}} - \dot{r}_{\text{модель}} \right| \leq \epsilon.$$

Точность регистрирующей и контрольной аппаратуры стенда ПРСО определила численное значение параметра $\epsilon = 0,01$ с.

Расчет по оценке адекватности математической модели и реального гидрокомплекса проводился при параметрах, полученных в результате проведения испытаний:

- два отказа по гидропитанию;
- управляющие воздействия от системы управления — пилообразный сигнал с частотой 0,25 Гц и скоростью «перекладки»

$$\dot{\delta}_{\text{РС1}} = \dot{\delta}_{\text{РС2}} = \dot{\delta}_{\text{РН}} = 10 \text{ град/с}, 11 \text{ град/с (рис. 3.30, 3.31);}$$

- скорость вращения валов насосов переменной подачи НП-112Д $n = 2800$ об/мин;

- давление нагнетания 210 кгс/см², слива 0—16 кгс/см².

Теоретические исследования проведены при следующих исходных данных математической модели:

- статическая характеристика двух спаренных насосов переменной подачи НП-112Д при $n = 2800$ об/мин и $t = 100$ °С;

$$Q_{\text{max}}(p_{\text{н}} = 0) = 283 \text{ л/мин (4723 см}^3\text{/с);}$$

$$Q_{\text{изл}}(p_{\text{изл}} = 210 \text{ кгс/см}^2) = 210 \text{ л/мин (4507 см}^3\text{/с);}$$

$$p_{\text{max}}(Q = 0) = 217 \text{ кгс/см}^2.$$

(Приведенные данные представляют собой сведения, полученные от завода-изготовителя насосов.)

Удельные расходы и утечки рулевых систем в соответствии с принятыми обозначениями в математической модели (3.9):

$$K_{\text{РС1}} = 56,16, \quad K_{\text{РС2}} = 115,85, \quad K_{\text{РН}} = 93,5.$$

$$Q_{\text{утканала гидросистемы}} = 653,3 \text{ см}^3\text{/с.}$$

Размерность коэффициентов K — см³/град.

Результаты вычислений по упрощенной математической модели гидрокомплекса и вышеприведенным исходным данным приведены на рис. 3.32, скорости движения рулевых поверхностей в модели соответствуют полученным при испытаниях на стенде ПРСО и приведены на рис. 3.33—3.34. В нижней части рис. 3.32 показано изменение скоростей движения рулевых поверхностей во

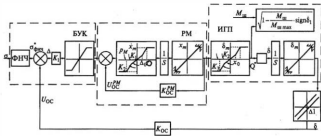


Рис. 3.30. Структурная схема упрощенной математической модели РС1 (РС2)

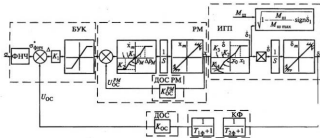


Рис. 3.31. Структурная схема упрощенной математической модели РСЗ

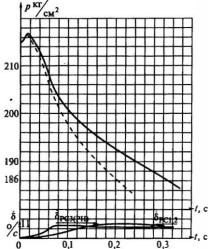


Рис. 3.32. Сравнительные характеристики результатов расчета по упрощенной модели ГК и испытаниям на ПРСО

времени, верхняя часть иллюстрирует характер изменения давления в системе при указанных скоростях.

Следует заметить, что, как и на рис. 3.23 и 3.25, графики изменения давления в системе весьма схожи и некоторый подъем давления в системе с последующим снижением его до 186 kg/cm^2 за время $t_{\text{модель сн}} = 0,2-0,31$ с объясняется такими же причинами. В экспериментальных исследованиях на стенде ПРСО это время $t_{\text{ПРСО сн}}$ составило 0,3 с для суммарных скоростей движения элевонов и руля направления $\delta = 10$ град/с и 0,2 с — для суммарных скоростей элевонов и руля направлен $\delta = 10$ град/с.

Величина разности $\epsilon = 0,01-0,005$ с не превышает оговоренной критерием адекватности.

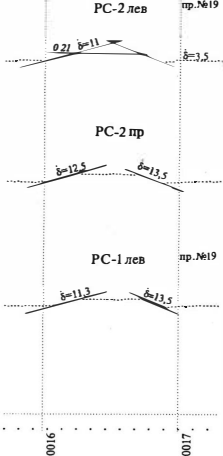


Рис. 3.33. Скорости движения приводов. Испытания на ПРСО

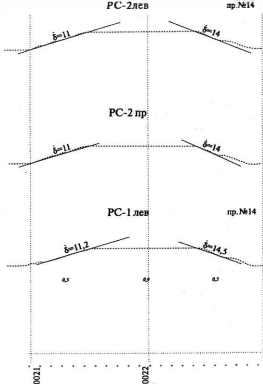


Рис. 3.34. Скорости движения приводов. Испытания на ПРСО

3.7.2. Область применения упрощенной математической модели гидрокомплекса ОК «Буран»

Упрощенная математическая модель гидрокомплекса ОК «Буран» имеет частотный диапазон от 0 до 2 Гц. Она может быть ис-

пользована для теоретических исследований различных режимов условий полета только «жесткого» летательного аппарата, а также для решения широкого круга прикладных задач!

1) при синтезе оптимальных алгоритмов системы управления с учетом принятых алгоритмов приоритета работы рулевых поверхностей и принципа рекуперации;

2) при оценке влияния неустойчивости скорости вращения выходного вала насоса переменной подачи на основные параметры гидрокомплекса и в целом — на динамические характеристики при спуске и посадке ОК «Буран».

Математическую модель динамики полета ОК «Буран» при спуске и посадке в отказных ситуациях (наиболее актуальная позиция сферы применения разработанной ММ гидрокомплекса (3.8) и упрощенную математическую модель гидрокомплекса рис. 3.29) необходимо дополнить для возможности использования ее в данной области математической моделью работы клапана переключения рулевых систем и логикой его срабатывания и, кроме того, логикой поведения рулевых приводов в процессе переключения.

Кроме приведенных выше прикладных задач динамики спуска и посадки ОК «Буран», упрощенная математическая модель позволяет решать широкий круг исследовательских задач, связанных с условиями работы гидрокомплекса ОК «Буран», в частности:

- определить АФЧХ рулевых систем в зависимости от интенсивности их работы,
- оценить уровни высших гармоник, возникающих при функционировании ГК, методами спектрального анализа.

Выводы

1. На основе расчетных схем (рис. 3.6—3.14), в соответствии с рекомендациями гл. 2, разработаны математическая модель гидрокомплекса ОК «Буран» (3.9) для оценки его основных параметров, алгоритм и блок-схема его практической реализации с помощью ЭВМ (3.15) при двух отказах по гидроснабжению.

2. Практическая реализация вышеуказанной математической модели и алгоритма позволили не только оценить максимально располагаемые скорости движения рулевых поверхностей, при ко-

торых может быть соблюден энергобаланс при двух отказах по гидропитанию, но и увеличить их уровень за счет использования принципа «рекуперации» при введении наиболее рационального закона управления аэродинамическими поверхностями.

3. Показано, что энергетический баланс гидрокомплекса при двух отказах по гидропитанию может быть сохранен только при движении рулевых поверхностей со следующими скоростями:

$$\dot{\delta}_{\text{эл}} = \dot{\delta}_{\text{рн}} = 8 \text{ град/с}, \quad \dot{\delta}_{\text{вг}} = \dot{\delta}_{\text{бш}} = 0 \text{ (см. рис. 3.17),}$$

что неприемлемо для обеспечения устойчивости ОК «Буран» при спуске и посадке.

4. Проведены теоретические исследования по выбору наиболее рационального закона управления (см. рис. 3.16—3.21), анализ которых показал, что состояние гидрокомплекса, характеризуемое двумя отказами по гидропитанию, при коэффициенте одновременности работы рулевых поверхностей, равном единице, требует введения режима управления рулевыми поверхностями на основе использования принципа «рекуперации» со следующим распределением скоростей:

$$\dot{\delta}_{\text{эл}} = \dot{\delta}_{\text{рн}} = 10 \text{ град/с на } t = 0,25 \text{ с,}$$

$$\dot{\delta}_{\text{эл}} = \dot{\delta}_{\text{рн}} = 7 \text{ град/с на } t = 0,5 \text{ с.}$$

5. Произведена оценка уровня адекватности математической модели и гидрокомплекса и его характеристик, полученных при испытаниях на стенде ПРСО. Проведенные вычисления по созданной на основе математической модели (3.9) инженерной методике показали, что выбранный критерий адекватности модели и реального гидрокомплекса лежит в диапазоне 0,005—0,01 с, что вполне соответствует реальной степени точности регистрирующей и контрольной аппаратуры.

6. На основе разработанной методики оценки основных параметров гидрокомплекса при двух отказах по гидропитанию показана возможность ее использования для задач синтеза основных параметров гидрокомплекса на основе применения ряда матема-

тических моделей с различной степенью детализации проектируемой системы. Приведены примеры обычно используемых целевых функций, алгоритм предлагаемой инженерной методики синтеза и блок-схема (3.26), (3.27) его реализации на ЭВМ, позволяющие выбирать параметры пневмогидроаккумуляторов, насосы переменной подачи, длины и сечения гидролиний и т.д. на основе требуемого энергетического баланса с учетом принципа «рекуперации» и алгоритма приоритета работы рулевых поверхностей.

7. Для оперативного решения задач динамики полета ОК «Буран» разработана упрощенная математическая модель гидрокомплекса, позволяющая учесть динамику взаимовлияния РС и ГС при моделировании системы управления на режимах максимальной энергоотдачи гидрокомплекса по моделям, учитывающим динамику рулевых систем. Кроме того, предлагаемая упрощенная модель гидрокомплекса позволяет решать и вопросы исследовательского характера, связанные, например, с оперативной оценкой гидравлических потерь в трубопроводах при различных температурах, а также, при различных траекториях спуска и посадки, синтезировать необходимый объем топлива для ВСУ, проводить теоретические исследования по достаточности его объема и, по необходимости, осуществлять конструктивные доработки алгоритмов управления и систем ВСУ.

Разработанные в настоящей главе совокупность математических моделей, алгоритмов их реализации и инженерные методики для задач синтеза и теоретических исследований основных параметров гидрокомплекса ОК «Буран», а также упрощенные математические модели гидрокомплекса для решения задач динамики полета, алгоритмы и методы их практической реализации образуют единый проектно-исследовательский комплекс, внедрение которого в практику инженерных теоретических исследований позволяет сократить объем испытаний на стендовом оборудовании (имеются в виду испытания на стенде ПРСО на основе соблюдения энергетического баланса при работе ОК «Буран» на режимах спуска и посадки.), так как численный эксперимент с помощью вычислительной техники позволяет выявить расчетные случаи, под-

лежащие исследованиям, и провести эти исследования с удовлетворительной степенью точности прогнозов результатов испытаний на реальном гидрокомплексе.

Состояние гидрокомплекса, характеризуемое двумя отказами гидросистем, при коэффициенте одновременности работы элевон и руля направления, равном единице, требует введения в систему управления режимов управления рулевыми поверхностями с распределением скоростей (см. п. 4 Выводов). Указанное распределение необходимо использовать также в алгоритме приоритета работы рулевых поверхностей, так как максимальное время движения элевон и руля направления со скоростями 10 град/с не должно превышать 0,25 с, после чего необходимо переключение на скорость 7 град/с, причем, минимальное время движения на данных скоростях должно быть не менее 0,5 с, что, исходя из анализа результатов экспериментальных данных, соответствует времени восстановления давления в гидрокомплексе, т. е. времени подзарядки пневмогидроаккумулятора.

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ И СИНТЕЗА ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ ГИДРОКОМПЛЕКСА ОК «БУРАН» В РЕЖИМЕ ГИДРООБОГРЕВА ПРИ ОРБИТАЛЬНОМ ПОЛЕТЕ

Как известно [15, 17], проектирование любых систем связано с проведением различных исследований и конструкторских разработок для решения конкретных проблемно ориентированных задач по выбору принципиальных и компоновочных схем, состава и параметров агрегатов и систем, энергетических характеристик проектируемых систем, а также логики их функционирования. Из вышеперечисленных задач в общем случае можно выделить наиболее важные, каковыми являются:

- разработка принципиальных схем;
- выбор энергетических параметров агрегатов и систем;
- выбор состава входящих в проектируемую систему агрегатов и элементов, а также их характеристик;
- создание средств контроля и отображения информации при работе системы;
- разработка системы управления.

В нашем случае, кроме задач вышеперечисленных, при проектировании ОК «Буран» и его систем следует добавить еще одну, и весьма значительную, задачу минимизации массовых характеристик.

Поскольку основы программы полета и проектирования ОК «Буран» создавались на ранних этапах разработки и исследований опытных образцов агрегатов, систем и гидрокомплекса в целом, естественно, возникал ряд проблем, связанных с исследованиями различных агрегатов и систем гидрокомплекса по обеспечению энергетического баланса при спуске, посадке и в орбитальном полете.

На орбитальном участке полета при неработающих рулевых поверхностях конструкция ОК «Буран» охлаждается до температуры -130°C (а от нее — агрегаты и системы гидрокомплекса), в связи с чем рабочая жидкость, упругие уплотнительные элементы и, естественно, рулевые приводы и гидрокомплекс в целом становятся неработоспособными. Поэтому для поддержания температуры, обеспечивающей работоспособность гидрокомплекса, применяются: изоляция агрегатов и трубопроводов гидрокомплекса от элементов конструкции планера; электрообогрев и прокачка рабочей жидкостью, подогретой в нагревательных теплообменниках, использующих тепло приборных отсеков, специальными насосными станциями малой мощности с приводом от электродвигателей, установленных в каждом канале питающих гидросистем. Питание электродвигателей осуществляется от электроаккумуляторов.

4.1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Кроме основной функции — обеспечения энергией приводов управления аэродинамическими поверхностями — гидрокомплекс ОК «Буран» поддерживает заданный температурный режим агрегатов и систем гидрокомплекса на участке орбитального полета. Это достигается насосными станциями малой мощности с приводом от электродвигателей, источником питания для которых являются аккумуляторы. При выключенных основных насосах нагретая в теплообменниках рабочая жидкость от насосных станций прокачивается через соответствующее множество потребителей с заданным распределением расходов, задаваемых соответствующими подразделениями, определяющими тепловой баланс при орбитальном полете, т.е. баланс, обеспечивающий поддержание работоспособности гидрокомплекса на участке верхнего применения.

Кроме системы гидравлического обогрева (СГО), термостатирование непрокачиваемых агрегатов и систем гидрокомплекса осуществляется при помощи электрообогревателей системы электрообогрева (СЭО).

Все элементы гидрокомплекса устанавливаются на специальные крепежные кронштейны с высокими термическими сопротив-

лениями и изолируются от конструкции планера специальной изоляцией.

Отключение и включение СГО и СЭО производится либо по сигналам датчиков температур, установленных в системах гидрокомплекса, либо по времени работы, определяемому системой управления.

В настоящей главе рассмотрены вопросы, связанные с анализом, доводкой, исследованиями и синтезом системы гидравлического обогрева.

Актуальность проведения вышеперечисленных исследований обусловлена следующими причинами:

- изменением проливочных характеристик агрегатов и систем гидрокомплекса в процессе изготовления и испытаний;
- жесткими массовыми и мощностными требованиями к насосным станциям по потребляемому току, напряжению и весовым характеристикам;
- недостаточностью объема теоретической и экспериментальной информации;
- необходимостью использования при проведении доводочных и исследовательских работ по системе гидрообогрева единственно подходящего для данной задачи метода — метода численного эксперимента по разработанным для этих целей математическим моделям.

Целью исследований является:

1. Разработка математических моделей агрегатов и систем гидрокомплекса при работе системы на участке орбитального полета ОК «Буран».
2. Создание методов практической реализации и алгоритмов численных исследований по разработанным моделям с помощью ЭВМ.
3. Оценка основных параметров насосных станций при заданном распределении расходов в заданном диапазоне температур.
4. Проведение численного эксперимента систем СГО с целью доработок реальных агрегатов и систем гидрокомплекса.
5. Обобщение результатов и анализ разработанных математических моделей, алгоритмов и методов их практической реализа-

ции с помощью ЭВМ для решения широкого круга задач в процессе экспериментальных исследований.

6. Определение области применения разработанных методов и алгоритмов для решения различных проектировочных задач, связанных с гидравлическими системами.

Принципиальная гидравлическая схема ГК ОК «Буран» для режима СГО дана на рис. 4.1. В связи с тем, что гидрокомплекс ОК «Буран» состоит из трех независимых гидросистем; большого количества агрегатов и гидролиний различных длин и сечений; контрольной, регулирующей и отображающей информацию аппаратуры, гидравлическая принципиальная схема гидрокомплекса обычными методами приведена к трем расчетным по каналам гидросистем, представленным на рис 4.2—4.4, что весьма существенно упрощает не только обработку исходных данных, но и анализ результатов проведенных исследований.

Как упоминалось ранее, поддержание температурного режима агрегатов и систем гидрокомплекса осуществляется нагретой в теплообменнике рабочей жидкостью, которая прокачивается через агрегаты и системы ГК насосными станциями постоянной подачи.

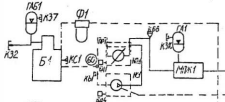
Требуется при заданных характеристиках насосных станций обеспечить заданное из условий анализа соответствующих служб распределение расходов по агрегатам и системам гидрокомплекса таким образом, чтобы выполнялись следующие соотношения:

$$\sum_{i=1}^n Q_i \geq Q_n, \quad t^{\circ}\text{C} = -10^{\circ}\text{C} + 0^{\circ}\text{C}, \quad \Delta p_n \leq \Delta p_{n3},$$

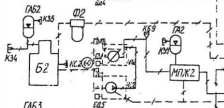
где Q_i — расход по соответствующим потребителям; Q_n — заданное ограничение по расходу насосной станции; p_{n3} — заданное ограничение по перепаду давления на насосной станции; Δp_n — текущее значение перепада давления на насосной станции; n — количество потребителей.

На рис. 4.1—4.4 обозначено: ГАБ1—ГАБ3 — гидравлические аккумуляторы баков; Б1—Б3 — баки гидравлические; ГС1—ГС3 — каналы гидросистем; БД1—БД6 — дренажные бачки; ГА1—ГА3 — пневмогидроаккумуляторы гидросистем на модуле подготовки ра-

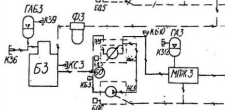
ГС1



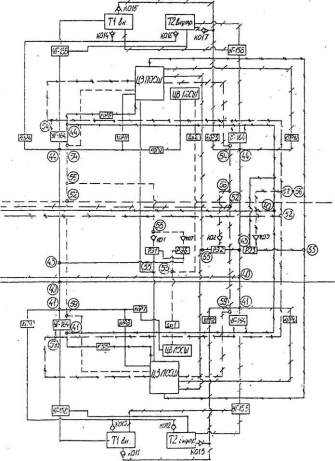
ГС2



ГС3







- Нагнетание ГС1
- Слив ГС1
- Нагнетание ГС2
- Слив ГС2
- Нагнетание ГС3
- Слив ГС3

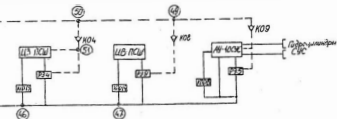


Рис. 4.1. Расчетная принципиальная гидравлическая схема гидрокомплекса в режиме СГО

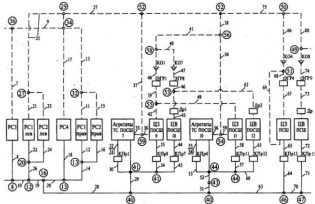


Рис. 4.2. Расчетная схема СГО канала TC1

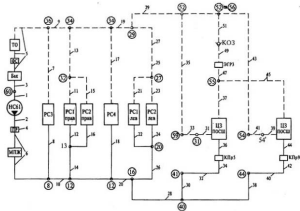


Рис. 4.4. Расчетная схема СГО канала ГС3

бочей жидкости; МПЖ1—МПЖ3 — модули подготовки рабочей жидкости каналов гидросистем; КБ1—КБ10 — клапаны бортовые; К310—К312 — клапаны зарядные; КС1—КС3 — клапаны сливные; КО1—КО12 — клапаны обратные; КПр1—КПр15 — клапаны прокачные; ДР1—ДР2 — дроссели; Т1—Т2 — тормоза; РЭ1—РЭ9 — электрогидравлические распределители; УГ158 — управляющий тормозными системами Т1-Т2 электрогидравлический агрегат; УГ154 — управляющий тормозными системами Т1-Т2 электрогидравлический агрегат; НПе1—НПе3 — основные питающие каналы гидросистем гидрокомплекса, насосы переменной подачи; НС1—НС3 — насосы малой мощности постоянной подачи, прокачивающие рабочую жидкость через агрегаты и системы гидрокомплекса в режиме СГО на участке орбитального полета; ПОСШ — правая основная стойка шасси; ЛОСШ — левая основная стойка шасси; ПСШ — передняя стойка шасси; ЦВ — цилиндр выпуска шасси; Ц3 — цилиндр замка выпуска шасси; АУ- 48 (СУС) — агрегат управления (гидроусилитель типа сопло-заслонка) системы управления передней стойкой шасси; ТО1—ТО3 — теплообменники; РС3 — рулевой привод руля направления и воздушного тормоза; РС1 — рулевой привод управления концевыми секциями элевонов; РС2 — рулевой привод управления корневыми секциями элевонов; РС4 — рулевой привод управления балансировочным щитком; Пр1—Пр3 — проставка; Ф1—Ф3 — фильтры на сливе каналов гидросистем; ЭГР1—ЭГР9 (на схемах рис. 4.2—4.4 РЭ1—РЭ9) — электрогидравлический распределитель.

Некоторые из условных обозначений были приведены гл. 1.

4.1.1. Методы исследований и научная новизна

Теоретической основой исследований служат методы математического моделирования с применением экспериментальных характеристик агрегатов и систем ГК и проливочных характеристик входящих в его состав элементов.

Существенно новыми являются следующие разработки:

1. Постановки задач теоретических исследований гидрокомплекса в режиме орбитального полета, предусматривающие анализ параметров агрегатов и систем гидрокомплекса в целом для про-

ведения исследовательских, проектировочных и доводочных работ уже на ранних этапах проектирования ОК «Буран».

2. Качественно отличный от традиционных метод определения требуемых характеристик потребителей по критерию заданной мощности насосной станции, основанный на использовании математических методов «невязок» и метода «стягивания в точку» с учетом эксплуатационных факторов.

3. Методика поверочного расчета, позволяющая проводить анализ влияния различных эксплуатационных и экспериментальных характеристик на факторы СГО, отличная от известных возможностью исследований в широком диапазоне температур.

4. Методика синтеза основных параметров системы гидрообогрева по критерию заданных распределений расходов и мощности насосных станций, содержащая итерационные процедуры, позволяющие получить оценки рабочих процессов системы гидрообогрева в широком диапазоне температур.

4.1.2. Практическая полезность

Разработанные и представленные в настоящей главе математические модели, алгоритмы, методы исследований и программы их конкретной реализации на ЭВМ позволяют:

- проводить инженерные расчеты по выбору основных параметров гидрокомплекса в режиме поддержания заданного распределения температур на участке орбитального полета;
- проводить конструкторские и экспериментальные доводочные работы методами численного эксперимента;
- оценивать основные параметры СГО с учетом испытательных и эксплуатационных параметров;
- использовать предлагаемые методы и программы их конкретной реализации при проектировании и исследованиях широкого класса гидросистем различных назначений.

Использование разработанных математических моделей и методов их практической реализации с помощью ЭВМ существенно сокращает время промышленных разработок и согласования технических заданий на агрегаты и системы ГК ОК «Буран» за счет проведения стыковочного численного эксперимента и, кроме того,

значительно уменьшает число доработок и стоимость этапов проектирования и испытаний.

От внедрения практических результатов разработок, представленных в настоящей главе, уже получен положительный эффект в виде:

- повышения качества промышленных разработок за счет использования теоретических исследований эксплуатационных режимов;
- уменьшения объема испытаний (так как все производственные дефекты СГО были выявлены в процессе теоретических исследований);
- экономии средств от многократного использования разработанных математических моделей и алгоритмов их практической реализации, существенно сократившего согласование и проведение доводочных работ.

4.2. ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА В РЕЖИМЕ СГО ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ОК «БУРАН» НА УЧАСТКЕ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

Оценка основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО по обеспечению требований теплового баланса по критерию равенства мощностных характеристик насосных станций и потребителей сводится к решению алгебраических и функциональных уравнений. При выполнении данной задачи используется математическая модель гидрокомплекса, состоящая из моделей элементов ГС, гидролиний различных длин и сечений, экспериментальных, проливочных характеристик входящих в гидрокомплекс агрегатов и систем, а также характеристик насосных станций.

4.2.1. Общая формализация задачи

В соответствии с расчетными схемами рис. 4.1—4.4 работу гидрокомплекса в режиме СГО можно представить следующим образом.

Насосные станции, состоящие из электродвигателей и насосов постоянной подачи, подают рабочую жидкость, подогретую в теп-

лообменниках (ТО), по гидротлиниям к прокачиваемым агрегатам и системам гидрокомплекса в соответствии с заданным соответствующими подразделениями распределением расходов, обеспечивая тем самым поддержание требуемого теплового режима. При этом мощность насосных станций для каждого из каналов гидрокомплекса должна быть такой, чтобы обеспечивалось заданное из условий теплового баланса распределение расходов, т.е., чтобы выполнялось следующее соотношение:

$$\left| p_{н.с} \sum_{i=1}^n Q_i - \eta I_{н.с} U_{н.с} \right| \rightarrow \varepsilon, \quad (4.1)$$

где $p_{н.с}$ — давление на выходе насосной станции; Q_i — заданный расход по i -му потребителю; n — количество прокачиваемых агрегатов и систем гидрокомплекса; $I_{н.с}$ и $U_{н.с}$ — ток и напряжение электродвигателя насосной станции; ε — степень точности; η — КПД насосной станции.

Следует учесть, что условие (4.1) должно выполняться в каждый момент времени в заданном интервале температур.

Нарушение условия (4.1) приведет либо к поломке электродвигателя при повышении тока выше допустимого значения, либо к отказу одной из систем СГО при падении давления на выходе насосной станции ниже допустимого предела.

Учитывая вышеизложенное, задачу оценки основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО можно представить следующим образом:

при заданной принципиальной гидравлической схеме гидрокомплекса, существующих ограничениях по расположению агрегатов и систем, в заданном температурном диапазоне выбрать характеристики входящих в СГО агрегатов и систем таким образом, чтобы однозначно выполнялось соотношение (4.1).

4.2.2. Математические модели агрегатов и систем СГО

Расчетные схемы систем СГО по каждому из каналов гидрокомплекса приведены на рис. 4.2—4.4.

Условимся под *агрегатом* и *системой* понимать устройство, выполняющее отдельную функцию, и перейдем к рассмотрению моделей элементов и систем, входящих в гидрокомплекс при его работе в режиме СГО.

Гидравлические потери по длине участка гидролинии можно вычислить исходя из известной зависимости и в соответствии с положениями гл. 2 как

$$\Delta p_i = \lambda(\text{Re}) \frac{L_i}{d_i} \frac{\rho}{2} \frac{Q_i^2}{F_i^3}, \quad (4.2)$$

где Δp — перепад давления на i -м участке гидролинии; L_i , d_i , F_i — длина, диаметр и площадь сечения i -й гидролинии соответственно; ρ — плотность рабочей жидкости; Q_i — расход на соответствующем участке гидролинии; λ — коэффициент, зависящий от числа Re , причем

$$\text{Re} = f(t), \quad \rho = f(t), \quad \lambda = f(t). \quad (4.3)$$

Анализ агрегатов и систем, входящих в гидрокомплекс ОК «Буран», показал, что существует проблема математического описания течения рабочей жидкости в каналах гидравлических агрегатов и систем. В связи с этим гидравлические модели агрегатов и систем гидрокомплекса не могут быть применены из-за сложности математического описания и неправомерного усложнения математической модели работы гидрокомплекса в режиме СГО. Поэтому в нашем случае гидравлические модели можно построить из моделей простой геометрии, т.е. заменить математическими моделями для гидравлических сопротивлений агрегатов (клапаны, дроссели и т.д.), основываясь на данных технических заданий, либо проливочных характеристиках, и в соответствии с [13] и положениями гл. 2 описать следующей зависимостью:

$$\Delta p_{\text{агр}} = \frac{\Delta p_1}{a_2^2} \frac{a_1^2}{\gamma_1} \frac{\gamma_2}{a_1^2} Q_i^2, \quad (4.4)$$

где Δp и Q_1 — гидравлическое сопротивление при заданном расходе Q (по ТЗ либо проливка); γ_1 и γ_2 — удельный вес рабочей жидкости при t_1 °C и t_2 °C (расчетное значение); a_1 и a_2 — коэффициенты ($a_1 = f\left(\frac{\delta_1}{\delta_{20}}\right)$, $a_2 = f\left(\frac{v_2}{v_{20}}\right)$, v_1 , v_2 — кинематическая вязкость при t_1 °C и t_2 °C; v_{20} — кинематическая вязкость при $t = 20$ °C); $\Delta p_{\text{агр}}$, Q_i — перепад давления и расход на агрегатах и системах гидрокомплекса.

Модель насосной станции постоянной подачи представлена в виде ограничений по давлению, расходу в СГО и току, потребляемому приводными электродвигателями.

Гидравлические потери на местные сопротивления (сужения, расширения, повороты и т.д.) принимаем в соответствии с [16] как процент от гидравлического сопротивления по длине гидролинии.

4.2.3. Обоснование выбора расчетных схем

Общая расчетная принципиальная схема гидрокомплекса в режиме работы СГО представлена на рис. 4.1. Поскольку гидрокомплекс состоит из множества различных агрегатов и участков гидролиний в большом диапазоне изменений длин и сечений трубопроводов, гидравлические сопротивления которых зависят от температуры, что вызывает необходимость введения интерполяционных блоков на функциональные зависимости $\nu = f(t)$ и $\rho = f(t)$, учитывая, что каждый из каналов СГО автономен, общая схема приведена к трем расчетным (рис. 4.2—4.4). Такой подход позволяет не только сократить время счета, но и значительно упрощает проведение анализа в вариантах изменения гидравлических характеристик агрегатов и систем СГО.

На общей принципиальной гидравлической расчетной схеме (рис. 4.1) номера участков гидролиний не проставлены, однако для удобства пользователя при анализе результатов расчета проставлены номера узловых точек, которые соответствуют обозначениям на рис. 4.2—4.4.

Значения длин и сечений гидролиний по каждому из каналов гидрокомплекса приведены в табл. 4.1 и считаются неизменными в процессе проведения числового эксперимента.

Учитывая, что ограничением по насосной станции в режиме СГО является перепад давления, который не зависит от давления поддавливания в гидравлическом баке, принимаем давление в баке постоянным и равным $p_{\text{бак}} = 3 \text{ кгс/см}^2$.

Таблица 4.1

№	ГС1		ГС2		ГС3	
	$L(\text{мм})$	$D(\text{мм})$	$L(\text{мм})$	$D(\text{мм})$	$L(\text{мм})$	$D(\text{мм})$
1	1100	14,4	750	14,4	350	14,4
2	2221	13,2	1122	13,2	1950	13,2
3	3150	41	4100	41	3800	41
4	552	9	552	9	552	9
5	3266	33	4816	33	3866	33
6	4087	25	3878	25	2916	25
7	9772	20	9672	20	9042	20
8	5000	18	5500	18	12750	18
9	1426	33	1526	33	1626	33
10	3222	25	3522	25	1426	25
11	5300	16	5150	16	5300	16
12	5350	15	5300	15	5450	15
13	4250	25,6	4250	25,6	4150	25,6
14	4350	20,6	4150	20,6	4250	20,6
15	250	20	400	20	400	20
16	300	16,4	350	16,4	400	16,4
17	6260	9	6460	9	6660	9
18	5960	6,4	6250	6,4	6460	6,4
19	2724	25	2674	25	727	33
20	824	20,6	824	20,6	824	25
21	5500	16	5450	16	4600	16
22	5100	15	4950	15	5100	15
23	300	20	350	20	400	20
24	250	16,4	350	16,4	400	16,4
25	7174	25,6	8182	25,6	4050	25,6
26	4600	20,6	4700	20,6	7424	20,6
27	5876	20	5424	14,4	2724	25,6
28	5976	18	5524	13,2	6074	15
29	4322	8	4622	8	5974	18
30	100	6,4	100	6,4	4486	13,2

31	5206	8	5047	8	4487	9
32	5040	6,4	2688	6,4	350	6,4
33	50	9	50	9	150	12,4
34	100	6,4	100	6,4	350	6,4
35	3950	6,4	4000	6,4	4696	14,4
36	4337	9	4347	9	3950	6,4
37	4347	16	4626	14,4	9022	8
38	1150	16	1100	8	4043	13,2
39	500	8	872	9	4487	9
40	142	7,5	92	7,5	340	6,4
41	240	12,4	300	8	150	12,4
42	9692	8	9822	8	350	6,4
43	200	6,4	4875	8	3770	14,4
44	1182	6,4	100	6,4	3950	6,4
45	6416	13,2	5047	8	5920	8
46	500	13,2	2653	6,4	0	0
47	110	11,5	50	9	300	8
48	160	12,4	100	6,4	0	0
49	6510	8	4000	6,4	92	7,5
50	1972	16	4347	9	0	0
51	850	13,2	3026	14,4	572	9
52	4025	8	6520	8		
53	100	6,4				
54	5146	8				
55	5044	6,4				
56	50	9				
57	100	6,4				
58	3994	6,4				
59	4337	9				
60	200	6,4				
61	1130	6,4				
62	6213	13,2				
63	11450	13,2				
64	350	6,4				
65	680	6,4				
66	680	9				
67	440	8				
68	70	9				
69	950	9				

70	2750	13,2				
71	1000	6,4				
72	900	6,4				
73	1630	13,2				
74	160	11,5				
75	1360	14,4				
76	3110	8				
77	450	6,4				
78	390	6,4				
79	2640	10,8				
80	2750	12,4				

4.2.4. Основные предположения и допущения

При разработке математической модели СГО в соответствии с расчетными схемами рис. 4.2—4.4 приняты следующие предположения и допущения:

1. Давление, скорость и плотность рабочей жидкости по сечению гидролинии постоянны.
2. Стенки трубопроводов не деформируемы.
3. Рабочая жидкость несжимаема.
4. Вязкость и плотность рабочей жидкости зависят от температуры и имеют вид, представленный на рис. 3.3—3.4.
5. Гидравлические сопротивления на вязкое трение рабочей жидкости зависят от режима течения и температуры.
6. Температура рабочей жидкости для каждого из вариантов расчета постоянна.
7. Гидравлические сопротивления агрегатов подчинены параболическому закону. (Статическая характеристика насосной станции СГО будет представлена на рис. 4.9.)
8. Основным расчетный вариант по доводке гидрокомплекса в режиме СГО — минимальная температура рабочей жидкости по ТЗ на участке орбитального полета — равна — 10 °С.
9. Диапазон изменения перепада давлений насосной станции в заданном диапазоне температур 7—15,5 кгс/см² при расходе $12,5 \pm 0,5$ л/мин.

10. Длины и сечения гидротлиний по всем трем каналам гидрокомплекса, в соответствии с расчетными схемами рис. 4.2—4.4, представлены в табл. 4.1.

4.2.5. Методика инженерного расчета основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО

Рассмотрим математическую модель гидрокомплекса в режиме СГО, алгоритм и метод его практической реализации на ЭВМ, позволяющий проводить анализ влияния различных факторов на гидравлические характеристики системы СГО в целом, а также численный эксперимент и теоретические исследования гидрокомплекса в режиме СГО с учетом экспериментальных и эксплуатационных характеристик и систем ГК.

4.2.6. Общая математическая модель гидрокомплекса в режиме СГО

С учетом рекомендаций гл. 2, а также принятых предположений, допущений и ограничений математическая модель гидрокомплекса в режиме СГО может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 \bar{p}_i &= f(\Delta \bar{p}_{\text{дл}i}, \Delta \bar{p}_{\text{агр}i}, t); \\
 p_n &= f(\bar{p}_i, Q_{\Sigma n}); \\
 \Delta p_{\text{дл}i} &= f(t); \\
 \Delta p_{\text{агр}i} &= f(\Delta \bar{p}_n, Q_n, t); \\
 Q_i &= f(\Delta \bar{p}_{\text{дл}i}, \Delta \bar{p}_{\text{агр}i}, t); \\
 Q_{\Sigma n} &= \sum_{i=1}^n Q_i; \\
 \rho &= f(t), \nu = f(t), \gamma = f(t),
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

где p_i — давление в узловых точках; $\Delta p_{\text{дл}i}$, $\Delta p_{\text{агр}i}$ — перепады давления по длине трубопроводов и на агрегатах соответственно; p_n —

давление на выходе насосной станции; Δp_n , Q_n — паспортные либо проливочные характеристики на агрегаты и системы гидрокомплекса в режиме СГО (перепады давления и расходы соответственно); Q_{Σ} — суммарный расход насосной станции в гидрокомплексе в режиме СГО; Q_i — расход на соответствующем участке гидрولинии; t — температура рабочей жидкости, °C; ρ , ν , γ — плотность, вязкость и удельный вес рабочей жидкости соответственно.

Таким образом, математическая модель (4.5) представляет собой систему, состоящую из нелинейных алгебраических уравнений и функциональных зависимостей. На стыках участков вводятся граничные условия, характеризующие передачу энергии от одного участка к другому. Считаем, что передача гидравлической энергии полностью характеризуется такими параметрами, как давление и расход рабочей жидкости при работе гидрокомплекса в режиме СГО.

4.2.7. Алгоритм расчета основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО

Как известно, при решении любой задачи, связанной с выбором параметров, синтезом и исследованиями различных проектируемых гидравлических систем, универсального метода практически не существует. Поэтому наиболее эффективное математическое моделирование работы рассматриваемых систем и правильность математизации зависят только от «физического чутья» разработчиков и понимания рабочих процессов проектируемой системы.

Рассмотрим задачу математического описания и обоснования применяемых методов и алгоритмов их практической реализации на ЭВМ для проведения исследовательских и доводочных работ по проблемам, связанным с работой гидрокомплекса в режиме СГО. Методы, изложенные в [18], для решения нашей задачи не подходят из-за наличия большого количества агрегатов, трубопроводов и т.д. в составе гидрокомплекса, что приводит к необоснованным, трудоемким, длительным и громоздким вычислениям.

Для решения полученной системы алгебраических и функциональных уравнений можно было бы использовать классический

метод Ньютона. При расчете напоров и расходов воды в многокольцевых тепловых сетях разработан и применяется несколько модифицированный метод Ньютона. Одним из частных случаев применения метода Ньютона является широко используемый метод Лобачева—Харди—Кросса, разработанный в СЭИСО Сибирской Академии наук СССР. Согласно этому методу после определения независимых контуров задаются произвольными распределениями расходов по участкам, удовлетворяющими следующему условию:

$$\left(p_n - \sum_{i=1}^n \Delta p_{дл_i} \right) - \left(\sum_{i=1}^n \Delta p_{агр_i} + \sum_{j=1}^n \Delta p_{дл_j} \right) = 0. \quad (4.6)$$

Здесь $\sum_{i=1}^n \Delta p_{дл_i}$ — сумма потерь по длине на соответствующих участках нагнетания насосной станции; $\sum_{i=1}^n \Delta p_{агр_i}$ — сумма гидравлических сопротивлений агрегатов; p_n — давление на выходе источника питания; $\sum_{j=1}^n \Delta p_{дл_j}$ — сумма гидравлических потерь на соответствующих участках трубопроводов.

В общем случае произвольно выбранные в качестве начального приближения расходы не удовлетворяют уравнению (4.6), так как в правой части этого уравнения остается некоторое значение Δh , требующее определения поправочного расхода из условия

$$\Delta h = 0.$$

После определения поправочных расходов и общего гидрораспределения производится расчет давления в узловых точках. Для решения нашей задачи с помощью данного метода необходимо знать либо выбирать гидравлические характеристики агрегатов и систем гидрокомплекса в режиме СГО, от которых зависит само

распределения расходов. То есть для решения задачи распределения расходов при известных либо выбираемых характеристиках агрегатов и систем гидрокомплекса в режиме СГО потребовалась разработка нового, более универсального метода расчета.

Опишем физическую модель рабочего процесса гидрокомплекса в режиме СГО и перейдем к рассмотрению разработанного универсального метода для задач проектирования, исследований и доводки различных гидросистем с известными потребителями.

После перехода к расчетной схеме (см. рис. 4.1) физическая модель рабочего процесса гидрокомплекса в режиме СГО может быть представлена следующим образом.

Пусть система в фиксированный промежуток времени находится в каком-то равновесном состоянии, которое характеризуется некоторым числом параметров. Из числа параметров, характеризующих систему, выбираются те, по которым производится сравнение с эталонными. За такие параметры могут быть приняты гидравлические сопротивления агрегатов, трубопроводов, различных систем и т.д. Для нашей задачи в качестве таких параметров предпочтительнее принять давление и подачу насосной станции по обеспечению заданного распределения расходов в соответствии с функциональным критерием (4.1).

Само регулирование системы осуществляется путем выбора характеристик соответствующих агрегатов и систем, т.е. увеличением либо уменьшением гидравлических сопротивлений. Причем сложность решения еще и в том, что после выбора необходимых гидравлических сопротивлений агрегатов и систем гидрокомплекса в режиме СГО необходимы пересчет и «правка» гидравлических сопротивлений на соответствующих участках гидролиний.

Сам алгоритм решения построен следующим образом. В каждый фиксированный промежуток времени, при заданной температуре рабочей жидкости, в соответствии с характеристиками агрегатов и систем гидрокомплекса в режиме СГО, а также существующими ограничениями по расположению агрегатов и систем определяются давления в узловых точках в соответствии с расчетными схемами рис. 4.1—4.4 (расходы по агрегатам заданы) со стороны агрегатов и со стороны гидролиний. По разнице давлений в

данной узловой точке определяется изменение расхода, которое, в зависимости от полученных расчетных значений, либо прибавляется, либо вычитается из заданного по соответствующему агрегату или системе. Полученный таким образом новый расход через соответствующий агрегат или систему вычитается из общего расхода по данной гидролинии. Далее производится суммирование всех полученных расчетным путем расходов, и если сумма больше заданной, повышается давление на насосной станции до величины, при которой обеспечивается равенство заданного и расчетного расхода. Если давление становится больше заданного по ТЗ на насосную станцию, меняются характеристики соответствующих агрегатов и систем гидрокомплекса в режиме СГО и расчет повторяется **ВНОВЬ**.

При этом на каждом фиксированном варианте расчета производится проверка условия (4.1).

Для большей наглядности работу предлагаемого алгоритма можно подробно рассмотреть на примере простой расчетной схемы, приведенной на рис. 4.5.

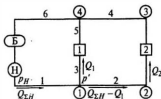


Рис. 4.5. Расчетная схема алгоритма расчета: (1)–(4) — узловые точки; [1], [2] — условные агрегаты и системы; 1–6 — номера участков гидролиний; Q_1 и Q_2 — заданные расходы по агрегатам и системам; Б — бак; p_H — давление нагнетания насосной станции; Н — насосная станция; Q_H — суммарный расход насосной станции

Рассмотрим этот алгоритм более подробно. Пусть в фиксированный промежуток времени суммарный расход и давление на выходе насосной станции известны. Тогда (см. рис. 4.5)

$$\Delta p_1 = \lambda(Re) \frac{L_1}{d_1} \frac{\rho}{2} \frac{Q_{\Sigma n}^2}{F_1^2};$$

$$p_1 = p_n - \Delta p_1.$$

С другой стороны,

$$p_1' = \Delta p_{\text{ггг}} + \Delta p_3 + p_1 + \Delta p_3.$$

Далее, в зависимости от выполнения условия $p_1 \geq p_1'$ корректируется значение расхода через первый (по схеме) агрегат:

$$Q_1 = Q_1' + \Delta Q \operatorname{sign} |p_1 - p_1'|. \quad (4.7)$$

Расчет повторяется, пока заданная точность не будет соблюдена:

$$|p_1 - p_1'| \rightarrow \epsilon. \quad (4.8)$$

При выполнении условия (4.8) из суммарного расхода насосной станции вычитается полученное значение (4.7), определяется давление p_2 и расчет повторяется.

Определив таким образом расходы по каждому агрегату и системе гидрокомплекса в режиме СГО, полученные расходы суммируют, и если

$$\sum Q_i \neq Q_{\Sigma n}, \quad (4.9)$$

уменьшается либо увеличивается давление p_n и расчет повторяется вновь, пока условие (4.9) не будет соблюдено.

При давлении p_n больше заданного меняются характеристики соответствующих агрегатов и систем до тех пор, пока баланс (4.1) не будет соблюден.

Блок-схема практической реализации вышеизложенного алгоритма с помощью ЭВМ приведена на рис. 4.6 и 4.7.



Рис. 4.6. Блок-схема алгоритма оценки основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО

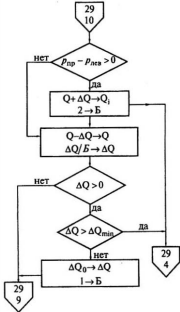


Рис. 4.7. Детализация блока 8 рис. 4.6

4.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА В РЕЖИМЕ СГО ДЛЯ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ И ДОВОДКИ

Вышеизложенный алгоритм может быть также использован для задач синтеза исследований и доводки уже созданных систем на основе численных экспериментов практически без доработки программ расчета на ЭВМ. Например, замена в (4.7) расхода по агрегатам и системам гидрокомплекса в режиме СГО расходом паспор-

тным позволяет проводить синтез параметров агрегатов СГО по критериям теплового баланса, что не только определяет характеристики рабочих процессов, происходящих в СГО, но и дает возможность квалифицированного и более точного выбора значений параметров, включаемых в ТЗ на агрегаты системы и саму насосную станцию.

Учитывая, что в процессе изготовления и испытаний реальные характеристики насосной станции, агрегатов и систем могут меняться (например, из-за допусков на изготовление), настоящая инженерная методика была использована для оперативной оценки работоспособности системы в целом, что позволило принять решения по необходимым конкретным доработкам агрегатов и систем гидрокомплекса в режиме СГО. Кроме того, рассмотренный выше алгоритм и программы его конкретной реализации на ЭВМ позволяют решать широкий круг исследовательских задач, связанных с изменениями эксплуатационных режимов работы и поведением всей системы при этих изменениях.

4.3.1. Блок-схема алгоритма оценки основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО

Как описывалось в предыдущих параграфах, алгоритм практической реализации предложенной методики состоит из целого комплекса проблемно ориентированных программ для ЭВМ по каждому каналу СГО, основанных на едином алгоритме, но различных исходных данных по размерам гидротрасс и характеристикам агрегатов и систем гидрокомплекса в режиме СГО. Обоснование данного построения приведено в п. 4.2.3, блок-схема практической реализации предлагаемого алгоритма — на рис. 4.6 и 4.7.

Опишем основные блоки алгоритма.

3 — блок интерполяции, в котором реализация функциональных зависимостей плотности, вязкости и удельного веса рабочей жидкости от температуры производится интерполяцией табличных значений, внесенных в оперативную память ЭВМ.

6 — блок вычисления давлений в узловых точках, в котором с учетом паспортных либо проливочных характеристик агрегатов и

систем при фиксированной температуре рабочей жидкости определяются давления в узловых точках.

7 — блок сравнения. В нем сравниваются между собой полученные давления как функции гидравлических сопротивлений по длине гидролинии и как функции гидравлических сопротивлений агрегатов.

8 — блок алгоритма оценки основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО (в развернутом виде представлен на рис. 4.7) и основан на известном в теории вычислений методе «стягивания в точку». (Примечание: блок 8 каналов гидросистем СГО1 и СГО2 основан на методе «невязок».)

II — блок корректировки p_{11} . В нем начальное значение давления на выходе насосной станции корректируется по результатам вычислений и сравнения (блок 10 настоящего алгоритма).

12 — блок корректировки характеристик клапанов прокачки. В нем, в зависимости от значений давления на выходе насосной станции, выбираются новые требуемые характеристики клапанов прокачки, которые должны быть отражены в ТЗ на разработку (при необходимости) новых клапанов. Данный блок может иметь двойное использование: либо при проведении проверочных и исследовательских расчетов, с учетом характеристик существующих (реальных) клапанов прокачки, во всем диапазоне допусков по гидравлическим характеристикам клапанов при различных фиксированных значениях температур рабочей жидкости на основании ТЗ, либо для задач синтеза при разработке и проектировании новых гидросистем, основанных на энергетическом балансе между требуемой и располагаемой мощностями насосных станций, т.е. на выполнении условия (4.1). Следует заметить, что разработанный в настоящей главе алгоритм инженерной методики и метод его практической реализации на основе энергетического баланса вполне приемлем для широкого круга задач, связанных с проектированием, исследованиями и доводкой гидросистем в различных отраслях промышленности.

4.4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧ СИНТЕЗА, ИССЛЕДОВАНИЙ И ДОВОДКИ СИСТЕМ И АГРЕГАТОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА В РЕЖИМЕ СГО

Известно, что достаточно строгое решение задачи синтеза и исследований основных характеристик любой гидросистемы может быть получено только при наличии достоверных характеристик потребителей, входящих в проектируемую и исследуемую гидросистему.

Предлагается множество вариантов расчета, каждый из вариантов содержит несколько этапов, которые наиболее удобно и просто проследить по структурной схеме, изображенной на рис. 4.8.

4.4.1. Обоснования банка исходных данных

При проведении теоретических исследований по предлагаемой математической модели и алгоритму ее практической реализации с помощью ЭВМ обоснование использования принятых характеристик агрегатов и систем гидрокомплекса в режиме СГО (в качестве исходных данных) приведено в следующих документах:

- принципиальная гидравлическая схема гидрокомплекса ОК «Буран»;
- ТЗ и дополнения к ТЗ на разработку рулевой системы управления концевыми секциями элевонов;
- ТЗ и дополнения к ТЗ на разработку рулевой системы управления корневыми секциями элевонов;
- ТЗ и дополнения к ТЗ на разработку рулевой системы управления рулем направления и воздушным тормозом;
- ТЗ и дополнения к ТЗ на разработку рулевой системы управления балансировочным щитком;
- ТЗ и дополнения к ТЗ на разработку прокачных клапанов;
- проливочные характеристики завода-изготовителя на УГ158;
- проливочные характеристики от завода-изготовителя на УГ164;
- проливочные характеристики цилиндров, замков шасси;

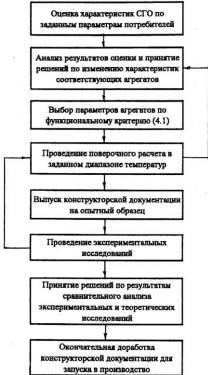


Рис. 4.8. Структурная схема этапов расчета основных параметров систем СГО

- ТЗ и исходные данные к ТЗ на разработку системы управления передней стойкой шасси;
- проливочные характеристики по всем рулевым системам в режиме СГО от завода-изготовителя;
- по тормозам колес данные отсутствуют, поэтому принято:
 $\Delta p = 1,5 \text{ кгс/см}^2$, $Q = 1 \text{ л/мин}$, $t = -10 \text{ }^\circ\text{C}$;

- по цилиндру выпуска шасси данные отсутствуют, поэтому принято:

$$\Delta p = 1 \text{ кгс/см}^2, Q = 0,5 \text{ л/мин}, t = -10^\circ \text{C}.$$

4.4.2. Основные варианты расчета

В соответствии с принципиальной расчетной гидравлической схемой гидрокомплекса в режиме СГО (см. рис. 4.1), заданными характеристиками насосных станций (рис. 4.9), а также с учетом принятых предположений, допущений, ограничений по располо-

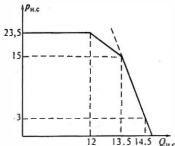


Рис. 4.9. Статическая характеристика насосной станции систем СГО

жению агрегатов и систем гидрокомплекса в режиме СГО рассмотрим основные расчетные варианты по получению информации от численного эксперимента с целью возможности проведения анализа по определению (при необходимости) мест непосредственной конструктивной доработки систем СГО.

Как отмечалось, основным расчетным вариантом, определяющим наиболее тяжелые условия работы гидрокомплекса в режиме СГО, принять состояние системы при температуре рабочей жидкости -10°C .

Однако после выбора основных прокачных характеристик агрегатов и систем СГО, соответствующих равновесному состоянию, при существующих ограничениях по работоспособности насосных

станций необходим проверочный расчет с выбранными основными характеристиками агрегатов и систем СГО при температуре рабочей жидкости, равной $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, с целью определения минимального давления на выходе насосной станции:

$$p_{н.с} \geq p_{н.с\min} \quad (4.10)$$

При несоблюдении условия (4.10) расчет повторяется вновь с изменением характеристик других агрегатов и систем СГО, которые не участвовали в выборе характеристик ранее.

Расчет считается законченным в том случае, когда при подобранном распределении расходов по агрегатам и системам СГО выполняются соотношения

$$\left| p_{н.с} \sum_{i=1}^n Q_i - \eta U_{н.с} I_{н.с} \right| \rightarrow \epsilon$$

$$p_{н.с} \geq p_{н.с\min} \quad (4.11)$$

во всем заданном диапазоне температур.

4.4.3. Результаты вычислений

В соответствии с принятыми допущениями, ограничениями и заданными характеристиками агрегатов и систем гидрокомплекса в режиме СГО, указанными в перечне документов п. 4.4.1, проводим расчеты по каждому из каналов СГО во всем диапазоне допусков по параметрам систем, агрегатов и прокачных клапанов в соответствии с расчетными схемами каналов СГО, приведенными на рис. 4.1—4.4, при фиксированных значениях температур рабочей жидкости: $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$, с проведением обязательного проверочного расчета в контрольной точке $t = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$, с целью определения минимального давления на выходе насосной станции. Учитывая, что при вышеперечисленных исследованиях сделано очень большое количество вариантов расчетов, для наглядности предлагаемого метода расчета и алгоритма его практической реализации приведем три варианта расчетов по каждому из кана-

лов СГО в соответствии с исходными данными табл. 4.2—4.4. В верхних строках каждой из таблиц указаны названия агрегатов и систем по каждому из каналов СГО; Q_i — заданные расходы через соответствующие агрегаты и системы в л/мин; Δp — перепады давлений на соответствующих агрегатах и системах при заданных Q_i в кгс/см²; ГС1, ГС2, ГС3 — каналы гидросистем при работе гидрокомплекса в режиме СГО. В соответствии с ранее принятым тормозная система состоит из агрегатов с характеристиками:

Таблица 4.2

Вариант 1

P	PC3	PC1л	PC2л	PC4	PC1п	PC2п	ТСЛОС	ЦЗЛОС
Q	1,4	0,77	0,7	1,4	1,2	1,2	х)	1,5
P	12	12	12	12	12	12		2,14
Q	1,4	1,2	0 01	1,4	1,2	0,72	х)	1,5
P	12	12	12	12	12	12		2,14
Q	1,4	0,79	1,2	1,4	0 01	1,2	-	1,6/1
P	12	12	12	12	12	12		2/2,14
P	ЦВЛОС	ТСПОС	ЦЗПОС	ЦВПОС	ЦЗПС	ЦВПС	СУС	
Q	1	х)	1,5	1	1,5	1	1	ГС1
P	0,5		2,14	1,5	2,14	1,5	1,5	
Q	-	х)	1,5	-				ГС2
P	-		2,14	-				
Q	-	-	1,6/1	-				ГС3
P	-		2/2,14	-				

Вариант 2

P	PC3	PC1л	PC2л	PC4	PC1п	PC2п	ТСЛОС	ЦЗЛОС
Q	0 02	0 01	1,4	0 02	0,8	1,5	х)	1,5
P	12	12	12	12	12	12		2,14
Q	0 02	1,74	0 01	1,9	1,2	0,45	х)	-
P	12	12	12	12	12	12		-
Q	1,8	0,5	1,35	0 02	1,2	0,75	-	1,6/1
P	12	12	12	12	12	12	-	2/2,14
P	ЦВЛОС	ТСПОС	ЦЗПОС	ЦВПОС	ЦЗПС	ЦВПС	СУС	
Q	1	х)	1,5	1	1,5	1	1	ГС1
P	0,5		2,14	0,5	2,14	0,5	1,5	
Q	1,5	х)	1,5	-	-	-	-	ГС2
P	2		2	-	-	-	-	
Q	-	-	1,6/1	-	-	-	-	ГС3
P	-	-	2/2,14	-	-	-	-	

УГ158: $Q = 10,7$ л/мин $\Delta p = 10$ кгс/см²,

УГ164: $Q = 2,52$ л/мин $\Delta p = 10$ кгс/см²,

Тормоз: $Q = 1$ л/мин $\Delta p = 1,5$ кгс/см²,

которые идентичны для всех трех каналов гидрокомплекса ОК «Буран» при работе в режиме СГО (т.е. во время орбитального полета по поддержанию работоспособности гидрокомплекса за счет гидрообогрева).

Вариант 3

P	PC3	PC1л	PC2л	PC4	PC1п	PC2п	ТС ЛОС		
Q	1±0,2	1,2±0,2	1,2±0,2	1,4±0,2	1,2±0,2	1,2±0,2	х)		
P	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5			
Q	2±0,2	1,2±0,2	1,2±0,2	2,25±0,2	1,2±0,2	1,2±0,2	х)		
P	12,5±0,2	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5			
Q	3±03	1,8±0,2	1,2±0,2	1,2±0,2	1,2±0,2	1,2±0,2	-		
P	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5	-		
P	ЦЗ ЛОС	ЦВ ЛОС	ТС ПОС	ЦЗ ПОС	ЦВ ПОС	ЦЗ ПС	ЦВ ПС	СУС	-
Q	1,5	1	х)	1,5	1	1,5	1	1	ГС1
P	2,14	0,5		2,14	0,5	0 02	0,5	1,5	
Q	1,5	-	х)	1,5	-	-	-	-	ГС2
P	2	-		2	-	-	-	-	
Q	1,6/1	-	-	1,6/1	-	-	-	-	ГС3
P	2/2,14	-		2/2,14	-	-	-	-	

4.4.4. Результаты исследований по варианту 2 (табл. 4.3)

Расчет проведен по каждому из трех каналов гидрокомплекса при его работе в режиме СГО в соответствии с исходными данными табл. 4.3, а также с учетом допусков на прокачные клапаны с характеристиками — $Q = 1 \pm 0,15$ л/мин, $\Delta p = 8$ кгс/см² при раз-

личных значениях температур рабочей жидкости и перепадах давлений на насосной станции в соответствии с заданными допусками.

Результаты вычислений по ГС1 представлены в табл. 4.5. В верхней строке таблицы показано, что расчет проводился во всем диапазоне допусков на прокачные клапаны (min, nom и max); вторая строка содержит фиксированные значения температур, при которых проводится расчет; третья строка показывает полученные в результате расчетов значения расходов; остальные строки содержат значения перепадов давлений на насосной станции первого канала гидросистемы в режиме СГО при исходных начальных значениях перепада давлений на насосной станции во всем диапазоне допусков (см. рис. 4.9).

Для второго канала ГС2 в режиме СГО показан вариант расчета, проведенного с целью оценки подобранных характеристик рулевых систем РС3 и РС4 на работу насосной станции. В табл. 4.6 представлены два варианта проверочных расчетов при следующих значениях подобранных характеристик рулевых систем РС3 и РС4:

1. $Q_{PC3} = 2,36$ л/мин $Q_{PC4} = 2,33$ л/мин
2. $Q_{PC3} = 2,56$ л/мин $Q_{PC4} = 2,53$ л/мин

$$\text{при } \Delta p = 12 \text{ кгс/см}^2$$

и следующих характеристиках прокачных клапанов:

$$Q_{пр} = 1,5 \pm 0,225 \text{ л/мин и } \Delta p = 9 \text{ кгс/см}^2.$$

Расчет проведен с учетом допусков на прокачные клапаны и перепадов давлений на насосной станции при различных температурах рабочей жидкости.

Для третьего канала ГС3 в режиме СГО показан вариант расчета по подбору необходимых расходов по рулевым системам РС3 и РС4, обеспечивающих заданный тепловой режим СГО, либо по выбору необходимых характеристик прокачных клапанов. Результаты вычислений по данному варианту приведены в табл. 4.7. В первых трех строках (по $\Delta p_{нс}$) таблицы показаны перепады давлений на насосной станции при подборе прокачных характеристик

Вариант 1 (ГЦ)

Кгп	min			nom			max			кк _г /см ³
t °C	-10	+10	+25/50	-10	+10	+25/50	-10	+10	+25/50	12
Q	13,55	13,48	12,9	13,5	13,5	12,9	13,5	13		
Ph	13,75	10	8,25/5,25	13	9,25	7,5/4,62	12,25	8,5	7/4,37	

P = 12,5

Ph	14	10,25	8,5/5,25	13	9,5	7,62/4,75	12,25	8,75	7/4,5	12,5
----	----	-------	----------	----	-----	-----------	-------	------	-------	------

P = 13

Ph	14	10,5	8,5/5,37	13,25	9,5	7,75/4,87	12,5	8,75	7,25/4,62	13
----	----	------	----------	-------	-----	-----------	------	------	-----------	----

Diagram 2 (FC2)

QPC3 = 2,36 g/min, QPC4 = 2,33 g/min, P = 12 atm/cm ²										
Kap	min			nom			max			P (T3)
t °C	-10	+10	+25/50	-10	+10	+25/50	-10	+10	+25/50	
Q	13,5	13,5	12,9/11,5	13,31	13,32	12,93/1,5	13,5	13,5	12,9/11,5	
P _u	16	11,75	9,5/5,87	15,37	11,2	8,87/5,5	14,87	10,62	8,37/5,19	12
P _m	16,25	12	9,75/6	15,75	11,37	9,12/5,62	15,25	10,79	8,62/5,31	12,5
P _h	16,75	12,25	10/6,19	16	11,62	9,25/5,75	15,5	11	8,75/5,44	13

QPC3 = 2,36 g/min, QPC4 = 2,33 g/min, P = 12 atm/cm²

P _u	15,5	11,25	9/5,62	14,75	10,62	8,5/5,25	14,37	10,12	8/5	12
P _m	15,75	11,5	9,25/5,37	15,12	10,87	8,62/5,67	14,75	10,37	8,25/5,06	12,5
P _h	16	11,75	9,5/5,87	15,5	11,12	8,87/5,5	15	10,62	8,37/5,19	13

Вариант 3 (ТС3)

Клп	min			nom			max			P (ТС)
t °C	-	+10	+25/50	-	+10	+25/50	-	+10	+25/50	
Qн	13,48	13,45	12,9	13,5	13,45	12,9	13,53	13,53	12,94	12
Pн	25,5	19,5	16	24	18,25	15	23	17,25	14	
Pн	26,25	20,25	16,5	24,75	18,25	15,37	23,5	17,75	14,37	12,5
Pн	27	20,75	17	25,25	18,25	15,75	24	18	14,75	

QPC3=4,7 л/мин, QPC4=4,3 л/мин, P=12 кгс/см²; либо КПП Q=4 л/мин, P=9 кгс/см²

Pн	15	10,87	8,37	15,37	11,12	8,62	15,75	11,25	8,75	12,5
----	----	-------	------	-------	-------	------	-------	-------	------	------

рулевых систем РС3 и РС4 либо характеристик прокачных клапанов. Последняя строка содержит результаты проверочного расчета при подобранных характеристиках рулевых систем РС3 и РС4 либо подобранных характеристиках прокачных клапанов.

4.4.5. Результаты исследований по варианту 1 (табл. 4.2)

Для варианта I расчет проведен также с целью определения влияния характеристик рулевых систем РС3, РС4 либо характеристик новых прокачных клапанов на работу насосной станции. Результаты вычислений по каждому из каналов гидросистем в режиме СГО сведены в таблицы, содержащие исходные данные по различным характеристикам новых прокачных клапанов в виде расходов при заданном перепаде давлений и фиксированных значениях температур рабочей жидкости и результаты расчетов по подбору требуемых характеристик РС3, РС4 либо прокачных клапанов.

Результаты вычислений по ГС1 представлены в табл. 4.8. Исходные характеристики клапанов представлены в первой строке таблицы.

Для второго канала ГС2 в режиме СГО приведены результаты теоретических исследований по подбору требуемых расходов в режиме СГО на рулевых системах РС3, РС4 либо требуемых характеристик прокачных клапанов. Критерием достаточности данного подхода служит выполнение условия (4.1). Результаты вычислений по ГС2 сведены в табл. 4.9, где в первой строке содержатся исходные данные по характеристикам прокачных клапанов, а крайний правый столбец содержит перепады давлений на насосной станции с учетом допусков.

Следует отметить, что результаты расчета по подбору необходимых расходов в режиме СГО на рулевых системах РС3 и РС4 аналогичны полученным по ГС1 и составляют:

$$Q_{PC3} = 2 \text{ л/мин}, Q_{PC4} = 2,25 \text{ л/мин при } \Delta p = 12 \text{ кгс/см}^2.$$

$t = -10^\circ \text{C}$, K_{np} : $Q = 2,45 \pm 0,225 \text{ л/мин при } \Delta p = 9 \text{ кгс/см}^2$, где K_{np} — прокачные клапаны.

ГЦ1

Клр	Q=0,45 л/мин P=10 кгс/см ²			Q=0,5 л/мин P=10 кгс/см ²			Q=0,575 л/мин P=10 кгс/см ²			P (Т3)
t °C	-	+10	+25/50	-	+10	+25/50	-	+10	+25/50	
P _н	20,5	16,5	14/9	19	15	12,5/8	17,5	14	11,5/7,25	12
P _н	21	17	14/9	19,5	15,5	13/8,25	18	14,25	11,75/7,5	12,5
P _н	21,5	17,5	14,5/9,25	19,75	15,75	13/8,5	18,5	14,5	12/7,62	13

Таблица 4.9

ГЦ2

Клр	Q=2,225 л/мин P=9 кгс/см ²			Q=2,45 л/мин P=9 кгс/см ²			Q=2,675 л/мин P=9 кгс/см ²			P (Т3)
t °C	-	+10	+25/50	-	+10	+25/50	-	+10	+25/50	
P _н	16,37	11,5	9/5,5	16,12	11,12	8,75/5,37	16	10,87	8,5/5,19	12
P _н	16,75	11,62	9,25/5,62	16,5	11,37	8,87/5,44	16,25	11,12	8,62/5,25	12,5
P _н	17	11,87	9,37/5,75	16,75	11,5	9,12/5,56	16,5	11,25	8,87/5,37	13

ГЦ3

Клп	Q=1,75 л/мин P = 9 кгс/см ²			Q=2,25 л/мин P = 9 кгс/см ²			Q=2,5 л/мин P = 9 кгс/см ²			P (Т3)
°C	-	+10	+25/50	-	+10	+25/50	-	+10	+25/50	
P _н	16,5	12,37	10/6,25	15,5	11,37	9/5,75	15	10,87	8,62/5,5	12
P _н	16,87	12,75	10,25/6,5	15,75	11,37	9,25/5,87	15,37	11,12	8,87/5,62	12,5
P _н	17,25	13,12	10,5/6,62	16,12	11,5	9,5/6	15,75	11,5	9,12/5,75	13
QPC3 = 4,5 л/мин, QPC4 = 2,75 л/мин, P = 12 кгс/см ² КЛП 862500 - 02										
P _н	14,87	11,37	9/5,62	14,5	10,87	9/5,75	15	10,87	8,62/5,5	12
P _н	15,25	11,62	9,25/5,75	14,75	11,12	9,25/5,87	15,37	11,12	8,87/5,62	12,5
P _н	15,5	11,75	9,37/5,94	15,12	11,5	9,5/6	15,75	11,9	9,12/5,75	13

Для третьего канала ГС3 в режиме СГО сами вычисления аналогичны предыдущим, исходные данные соответствуют табл. 4.4, начальные исходные данные по прокачным клапанам приведены в первой строке табл. 4.10, куда сведены также результаты вычислений.

В ходе проведенных исследований подобраны необходимые характеристики рулевых систем РС3 и РС4 в режиме СГО с характеристиками клапанов прокачки, представленными в первой строке табл. 4.10.

Вторая часть таблицы содержит результаты проверочного расчета на соблюдение условия (4.1) при выбранных ранее характеристиках $K_{пр}$, РС3 и РС4.

4.4.6. Результаты исследований по варианту 3 (табл. 4.4)

Исходными данными для варианта 3 настоящих теоретических исследований приняты данные, представленные в табл. 4.4. Расчеты проведены для каждого из каналов гидросистем при их работе в режиме СГО с учетом допусков на характеристики рулевых систем и прокачных клапанов при фиксированных значениях температур рабочей жидкости. Результаты исследований по ГС1 в режиме СГО представлены в табл. 4.11, где в первой строке приведены исходные начальные данные, во второй — характеристики прокачных клапанов с учетом допусков. Вторая часть таблицы представляет собой проверочный расчет по результатам исследований верхней части настоящей таблицы.

Анализ результатов вычислений, приведенных в табл. 4.11, позволяет отметить, что для исходных данных, соответствующих максимальным характеристикам по ТЗ на рулевые системы в режиме СГО, т.е. изготовленным по максимальным допускам при номинальных характеристиках прокачных клапанов, входящих в каналы гидросистем, гидрокомплекс работоспособен в диапазоне температур рабочей жидкости от -10 до $+10$ °С.

Результаты исследований ГС2 и ГС3 с исходными данными, приведенными в табл. 4.4, во всем диапазоне принятых допусков и температур с характеристиками прокачных клапанов $Q = 2,45 \pm 0,225$ л/мин при $\Delta p = 9$ кгс/см² приведены в табл. 4.12—4.13.

ТС1

Клр 862500 - 01 Т3 РС1:4 по расходу $Q = 1 + 0,15$ л/мин $P = 8$ кгс/см ²										
Клр	min			nom			max			P (Т3)
t C	-	+10	+25/50	-	+10	+25/50	-	+10	+25/50	
P _н	17,5	13	11/7	16,25	12	9,75/6,12	15	10,25	8,87/5,25	12
P _н	17,75	13,5	11/7	16,5	12,25	10/6,25	15,25	11	9/5,25	12,5
P _н	18	13,5	11,25/7,25	16,5	12,5	10/6,25	15,5	11	9,25/5,25	13
$Q = 1,15$ л/мин $P = 8$ кгс/см² Пробирь-тапков $Q = 1,225$ л/мин $P = 8$ кгс/см² $Q = 1,3$ л/мин $P = 8$ кгс/см²										
P _н	15,5	11,5	9,5/6	14,75	10,75	8,75/5,37	14	10,25	8/5,25	12
P _н	15,75	11,5	9,5/6	15	10,75	8,75/5,5	14,25	10,25	8/5,25	12,5
P _н	16	11,75	9,75/6,25	15	11	9/5,5	14,5	10,5	8,25/5,25	13

FC2

1.01 Knp 862500 - 02 T3 min FC2

$P_{\text{н}}$	18,75	14	11,37/7,12	18	13,12	10,5/6,5	17,25	12,5	10/6,12	$P = 12$
$P_{\text{н}}$	19,25	14,37	11,62/7,25	18,25	13,5	10,75/6,69	17,62	12,75	10,12/6,25	$P = 12,5$
$P_{\text{н}}$	19,5	14,75	11,87/7,37	18,62	13,75	11/6,87	18	13	10,37/6,37	$P = 13$

1.01 Knp 862500 - 02 T3 nom FC2

$P_{\text{н}}$	16,12	12	9,62/6	15,5	11,25	9/5,56	15	10,75	8,5/5,25	$P = 12$
$P_{\text{н}}$	16,5	12,25	9,87/6,12	15,75	11,5	9,25/5,69	15,25	11	8,75/5,37	$P = 12,5$
$P_{\text{н}}$	16,75	12,5	10,12/6,25	16,12	11,75	9,37/5,87	15,5	11,12	8,87/5,5	$P = 13$

1.01 Knp 862500 - 02 T3 max FC2

$P_{\text{н}}$	14,12	10,25	8,25/5,12	13,62	9,75	7,75/4,81	13,25	9,37	7,37/4,56	$P = 12$
$P_{\text{н}}$	14,5	10,5	8,5/5,25	13,87	10	8/4,94	13,5	9,5	7,62/4,69	$P = 12,5$
$P_{\text{н}}$	14,75	10,75	8,62/5,37	14,12	10,25	8,12/5,06	13,75	9,75	7,75/4,75	$P = 13$

TC3

T3 min P = 12									
Pm	21,5	17,12	14	20,5	16	13	19,5	15,25	12,25
Pm	22	17,75	14,37	21	16,5	13,5	20	15,5	12,62
P = 13									
Pm	22,5	18,25	14,75	21,5	18	13,75	20,5	16	13
T3 nom P = 12									
Pm	18,12	14	11,25	17,37	13,25	10,62	16,75	12,62	10,12
P = 12,5									
Pm	18,5	14,37	11,62	17,75	13,62	11	17,12	13	10,37
P = 13									
Pm	19	14,75	12	18,25	14	11,25	17,5	13,25	10,75
T3 max P = 12									
Pm	15,75	11,62	9,37	15,12	11,12	8,87	14,75	10,62	8,5
P = 12,5									
Pm	16	12	9,62	15,5	11,5	9,12	15	11	8,75
P = 13									
Pm	16,5	12,37	10	15,87	11,75	9,5	15,37	11,25	9

Наличие в табл. 4.11 трех строк со значениями по p_n означает, что расчет проведен с учетом допусков на характеристики насосной станции СГО, т. е. min, nom, max (сверху — вниз) по давлению. Нижняя часть таблицы содержит результаты вычислений по подбору трех видов прокачных клапанов с характеристиками, приведенными вверх данной таблицы.

Табл. 4.12 построена по несколько иному принципу. Здесь в качестве примера приведены результаты вычислений с учетом допусков на характеристики рулевых систем в режиме СГО и обозначения min, nom и max относятся уже к рулевым системам РС1—РС4. Все остальное идентично данным табл. 4.11.

Табл. 4.13 аналогична табл. 4.12 и отличается лишь тем, что здесь приведены результаты вычислений для номинальных значений характеристик прокачных клапанов, входящих в ГСЗ СГО: $Q = 2,45$ л/мин, $\Delta p = 9$ кгс/см².

4.5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим более подробно результаты проведенных теоретических исследований по исходным данным, приведенным в табл. 4.2—4.4 по каждому из каналов гидросистем в режиме СГО.

Вариант 1 — исходные данные в табл. 4.2. Вычисления проведены по каждой из трех гидросистем, результаты которых содержатся в табл. 4.8, 4.9 и 4.10 соответственно.

В табл. 4.8 приведены результаты вычислений давлений на насосной станции при различных фиксированных значениях температуры рабочей жидкости с прокачными клапанами, обладающими характеристиками:

$$Q = 0,5 \pm 0,075 \text{ л/мин} \quad \Delta p = 10 \text{ кгс/см}^2.$$

Сравнивая исходные данные табл. 4.2, можно видеть, что с такими прокачными клапанами на основном расчетном варианте по температуре рабочей жидкости система не работоспособна, т. е. условие (4.1) соблюдено быть не может.

Табл. 4.9 содержит результаты вычислений по ГС2 с прокачными клапанами с характеристиками: $Q = 2,45 \pm 0,225$ л/мин,

$\Delta p = 9 \text{ кгс/см}^2$, а также результаты вычислений по выбору расходов в режиме СГО на рулевых системах РС3 и РС4, при которых условие (4.1) соблюдается: $Q_{\text{РС3}} = 2 \text{ л/мин}$, $Q_{\text{РС4}} = 2,25 \text{ л/мин}$ при $\Delta p_n = 12 \text{ кгс/см}^2$. Как видно из таблицы, даже если брать верхний предел допуска по ТЗ на РС, давление на насосной станции вполне удовлетворяет условию (4.1), т.е. система работоспособна при выбранных расходах, указанных выше, сданными прокачными клапанами.

По ГС3 (см. табл. 4.10) результаты вычислений по подбору необходимых расходов аналогичны приведенным в табл. 4.9, однако даже при незначительном уменьшении расхода на прокачных клапанах требуется подбор расходов по РС3 и РС4: $Q_{\text{РС3}} = 4,5 \text{ л/мин}$, $Q_{\text{РС4}} = 2,73 \text{ л/мин}$ при $\Delta p_n = 12 \text{ кгс/см}^2$.

Вариант 2 — исходные данные в табл. 4.3. Вычисления проведены для каждой из систем СГО во всем поле допусков на прокачные клапаны с характеристиками: $Q = 1 \pm 0,15 \text{ л/мин}$, $\Delta p = 8 \text{ кгс/см}^2$.

Результаты расчетов по ГС1 приведены в табл. 4.5. (Здесь Q_n — расход насосной станции; p_n — перепад давлений на насосной станции; p — перепад давления на рулевых системах в режиме СГО.) Данные вычислений, приведенные в таблице, показывают, что ГС1 в режиме СГО работоспособна во всем поле допусков на прокачные клапаны и рулевые системы.

Для ГС2 расчет проведен в табл. 4.6 с целью оценки подобранных характеристик рулевых систем и прокачных клапанов с характеристиками:

$$Q_{\text{пр}} = 1,5 \pm 0,225 \text{ л/мин}, \quad p_{\text{пр}} = 9 \text{ кгс/см}^2,$$

$$Q_{\text{РС3}} = 2,36 \text{ л/мин}, \quad Q_{\text{РС4}} = 2,33 \text{ л/мин},$$

$$Q_{\text{РС3}} = 2,56 \text{ л/мин}, \quad Q_{\text{РС4}} = 2,53 \text{ л/мин}.$$

Табл. 4.6 содержит результаты двух проверочных расчетов по подобранным характеристикам рулевых систем в режиме СГО с учетом допусков на прокачные клапаны, рулевые системы (по давлению) во всем заданном диапазоне температур рабочей жидкости. Как видно из таблицы, разность в подобранных расходах

0,2 л/мин позволяет снизить давление на насосной станции в ГС2 всего на 0,5—0,6 кгс/см².

Для ГС3 результаты вычислений представлены в табл. 4.7. Здесь в первых трех строках по p_n приведены характеристики насосной станции с исходными данными табл. 4.3. Последняя строка содержит результаты проверочного расчета с подобранными характеристиками $Q_{PC3} = 4,7$ л/мин, $Q_{PC4} = 4,3$ л/мин при $\Delta p = 12$ кгс/см², либо прокачными клапанами с характеристиками $Q = 4$ л/мин, $\Delta p = 9$ кгс/см².

Здесь можно ясно увидеть, что с исходными данными, приведенными в табл. 4.3, система ГС3 в режиме СГО без конкретных доработок не работоспособна.

Вариант 3 — исходные данные в табл. 4.4. По данному варианту вычисления проведены также для каждого ГС в режиме СГО. Результаты проведенных исследований по ГС1 сведены в табл. 4.11. Верхняя часть таблицы содержит результаты вычислений с исходными данными табл. 4.4 и прокачными клапанами с характеристиками:

$$Q = 1 \pm 0,15 \text{ л/мин при } \Delta p = 8 \text{ кгс/см}^2.$$

Вычисления проведены во всем поле допусков на рулевые системы и при фиксированных значениях различных температур рабочей жидкости.

Нижняя часть табл. 4.11 содержит результаты проверочного расчета с измененными характеристиками прокачных клапанов.

Результаты вычислений показывают, что система ГС3 обладает наилучшими эксплуатационными характеристиками при изготовлении рулевых систем по максимальным допускам (по расходу в режиме СГО), а снижение давления на выходе насосной станции возможно путем индивидуального подбора реальных прокачных клапанов даже при изготовлении рулевых систем по минимальным допускам по расходу.

Результаты вычислений по ГС2 с прокачными клапанами, уже установленными в системе, во всем поле допусков на характеристики рулевых систем и прокачных клапанов при заданных, фиксированных значениях температур рабочей жидкости приведены в

табл. 4.12 и показывают работоспособность ГС2 в режиме СГО во всем рассмотренном поле допусков и температур рабочей жидкости.

Результаты вычислений по ГС3 в режиме СГО содержатся в табл. 4.13, которая несколько отлична от предыдущих таблиц. В каждой строке здесь представлен перепад давления на насосной станции с учетом допусков на рулевые системы по расходу и давлению, причем величина давления указана перед каждой строкой а min, пом, max соответствуют расходу по рулевым системам с учетом допусков.

Данные, приведенные в табл. 4.13, показывают, что гидросистема ГС3 в режиме СГО в настоящем, реальном виде может быть работоспособна только при изготовлении рулевых систем РС1 — РС4 по номинальным, а еще лучше — по максимальным допускам по расходу.

Выводы

Современные требования к эффективности промышленных разработок гидравлических систем управления летательных аппаратов диктуют необходимость развития новых, современных, экономически целесообразных методов проектирования и теоретических исследований систем с помощью современной вычислительной техники уже на ранних этапах разработки технических заданий на агрегаты и системы проектируемых изделий.

В настоящей главе изложены практическая реализация одной из вышеперечисленных разработок и анализ проведенных теоретических исследований на основе математических моделей и алгоритмов их реализации с помощью вычислительной техники по доводке и теоретическому эксперименту гидрокомплекса ОК «Буран» на участке орбитального полета. По результатам проведенных вычислений сделаны следующие выводы.

1. Изменение перепада давления на насосной станции по всем трем каналам ГС от температуры рабочей жидкости колеблется в пределах:

от -10 до $+10$ °C	$\Delta p = 3,5$ кгс/см ² ;
от $+10$ до $+25$ °C	$\Delta p = 1,5$ кгс/см ² ;
от -10 до $+50$ °C	$\Delta p = 10$ кгс/см ² .

2. Изменение перепада давления на насосной станции от допусков на реальные прокачные клапаны составляет $\Delta p = 1,5 \text{ кгс/см}^2$.

3. Максимальное изменение перепада давления на насосной станции в зависимости от допусков на параметры PC1 — PC4 в режиме СГО не более $\Delta p = 7 \text{ кгс/см}^2$.

4. По всем каналам гидросистем в режиме СГО и при соответствии режимов работы насосной станции требованиям ТЗ, при температуре рабочей жидкости $t = 35^\circ\text{C}$ перепад давления на насосной станции $\Delta p < 1,5 \text{ кгс/см}^2$, что приведет к отказу системы СГО по давлению.

5. Требования ТЗ на рулевые системы PC1 — PC4 в режиме СГО по параметрам прокачки рабочей жидкостью каналов клапана переключения гидропитания Б и В обеспечивают работоспособность GC2 и GC3 в режиме прокачки только в случае изготовления PC1 — PC4 по максимальным допускам по расходу.

6. Разработанные в настоящей главе математические модели и методы их практической реализации с помощью современной вычислительной техники позволяют проводить теоретические исследования и численный эксперимент гидрокомплекса в режиме СГО с учетом поля допусков на входящие в гидрокомплекс агрегаты и системы, а также с учетом их реальных характеристик.

7. Объем проведенных теоретических исследований позволяет сделать вывод о достаточности информации для определения влияния основных характеристик и систем гидрокомплекса ОК «Буран» в режиме гидрообогрева на участке орбитального полета.

Таким образом, разработанная совокупность математических моделей, методов исследований, проектирования, синтеза и анализа систем гидрокомплекса в режиме орбитального полета ОК «Буран», а также алгоритмов и программ их конкретной реализации с помощью современной вычислительной техники образует единый научно-исследовательский комплекс. Внедрение этого комплекса в практику инженерного проектирования позволит оптимальным образом выбирать характеристики агрегатов и систем в режиме гидрообогрева вновь проектируемых космических аппаратов (например, любых транспортных гидросистем, где быстродей-

ствие их работы не является определяющим) уже на ранних этапах проектирования, а также проводить анализ и исследования влияния характеристик различных агрегатов на параметры проектируемой системы в целом.

Вышеперечисленные исследования послужат значительному снижению материальных затрат на проведение натурных испытаний и, следовательно, сокращению объема испытаний и сроков проектирования.

В результате проведенных теоретических исследований выявлена возможность оценки основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО на критических и аварийных режимах работы насосной станции. Кроме того, результаты проведенных вычислений позволяют сделать заключение о большом влиянии температуры рабочей жидкости на работу систем СГО.

Ограниченность области допустимых значений рабочих параметров насосных станций систем СГО, значительное влияние температурного диапазона рабочей жидкости и конструктивных допусков на агрегаты и системы гидрокомплекса в режиме СГО при работе на границе области допустимых значений требуют доработки математических моделей по учету распределения температуры рабочей жидкости по длине гидролиний и теплоотдачи в гидробаках.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА СИСТЕМ
И АГРЕГАТОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА
ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ «БУРАН»**

**5.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ОТРАБОТКИ**

Успешный полет и автоматическая посадка орбитального корабля «Буран» могли быть обеспечены только при условии длительных и тщательных экспериментальных наземных отработочных испытаний уже на ранних этапах проектирования.

Длительный процесс создания «Бурана» практически завершили отработочные (автономные и комплексные) испытания, в результате которых была подтверждена правильность технических решений и соответствие характеристик агрегатов и систем гидрокомплекса ОК «Буран» требованиям ТТЗ.

К основным задачам экспериментальной отработки можно отнести:

- отработку работоспособности и подтверждение ТЗ на агрегаты и системы гидрокомплекса, проверку их совместного функционирования в условиях полета, максимально приближенных к экстремальным, на специально для этого созданных комплексных стендах;
- отработку конструкторской, эксплуатационной и технологической документации;
- проведение различных исследовательских и научных испытаний с целью создания новых испытательных установок и стендов, позволяющих определять работоспособность гидрокомплекса в составе ОК «Буран» при различных отказах, и, на основании проведенных исследований (при положительных результатах), выда-

вать заключение о готовности к полету либо на доработку систем гидрокомплекса с последующим подтверждением эффективности проведенных доработок после повторных испытаний на комплексных стендах (см. гл. 3 и 4);

— научно-исследовательские испытания (отработка математических моделей агрегатов и систем гидрокомплекса с целью замены дорогостоящих экспериментальных исследований методами численного эксперимента (см. гл. 2—4).

Необходимость проведения экспериментальной отработки агрегатов и систем гидрокомплекса, а также гидрокомплекса в целом в составе ОК «Буран» на различных этапах его создания потребовала решения многих принципиальных вопросов по этапности испытаний, их виду, выработке различных критериев достаточности данного вида испытаний и необходимости перехода к следующим, определению видов испытаний и создания новой экспериментальной базы.

Для успешного решения данных вопросов [14], [19] была создана комплексная программа экспериментальной отработки (КПЭО), определяющая объем, порядок и организацию проведения испытаний, перечень и состав объектов испытаний, задачи, цели, виды испытаний, их состав и охватывающая все этапы создания ОК «Буран» в целом и гидрокомплекса — в частности.

Входящая в состав КПЭО программа экспериментальной отработки гидрокомплекса включает в себя:

- автономные испытания систем и агрегатов (АИ),
- комплексные испытания (КИ),
- межведомственные испытания (МИ).

На всех этапах экспериментальной отработки ОК «Буран» и его многочисленных систем и агрегатов было задействовано 370 различных стендов и установок, из них 248 ранее существовавших и доработанных [19] и 122 созданных вновь, из которых 64 — для испытаний объектов, разработанных в НПО «Молния», и 58 — для агрегатов и систем, разработанных смежными предприятиями.

Кроме того, было изготовлено шесть полноразмерных макетов [14], на которых проводились различные виды испытаний:

- ОК-М — для частотных испытаний;
- ОК-ГЛИ — для горизонтальных испытаний;

ОК-МТ — для отработки и макетирования;

ОК-ТВА — для тепло-вибропрочностных и акустических испытаний;

ОК-КС — для комплексных электрических испытаний и тепловакуумных испытаний (ОК-ТВИ).

Учитывая, что на ОК «Буран» установлено более 50 различных систем, имеющих свои принципы функционирования и режимы работы, для стыковки всех этих систем, их регулировки и настройки, а также проверки их взаимодействия были созданы:

- полноразмерный уникальный стенд оборудования (ПРСО), позволяющий в реальном масштабе времени отрабатывать этапы спуска, захода на посадку и посадку на ВПП ОК, а также имитировать работу пилотажно-навигационных систем, движение центра масс и вокруг него; оценивать характеристики устойчивости и управляемости ОК с учетом имитации шарнирных моментов (реализуемых с помощью системы загрузки стенда ПРСО), действующих на рулевые поверхности;
- пилотажно-динамический стенд-тренажер (ПДСТ).

Следует особо отметить, что на ПРСО в строгом топологическом соответствии установлены все бортовые системы, механизмы, агрегаты, электрические кабели и трубопроводы, примененные на ОК «Буран» (штатный гидрокомплекс, установленный на ОК «Буран», например, отличается от гидрокомплекса, установленного на стенде ПРСО, по длине питающих магистралей на величину, не превышающую 5 см).

На ПРСО собраны воедино реальная аппаратура, математическое обеспечение, программы и алгоритмы управления движением и контроля всех систем ОК. Наличие такого стенда позволило провести не только комплексные испытания систем гидрокомплекса при функционировании их в режиме реального времени с реальной системой управления и контроля, но и проверку всех доработок, проведенных по выявленным отступлениям от требований ТТЗ при громадном числе различных математических экспериментов, на моделях, отлаженных по испытаниям на том же ПРСО и КСШ. Кроме того, при тренировках пилотов на различные экстремальные ситуации, имитация которых на ОК-ГЛИ невозможна из-за риска катастрофы, стенд ПРСО позволяет оценить парамет-

ры устойчивости и управляемости ОК с учетом реальных характеристик гидрокомплекса и, при необходимости, провести нужные доработки как материальной части, так и математического обеспечения (см. гл. 3).

Все вышеперечисленные системы через различные системы датчиков и адаптеров подсоединены к вычислительной технике. Только для того, чтобы разместить стенды ПРСО и ПДСТ, вычислительную технику для них, а также создать нормальные условия для функционирования, был построен специальный стендовый корпус с площадью стендового зала 12000 м² и рядом с ним многоэтажное здание, на четырех этажах которого разместились вычислительная техника и обслуживающий персонал [14, 19].

Пилотажно-динамический стенд-тренажер ПДСТ предназначен для:

- 1) проведения исследовательских работ по созданию, отработке, анализу и на основе его — оптимизации алгоритмов управления;
- 2) подготовки, обучения и тренировок экипажей ОК с целью приобретения навыков пилотирования и отработки методик выхода из нештатных ситуаций при различных отказах систем ОК.

ПДСТ включает в себя кабину моделируемого изделия, системы подвижности, питания, визуализации, контроля и вычислительной техники. Система подвижности представляет собой подвижный стенд, имеющий шесть степеней свободы, состоящий из подвижной платформы с закрепленной на ней кабиной ОК «Буран». Перемещения платформы с кабиной в пространстве осуществляются при помощи шести длинноходовых гидроцилиндров, управляемых гидравлическими агрегатами управления — гидроусилителями АУ-38 типа «сопло-заслонка». Питание гидросистемы подвижности производится системой питания, состоящей из блока насосов переменной подачи, блока пневмогидроаккумуляторов, различной регулирующей и контрольной аппаратуры. Выходные параметры гидросистемы питания полностью определяют все возможные и необходимые законы движения платформы системы подвижности с закрепленной на ней кабиной ОК.

В целом ПДСТ построен по тем же принципам полунатурного моделирования, что и ПРСО [19], однако «натура» на нем представ-

лена только в виде реальной кабины ОК с полным штатным размещением приборов управления и контроля, т.е. с тем, чем осуществляется управление ОК экипажем.

Перед остеклением кабины установлена система визуализации, которая предоставляет экипажу при тренировках изображение горизонта, земной поверхности и облачности с ВПП, соответствующие реальной высоте полета.

После получения положительного заключения по результатам испытаний на ПРСО и полетов на ПДСТ проводились горизонтальные летные испытания на ОК-ГЛИ, который по конструкции, системам и оборудованию, используемому на спуске и посадке на ВПП, полностью аналогичен ОК «Буран».

Для обеспечения взлета и проведения полетов в соответствии с полетным заданием на ОК-ГЛИ установлены четыре воздушно-реактивных двигателя. Основными задачами горизонтальных летных испытаний были следующие:

- отработка пилотируемой и автоматической посадок;
- отработка задействованного при этом математического обеспечения и алгоритмов;
- подтверждение летно-технических характеристик, параметров устойчивости и управляемости;
- отработка работоспособности систем и агрегатов, обеспечивающих полет и посадку, и уточнение нагрузок на исполнительные приводы при посадке.

Горизонтальные летные испытания летающего аналога ОК «Буран» ОК-ГЛИ представляют собой заводские контрольные испытания, проводимые с целью подтверждения результатов лабораторных исследований, отработок на специальных стендах (ПРСО и ПДСТ) и «летающих лабораториях», а также подтверждения результатов математического моделирования бортовых систем и планера в целом.

Учитывая громадный объем проведенных испытаний, их сложность и длительность, авторы решили привести в книге данные испытаний лишь наиболее важных агрегатов гидрокомплекса, обеспечивающих решение задач спуска и посадки ОК «Буран».

Рассмотрим здесь автономные испытания пневмогидроаккумуляторов баков и пневмогидроаккумуляторов основных гидросистем гидрокомплекса.

Испытания проводились в соответствии с комплексной программой экспериментальной отработки (КПЭО) на НПО «Молния», в специально созданных для этого лабораториях и на стендах.

5.2. АВТОНОМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АГРЕГАТОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА

Идея испытаний систем и агрегатов ОК «Буран» на основе комплексной программы экспериментальной отработки в том, что основной объем отработки вновь разрабатываемых систем и элементов гидрокомплекса, а также существующих и дорабатываемых агрегатов, для которых менялись условия эксплуатации, по подтверждению заданных требований, должен быть получен при автономных испытаниях.

Рассмотрим некоторые материалы по объему, составу и методам проведения автономных испытаний агрегатов гидрокомплекса, изготовленных и испытанных на НПО «Молния», а именно пневмогидроаккумуляторов гидравлических баков и пневмогидроаккумуляторов гидросистем.

5.2.1. Объем и последовательность проведения автономных испытаний пневмогидроаккумуляторов баков и гидросистем

Испытания проведены по разработанным на основе КПЭО программам автономных испытаний на функционирование и ресурс пневмогидроаккумуляторов в обеспечение натурного применения в составе ОК «Буран».

Задача испытаний — подтверждение работоспособности и ресурса пневмогидроаккумуляторов в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным в составе гидрокомплекса ОК «Буран».

Различным видам испытаниям подверглись шесть пневмогидроаккумуляторов, изготовленных по соответствующей конструкторской документации с отметкой в паспортах о приемке ОТК, ПЗ и с заключением о допуске к испытаниям при наличии акта соответствия представленных агрегатов агрегатам, установленным на ОК «Буран».

Принципиальная конструктивная схема пневмогидроаккумулятора представлена на рис. 5.1.

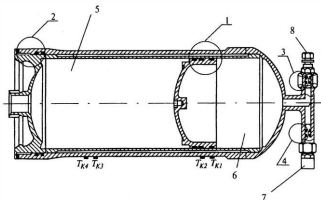


Рис. 5.1. Принципиальная конструктивная схема пневмогидроаккумулятора:

1, 2, 3, 4 — узлы, подлежащие проверке на герметичность; $T_{K1} \dots T_{K2}$ — датчики температуры; 5 — жидкостная полость; 6 — газовая полость; 7 — датчик давления; 8 — зарядный клапан

Испытания гидропневмоаккумуляторов проводились в четыре этапа.

1 этап. Подтверждение работоспособности, ресурса, ТЗ, требований конструкторской документации и ее достаточности для обеспечения первого натурного применения ОК «Буран» (испытаниям подвергались агрегаты № 1, 2, 3).

2 этап. Подтверждение ресурса для второго натурного применения ОК «Буран» (испытаниям подвергались агрегаты № 1, 2, 3).

3 этап. Подтверждение ресурса на три натурных применения ОК «Буран» (испытаниям подвергались агрегаты № 4, 5, 6).

4 этап. Подтверждение ресурса на четыре натурных применения ОК «Буран» (испытаниям подверглись агрегаты № 1, 2, 3, 4, 5, 6).

Приведем последовательность испытаний для первого этапа и далее остановимся на отличии первого этапа от остальных трех.

1. Осмотр.
2. Термостарение.
3. Опрессовка.
4. Испытания на герметичность при нормальном давлении рабочей жидкости в диапазоне эксплуатационных температур.
5. Испытания на функционирование в диапазоне эксплуатационных температур.
6. Испытания на герметичность при пониженном давлении в диапазоне эксплуатационных температур.
7. Осмотр.
8. Испытания на ударную прочность — 20%.
9. Осмотр.
10. Испытания на вибропрочность.
11. Осмотр.
12. Испытания на виброресурс — 20%.
13. Осмотр.
14. Опрессовка.
15. Температурные испытания при нормальном давлении — 1 цикл.
16. Вакуумно-температурные испытания — 25 часов.
17. Ресурсные испытания:
 - 1) зарядка — разрядка от 0 до 120 кгс/см² и от 120 кгс/см² до 0 — циклов,
 - 2) пульсирующим давлением:
 - от 20 до 230 и от 230 до 20 кгс/см² — 309 циклов,
 - от 190 до 315 и от 315 до 190 кгс/см² — 3090 циклов,
 - от 190 до 210 и от 210 до 190 кгс/см² — 11330 циклов,
 - от 160 до 210 и от 210 до 160 кгс/см² — 515 циклов.
18. Испытания на герметичность при нормальном давлении в диапазоне эксплуатационных температур.

19. Испытания на функционирование в диапазоне эксплуатационных температур.

20. Испытания на герметичность при пониженном давлении в диапазоне эксплуатационных температур.

Второй этап отличается от первого этапа только объемом некоторых видов испытаний:

- температурные испытания (п.15 первого этапа) проводятся уже в объеме 7 циклов, включая 24-часовую выдержку при температуре 90 °С на каждом цикле,
- вакуумно-температурные испытания — 35 суток вместо 25 часов на первом этапе (п.16 перечня первого этапа),
- ресурсные испытания (п.17 испытаний первого этапа сверху вниз по порядку:
- 78 циклов вместо 27 циклов по первому этапу,
- 810 циклов вместо 309 циклов по первому этапу,
- 8100 циклов вместо 3090 циклов по первому этапу,
- 29700 циклов вместо 11330 циклов,
- 1350 циклов вместо 515 циклов.

Следует отметить, что испытания по пп. 2—14 (включительно) перечня видов испытаний для первого этапа для второго этапа не проводились — на основании соответствующей программы испытаний.

Третий этап идентичен полностью перечню-испытаний первого этапа и отличается от первого этапа только по объему, изложенному в пп. 15—17 включительно, т.е:

- по п.15 — 8 циклов вместо 1 цикла испытаний по первому этапу и 7 циклов по второму,
- по п. 16 — 35 суток, как для испытаний по второму этапу,
- по п. 17 (сверху — вниз),
- 105 циклов вместо 27 циклов по первому этапу и 78 циклов по второму этапу,
- 1119 циклов вместо 309 циклов по первому этапу и 810 циклов по второму,
- 11190 циклов вместо 3090 циклов по первому этапу и 8100 циклов по второму,
- 41030 циклов вместо 11330 циклов по первому этапу и 29700 циклов по второму,

- 1865 циклов вместо 515 циклов по первому этапу и 1350 циклов по второму.

Необходимо отметить, что после окончания третьего этапа испытаний была проведена разборка пневмогидроаккумулятора № 3 с целью дефектации резино-технических деталей (см. 1—4 на рис. 5.1), после чего было принято решение собрать пневмогидроаккумулятор № 3 с новыми уплотнительными кольцами и продолжить испытания на четвертом, заключительном этапе.

Четвертый этап завершил подтверждение полного ресурса пневмогидроаккумуляторов для четырех натурных применений ОК «Буран». Испытаниям подвергались агрегаты № 1—6. Для этого заключительного этапа испытаний перечень объема испытаний авторы решили привести полностью.

1. Термостарение 16 суток (только для агрегата № 3).
2. Опрессовка (только для агрегата № 3).
3. Испытания на функционирование в диапазоне эксплуатационных температур (только для агрегата № 3).
4. Испытания на герметичность при нормальном давлении в диапазоне эксплуатационных температур (только для агрегата № 3).
5. Испытания на герметичность при пониженном давлении в диапазоне эксплуатационных температур (только для агрегата № 3).
6. Осмотр.
7. Испытания на ударную прочность — 80%.
8. Осмотр.
9. Испытания на виброресурс — 80%.
10. Осмотр.
11. Опрессовка.
12. Испытания на функционирование при нормальной температуре.
13. Температурные испытания — 97 циклов для агрегатов № 1, № 2, № 4—6 и 105 циклов для агрегата № 3.
14. Испытания на герметичность при нормальном давлении и нормальной температуре.
15. Вакуумно-температурные испытания в течение 35 суток для агрегата № 3. Допускается совмещать с ресурсными испытаниями совместно с баком.
16. Ресурсные испытания:

- 1) зарядка-разрядка от 0 до 120 кгс/см² и от 120 до 0 кгс/см² — 105 циклов,
- 2) пульсирующим давлением:
 - от 20 до 230 кгс/см² и обратно — 1866 циклов;
 - от 190 до 315 кгс/см² и обратно — 18660 циклов;
 - от 190 до 210 кгс/см² и обратно — 41030 циклов;
 - от 160 до 210 кгс/см² и обратно.
17. Испытания на функционирование в диапазоне эксплуатационных температур.
18. Испытания на герметичность при нормальном давлении в диапазоне эксплуатационных температур.
19. Испытания на герметичность при пониженном давлении в диапазоне эксплуатационных температур.
20. Разборка и осмотр (агрегаты № 1 и № 6).
21. Испытания на виброресурс до разрушения (агрегат № 3).
22. Ресурсные испытания до разрушения (агрегаты № 2 и № 4).
23. Разрушение внутренним давлением (агрегат № 5).

Все виды испытаний, за исключением специально оговоренных в соответствующих документах, проведены при нормальных климатических условиях:

- температура окружающей среды (25 ± 10) °C,
- атмосферное давление (750 ± 30) мм рт. ст.,
- относительная влажность (65+15)%.

Допускается увеличение относительной влажности до 95%.

В качестве рабочей жидкости использовалась жидкость 7-50С-3 ГОСТ 17216-71 с чистотой не ниже 8 класса ГОСТ 17216-71, этиловый спирт ГОСТ 18300-72 и азот второго сорта ГОСТ 9293-74 с точкой росы не выше (–60) °C.

Рассмотрим наиболее подробно основные виды проведенных испытаний и методы их проведения, определившие в конечном счете их объемы и последовательность.

5.2.2. Виды и методы проведения испытаний

Как упоминалось ранее, проведение всех вышеперечисленных в предыдущем разделе типов испытаний потребовало разработки, изготовления и монтажа различных стендов, участков гидро- и пневмосистем, а также пультов управления и контроля. Все комп-

лекующие гидравлических систем — трубопроводы, переходники, крестовины, ниппели и т.д. — были изготовлены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с различными толщинами стенок.

5.2.2.1. Осмотр. Проводился на предмет отсутствия механических повреждений пневмогидроаккумуляторов, правильности наличия необходимой комплектации, конструкторской документации и пломб в присутствии представителей разработчиков, производителей, ОТК и ПЗ. По результатам осмотра составлены соответствующие документы о допуске к следующему виду испытаний.

5.2.2.2. Опрессовка. Проводилась с целью проверки прочности, отсутствия механических повреждений материала, мест сварки и резино-технических деталей (РТД) пневмогидроаккумуляторов. Опрессовка проводилась на стенде, гидравлическая принципиальная схема которого приведена на рис. 5.2, выдержкой пневмогидроаккумуляторов под давлением $(315-5) \text{ кгс/см}^2$ в газовой и жидкостной полостях (см. рис. 5.1) в течение 5 мин.

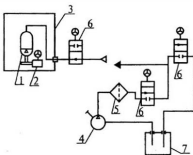


Рис. 5.2. Гидравлическая принципиальная схема испытательного стенда для проведения опрессовки:

- 1 — пневмогидроаккумулятор; 2 — наконечник для зарядки;
3 — бронекамера; 4 — насос ручной; 5 — фильтр; 6 — вентиль;
7 — емкость

Для подачи давления:

1) наполнялась спиртом газовая полость пневмогидроаккумулятора через зарядный клапан;

2) подавалась рабочая жидкость через штуцер в жидкостную полость гидропневмоаккумулятора, после чего давление в полости повышалось до вышеприведенной величины.

После проведения опрессовки просушка газовой полости пневмогидроаккумулятора проводилась путем последовательной подачи и сброса давления азота из газовой камеры через зарядный клапан.

5.2.2.3. Испытания на функционирование в диапазоне эксплуатационных температур проведены при температуре рабочей среды $(-60 \pm 5)^\circ\text{C}$, $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ и $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$. Температура окружающей среды при этом — в диапазоне от нормальной до температуры рабочей жидкости.

Выдержка при температуре рабочей жидкости $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$ не более 10 мин. Скорость повышения (понижения) давления рабочей жидкости обеспечивалась в пределах не более 1 кгс/см^2 .

При страгивании поршня пневмогидроаккумулятора из его крайних положений контролировался перепад давления между жидкостной и газовой полостью, который для температур $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ и $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$ должен быть не более $1,5 \text{ кгс/см}^2$, а само перемещение поршня должно происходить при перепаде давления не более 1 кгс/см^2 плавно, без заеданий. При температуре рабочей жидкости $(-60 \pm 5)^\circ\text{C}$ перепад давления между полостями при страгивании поршня должен быть не более $6,5 \text{ кгс/см}^2$, а его перемещение должно происходить при перепаде давления не более 3 кгс/см^2 .

Испытания на функционирование пневмогидроаккумулятора при температуре рабочей жидкости $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ проведены на стенде, принципиальная гидравлическая схема которого показана на рис. 5.3; при температуре рабочей жидкости $(+175 \pm 5)^\circ\text{C}$ — на стенде рис. 5.4; испытания при температуре рабочей жидкости $(-60 \pm 5)^\circ\text{C}$ — на стенде рис. 5.5.

Перед началом испытаний на функционирование пневмогидроаккумуляторов была проведена прокачка гидросистемы стенда и жидкостной полости пневмогидроаккумулятора с целью удаления из них воздуха.

Во время проведения вышеперечисленных испытаний контролировались температура и давление рабочей жидкости и окружающей среды, предварительно подго- " . ной и включенной систе-

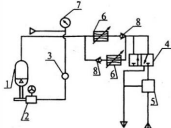


Рис. 5.3. Гидравлическая принципиальная схема стенда для проведения испытаний на функционирование пневмогидроаккумулятора при температуре рабочей жидкости $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$:

1 — пневмогидроаккумулятор; 2 — наконечник для зарядки;
 3 — датчик перепада давления; 4 — гидравлический распределитель;
 5 — редукционный клапан; 6 — дроссельный кран;
 7 — манометр (кл. 6); 8 — обратный клапан

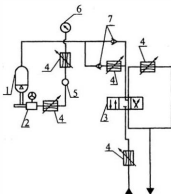


Рис. 5.4. Гидравлическая принципиальная схема стенда для проведения испытаний на функционирование пневмогидроаккумулятора при температуре рабочей жидкости $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$:

1 — пневмогидроаккумулятор; 2 — наконечник для зарядки; 3 — датчик перепада давления;
 4 — дроссельный кран; 5 — гидравлический распределитель;
 6 — манометр (кл.6); 7 — обратный клапан

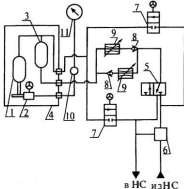


Рис. 5.5. Гидравлическая принципиальная схема стенда для проведения испытаний на функционирование пневмогидроаккумулятора при температуре рабочей жидкости $(-60+5)^\circ\text{C}$:

1 — пневмогидроаккумулятор; 2 — наконечник для зарядки; 3 — пневмогидроаккумулятор технологический; 4 — тепловая камера; 5 — гидравлический распределитель; 6 — редукционный клапан; 7 — вентиль; 8 — обратный клапан; 9 — дроссельный кран; 10 — датчик перепада давления; 11 — манометр (кл. 6)

мой измерения, причем погрешность при замере перепада давлений не превышала 2%.

5.2.2.4. Температурные испытания с целью проверки характеристик пневмогидроаккумулятора после температурных воздействий были проведены в специально созданной для этого температурной камере на стенде, принципиальная гидравлическая схема которого приведена на рис. 5.6.

Перед испытаниями газовая полость пневмогидроаккумулятора заряжалась рабочим газом до давления $(120+5) \text{ кгс/см}^2$ (давление зарядки дано для температуры 20°C).

Объем жидкостной полости и подводящие трубопроводы заполнялись рабочей жидкостью без давления.

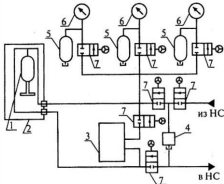


Рис.5.6. Гидравлическая Принципиальная схема стенда для проведения Температурных испытаний;

1 — пневмогидроаккумулятор; 2 — Тепловая камера; 3 — блок питания; 4 — предохранительный клапан; 5 — гидроаккумулятор технологический; 6 — манометр (кл.6); 7 — вентиль

Давление в газовой полости пневмогидроаккумулятора при режиме испытаний, соответствующем ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), определялось температурой в камере.

Наиболее удобно режимы проведения испытаний проследить по циклограмме, представленной на рис. 5.7. Следует заметить, что при испытаниях на режимах $+150$ и $+175\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление в жидкостной полости пневмогидроаккумулятора поддерживалось равным $(210+5)\text{ кгс/см}^2$.

Количество циклов испытаний по циклограмме, представленной на рис. 5.7, должно быть не менее 100.

5.2.2.5. Вибропрочностные испытания проводились с целью подтверждения расчетной усталостной прочности пневмогидроаккумулятора при воздействии на него всего спектра вибрационных нагрузок на соответствие заданных в соответствующей документации норм вибропрочности, а также для подтверждения работоспособности пневмогидроаккумуляторов после проведения вышеуказанных испытаний.

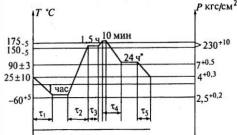


Рис. 5.7. Циклограмма проведения температурных испытаний пневмогидроаккумулятора

Перед началом испытаний газовая полость пневмогидроаккумулятора заряжалась азотом до штатного давления зарядки, равного $(120 \pm 0,2)$ кгс/см², затем давление в жидкостной полости доводилось до давления, равного штатному в гидросистеме ОК, т.е. $p = 220$ кгс/см².

5.2.2.6. Испытания на термостарение проводились при температуре $(+90 \pm 3)$ °C в течение времени (в сутках), различного для каждого этапа. На данный вид испытаний пневмогидроаккумуляторы поставлялись полностью заполненными рабочей жидкостью.

5.2.2.7. Вакуумно-температурные испытания пневмогидроаккумуляторов проводились с целью последующей проверки эксплуатационных характеристик аккумуляторов после расчетных температурных и вакуумных воздействий.

Перед испытаниями газовая полость пневмогидроаккумуляторов заряжалась рабочим газом до давления (120 ± 5) кгс/см². Жидкостная полость и подводящие трубопроводы были заполнены рабочей жидкостью.

Испытания проводились в тепловакуумной установке (ТВУ) при давлении окружающей среды, равном минимальному давлению, заданному в соответствующей документации для негерметичных отсеков.

Нагрев и охлаждение велись в соответствии с циклограммой, приведенной на рис. 5.8: $T_1 = T_2 = 24 \times 17,5 = 450$ ч; τ_1, τ_2 —

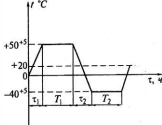


Рис. 5.8. Циклограмма режимов при тепло-вакуумных испытаниях пневмогидроаккумуляторов

время выхода на режимы должно быть минимальным, определяемым возможностями испытательного стендового оборудования.

Временные перерывы в испытаниях допускались только в выходные и праздничные дни, причем без разгерметизации тепловакуумной установки, т.е. если давление в ТВУ не превышало 1×10 мм рт.ст.

5.2.2.8. Ресурсные испытания пневмогидроаккумуляторов велись с целью подтверждения их ресурса, причем коэффициент переработки при испытаниях был принят равным 3.

Испытания проводились в два этапа. На первом этапе использовался метод «зарядка-разрядка» от давления в газовой полости (120 до 0) кгс/см² и обратно. Гидравлическая принципиальная схема испытательного стенда приведена на рис. 5.9. Время проведения одного цикла 10 мин., количество циклов соответствует п. 5.2.2.3 при температуре (25 ± 10) °C. Сброс давления проводился плавно за время не менее 5 мин.

Второй этап испытаний проводился совместно с гидравлическим баком гидросистемы пульсирующим давлением на гидравлических стендах (рис. 5.10, 5.11). Следует отметить, что испытательный стенд, гидравлическая принципиальная схема которого приведена на рис. 5.10, предназначен для испытаний на ресурс пульсирующим давлением (20-230), (160-210), (190-210) кгс/см² и обратно, причем время нарастания и сброса давления за 1с, количе-



Рис. 5.9. Принципиальная гидравлическая схема стенда для проведения ресурсных испытаний пневмогидроаккумулятора на режимах «зарядка-разрядка»: 1 — гидроаккумулятор; 2 — заглушка; 3 — наконечник для зарядки; 4, 5 — манометры; 6 — гидрораспределитель; 7 — редуктор; 8 — фильтр; 9 — вентиль; 10 — клапан обратный; 11 — кран дроссельный

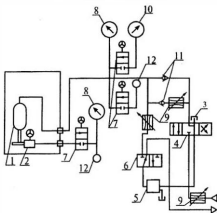


Рис. 5.10. Принципиальная гидравлическая схема стенда для проведения совместных с баком гидросистемы ресурсных испытаний пульсирующим давлением (20-230), (160-210), (190-210) кгс/см²: 1 — гидроаккумулятор; 2 — наконечник; 3 — броне-камера; 4, 6 — распределители; 5 — клапан предохранительный; 7 — вентиль; 8, 10 — манометры; 9 — кран дроссельный; 11 — обратный клапан; 12 — датчик

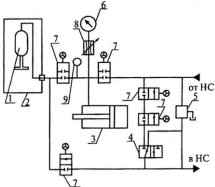


Рис. 5.11. Принципиальная гидравлическая схема стэнда для проведения совместных с баком гидросистемы ресурсных испытаний пульсирующим давлением ($190-315 \text{ кгс/см}^2$): 1— гидроаккумулятор; 2 — бронкамера; 3 — мультипликатор; 4 — распределитель; 5 — клапан редукционный; 6 — манометр; 7 — вентиль; 8 — клапан дроссельный; 9 — датчик

ство циклов соответствовало п. 5.2.2.3 с перерывом между циклами не более 20 с.

Испытательный стэнд, гидравлическая принципиальная схема которого приведена на рис. 5.11, предназначен для испытаний пульсирующим давлением ($190-315 \text{ кгс/см}^2$) и обратно. Время нарастания и сброса давления не превышало 0,1 с. Количество циклов соответствует п. 5.2.2.3 с перерывами между циклами не более 20 с.

Температура рабочей жидкости во время ресурсных испытаний не должна превышать 150°C .

Давление зарядки газовой полости ($120+5 \text{ кгс/см}^2$) дано при температуре $+20^\circ\text{C}$.

Жидкостная полость и подводящие трубопроводы должны быть заполнены рабочей жидкостью.

На всех режимах проведения ресурсных испытаний давление подается в жидкостную полость.

5.2.2.9. Испытания на ресурс до разрушения (агрегаты №2 и №4) проводятся в полном объеме по п. 5.2.2.8 с повторением до разрушения.

Однако после повторных испытаний дальнейшие испытания решено было прекратить и произвести разборку, осмотр и дефектацию. Перед разборкой стравлено давление из газовой полости пневмогидроаккумулятора за время не менее 1 ч.

5.2.2.10. Испытания на прочность до разрушения внутренним давлением проводились для агрегата №3 при полностью заполненной рабочей жидкостью газовой полости. Постепенным повышением давления в жидкостной полости пневмогидроаккумулятор доводился до разрушения.

Испытания велись в специально разработанной для этого бронекамере на стенде, принципиальная схема которого приведена на рис. 5.12.

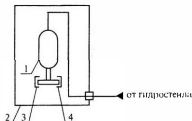


Рис. 5.12. Принципиальная гидравлическая схема стенда для проведения испытаний пневмогидроаккумулятора до разрушения внутренним давлением:

1 — пневмогидроаккумулятор; 2 — бронекамера; 3 — заглушка на гнездо датчика давления; 4 — заглушка на гнездо зарядного клапана

5.2.2.11. Испытания на герметичность проводились по специально разработанной программе испытаний. Учитывая, что испытаниям на герметичность должны подвергаться все шесть агрегатов, поставленных на отработочные испытания, и сами испытания на герметичность проводятся практически после каждого вида испытаний в значительном объеме, авторы сочли необходимым остановиться наиболее подробно на методах и условиях их проведе-

ния, а также на критериях определения соответствия герметичности уплотнительных узлов пневмогидроаккумуляторов после испытаний, наиболее полно имитирующих реальные эксплуатационные воздействия.

Основными целями и задачами проведения автономных, отработочных испытаний на герметичность пневмогидроаккумуляторов можно назвать определение:

- соответствия резинотехнических уплотнений требованиям конструкторской документации;
- степени герметичности уплотнительных узлов пневмогидроаккумуляторов требованиям конструкторской документации при нормальной температуре;
- степени герметичности уплотнительных узлов пневмогидроаккумуляторов при повышенной температуре;
- степени герметичности уплотнительных узлов пневмогидроаккумуляторов при пониженной температуре;
- степени герметичности уплотнительных узлов пневмогидроаккумуляторов при нормальном и пониженном давлениях, после испытаний, наиболее полно имитирующих эксплуатационные воздействия.

Для проведения вышеизложенных испытаний применялось следующее оборудование и технологическая оснастка:

1. Установка ТВУ-2,5/1,5-0,6.
2. Камера климатическая КХТБ-0,4.
3. Гидравлическая насосная станция.
4. Блок питания гидростенда.
5. Прибор КСМ-4.
6. Пневмостендзаправки контрольным газом.
7. Оборудование для испытания на герметичность (5.СТ203.0000-ОСП).
8. Теческатель гелиевый ПТИ-10.
9. Шприц хирургический с иглой Льюера.
10. Бачок для хранения и приготовления контрольной смеси.
11. Объемы накопления для 3—4 уплотнительных узлов (см. рис. 5.1).

Во время испытаний велся журнал испытаний, где указывались контролируемые параметры, неисправности и замечания, а также

принятые решения по организации работ по анализу и устранению обнаруженных неисправностей (при их наличии).

Все оборудование, применяемое при проведении вышеизложенных испытаний, подтверждено его пригодностью соответствующими документами.

Средства измерений имели отметки в паспортах о проведении очередной проверки.

Вся работа проведена в соответствии с ГОСТом «Организация работ по наземной экспериментальной отработке».

Объем, виды, последовательность и методы проведения автономных, отработочных испытаний пневмогидроаккумуляторов на герметичность, а также режимы испытаний, места контроля герметичности, их методы и нормы указаны в табл. 5.1.

Испытания на герметичность были проведены масс-спектрометрическими методами: НАД, шуп и вакуумирование.

Перед началом испытаний на герметичность, согласно сопроводительной документации на соответствующие уплотнительные узлы пневмогидроаккумуляторов, герметичность должна иметь значения (см. рис. 5.1):

по узлу 1 — 1л·мкм рт.ст./с (группа 2-10 ОСТ1.00128-74);

по узлу 2 — (2х10) л·мкм рт.ст./с при $T = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q = 7\text{ л} \cdot \text{мкм рт.ст./с}$ (группа 2-9 ОСТ1.00128-74);

по узлу 3 — (2х10) л·мкм рт.ст./с (группа 2-7 ОСТ1.00128-74);

по узлу 4 — (2х10) л·мкм рт.ст./с (группа 2-7 ОСТ1.00128-74).

Рассмотрим подробнее методики контроля герметичности способами НАД, шуп и вакуумирование.

Контролируемыми параметрами при испытаниях на герметичность пневмогидроаккумуляторов являются:

- 1) величина утечки контрольного газа;
- 2) давление контрольного газа в газовой полости пневмогидроаккумулятора;
- 3) давление окружающей среды;
- 4) температура окружающей среды;
- 5) температура газа;
- 6) температура рабочей жидкости.

Режимы испытаний на герметичность пневмогидроаккумулятора

Давление сжимающей среды, МПа, ат, кг/см ²	Порядковый номер режима испытаний	Температура контрольной (рабочей) среды, °С	Давление контрольной (рабочей) среды, кгс/см ²	Контролируемая уплотнительная усл. Группа герметичности по ГОСТ 1.00828-74 (допустимая величина негерметичности)	Способ испытаний
750 ± 30	1	2,5 ± 10	120+5	1. Группа 3-7 (1 л-мм/с)	НАД
				3,4. Группа 2-5 (2 x 10 л-мм/с)	
				2. Группа 3-5 (2 x 10 л-мм/с)	Шуп (НАД)
	2	-(60+5)	Зарядка производится при п.у. 120+5	Суммарная по 2,3,4 (7,6 л-мм/с)	Высучивание
	2а			1. Группа 2-10 (1 л-мм/с)	НАД
	3	+ 150 - 5	210+5	Суммарная по 2,3,4 (2,4 x 10 л-мм/с)	Высучивание
	4	25 ± 10	210+5	3,4. Группа 3-7 (2 x 10 л-мм/с)	НАД
				2. Группа 3-5 (1 x 10 л-мм/с)	Шуп (НАД)

Давление окружающей среды, мм. рт. ст.	Порядковый номер режима испытаний	Температура контрольной (рабочей) среды, °С	Давление контрольной (рабочей) среды, кгс/см ²	Контролируемый уплотнительный узел. Группа герметичности по ОСТ 1.00128-74 (допустимая величина негерметичности)	Способ испытаний
$P_{\text{мин}}$	3	25 ± 10	120 ± 3	Суммарная по 2,3,4 ($2,4 \times 10^{-4}$ л·мм/с)	Вакуумирование
	6	$+50 \pm 5$	132 ± 5		
	7	-15 ± 5	105 ± 3		
	8	-50 ± 5	91 ± 2		
750 ± 30	9	-60 ± 5	Зарядка производится при н.у. 120 ± 5	Клапан зарядный (по седлу). Группа 2-7 (2×10^{-4} л·мм/с).	НАД
	10	$+150 \pm 5$	210 ± 5		

$P_{\text{мин}}$ — минимальное давление, заданное для негерметичных отсеков.

Давление (210 ± 5) обеспечивается путем подачи в камеру в жидкостную полость пневмогидравлического насоса при предварительно тарированной газовой полости давление (120 ± 2) кгс/см² (давление температуры зарядки 20°C).

Примечание: В процессе испытаний не допускается превышение давления в жидкостной полости пневмогидравлического насоса до сравнительного давления в газовой полости более чем на $1,5$ кгс/см². Режим 2а допускается проводить только от режима 2.

Давление контрольного газа измерялось в газовой полости пневмогидроаккумулятора манометрами класса точности не ниже 0,6.

За температуру контрольного газа принималась температура корпуса пневмогидроаккумулятора.

5.2.2.12. Метод контроля герметичности способом НАД. Рассмотрим более подробно методику контроля герметичности пневмогидроаккумуляторов способом *НАД* (накопления при атмосферном давлении).

Данный способ служит для определения степени герметичности как элементов конструкции, так и испытываемого объекта в целом и позволяет определить количественную величину негерметичности в местах установки объемов накопления.

Суть метода состоит в следующем:

- проверяемый объект заполняется контрольным газом до испытаний;

- при наличии течи в проверяемом объекте испытаний контрольное вещество попадает в замкнутый объем накопления, тем самым повышая в нем концентрацию гелия;

- путем ввода в объем накопления иглы Льюера, установленной на шуп, соединенный с гелиевым течеискателем шлангом, регистрировались показания прибора БИИТ течеискателя, которые соответствуют определенным величинам концентрации гелия в объемах накопления. Из сравнения величин концентрации гелия в объеме накопления с допустимыми величинами определялось соответствие проверяемого соединения требованиям герметичности.

Концентрация гелия в каждом объеме накопления вычислялась по следующей зависимости:

$$C = C_0(\alpha - \alpha_{\phi}), \%, \quad (5.1)$$

где C — концентрация гелия в каждом объеме накопления; C_0 — концентрация гелия, приходящаяся на 1 В показаний БИИТ течеискателя; α — показания прибора БИИТ в момент контроля, В; α_{ϕ} — воздушный пик гелия в атмосфере помещения.

Пересчитывалась концентрация гелия в поток по смеси контрольного газа для каждого объема накопления:

$$Q_{\text{см}} = 2,1 \frac{C}{\tau_{\phi}} W \frac{100}{20}, \quad (5.2)$$

где $Q_{см}$ — поток контрольного газа, л·мкм рт.ст./с; C — концентрация газа в объеме накопления, %, W — величина объема накопления, л; $\tau_{ф}$ — фактическое время накопления контрольного газа, ч.

Следует отметить, что контроль герметичности уплотнительных узлов 1, 3, 4, проводился методом НАД, а узла 2 методом щупа (см. рис. 5.1).

Принципиальные гидравлические схемы стенов для проведения вышеизложенных испытаний приведены на рис. 5.13, 5.14.

5.2.2.13. Метод контроля герметичности способом щупа. Контроль герметичности способом щупа заключается в перемещении щупа, соединенного шлангом с течеискателем ПТИ-10, по соединению испытываемой системы, находящейся под давлением контрольного газа.

Контрольный газ при наличии течи засасывается щупом в масс-спектрометрическую камеру прибора БИИТ течеискателя с откло-

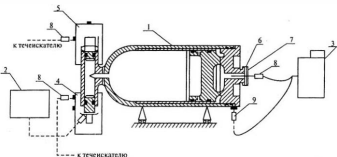


Рис. 5.13. Принципиальная гидравлическая схема стенов для проведения испытаний на герметичность пневмогидроаккумулятора и контроля герметичности узлов 1, 2, 3, 4, методами НАД и щупа: 1 — пневмогидроаккумулятор; 2 — пневмостенд заправки контрольной смесью; 3 — течеискатель гелиевый ПТИ-10; 4, 5 — объемы накопления; 6 — мембрана резиновая или фторопластовая; 7 — гайка; 8 — щуп специальный; 9 — щуп течеискателя

нением стрелки и изменением тональности звукового сигнала, фиксирующего наличие негерметичности.

Перед испытаниями производят настройку течеискателя на максимальную чувствительность в соответствии с инструкцией по эксплуатации и затем заполняют контролируемую систему гелиево-азотной смесью определенной концентрации до рабочего давления.

Для получения требуемой смеси необходимо заполнить пневмостенд (2 на рис. 5.13, 5.14) до давления

$$p_{\text{гел}} = \frac{(p_{\text{исп}} + 1)C}{100}, \quad (5.3)$$

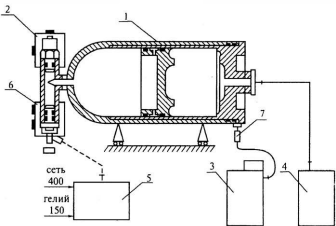


Рис. 5.14. Принципиальная гидравлическая схема стэнда для проведения испытаний на герметичность пневмогидроаккумулятора и контроля его герметичности способами НАД и щупа при $p_{\text{исп}} = (210 + 5) \text{ кгс/см}^2$:

1 — пневмогидроаккумулятор; 2 — пневмостенд заправки контрольным газом; 3 — течеискатель ПТИ-10; 4 — гидростенд заправки рабочей жидкостью; 5, 6 — объемы накопления; 7 — щуп течеискателя

Здесь $p_{гел}$ — избыточное давление гелия, кгс/см²; $p_{исп}$ — избыточное давление гелиево-азотной смеси, кгс/см²; C — концентрация гелия в гелиево-азотной смеси, %.

Контрольная течь выбиралась из условия

$$Q_{кт} = (0,1 - 1)Q_{доп}, \quad (5.4)$$

где $Q_{кт}$ — поток гелия от контрольной течи, л·мкм рт. ст./с; $Q_{доп}$ — допустимая негерметичность, л·мкм рт.ст./с.

Перед началом испытаний необходимо проверить флюктуацию стрелки прибора БИИТ и при необходимости произвести корректировку величины чувствительности испытаний:

$$S_q = \frac{Q_{кт} \alpha_{min}}{\Delta \alpha_{кт}}, \quad (5.5)$$

где S_q — чувствительность испытаний, л·мкм рт.ст. с; $Q_{кт}$ — поток гелия от контрольной течи, л·мкм рт.ст. с; $\Delta \alpha_{кт}$ — приращение показаний прибора БИИТ от контрольной течи, мВ; α_{min} — минимально достоверный отсчет течеискателя, равный удвоенному уровню флюктуаций фона, но не менее 6 мВ.

За уровень флюктуаций принимается разность между минимальным и максимальным показаниями стрелки прибора БИИТ (размах колебаний стрелки прибора), измеренная в течение 2—3 мин на шкалах прибора «0,3» либо «1».

Испытания начинают с нижних участков изделия с постепенным переходом к верхним. Щуп держат перпендикулярно проверяемой поверхности, передвигая его со скоростью не более 1см/с. Зазор между щупом и проверяемым изделием должен быть не более 0,5 мм. Для уточнения предполагаемого места течи необходимо провести щупом медленно, 4—5 раз, в местах ожидаемой негерметичности для выявления ее конкретного расположения.

5.2.2.14. Контроль герметичности пневмогидроаккумулятора способом вакуумирования. При контроле герметичности с применением вакуумной камеры испытуемое изделие помещается в герметичную камеру, соединенную с течеискателем, и над испытуемой поверхностью изделия создается разрежение порядка (1.10—1.10) мм

рт. ст. При наличии мест негерметичности в изделии контрольный газ под действием разности давлений проникает в полость вакуумной камеры, а затем в камеру масс-спектрометра течеискателя, при этом регистрация сигнала от поступившего в масс-спектрометр течеискателя гелия отображается на шкале прибора БИИТ течеискателя.

В основе контроля герметичности способом вакуумирования лежит определение величины потока гелия по известной чувствительности при одинаковых условиях измерения от контрольной течи и утечек из изделия.

Метод контроля герметичности способом вакуумирования предусматривает два режима контроля герметичности:

- 1) динамический, при котором измерения фона гелия от контрольной течи и от изделия производятся без отключения насосной станции вакуумной камеры,
- 2) статический, при котором измерения фона гелия от контрольной течи и от изделия производятся при отключенной насосной станции вакуумной камеры.

Чувствительность испытаний определяется чувствительностью течеискателя к потоку гелия, распределением его потока между течеискателем и вспомогательными средствами откачки, а также временными характеристиками испытаний.

Для исключения возможного перераспределения потока гелия в процессе испытаний между насосными группами необходимо было выполнение следующих условий:

- запорные трубопроводы в вакуумной части в принципиальной гидравлической схеме испытательного стенда полностью открывались;
- поддерживалось постоянство производительности насосных групп, обеспечивающих стабилизированные напряжения на нагревателях насосов откачки, характеризующихся постоянством давления в вакуумной камере и масс-спектрометрической камере течеискателя.

Следует заметить, что наибольшая чувствительность испытаний может быть достигнута только при полностью отключенной насосной группе вакуумной камеры в статическом режиме. Кстати, статический способ контроля герметичности назначается толь-

ко в том случае, когда динамический режим испытаний не обеспечивает требуемой чувствительности схемы испытаний при условии, что насосная группа течейскаателя не обеспечивает постоянства давления в вакуумной камере и масс-спектрометрической камере течейскаателя. Для постоянства чувствительности испытаний были созданы условия, при которых период накопления в процессе измерений на БИИТ во время испытаний был одним и тем же. Для этого в камере масс-спектрометра течейскаателя поддерживалось постоянное начальное давление, с которого происходило накопление контрольного газа при оценке чувствительности и герметичности пневмогидроаккумулятора.

При испытаниях на герметичность методом вакуумирования необходимо выполнение следующих основных требований:

1. Контрольная течь должна быть меньше допустимой величины негерметичности испытываемого изделия не менее чем в 10 раз.
2. Если после оценки чувствительности испытательной системы длительность испытаний превышает 24 часа, необходимо произвести проверку и оценку чувствительности испытательной системы.

Перед испытаниями необходимо было провести следующие работы:

- осмотреть оснастку и испытываемое изделие с целью выявления видимых дефектов (царапины, риски и другие механические повреждения), а также определения качества наклейки датчиков температуры, необходимых для проведения вышеизложенных испытаний;
- обезжирить внутренние поверхности вакуумной камеры, наружных поверхностей объекта испытаний и оснастки, расположенной в вакуумной камере;
- снять пластиковые заглушки.

На обезжиренных поверхностях не должно оставаться волокон, нитей и других механических частиц. Обезжиривание трубопроводов, шлангов, металлических рукавов, коллектора и вакуумных вентилях производилось спиртом методом заливки и полоскания, при этом переходники и заправочные приспособления обезжиривались методом погружения.

После обезжиривания необходимо продуть трубопроводы воздухом при давлении 3 кгс/см^2 до исчезновения запаха спирта.

Следует особо отметить, что фильтры и переходники с встроенными фильтрами промывать запрещено.

Принципиальная гидравлическая схема специального стенда для проведения испытаний представлена на рис. 5.15.

При испытаниях на пониженной температуре необходимо зарядить пневмогидроаккумулятор давлением $(120 \pm 5) \text{ кгс/см}^2$ при нормальной температуре.

Для проверки герметичности технологических стыков магистрали подачи контрольного газа смеситель пневмостенда заполнялся гелием до давления 30 кгс/см^2 и дозаправлялся азотом до давления 300 кгс/см^2 с выдержкой 40 мин. Затем проводился контроль герметичности стыков методом щупа по такой же методике, как для испытаний на режиме 2 табл. 5.1 контроля стыков, находящихся в вакуумной камере.

Следует особо отметить, что чувствительность испытаний (минимальный достоверно регистрируемый поток) определяется чувствительностью течеискателя к потоку гелия, распределением потока между течеискателем, вспомогательными средствами откачки и временными характеристиками испытаний.

Стабильность чувствительности течеискателя обеспечивалась при соблюдении следующих условий:

- давление в масс-спектрометрической камере течеискателя при измерениях по БИИТ было постоянным в процессе испытаний;
- напряжение на нагревателе пароструйного насоса течеискателя было постоянным и равным $(220 \pm 5) \text{ В}$;
- величина тока эмиссии была постоянной, т.е. (5 ± 0.5) или (0.5 ± 0.5) или $(0.1 \pm 0.1) \text{ Ма}$;
- постоянная производительность насосных групп обеспечивалась стабилизированным напряжением на нагревателях насосов системы откачки и характеризовалась постоянством давления в вакуумной и масс-спектрометрической камере течеискателя.

Естественно, наибольшая чувствительность достигается при полностью отключенной насосной группе вакуумной камеры, т.е.

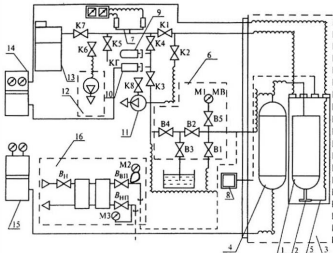


Рис. 5.15. Принципиальная гидравлическая схема стенда для проведения испытаний на герметичность пневмогидроаккумулятора способом вакуумирования:

1 — пневмогидроаккумулятор; 2 — камера вакуумная; 3 — камера климатическая; 4 — гидроаккумулятор технологический; 5 — наконечник; 6 — схема вакуумной заправки жидкостной полости пневмогидроаккумулятора рабочей жидкостью; 7 — вакуумметр ВИТ-2; 8 — прибор типа КСМ-4; 9 — контрольная течь типа «Гелит-1»; 10 — контрольная течь капиллярная; 11 — насос форвакуумный; 12 — пост откачной вакуумный; 13 — течисскаатель ПТИ-10; 14 — пневмостенд; 15 — гидростенд; 16 — гидравлическая часть схемы для работы с насосной станцией; К1, К12 — клапаны вакуумные ВРП2-2,5; Вн, Ввп, Вп — вентили гидравлические типа 992АТ; В1-В6 — вентили типа 922АТ; М1-М3 — манометры; МВ — мановакуумметр

в статическом режиме. Статический режим назначается в случае, когда динамический режим не обеспечивает требуемой чувствительности схемы испытаний даже при условии постоянства давления в вакуумной камере и масс-спектрометрической камере течеискателя.

Для постоянства чувствительности испытаний необходимо, чтобы период накопления в процессе измерений по БИИТ во время испытаний был одним и тем же. Это достигается постоянством начального давления в масс-спектрометрической камере течеискателя, т.е. того давления, с которого происходит накопление контрольного газа при оценке чувствительности и герметичности.

При проведении испытаний на герметичность способом вакуумирования необходимо выполнение следующих требований:

- контрольная течь должна соответствовать либо быть меньше допустимой величины негерметичности испытываемого изделия не менее чем в 10 раз;
- если после оценки чувствительности испытательной системы длительность испытаний превышает 24 часа, необходимо провести повторную оценку чувствительности.

Порядок проверки оценки чувствительности схемы испытаний следующий:

1. Отвакуумировать вакуумную часть схемы испытаний до давления (1.10)—(1.10) мм рт.ст.
2. Включить и настроить течеискатель в соответствии с инструкцией по эксплуатации.
3. Открыть клапан К3 (см. рис. 5.15) и произвести откачку контрольной течи в течение 3—5 мин. Затем клапан К3 закрыть.
4. Зафиксировать показание прибора БИИТ течеискателя, соответствующее начальному фону гелия в схеме испытаний (α_0).
5. Открыть клапан К4 и зафиксировать установившееся показание прибора БИИТ течеискателя, соответствующее фону гелия в вакуумной схеме от потока гелия через контрольную течь ($\alpha_{к.т}$). Затем закрыть клапан К4.

Далее определяется чувствительность схемы испытаний:

$$S_Q = \frac{Q_{к.т}}{\alpha_{к.т} - \alpha_0} \alpha_{\min}, \quad (5.6)$$

где S_Q — чувствительность схемы испытаний, л·мкм рт.ст./с; $Q_{к.т}$ — поток гелия через контрольную течь, л·мкм рт.ст./с; $\alpha_{\min}$ — минимальная регистрируемая величина показаний прибора БИИТ течеискателя, В; $\alpha_{к.т}$, α_0 — приращение показаний по БИИТ течеискателя от потока гелия через контрольную течь, В.

По результатам проведенных испытаний необходимо подсчитать суммарную негерметичность испытываемого объекта:

$$Q_t = Q_{к.т} \frac{(\alpha_t - \alpha'_0)100}{(\alpha_{к.т} - \alpha_0)C}, \quad (5.7)$$

где Q_t — суммарный поток контрольного газа через микронеплотности объекта испытаний, л·мкм рт.ст./с; $Q_{к.т}$ — поток гелия через контрольную течь, л·мкм рт.ст./с; $\alpha_t - \alpha'_0$ — приращение показаний прибора БИИТ от потока контрольного газа через микронеплотности объекта испытаний, В; $\alpha_t - \alpha_0$ — приращение показаний прибора БИИТ от потока гелия через контрольную течь, В; C — концентрация гелия в смеси, %.

5.2.2.15. Контроль герметичности методом вакуумирования с обдувом испытываемой системы гелием. Отличие данного метода от описанного выше в том, что в контролируемой системе создается разрежение, но при этом внешняя поверхность системы обдувается тонкой струей гелия. При наличии негерметичности гелий проникает в полость изделия, соединенную с масс-спектрометрической камерой течеискателя, что, естественно, приводит к отклонению стрелки прибора БИИТ течеискателя.

Следует отметить, что данный метод применяется в основном для контроля герметичности в местах технологических стыков вакуумных частей системы испытаний.

Порядок проведения испытаний и оценка чувствительности схемы, кроме обдува, полностью идентичен описанному выше.

Сам обдув на первой стадии контроля герметичности производится сильной струей гелия, покрывающей наибольшую поверхность контролируемой системы. После обнаружения места течи струю гелия уменьшают до минимального значения и производят точное определение места течи, если таковая обнаружена. Далее течь устраняют и весь цикл испытаний повторяют вновь по данной методике.

Испытания на герметичность зарядного клапана пневмогидроаккумулятора, соответствующие режимам 9 и 10 табл. 5.1, проведены при пониженных и повышенных температурах. Контрольной средой служила гелиево-азотная смесь с 10%-ным содержанием гелия. Осуществлялись измерение и регистрация температуры в климатической камере и на поверхности пневмогидроаккумулятора температурными датчиками типа ТЭПО18 и прибором КСМ-4 (регистрация).

Схема стенда для проведения испытаний на герметичность зарядного клапана пневмогидроаккумулятора приведена на рис. 5.16.

Следует особо отметить, что момент затяжки гайки наконечника производят динамометрическим ключом с моментом затяжки $M_{зат} = 450—500$ кг/см.

Контроль герметичности зарядного клапана, в соответствии с режимами 9 и 10 табл. 5.1, проводился методом НАД, достаточно подробно изложенным выше.

5.2.3. Основные выводы по результатам автономных испытаний пневмогидроаккумуляторов баков и гидросистем

1. Автономные испытания пневмогидроаккумуляторов были проведены в полном объеме, подтверждающем их работоспособность и ресурс в соответствии с требованиями соответствующих программ КПЭО в обеспечение необходимого числа натуральных применений ОК «Буран» и времени необходимого эксплуатационного обслуживания.

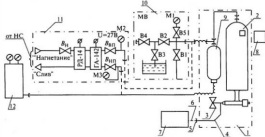


Рис. 5.16. Принципиальная гидравлическая схема стенда для проведения испытаний на герметичность
Заводного клапана лисаного гидравлического насоса

1 — климатическая камера; 2 — пневмогидроаккумулятор; 3 — наконечник шарового клапана; 4 — трубопровод; 5 — заглушка; 6 — трубопровод; 7 — интумесцент; 8 — прибор КСМ-4; 9 — пневмогидроаккумулятор технологический; 10 — сменная вакуумная правка гидростатической полости пневмогидроаккумулятора рабочей жидкостью; 11 — гидравлическая часть-съемная для работы с насосной станцией; 12 — гидравлический стенд.

2. Все поставленные на испытания пневмогидроаккумуляторы выдержали опрессовку давлением $(315-5)$ кгс/см². При осмотре после опрессовки видимых трещин, подтеков и вспучивания на корпусе изделия не было обнаружено.

3. Проведенные испытания на герметичность показали, что все пневмогидроаккумуляторы их выдержали во всем диапазоне эксплуатационных температур и давлений. При этом наружная герметичность уплотнительных узлов №2, №3 и №4 (см. рис. 5.1) соответствует группе 2-5 ОСТ.1 00128-74, внутренняя негерметичность уплотнительного узла №1 — группе 2-7 ОСТ.1 00128-74.

4. Все представленные на испытания пневмогидроаккумуляторы по функционированию в диапазоне эксплуатационных температур их выдержали:

- минимальный перепад давления при страгивании поршня при температурах (25 ± 10) °С и $(175-5)$ °С составил 1,41 кгс/см² ($p_{\text{доп}}$ не более 1,5 кгс/см²);
- максимальный перепад давления для движения поршня пневмогидроаккумуляторов при вышеприведенных температур составил 0,85 кгс/см² ($p_{\text{доп}}$ не более 1 кгс/см²);
- максимальный перепад давления для страгивания поршня пневмогидроаккумуляторов при температуре $-(60 \pm 5)$ °С составил 2,7 кгс/см² ($p_{\text{доп}}$ не более 6,5 кгс/см²);
- максимальный перепад давления для движения поршня при вышеприведенной температуре составил 1,8 кгс/см² ($p_{\text{доп}}$ не более 3 кгс/см²).

5. Пневмогидроаккумуляторы выдержали вакуумно-температурные испытания в тепловakuумных камерах при минимальном давлении окружающей среды в соответствии с техническими требованиями, изложенными в технической документации для негерметичных отсеков ОК, в течение 450 часов при температуре $(50+5)$ °С и в течение 450 часов при температуре минус $(40+5)$ °С.

6. Пневмогидроаккумуляторы выдержали ресурсные испытания совместно с баком гидросистем в эксплуатационном диапазоне температур по специальной программе испытаний, входящей в состав КПЭО. Испытания заключались в том, что изменение давления в пневмогидроаккумуляторах, соответствующее перемещениям поршня гидравлического бака гидросистем, представляющим

с собой изменение объема полости А пневмогидроаккумуляторов (рис. 5.17) от минимального до максимального при различных температурах рабочей жидкости, обрабатывалось большое количество циклов при испытаниях:

- изменение давления в пневмогидроаккумуляторах, соответствующее перемещениям поршня от объема полости А (9+1) л до объема (25+1) л и обратно, обрабатывалось при температуре (25+10) °С — 219 циклов;

- изменение давления в пневмогидроаккумуляторах, соответствующее перемещением поршня гидравлического бака гидросистем от объема полости А (9+1) л до объема (25+1) л и обратно, обрабатывалось при температуре рабочей жидкости (150–5) °С — 219 циклов.

Весь проведенный объем ресурсных испытаний пневмогидроаккумуляторов совместно с гидравлическим баком гидросистем состоял из следующих режимов:

- при температурах (25+10) °С и (150–5) °С и изменении объема полости А гидробака (9+1) л (25+1) л (9+1) л отработано на каждом температурном режиме по 219 циклов;

- при температурах (25+10) °С и (150–5) °С и изменении объема полости А гидробака (19+1) л (32+1) л (19+1) л отработано на каждом температурном режиме по 646 циклов;

- при температурах (50+5) °С, минус (15+5) °С и минус (40+5) °С и изменении объема полости А гидравлического бака (25+1) л (31+1) л (25+1) л отработано на каждом из температурных режимов по 5983, 5907 и 75 циклов соответственно.

7. Пневмогидроаккумуляторы выдержали ресурсные испытания на зарядку-разрядку газовой полости от 0 до 120 кгс/см² и обратно, отработав при этом 315 циклов.

8. Пневмогидроаккумуляторы выдержали ресурсные испытания пульсирующим давлением рабочей жидкости в соответствии с требованиями, изложенными в п. 5.2.1:

- при изменении давления рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторах от 20+0,5 до 230+5 кгс/см² и обратно пневмогидроаккумуляторы №1–3 отработали 2985 циклов, №4–6 — 4104 циклов;

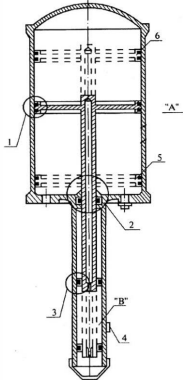


Рис. 5.17. Конструктивная схема гидравлического бака гидросистем гидрокомплекса:

1, 2, 3 — узлы уплотнительные; полость А — жидкостная полость низкого давления; полость В — полость высокого давления; 4 — место наклейки датчиков; 5 — положение поршня при пустом баке; 6 — положение поршня при полном баке

- при изменении давления рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторах от 190 до 315 кгс/см² и обратно пневмогидроаккумуляторы №3 отработали 29790 циклов, №4—6 — 29990 циклов;
- при изменении давления рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторах от 190 до 210 кгс/см² и обратно пневмогидроаккумуляторы №1—3 отработали 82060 циклов, №4—6 — 82060 циклов;
- при изменении давления рабочей жидкости в пневмогидроаккумуляторах от 160 до 210 кгс/см² и обратно пневмогидроаккумуляторы №1—3 отработали 7775 циклов, №4—6 — 4975 циклов.

После проведения всех вышеперечисленных испытаний была проведена разборка и дефектация резинотехнических деталей пневмогидроаккумуляторов, в результате которой выявлено, что все резиновые уплотнения имеют незначительные деформации с частичной потерей эластичности, хотя при этом обеспечивается герметичность пневмогидроаккумулятора в течение всего объема испытаний.

Пневмогидроаккумулятор №5 был испытан на прочность до разрушения внутренним давлением рабочей жидкости. Разрушения корпуса пневмогидроаккумулятора не произошло при подаче в его внутреннюю полость рабочей жидкости под давлением 660 кгс/см² с последующим повышением давления до 850 кгс/см² (в соответствии с документацией разрушающее давление должно быть не менее 660 кгс/см²).

5.2.4. Заключение по результатам автономных испытаний пневмогидроаккумуляторов гидравлических баков и гидросистем гидрокомплекса

1. Все представленные на испытания пневмогидроаккумуляторы испытания на функционирование, ресурс, герметичность и ВТИ в объеме, определенном КПЭО, в обеспечение 25+5 натурных применений и 200 часов наземных работ выдержали.

2. Объем, методы, разработанные программы испытаний, оборудование, стенды и способы отработки только по данным агрегатам гидрокомплекса позволяют оценить весь объем и сложность

проведенных автономных испытаний агрегатов и систем гидрокомплекса.

5.3. КОМПЛЕКСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АГРЕГАТОВ И СИСТЕМ ГИДРОКОМПЛЕКСА ОК «БУРАН»

Все испытания агрегатов и систем гидрокомплекса в обеспечение необходимого числа натурных применений проводились для систем ОК «Буран». Было отработано 780 приборов и узлов, проведена комплексная отработка 135 систем и агрегатов на специально созданных установках и стендах

Кроме вновь созданных лабораторий триботехнических испытаний, зала статических испытаний, теплопрочностных вакуумных камер ТПКВК-1 и реверберационных камер РК-1 500 (созданных в ЦАГИ), лаборатории динамических испытаний и уникальной тепловакуумной камеры ОК -ГЛИ, несомненно, представляет собой окончательный этап экспериментальной отработки, по результатам которой и определяют допуск к полету.

Наиболее подробно стенды для комплексных испытаний агрегатов и систем гидрокомплекса описаны в п. 5.1. Следует особо отметить, что в состав стенда ПРСО входит еще и стенд «Комплексная отработка шасси» (КСШ), представляющий собой полнометражную модель основных и передних шасси ОК «Буран» и ОК-ГЛИ, которые различаются только размерами передних стоек. На КСШ проводились автономные и комплексные испытания агрегатов и систем уборки-выпуска шасси, таких, как: створки шасси (ресурс, время открытия), гидрошарниры (ресурс, герметичность), системы выпуска и уборки шасси, а также совместные испытания с ПРСО по отработке систем гидрокомплекса при совместном функционировании аэродинамических поверхностей и шасси на конечном этапе применения ОК «Буран».

Комплексные испытания на стенде ПРСО совместно со стендом КСШ (комплексный стенд шасси) позволили оценить достаточность энергетики гидрокомплекса для обеспечения необходимых скоростей движения аэродинамических поверхностей на фоне одновременной работы систем выпуска шасси при экстремальном режиме работы — отказе одной из трех гидросистем (при отказе

одной из гидросистем производится АВШ — аварийный выпуск шасси при помощи пиропатронов).

Все комплексные испытания, проведенные на шести полнометражных макетах ОК «Буря» и стендах ПРСО, КСШ, ПДСТ и т.д., позволили:

- отработать конструкцию ОК в части размещения и крепления бортового оборудования и агрегатов, прокладки электрических жгутов и трубопроводов, а также элементов гидрокомплекса и его систем;
- подтвердить правильность технических решений по обеспечению требуемых характеристик бортовых систем, по удобству их обслуживания;
- отработать и доработать, на основе многочисленных математических численных экспериментов, конкретные геометрические параметры;
- подтвердить располагаемый мощностной баланс, а также необходимые для этого энергетические параметры агрегатов и систем гидрокомплекса.

Комплексные испытания, проведенные на макетах (см. п. 5.1) и стендах ПРСО, ПДСТ и КСШ, позволили не только отработать конструктивные параметры ОК, но и провести исследования по подтверждению основных рабочих характеристик агрегатов и систем гидрокомплекса на основе громадного числа вариантов математического моделирования и доработать по результатам вышеприведенных исследований соответствующие агрегаты и системы гидрокомплекса.

В комплекс испытаний на стенде ПРСО и входившем в него стенде КСШ входили:

- испытания по подтверждению скоростей движения рулевых поверхностей в соответствии с требованиями ТЗ на соответствующие приводы при коэффициенте одновременности, равном единице, при работе штатного гидрокомплекса ОК;
- испытания по подтверждению энергетического баланса гидрокомплекса и его систем при их совместной работе и штатной СУ по обеспечению режима спуска ОК;
- испытания по подтверждению энергетического баланса ГК и его систем при совместной работе рулевых поверхностей, СУ и

шасси на этапе посадки на ВПП при различных отказах гидросистем управления;

- испытания по выбору и отработке алгоритмов управления СУ ОК в «ручном» режиме управления на этапах спуска и посадки на ВПП;

- испытания по отработке алгоритмов управления СУ ОК в автоматическом режиме управления на этапах спуска и посадки;

- научно-исследовательские испытания по подтверждению результатов математического моделирования и выбору на их основе алгоритмов приоритета работы рулевых поверхностей для СУ ОК;

- проведение полетов штатным экипажем и отработка действий по парированию различных отказов систем гидрокомплекса;

- проведение испытаний на функционирование и ресурс агрегатов и систем шасси на стенде КСШ (всего выполнено более 2200 циклов «выпуск — уборка» шасси);

- проведение испытаний по аварийному выпуску шасси и отработке необходимого времени выпуска;

- испытания по отработке системы управления передней стойкой шасси, тормозной системы и противоюзовой автоматики.

Следует особо отметить, что комплексные испытания — это весьма сложный, длительный и очень дорогостоящий процесс, которому подвергаются только системы, не испытанные ранее, т.е. те, опыт создания которых в космической и авиационной технике отсутствует. Поэтому комплексные испытания включают в себя этапы:

- разработки технических заданий на проектирование уникальных (не имеющих аналогов) испытательных комплексов, полноразмерных макетов и стендов;

- проектировки и изготовления вышеперечисленных полноразмерных макетов и стендов. Экспериментальные полноразмерные макеты и стенды изготавливались по конструкторской документации штатного ОК «Буран», т.е. являлись его дубликатами, а отступления по конструктивному исполнению допускались только в части, не влияющей на результаты испытаний — например, отличие штатного и стендового гидрокомплекса по длине гидролиний не превышало 5 см;

— создания систем управления экспериментами, а также систем измерений, контроля и необходимого метрологического обеспечения,

а также

— пусконаладочные работы;

— комплексные и научно-исследовательские испытания различных систем с целью их совместной отработки, включая аварийные ситуации.

Все испытательное оборудование аккредитовано [19] Госстандартом РФ на техническую компетентность и независимость как испытательные центры РФ. Аттестаты зарегистрированы в Государственном Реестре систем сертификации ГОСТ-Р.

5.3.1. Заключение по результатам комплексных испытаний систем гидрокомплекса ОК «Буран»

Комплексные испытания, проведенные на полнометражных макетах и стендах ПРСО, ПДСТ, КСШ и ОК-ГЛИ, представляющих собой вновь созданную современную испытательную базу, обеспечили безотказную работу систем и агрегатов ОК «Буран» на всех этапах его применения, и особенно его орбитальный полет и посадку в автоматическом (беспилотном) варианте.

Более того, они заложили базу для проведения последующих полетов ОК «Буран» с усложненными программами полетов и проведением исследовательских работ на орбите.

Результаты первого полета ОК «Буран», подробно описанные в [14, 19], авторы решили не приводить в настоящей главе, так как пришлось бы просто переписать имеющиеся в этих книгах данные, где они приведены достаточно грамотно и подробно.

Современные требования к эффективности промышленных разработок гидросистем управления различных типов летательных аппаратов диктуют необходимость развития новых методов подхода к вопросам проектирования и исследования данных систем с применением новейшей испытательной и вычислительной техники.

В первой главе настоящей книги содержится краткое описание облика ОК «Буран», элементов его конструкции, основные характеристики систем самого планера и его бортовых систем; приведены краткие описания составных частей систем МРКК и МКТС «Спейс-Шаттл», показаны их принципиальные различия и сравнительные характеристики.

Кроме описания основных конструктивных элементов планера ОК, данная глава содержит сведения по размещению в элементах конструкции бортовых систем планера и, в частности, систем гидрокомплекса.

Наиболее подробно даются описания гидрокомплекса и его систем, принципиальных гидравлических схем гидравлических систем и приводов управления аэродинамическими поверхностями; показаны принципы работы системы управления полетом ОК; приведена программа первого полета ОК «Буран» и некоторые данные ее реализации.

Приведенные в главе I материалы — краткое описание ОК «Буран», компоновки его элементов и систем — позволят читателям получить представление о первом космическом корабле многоцелевого применения, создание которого в России опередило свое время.

Вторая глава посвящена разработке и методам реализации математических моделей, предназначенных для решения задач синтеза и анализа рабочих параметров агрегатов и систем ГК как на ранних этапах разработки и согласования ТЗ, так и при проведении численных экспериментов, а также при доводке и доработке по данным этих исследований вышеперечисленных систем и агрегатов.

В главе указываются и обосновываются пути решения важной проблемы построения моделирующих алгоритмов систем и элементов гидрокомплекса ОК «Буран» и методы их реализации; представлены конкретные разработки в виде математических моделей (ММ) и алгоритмов, основные из которых:

- качественно отличная от традиционных ММ насоса переменной подачи с регулятором по давлению, входящего в состав гидросистемы ОК «Буран»;
- ММ движения рабочей жидкости в гидролиниях с учетом инерции и сжимаемости;
- ММ вспомогательной силовой установки (ВСУ);
- ММ клапана переключения рулевых систем, методы его математического описания и алгоритмы реализации;
- ММ гидрокомплекса с привязкой клапана переключения гидросистем.

Показано, что разработанная в предыдущем пункте математическая модель в виде обыкновенных дифференциальных уравнений может быть приведена к задаче Коши, гарантирующей ее решение с помощью ЭВМ.

Разработанная на примере гидрокомплекса ОК «Буран» совокупность принципов и методов построения моделирующих алгоритмов его элементов и систем указывает и обосновывает пути дальнейших разработок в области проектирования, создания и исследований гидравлических систем управления, используемых в авиационной технике и орбитальных кораблях многоразового использования.

Третья глава содержит результаты практического применения разработок, полученных в предыдущей главе, для задач анализа, синтеза и исследований элементов и систем гидрокомплекса ОК «Буран».

Разработанные в настоящей главе совокупность математических моделей, алгоритмов их реализации и инженерные методики для задач синтеза и исследований основных параметров гидрокомплекса ОК «Буран» образуют единый проектно-исследовательский комплекс, внедрение которого в практику инженерных расчетов позволит не только сократить объем испытаний и уменьшить стоимость разработок, но и определить расчетные случаи, подлежа-

щие дополнительные исследования, по результатам которых возможно, если необходимо, доработать исследуемые системы.

Рассмотренные в настоящей главе математические модели и методы их реализации, отлаженные по результатам экспериментальных исследований на стенде ПРСО, позволили создать и реализовать:

- ММ гидрокомплекса и созданные на ее основе инженерные методики синтеза основных параметров ГК (на основе энергобаланса) и методики оценки основных характеристик рабочих параметров ГК с учетом алгоритма приоритета работы аэродинамических поверхностей, что позволило решить задачу выбора закона управления поверхностями для преодоления энергодефицита гидрокомплекса при двух отказах гидросистем, основанного на принципе «рекуперации»;

- упрощенную ММ гидрокомплекса для оперативного решения задач динамики полета ОК «Буран» при спуске и посадке в отказных ситуациях. Модель позволяет учесть изменение давления в гидросистемах (и, естественно, на входе в приводы управления аэродинамическими поверхностями), влияние всех систем ГК на СУ и на основе множества численных экспериментов режимов спуска и посадки на ВПП с выбранными ранее законами управления провести реальную оценку достаточности — для безаварийного режима спуска и посадки ОК — топлива для ВСУ, увеличение объема которого приведет к увеличению веса ОК, что недопустимо в соответствии с жесткими требованиями по взлетному весу «Бурана».

В главе приведены конкретные примеры практической реализации вышеизложенных математических моделей в виде графиков сравнительных характеристик многочисленных результатов численных и экспериментальных исследований, показывающие практические возможности разработанных моделей и алгоритмов их реализации.

Четвертая глава посвящена проблемам, связанным с функционированием гидрокомплекса ОК «Буран» на участке орбитального полета. Учитывая, что на орбитальном участке полета ОК, при неработающих аэродинамических поверхностях, агрегаты и системы гидрокомплекса охлаждаются до температуры $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$, руле-

вые системы и ГК в целом становятся неработоспособными, возникает важнейшая проблема поддержания температуры рабочей жидкости, обеспечивающая работоспособность ГК.

Данная проблема была решена, как упоминалось ранее, использованием в гидрокомплексе ОК насосных станций малой мощности с приводом от электродвигателей, источником питания которых являются аккумуляторы, т. е. нагретая в теплообменниках рабочая жидкость от насосных станций прокачивается через множество потребителей (около 100 различных агрегатов и систем) с заданным соответствующими специалистами в области теплообмена распределением расходов по потребителям, обеспечивая тем самым тепловой баланс ГК на участке орбитального полета.

Сложность решения данной проблемы обусловлена следующими причинами:

- жесткими массовыми и мощностными требованиями к насосным станциям по потребляемому току и напряжению;
- большим числом потребителей с заданным распределением расходов рабочей жидкости по каждому;
- недостаточностью объема теоретической и экспериментальной информации;
- необходимостью разработки нового метода математического описания и алгоритма его реализации — единственно подходящего для настоящей задачи, так как только метод численного эксперимента может быть приемлем для выбора проливочных характеристик множества потребителей.

То есть при заданных жестких характеристиках насосных станций по давлению и расходу требовалось обеспечить заданное распределение расходов по потребителям.

Вышеизложенная задача была решена проведением численного эксперимента по математическим моделям ГК и разработанным на их основе инженерным методикам оценки основных параметров систем гидрообогрева (СГО). Поэтому в главе подробно представлена общая математическая модель СГО, подробно описан алгоритм ее практической реализации, приведены обоснование выбора расчетных гидравлических характеристик принципиальных схем и сами принципиальные гидравлические схемы по каждой из гидросистем, а также рассмотрены вопросы использования разра-

ботанной инженерной методики для задач анализа и синтеза аналогичных систем.

Кроме того, приведены результаты практической реализации вышеизложенных инженерных методик по каждому из независимых каналов гидросистем; в соответствующих таблицах показано множество вариантов численных исследований. Все расчеты проведены с учетом конструкторских допусков на агрегаты и системы гидрокомплекса при фиксированных значениях различных эксплуатационных температур.

Разработанная совокупность математических моделей, методов исследований, проектирования, анализа и синтеза систем гидрокомплекса ОК «Буран» на этапе орбитального полета образует единый проектно-исследовательский комплекс, позволяющий наиболее оптимальным образом выбрать характеристики агрегатов и систем ГК уже на ранних этапах проектирования. По результатам проведенных численных экспериментов было выявлено, что соответствие режимов работы насосных станций СГО требованиям ТЗ по параметрам прокачки рабочей жидкостью рулевых приводов во всем диапазоне эксплуатационных температур обеспечивается только в случае изготовления рулевых приводов по максимальным допускам, что и явилось основанием для их доработки.

Материалы пятой главы наглядно отражают объемы и сложность проведенной экспериментальной отработки агрегатов и систем гидрокомплекса в обеспечение натурного применения ОК «Буран».

На примере наиболее сложных агрегатов (пневмогидроаккумуляторы гидравлических баков и гидросистем) подробно рассмотрены виды, объемы и методы проведения автономных испытаний. В главу вошли таблицы используемого оборудования, графики и таблицы режимов испытаний, имеются гидравлические принципиальные схемы испытательных стендов для каждого из видов испытаний.

Показано, что все агрегаты, поставленные на автономные испытания в объеме КПЭО, их успешно выдержали.

Подробно изложенные материалы, касающиеся вида, объемов и методов проведения автономных испытаний на примере пневмогидроаккумуляторов гидравлических баков и гидросистем, по-

звolyают не только оценить объем и сложность проведенных испытаний, но и представляют собой инструкцию для специалистов, занимающихся испытаниями и отработкой аналогичных систем.

Комплексные испытания, проведенные на полнометражных макетах, стендах ПРСО, ПДСТ, КСШ, летающих лабораториях на базе Ту-154, Ту-22, Ил-76К, Ил-20Д, МиГ-25 и летающем аналоге ОК-ГЛИ, завершающую экспериментальную отработку систем ОК «Буран», несомненно, обеспечили в полном объеме безотказную работу систем и агрегатов ОК «Буран» на всех этапах полета, и особенно на этапе спуска и посадки в автоматическом (беспилотном) режиме.

Весь объем проведенных испытаний — это не что иное, как база для проведения последующих запусков ОК «Буран» с более сложными программами полетов.

Авторам хотелось бы надеяться, что государственная мудрость найдет оптимальный путь применения созданных разработок; возможности системы, превосходящей потребности национальной космической программы, будут востребованы для решений с помощью космических средств таких межгосударственных проблем, как глобальная телесеть, восстановление озонового слоя Земли, утилизация ядерных отходов, создание многих медицинских препаратов и др. В наше непростое время, утрата высокого уровня космической промышленности может очень дорого обойтись стране.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кольев Д.Е., Соколов А.А. Модель насоса переменной подачи. Рукопись 34 с. Деп. в ЦНТИ «Волна». 1982. № ДД0806.
2. Следящие приводы: В 2-х кн. / Под ред. Б.К. Чемаданова. — М.: Энергия, 1976. Кн. 2. С. 207—221.
3. Euler L. Principes generaux du mouvement des fluides, Hist. de l'Acad. de Berlin. 1775. P. 207—221.
4. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. Полн. собр. соч. — М., 1937. Т. VII.
5. Тарко Л.М. Переходные процессы в гидравлических механизмах. — М.: Машиностроение, 1973.
6. Чарный Н.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. — М.: Гостехиздат, 1951.
7. Попов Д.Н. О потерях напора в трубопроводах при неустановившемся движении жидкости // Вестник машиностроения. 1969. № 6. С. 19—20.
8. Прокофьев В.Н. Расчет вынужденных колебаний гидропривода // Вестник машиностроения. 1967. № 12. С. 11—17.
9. Кольев Д.Е., Соколов А.А. Методы построения моделирующих алгоритмов гидроприводов систем питания и подвижности авиационных тренажеров. Рукопись 35 с. Деп. В ЦНТИ «Волна», 1982. № дд0804.
10. Литвин А.М. Теоретические основы теплотехники. — М.: Энергия, 1969. С. 71—80.
11. Ермаков С.А. Исследование динамических процессов в гидравлических агрегатах на ЦВМ // Механика машин. 1975. № 49.
12. Соколов А.А. Оценка основных параметров гидросистем управления космического корабля «Буран» // Вестник машиностроения. 1992. № 8—9. С. 19—21.
13. Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления. — М.: Машиностроение, 1972. С. 60—65.
14. Многоразовый орбитальный корабль «Буран» / Под ред. Ю.П. Семенова, Г.Е. Лозино-Лозинского, В.Л. Лапыгина и В.А. Тимченко. — М.: Машиностроение, 1995.

15. *Матвеевко А.М., Зверев И.И.* Проектирование гидравлических систем летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1982.

16. *Бахта Т.М.* Гидропривод и гидропневмоавтоматика. — М.: Машиностроение, 1972.

17. *Василенко Е.Г., Косовцов О.В., Павлов Б.И.* Динамика системы, насос-трубопровод-гидроустройства // Алгоритмы анализа и синтеза механизмов. — М.: Наука, 1977.

18. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / Под ред. В.Я. Хасилева, А.П. Меренкова. — М.: Энергия, 1978.

19. Авиационно-космические системы / Под ред. Г.Е. Лозинно-Лозинского и А.Г. Братухина. — М.: Изд-во МАИ, 1997.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОТ АВТОРОВ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ	9

ГЛАВА 1. ОРБИТАЛЬНЫЙ КОРАБЛЬ «БУРАН»:

СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ	12
1.1. Обоснование разработок	12
1.2. Составные части МРКК	13
1.2.1. МРКК и МТКС «Спейс-Шаттл»	16
1.3. Облик ОК «Буран»	17
Его конструкция и характеристики	17
1.3.1. Конструкция планера	20
1.4. Системы планера	23
1.4.1. Вспомогательная силовая установка	24
1.4.2. Гидрокомплекс ОК «Буран»	26
1.4.3. Система распределения и коммутации	39
1.4.4. Бортовой комплекс системы управления створками	40
1.4.5. Система наддува и вентиляции	41
1.4.6. Система электроэнергетики	42
1.4.7. Особенности создания системы управления	42
1.4.8. Система управления	43
1.4.9. Радиотехнические системы	46
1.4.10. Средства жизнеобеспечения	48
1.5. Программа полета ОК «Буран» и ее реализация	49

ГЛАВА 2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИРУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ГИДРОКОМПЛЕКСА ОК «БУРАН» 53 |

2.1. Обоснование, актуальность, цель и общие направления разработок	53
2.2. Принципы построения математических моделей элементов гидрокомплекса	56
2.2.1. Разработка модели насоса переменной подачи	56

2.2.2. Метод определения областей изменения параметров модели насоса переменной подачи	66
2.2.3. Идентификация параметров модели насоса переменной подачи по экспериментальным характеристикам	68
2.2.4. Алгоритм и блок-схема идентификации параметров модели насоса переменной подачи по экспериментальным характеристикам	76
2.2.5. Методы построения математических моделей ВСУ и пневмогидроаккумулятора	79
2.3. Математическая модель клапана переключения гидропитания рулевых систем	85
2.3.1. Общая постановка задачи и цель разработки	85
2.3.2. Математическая модель золотника, переключающего гидропитание с ГСА на ГСВ	91
2.4. Методы построения моделирующих алгоритмов системы ГС—КП	97
2.5. Алгоритм рабочего процесса клапана переключения гидропитания	101
2.6. Полная математическая модель системы ГС—КП	105
Выводы	112

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА ОК «БУРАН» С УЧЕТОМ АЛГОРИТМА ПРИОРИТЕТА РАБОТЫ

РУЛЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	114
3.1. Обоснование и практическая полезность предлагаемых разработок	114
3.2. Оценка основных параметров гидрокомплекса ОК «Буран» с учетом выбора алгоритма приоритета работы рулевых поверхностей	121
3.2.1. Формализация задачи оценки основных параметров гидрокомплекса	122
3.2.2. Математические модели элементов гидрокомплекса	124
3.3. Разработка расчетных схем	130

3.4. Инженерная методика оценки основных параметров гидрокомплекса при двух отказах по гидропитанию	140	
3.4.1. Блок-схема реализации инженерной методики оценки основных параметров гидрокомплекса	143	
3.5. Практическая реализация методики и алгоритма оценки основных параметров гидрокомплекса при двух отказах по гидропитанию	144	
3.5.1. Результаты теоретических исследований и их сравнение с экспериментом	151	
3.5.2. Выводы по результатам оценки основных параметров гидрокомплекса при двух отказах по гидропитанию	155	
3.6. Использование инженерной методики оценки основных параметров ГК при двух отказах по гидропитанию для задач синтеза основных параметров системы на основе соблюдения требуемого энергобаланса ..	156	
3.6.1. Блок-схема алгоритма синтеза основных параметров гидрокомплекса	159	
3.7. Разработка упрощенной модели гидрокомплекса для	оперативного решения задач динамики полета ОК «Буран»	161
3.7.1. Адекватность упрощенной математической модели для оперативного решения задач динамики полета ОК «Буран»	165	
3.7.2. Область применения упрощенной математической модели гидрокомплекса ОК «Буран»	171	
Выводы	172	
 ГЛАВА 4. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ И СИНТЕЗА ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ ГИДРОКОМПЛЕКСА ОК «БУРАН» В РЕЖИМЕ ГИДРООБОГРЕВА ПРИ ОРБИТАЛЬНОМ ПОЛЕТЕ		
4.1. Объект исследований	177	
4.1.1. Методы исследований и научная новизна	187	
4.1.2. Практическая полезность	188	

4.2. Оценка основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО по обеспечению теплового баланса ОК «Буран» на участке орбитального полета	189
4.2.1. Общая формализация задачи	189
4.2.2. Математические модели агрегатов и систем СГО	190
4.2.3. Обоснование выборо расчетных схем	192
4.2.4. Основные предположения и допущения	193
4.2.5. Методика инженерного расчета основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО	196
4.2.6. Общая математическая модель гидрокомплекса в режиме СГО	196
4.2.7. Алгоритм расчета основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО	197
4.3. Использование инженерной методики оценки основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО для задач исследований и доводки	203
4.3.1. Блок-схема алгоритма оценки основных параметров гидрокомплекса в режиме СГО	204
4.4. Практическое применение математических моделей и методов их реализации для задач синтеза, исследований и доводки систем и агрегатов гидрокомплекса в режиме СГО	206
4.4.1. Обоснования банка исходных данных	206
4.4.2. Основные варианты расчета	208
4.4.3. Результаты вычислений	209
4.4.4. Результаты исследований по варианту 2 (табл. 4.3)	212
4.4.5. Результаты исследований по варианту 1 (табл. 4.2)	217
4.4.6. Результаты исследований по варианту 3 (табл. 4.4)	220
4.5. Анализ результатов исследований	224
Выводы	227

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА СИСТЕМ И АГРЕГАТОВ ГИДРОКОМПЛЕКСА ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ «БУРАН»	230
5.1. Цели и задачи экспериментальной отработки	230
5.2. Автономные испытания агрегатов гидрокомплекса	235
5.2.1. Объем и последовательность проведения автономных испытаний пневмогидроаккумуляторов баков и гидросистем	235
5.2.2. Виды и методы проведения испытаний	240
5.2.3. Основные выводы по результатам автономных испытаний пневмогидроаккумуляторов баков и гидросистем	265
5.2.4. Заключение по результатам автономных испытаний пневмогидроаккумуляторов гидравлических баков и гидросистем гидрокомплекса ...	270
5.3. Комплексные испытания агрегатов и систем гидрокомплекса ОК «Буран»	271
5.3.1. Заключение по результатам комплексных испытаний систем гидрокомплекса ОК «Буран»	274
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	275
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	281

СОКОЛОВ Александр Александрович
БАШИЛОВ Александр Сергеевич

ГИДРОКОМПЛЕКС ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ «БУРАН»

Редактор М.С. Винниченко
Компьютерная верстка О.Г. Лавровой

Сдано в набор 11.01.06. Подписано в печать 7.03.06.
Бумага писчая. Формат 60х84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 16,74. Уч.-изд. л. 18,0. Тираж 500 экз.
Зак. 3311/1914. С. 426.

Издательство МАИ
«МАИ», Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
«МАИ», Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993