

Д.А.Полухин  
В.М.Орещенко  
В.А.Морозов

---

ОТРАБОТКА  
ПНЕВМОГИДРОСИСТЕМ  
ДВИГАТЕЛЬНЫХ  
УСТАНОВОК  
РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ  
И КОСМИЧЕСКИХ  
АППАРАТОВ  
С ЖРД

Д.А.Полухин  
В.М.Орещенко  
В.А.Морозов

ОТРАБОТКА  
ПНЕВМОГИДРОСИСТЕМ  
ДВИГАТЕЛЬНЫХ  
УСТАНОВОК  
РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ  
И КОСМИЧЕСКИХ  
АППАРАТОВ  
С ЖРД



Москва  
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
1987

ББК 39.62

П53

УДК 629.7.036.54—63(082)

Рецензент В. И. ПЕТРОВ

**Полухин Д. А. и др.**

П53 Оработка пневмогидросистем двигательных установок ракет-носителей и космических аппаратов с ЖРД/Д. А. Полухин, В. М. Орещенко, В. А. Морозов. — М.: Машиностроение, 1987. — 248 с., ил.

(В пер.): 1 р. 30 к.

В книге изложены основы устройства пневмогидравлических систем двигательных установок ракет-носителей и космических аппаратов с ЖРД, рассмотрены теоретические и организационно-методические принципы экспериментальной отработки этих систем, даны сведения об условиях их эксплуатации и лабораторно-стендовой базе, обеспечивающей воспроизведение или имитацию эксплуатационных факторов при испытаниях. Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся ракетно-космической техникой.

П 3607000000-139  
038(01)-87 139-87

**ББК 39.62**

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

**Дмитрий Алексеевич ПОЛУХИН**  
**Владимир Михайлович ОРЕЩЕНКО**  
**Владимир Александрович МОРОЗОВ**

## **ОТРАБОТКА ПНЕВМОГИДРОСИСТЕМ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ЖРД**

Редактор *В. И. Сухейли.*

Художественный редактор *В. В. Лебедев.*

Переплет художника *Р. А. Казакова.*

Технический редактор *Е. П. Смирнова.*

Корректоры *Н. Г. Богомолова и А. А. Снастина*

ИБ № 4553

Сдано в набор 07.07.86. Подписано в печать 26.09.86. Т-15444. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага кн. журн. импорт. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 15,5.  
Усл. кр.-отт. 15,5. Уч.-изд. л. 16,54. Тираж 1620 экз. Заказ 455. Цена 1 р. 30 к.

Ордена Трудового Красного знамени издательство «Машиностроение»,  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном Комитете СССР  
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, 101898, Москва, Центр.  
Хохловский пер., 7.

© Издательство «Машиностроение», 1987

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Двигательные установки (ДУ) с ЖРД современных ракет-носителей и космических аппаратов представляют собой сложный комплекс совместно функционирующих жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и пневмогидравлических систем (ПГС). ПГС обеспечивают хранение запасов компонентов топлива, а также подачу их к двигателям с расходами и давлениями, необходимыми для запуска и поддержания установившихся входных режимов.

При проектировании и отработке ПГС ДУ возникает множество проблем, связанных с длительной эксплуатацией в неблагоприятных условиях окружающей среды, применением в качестве компонентов топлива энергоэффективных, но токсичных горючих или высокоактивных окислителей с широким диапазоном рабочих температур, напряженными динамическими и тепловыми режимами работы, повышенными требованиями по надежности и эффективности.

Под термином отработка понимается комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению экспериментального определения показателей качества ПГС ДУ и соответствия ее характеристик техническому заданию (ТЗ) во всем диапазоне эксплуатационных условий.

Отработка ПГС ДУ — важнейший и трудоемкий этап создания современных ракет-носителей и космических аппаратов, включающий технические, экономические и организационные мероприятия. Она предусматривает большой объем различных видов испытаний, использование сложнейшего стендового и пускового наземного оборудования, применение новейшей измерительной и вычислительной техники, выпуск организующей, эксплуатационной и технологической документации, четкую организацию взаимодействия многих предприятий и организаций.

Современные положения отработки ПГС ДУ определяются необходимостью:

изготовления опытных образцов для всех этапов отработки по единой технической и технологической документации;

полной проверки работоспособности агрегатов, механизмов и систем во всем диапазоне изменения эксплуатационных факторов;

планирования всего процесса отработки и каждого ее этапа;

обеспечения нагружения объектов испытаний комплексом факторов, воздействующих при эксплуатации;

глубокого и всестороннего анализа результатов испытаний;

анализа информации по отказам на всех этапах отработки;

организации специальных испытаний на надежность, в том числе при предельных сочетаниях эксплуатационных факторов.

Способы отработки ПГС определяются во многом спецификой создаваемой ДУ: ее назначением и условиями эксплуатации; соотношением числа унифицированных агрегатов, механизмов, систем и числа новых конструкций; сроками создания. С учетом этих факторов принимаются решения о структуре этапов отработки ДУ, о числе агрегатов, механизмов, систем для каждого этапа, о соотношении видов испытаний и т. д.

В предлагаемой книге авторы знакомят читателей со структурой и устройством ПГС ДУ с ЖРД, с путями и методами решения указанных выше проблем отработки.

Авторы просят читателей присылать свои отзывы и замечания по адресу: 107076, Москва, Б-76, Стромьинский пер., 4, издательство «Машиностроение».

### 1.1. СОСТАВ, ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА

Под ПГС питания понимают совокупность пневмогидравлических элементов, включающих топливные баки, аккумуляторы давления, демпфирующие устройства, агрегаты автоматики и регулирования, а также расходные магистрали, устройства и системы, обеспечивающие заправку баков компонентами топлива, зарядку газом аккумуляторов давления, питание демпфирующих устройств, хранение рабочих продуктов без нарушения их эксплуатационных характеристик, предстартовый и основной наддув газовых подушек баков, непрерывную подачу топлива с заданными расходами, давлениями и температурами на входы в двигатели при запуске и на различных режимах; слив топлива из баков, сброс газа из аккумуляторов и баков, а также функционирование агрегатов автоматики и регулирования в соответствии с циклограммой работы и программой полета.

Состав ПГС существенно зависит от назначения ДУ, от типа применяемого ЖРД. ЖРД, предназначенные для установки на ракеты-носители, имеют узкий круг задач, связанных в основном с разгоном и стабилизацией на активном участке полета. Здесь наиболее часто применяются ЖРД с однократным запуском и насосной системой подачи компонентов топлива. В их состав входят камеры сгорания, турбонасосные агрегаты (ТНА), газогенераторы привода ТНА и наддува топливных баков, регуляторы расхода и давления, различные пневмогидравлические или пиротехнические клапаны, обеспечивающие запуск и выключение ЖРД.

Очевидно, что для изучения проблем, связанных с созданием и отработкой ПГС, необходимо иметь четкое представление не только о функциональном составе и назначении элементов, входящих в нее, но и об основных требованиях, предъявляемых к этим элементам, а также об их параметрах.

В ПГС ДУ ракет-носителей и космических аппаратов входят топливная система, система заправки, система наддува, система ограничения давления, система управления состоянием топлива, а также вспомогательные системы. Каждая из этих комплексных систем, как правило, состоит из нескольких более

простых функциональных частей, которые можно определить с классификационной точки зрения как подсистемы комплексных систем.

Топливная система — комплекс пневмогидравлических устройств (в том числе топливных баков), обеспечивающих хранение топлива, а также питание компонентами топлива ЖРД при старте и в полете.

Топливная система включает следующие подсистемы:

расходные магистрали — совокупность трубопроводов, узлов и агрегатов, обеспечивающих транспортировку компонентов топлива в ЖРД;

заборные устройства — совокупность внутрибаковых устройств, обеспечивающих организованную подачу компонентов из топливных емкостей с минимальными остатками;

подсистемы управления положением топлива и разделения жидкой и газовой сред — совокупность устройств, обеспечивающих непрерывную подачу (сплошность потока жидкого топлива в ЖРД);

подсистемы перелива — совокупность устройств, обеспечивающих перекачку компонентов топлива из одной емкости в другую;

подсистемы демпфирования колебаний уровня топлива — совокупность устройств и приспособлений, позволяющих уменьшить амплитуды колебаний топлива в баках и магистралях;

подсистемы питания — совокупность устройств, обеспечивающих питание ЖРД компонентами топлива из небортовых емкостей.

Система заправки — комплекс устройств, обеспечивающих заправку (слив) и зарядку (сброс) емкостей топливом и газом.

Система заправки может состоять из следующих подсистем:

заправки топливом — совокупности устройств, обеспечивающих заправку и насыщение газом, дозаправку компонентами топлива, их слив и повторную заправку;

зарядки газом — совокупности устройств, обеспечивающих зарядку газом и его сброс;

дренажа — совокупности устройств, обеспечивающих дренаж емкостей при заправке.

Система наддува — комплекс устройств, обеспечивающих необходимые давления в топливных баках.

Система наддува может состоять из следующих подсистем:

предпускового наддува — совокупности устройств, обеспечивающих наддув (поднаддув) топливных баков до выхода на режим системы основного наддува;

основного наддува — совокупности бортовых устройств, обеспечивающих наддув топливных баков при работающих двигателях.

Система ограничения давления — комплекс устройств, предохраняющих ПГС от разрушения и разгерметизации в процессе эксплуатации.

Такая система может состоять из следующих подсистем: обеспечения давления в незаправленных топливных баках в требуемых пределах при хранении и транспортировке — совокупности устройств, обеспечивающих допустимый перепад давления между топливными баками и окружающей средой;

обеспечения давления в заправленных топливных баках в требуемых пределах при хранении — совокупности устройств, обеспечивающих необходимый диапазон давления в заправленных топливных баках в процессе хранения;

предохранения топливных баков при запуске ЖРД и в полете — совокупности устройств, обеспечивающих ограничение давлений в баках при наддуве.

Система управления состоянием топлива — комплекс устройств, обеспечивающих требуемые характеристики и параметры компонентов топлива при эксплуатации ПГС.

Система управления состоянием топлива может состоять из следующих подсистем:

терморегулирования — совокупности устройств, обеспечивающих поддержание заданных значений температур топлива в процессе эксплуатации;

контроля параметров рабочей среды (в баках) — совокупности устройств, обеспечивающих измерение характеристик рабочего тела в ПГС и выдачу соответствующих сигналов в системы регулирования ЖРД;

изменения агрегатного состояния топлива — совокупности устройств, обеспечивающих перевод компонентов топлива из разных агрегатных состояний в жидкое с требуемыми характеристиками, необходимыми для нормальной работы двигателей.

К вспомогательным системам относятся системы пневмоуправления агрегатами, продувки, аварийного слива, нейтрализации.

В зависимости от назначения ракеты и от вида старта ПГС располагаются как на борту, так и вне борта.

Вне борта располагаются в основном системы 1-х ракетных блоков (система подпитки топливом двигателей 1-го ракетного блока и т. д.), а также системы продувки, дренажа и предпускового наддува всех ракетных блоков.

Внебортовые системы до старта соединены с бортовыми системами герметичными соединениями, которые при старте расстыковываются.

При оценке ПГС в качестве основных обычно рассматриваются следующие параметры:

давление на входе в двигатели;  
температура компонентов топлива на входе в двигатели;  
массовый секундный расход компонентов топлива двигателями;

концентрация растворенного газа и масса (объем) свободного газа на входе в двигатели;

концентрация растворенного газа в компонентах топлива в блоках;

масса рабочего запаса компонентов топлива;

масса неиспользуемых остатков компонентов топлива;

потеря давления в системах подачи;

давления в газовых объемах баков;

температуры в газовых объемах баков;

свободные газовые объемы;

характеристики надежности ПГС.

Особенности современных ПГС ДУ обусловлены общей тенденцией к повышению надежности ракет-носителей и космических аппаратов, стремлением к получению высоких энергетических, массовых и эксплуатационных характеристик при использовании достижений современной технологии. Эта тенденция выразилась в применении энергетически эффективных пар компонентов топлива (кислород+водород, четырехокись азота+несимметричный диметилгидразин или его производные), в использовании в ДУ ракет-носителей ЖРД замкнутой схемы, причем обычно в многокамерном исполнении с высокими давлениями в камерах сгорания и широким диапазоном регулирования по тяге; в использовании в ДУ космических аппаратов двухкомпонентных ЖРД с вытеснительной системой подачи, улучшенными динамическими характеристиками (в части быстродействия, стабильности и эффективности выдачи кратковременных импульсов тяги), высокой циклопрочностью и герметичностью агрегатов.

Увеличение частоты вращения ТНА и необходимость обеспечения кавитационных запасов при ограниченных давлениях в баках обусловили применение бустерных преднасосов. Для ПГС ДУ ракет-носителей некоторых типов характерно применение насыщенных газом компонентов топлива, обеспечивающее автоматическое поддержание заданного диапазона давлений в заправленных баках благодаря процессам конвективной диффузии газов при изменении условий хранения. Отличительной особенностью современных ДУ является также наличие эффективных в отношении массовых характеристик систем высокотемпературного наддува баков или газобаллонных систем с хранением источников энергии в условиях низких (криогенных) температур. Значительно возросли требования к точности заправки баков компонентами топлива, а также к эффективности заборных устройств. Широко применяется резервирование и дублирование отдельных систем и агрегатов.

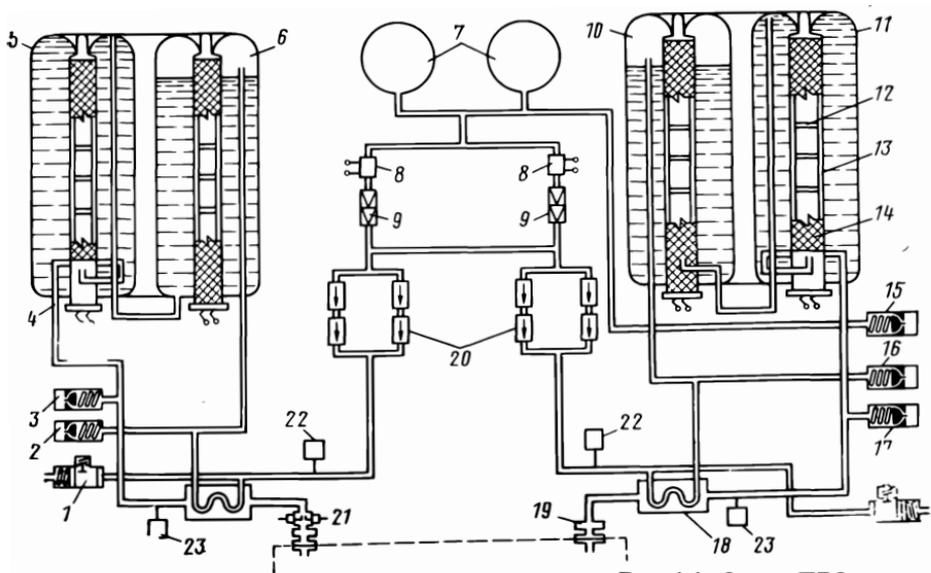


Рис. 1.1. Схема ПГС маршевой ДУ космического корабля «Аполлон»:

1 — предохранительный клапан с регулируемой прорывной мембраной в магистрали гелия; 2 — быстроразъемное соединение дренажа окислителя; 3 — быстроразъемное соединение заправки и слива окислителя; 4 — заборное устройство; 5 — расходный бак окислителя; 6, 10 — баки хранения горючего; 7 — баллон с гелием; 8 — электропневмоклапан подачи гелия; 9 — блок регулятора расхода гелия; 11 — расходный бак горючего; 12 — точечный первичный преобразователь уровня; 13 — емкостный первичный преобразователь уровня; 14 — успокоитель; 15 — быстроразъемное соединение заправки гелия; 16 — быстроразъемное соединение дренажа горючего; 17 — быстроразъемное соединение заправки и слива горючего; 18 — теплообменник; 19 — сифлон; 20 — обратный клапан; 21 — дроссель системы опорожнения баков (СОБ); 22 — первичный преобразователь давления; 23 — первичный преобразователь температуры

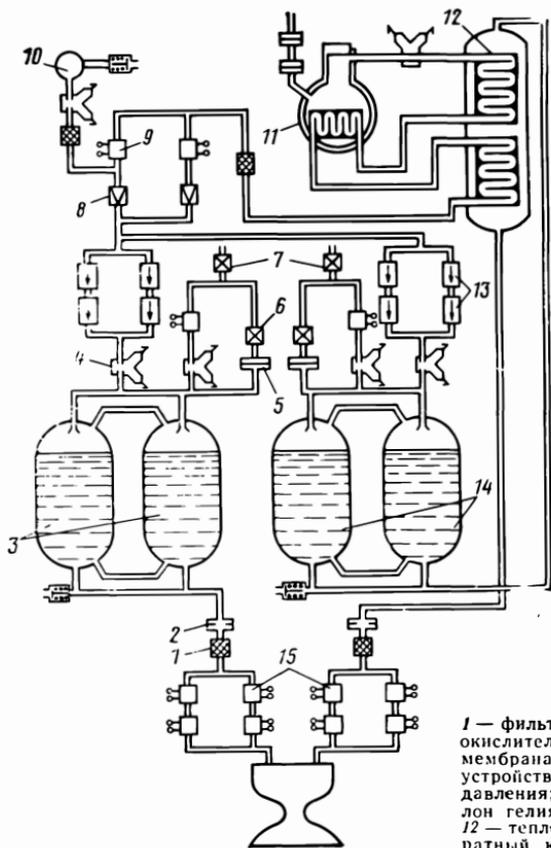


Рис. 1.2. Схема ПГС посадочной ДУ космического корабля «Аполлон»:

1 — фильтр; 2 — настроечная шайба; 3 — бак окислителя; 4 — пироклапан; 5 — прорывная мембрана; 6 — предохранительный клапан; 7 — устройство сброса давления; 8 — регулятор давления; 9 — электропневмоклапан; 10 — баллон гелия; 11 — теплообменник гелий — гелий; 12 — теплообменник горючее — гелий; 13 — обратный клапан; 14 — бак горючего; 15 — топливные клапаны

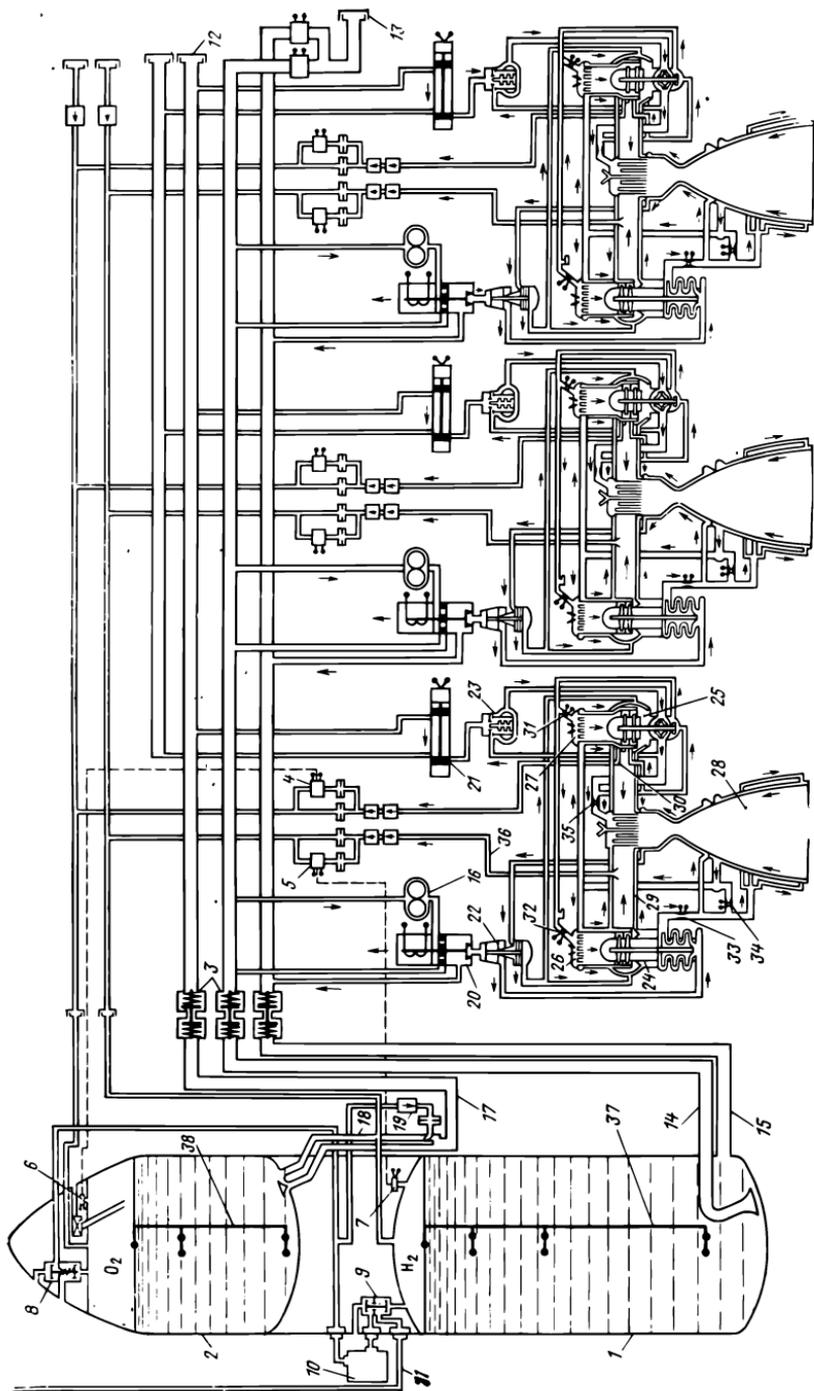


Рис. 1.3. Схема ПГС основной ДУ многогазового транспортного космического корабля «Спейс Шаттл»:

1 — бак горючего; 2 — бак окислителя; 3 — разъем баков ДУ; 4 — клапан управления наддувом бака окислителя; 5 — клапан управления наддувом бака горючего; 6 — первичный преобразователь управления наддувом бака окислителя; 7 — первичный преобразователь управления наддувом бака горючего; 8 — дренажно-предохранительный клапан бака окислителя; 9 — дренажно-предохранительный клапан бака горючего; 10 — блок подачи гелия; 11 — патрубок дренажа водорода; 12 — горловина заправки жидкого водорода; 13 — горловина заправки жидкого кислорода; 14 — магистраль питания жидким водородом; 15 — рециркуляционная магистраль жидкого кислорода; 16 — рециркуляционная магистраль жидкого кислорода; 17 — система питания жидким водородом; 18 — рециркуляционная магистраль жидкого кислорода; 19 — обратный клапан подачи гелия в систему рециркуляции жидкого кислорода; 20 — пусковой клапан горючего; 21 — пусковой клапан окислителя; 22 — преднасос горючего; 23 — преднасос окислителя; 24 — ТНА сторания; 25 — ТНА окислителя; 26 — газогенератор ТНА горючего; 27 — газогенератор ТНА окислителя; 28 — камера сгорания; 29 — рубашка охлаждения магистралей теплообменник наддува бака окислителя; 30 — регуляторы подачи окислителя; 31, 32 — регуляторы подачи окислителя; 33, 34 — управляющие клапаны горючего; 35 — главный клапан подачи окислителя; 36 — магистраль наддува бака горючего; 37 — первичный преобразователь уровня окислителя; 38 — первичный преобразователь уровня горючего; 39 —

Практически перечисленные выше особенности ПГС ДУ ракет-носителей и космических аппаратов можно выявить, рассмотрев несколько конкретных ПГС.

На рис. 1.1 и 1.2 представлены схемы ПГС маршевой и посадочной ДУ космического корабля «Аполлон». В этих ДУ используется в качестве окислителя азотный тетраоксид  $N_2O_4$ , а в качестве горючего смесь (1:1 по массе) безводного гидразина с несимметричным диметилгидразином. Соотношение компонентов — 1:6.

В маршевой ДУ (см. рис. 1.1) гелий для наддува баков хранится при температуре окружающей среды под высоким давлением в двух сферических баллонах 7. Через нормально закрытые электропневмоклапаны 8, блоки 9 регуляторов расхода, блок обратных клапанов 20 и теплообменники 18 гелий поступает в топливные баки 6 и 10. Из этих баков компоненты поступают в расходные баки 5 и 11, а затем через теплообменники — в двигатель. Система опорожнения баков (СОБ), в которую входят первичные преобразователи 12 и 13, установленные внутри баков, измеряет количество оставшихся в баках компонентов топлива и определяет величину рассогласования. Одновременность выработки компонентов из баков регулируется дросселем 21 СОБ. В расходных баках имеются заборные устройства с внутренним и наружным сетчатыми успокоителями 14. Они предназначены для предотвращения попадания пузырей гелия в топливные магистрали в период запуска двигателя, когда возможны значительные колебания уровня компонентов.

Для наддува баков посадочной ДУ (см. рис. 1.2) используется газообразный гелий, который хранится в криогенной системе. Теплообменники горючее — гелий 12 и гелий — гелий 11 служат для обеспечения необходимых давлений и температур в баке гелия и температур в магистралях наддува топливных баков. Топливо содержится в попарно закольцованных баках 3 и 14. Как и у маршевой ДУ, топливные клапаны 15 двигателя представляют блок последовательно

и параллельно соединенных шаровых клапанов. На рис. 1.3 представлена упрощенная схема ПГС маршевой ДУ II ступени многофазового транспортного космического корабля (МТКК) «Спейс Шаттл».

Основные характеристики ДУ:

1. Компоненты топлива:

горючее — жидкий водород (температура заправки — 253°C, рабочий запас 102 000 кг); окислитель — жидкий кислород (—183°C, рабочий запас — 60 400 кг).

2. Три однокамерных ЖРД с номинальной тягой каждого  $1,667 \cdot 10^6$  Н на уровне моря и  $2,09 \cdot 10^6$  Н в вакууме. Удельная тяга 45 515 Н·с/кг. Давление в камере сгорания  $235,4 \cdot 10^5$  Па. Максимальная продолжительность непрерывной работы 480 с. Общий ресурс — 27 000 с.

3. Номинальное давление горючего на входе в двигатель  $2,06 \cdot 10^5$  Па при массовом секундном расходе 66,7 кг/с. Номинальное давление окислителя на входе в двигатель —  $6,86 \cdot 10^5$  Па при массовом секундном расходе 382,8 кг/с.

Заправка, слив жидких кислорода и водорода осуществляется через системы и горловины 12 и 13 космического корабля. Дренаж баков до запуска обеспечивается дренажно-предохранительными клапанами 8 и 9, которые в полете предотвращают повышения давления в баках выше предельно допустимых значений. До старта клапаны 8 и 9 управляются гелием, поступающим от наземного комплекса. От этого же комплекса через блок 10 поступает гелий для предпускового наддува топливных баков. После запуска наддув обеспечивается газифицированными компонентами от систем двигателей. При этом контроль и управление наддувом осуществляется первичными преобразователями управления 6, 7 и клапанами 4, 5. В процессе заправки и предстартовой подготовки вскипание кислорода в магистралях питания предотвращается благодаря его рециркуляции между входами в двигатели и баком. Подаваемый из блока 10 через клапан 19 гелий интенсифицирует процесс рециркуляции кислорода. Рециркуляция водорода по магистралям 14, 15 происходит с помощью рециркуляционных насосов 16, имеющих на борту космического корабля. Отсечка маршевых двигателей в полете осуществляется или по команде с космического корабля, или от первичных преобразователей уровня 37, 38 в топливных баках. При отделении блока подвесных баков от корабля срабатывают разъемы 3 трубопроводов наддува и питания. Выключенные двигатели продолжают полет в составе космического корабля.

ДУ включает в себя три ЖРД, выполненных по замкнутой схеме, с высокой степенью дросселирования (до 50%). В состав каждого ЖРД входит камера сгорания 28 и два преднасоса (окислителя 23 и горючего 22). ТНА окислителя 25 и горючего 24 приводятся от собственных газогенераторов 27 и 26, работающих с избытком горючего. Камера сгорания и высотное сопло охлаждаются жидким водородом через два независимых

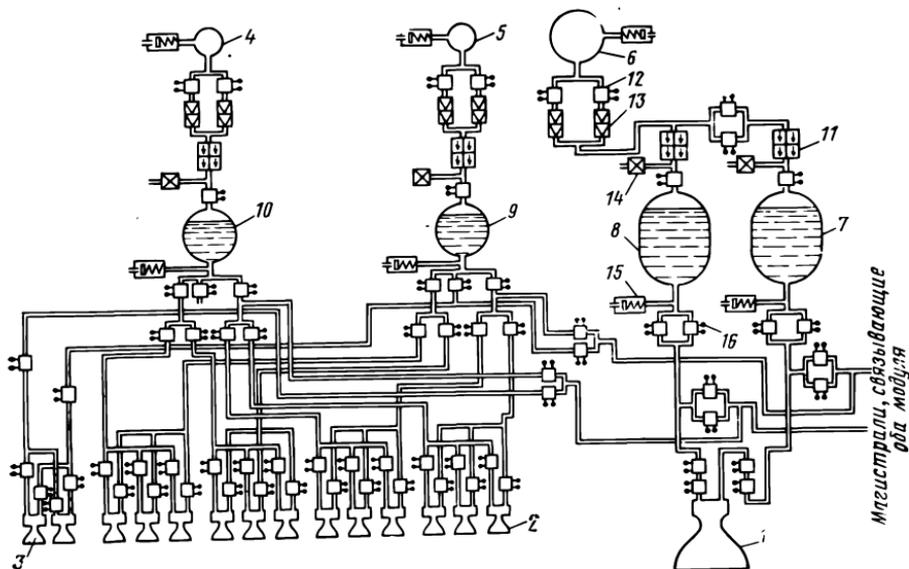


Рис. 1.4. Схема ПГС ДУ маневрирования и управления ориентацией МТКК «Спейс Шаттл»:

1 — ЖРД орбитального маневрирования; 2 — ЖРД реактивного управления; 3 — верньерный ЖРД; 4, 5, 6 — аккумуляторы давления; 7 — бак окислителя подсистемы орбитального маневрирования; 8 — бак горючего подсистемы орбитального маневрирования; 9 — бак окислителя подсистемы реактивного управления; 10 — бак горючего подсистемы реактивного управления; 11 — блок обратных клапанов; 12 — клапан системы наддува; 13 — блок регуляторов давления системы наддува; 14 — дренажный клапан; 15 — клапан заправки; 16 — клапан системы питания

контура. Для наддува бака окислителя используется кислород, газифицированный в теплообменнике 30. На наддув баков горючего отбирается газ из газогенератора 26. Охлаждение трубопроводов горячего газа от ТНА до камеры сгорания осуществляется водородом, который по рубашке 29 также поступает в камеру сгорания.

Схема ПГС ДУ маневрирования и управления ориентацией МТКК «Спейс Шаттл» показана на рис. 1.4. ДУ работает на самовоспламеняющихся компонентах топлива: монометилгидразине и четырехокиси азота. В ее состав входят два связанных топливными коммуникациями автономных модуля, расположенных в хвостовой части фюзеляжа МТКК (на рис. 1.4 изображена схема одного из модулей). Каждый модуль имеет массу 1820 кг и содержит до 6800 кг топлива. Баки обеих двигательных подсистем одного модуля тандемно расположены в контейнере из композиционного материала. Объемы топливных баков 7 и 8 подсистемы орбитального маневрирования составляют по 2,5 м<sup>3</sup> каждый, а баков 9, 10 подсистемы реактивного управления — по 0,50 м<sup>3</sup>. ЖРД 1 орбитального маневрирования с тягой 26,7·10<sup>3</sup> Н и давлением в камере сгорания

0,85 МПа установлен на карданном подвесе и имеет регенеративное охлаждение. Каждый модуль подсистемы реактивного управления имеет 12 основных ЖРД тягой  $3,83 \cdot 10^3$  Н и 2 верньерных ЖРД 3 тягой по 110 Н. Система подачи топлива к ЖРД вытеснительная. Она работает от гелиевых аккумуляторов 4, 5, 6 давления объемом 0,048 м<sup>3</sup>, 0,048 м<sup>3</sup>, 0,48 м<sup>3</sup> соответственно. Давление в топливных баках 1,73 МПа с отклонением не более 11 кПа.

Подача компонентов топлива из баков осуществляется с помощью системы сетчатых заборников, принцип работы которых основан на использовании эффекта поверхностного натяжения.

Всем рассмотренным выше ПГС ДУ космических аппаратов свойственно широкое применение резервирования и дублирования агрегатов управления и систем питания. Запараллеливание клапанов, регуляторов и обратных клапанов в системах наддува направлено в основном на парирование отказов из-за невключения, а последовательная установка клапанов в системе питания — на парирование отказов из-за невключения агрегатов. В каждом из таких решений есть свои положительные и негативные стороны, а их выбор диктуется соображениями обеспечения максимальной надежности ДУ в конкретных ситуациях; без включения системы наддува не обеспечивается работа двигателей, а невключение двигателей приводит к срыву программы полета.

Технические требования к ПГС обусловлены функциональными особенностями современных ДУ.

ПГС должны отвечать следующим основным требованиям: иметь минимальную массу при обеспечении заданной надежности функционирования;

обеспечивать размещение максимально возможного числа агрегатов и систем вне борта;

иметь минимально необходимое число разъемных соединений и обеспечивать требуемую герметичность;

исключать возможность контакта компонентов топлива друг с другом;

иметь достаточную прочность и минимальную стоимость при оптимальной массе;

обладать необходимой коррозионной стойкостью и не вызывать изменения состава компонентов топлива;

иметь минимально возможные гидравлические сопротивления при оптимальной массе;

должны быть технологичны в изготовлении и при испытаниях на герметичность, функционирование и т. п.;

состоять по возможности из недефицитных материалов, соответствовать действующим стандартам и нормам;

быть простыми и надежными в эксплуатации;

обладать вибропрочностью при эксплуатации;

иметь минимально возможное число пневмо- и гидросвязей с внебортовыми системами, исключать возможность неправильного подключения к ним в процессе выполнения технологических операций (в том числе при сборке на заводе-изготовителе и при эксплуатации);

обеспечивать максимально возможный полный слив компонентов топлива и возможность проведения нейтрализации и повторной заправки топливом;

обеспечивать автоматические дистанционные проверки различных подсистем на заводе-изготовителе и во время эксплуатации;

исключать возможность самопроизвольного запуска двигателей в процессе эксплуатации;

обеспечивать максимальную автоматизацию управления в процессе подготовки к старту и при старте;

иметь минимально возможные сроки и материальные затраты на изготовление.

В зависимости от назначения и вида старта к ПГС предъявляются специальные требования:

минимально возможное время предстартовых операций;

минимально необходимое число операций контроля во время хранения и эксплуатации;

резервирование наиболее ответственных узлов и агрегатов;

обеспечение многократного включения двигателей и обеспечение работы в условиях невесомости и знакопеременных перегрузок.

## **1.2. ТОПЛИВНЫЕ СИСТЕМЫ, ЗАБОРНЫЕ УСТРОЙСТВА, УСТРОЙСТВА ЗАПРАВКИ**

**Топливные системы.** Топливные баки как элементы ПГС являются устройствами, вокруг которых объединяются практически все другие системы ДУ. Они должны удовлетворять ряду требований, обусловленных особенностями конструкции и эксплуатации космического аппарата, а также условиями работы ПГС ДУ.

Так, необходимость обеспечения центровки ракеты и создания большого напора на входе в насосы окислителя, чем в насосы горючего, является на многих ракетах аргументом в пользу расположения баков окислителя выше баков горючего. На выбор конструкции топливных баков существенное влияние оказывают свойства применяемых компонентов топлива, их температура, сроки хранения в баках, уровень давления в баках.

Принципиальным моментом при проектировании баков является выбор оптимального соотношения между объемом заправленного топлива и объемом газовых подушек. Объем за-

правляемого в баки топлива складывается из следующих составных частей:

1. Рабочего запаса — объема компонентов, потребного для работы двигателей на основном и переходных режимах. Здесь переходный режим — период работы двигателей от момента отрыва ракеты от стартового стола до выхода двигателей на 90...97% номинальной тяги.

2. Гарантийного запаса — объема топлива, необходимого для компенсации увеличения расхода на основном режиме при отклонении параметров ракеты и двигателей (массы, тяги, соотношения объемов компонентов) от номинальных значений. Обычно гарантийный запас не превышает 3% от рабочего.

3. Объема топлива, необходимого для заполнения и запуска двигателей до отрыва ракеты от стартового стола.

4. Объема топлива, остающегося в двигателях после выключения.

5. Остатков топлива в баках.

6. Остатков топлива в магистралях питания для обеспечения бескавитационной работы насосов ТНА.

7. Объема топлива, необходимого для наддува баков.

8. Остатков одного из компонентов из-за полной выработки другого по причине нарушения их расчетного соотношения.

9. Объем топлива, необходимого для охлаждения двигателей и магистралей перед запуском (в случае применения криогенных компонентов).

Следует отметить, что остатки топлива в баках состоят: из гидравлических остатков, о которых будет сказано ниже, и тепловых остатков.

В результате теплообмена газа, используемого для наддува, и аэродинамического нагрева баков возникает свободное конвективное движение топлива, которое образует у свободной поверхности слой с повышенной температурой по сравнению с температурой всей остальной жидкости. Перегретый слой не может быть подан в двигатель из-за опасности возникновения кавитации. Часть топлива, которая к концу работы ДУ имеет температуру выше допустимой для нормальной работы насоса при заданном давлении на входе, носит название тепловых остатков.

Сумма всех перечисленных выше составляющих объема заправляемого топлива и дает расчетную массовую дозу заправки  $G_{\text{запр}}$ . Объем заправляемого в бак топлива  $V_{\text{запр}}$  определяется как

$$V_{\text{запр}} = G_{\text{запр}} / \rho + \Delta V_{\text{запр}},$$

где  $\rho$  — плотность топлива;  $\Delta V_{\text{запр}}$  — погрешность заправки, которая включает:

погрешность изготовления топливных баков (если не производится тарировка баков после изготовления);

погрешность измерения плотности и температуры компонентов при заправке;

погрешности заправочного оборудования, связанные с быстрым действием агрегатов управления заправкой, точностными характеристиками измерителя заправляемой дозы и т. п.;

погрешности определения поправок на изменение объема баков при изменении температуры стенок, а также из-за деформации баков за счет появления гидростатического давления при заправке.

При расчете максимального объема необходимо брать минимальное значение плотности компонента топлива при максимальной температуре заправки, при расчете минимального объема — максимальное значение плотности при минимальной температуре.

Полный объем топливного бака  $V_{\text{полн}}$  определяется максимальным объемом заправленного топлива  $V_{\text{запр max}}$  и минимальным газовым объемом в верхней части бака  $V_{\text{п min}}$  (объемом подушки):

$$V_{\text{полн}} = V_{\text{запр max}} + V_{\text{п min}}$$

При расчете объема бака при номинальных условиях необходимо учитывать, что в эксплуатационных условиях бак изменяет объем из-за температурных деформаций и из-за растяжения от внутреннего давления и других силовых воздействий соответственно на величины  $\Delta V_T$  и  $\Delta V_{\text{деф}}$ :

$$\Delta V_{\text{полн}}^T = V_{\text{ном}} + \Delta V_T + \Delta V_{\text{деф}}$$

где  $V_{\text{ном}}$  — объем бака при номинальной температуре.

Изменение объема бака при изменении температуры определяется из выражения

$$\Delta V_T \approx \alpha V_{\text{ном}} (T_{\text{ном}} - T_{\text{экс пл}}),$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала бака;  $T_{\text{ном}}$  — номинальная температура стенок бака;  $T_{\text{экс пл}}$  — температура стенок бака при эксплуатации.

Для большей точности необходимо учитывать изменение коэффициента линейного расширения в зависимости от температуры. Изменение объема бака от давления и других сил в эксплуатационных условиях вычисляется по известному модулю упругости материала бака и рассчитанным деформациям от осевых, меридианальных и окружных напряжений в заправленном баке.

Вопрос о выборе объема газовой подушки довольно сложен. Объем подушки должен быть минимальным, так как увеличение его ухудшает массовые характеристики топливного бака из-за увеличения неиспользуемого объема. Но уменьшение объема подушки ограничивается рядом факторов.

Необходимость иметь газовую подушку в баке диктуется следующими требованиями:

обеспечить свободный объем в случае ошибки в выдаче заправочной дозы компонента топлива наземными средствами заправки;

компенсировать расширение топлива при увеличении температуры окружающей среды при хранении и при аэродинамическом нагреве у верхних ступеней ракет в полете;

обеспечить объем в случае выделения растворенных в топливе газов и продуктов разложения топлива;

обеспечить в заданных диапазонах давление в баке при колебаниях температуры окружающей среды;

поддерживать определенное давление в свободной газовой подушке во время запуска двигателя;

компенсировать возможную утечку газа через предохранительный клапан из баков верхних ступеней ракеты во время полета. Эта утечка может быть существенна на резонансных режимах предохранительных клапанов.

В некоторых случаях необходимость подушки определяется условиями размещения газораспределителя наддува, дренажно-предохранительных устройств, первичных преобразователей системы контроля заправки и выработки топлива и др. [30].

Объем подушки в баках ракет может изменяться в широком диапазоне (1 ... 5% от полного объема бака) в зависимости от требований, предъявляемых к ракете.

Объем подушки для обеспечения заданных техническими условиями максимального  $p_{\sigma \max}$  и минимального  $p_{\sigma \min}$  давлений в баках в эксплуатационном диапазоне температур  $T$  без учета растворимости газов и разложения компонента топлива определяется давлением в свободной подушке, которое складывается из суммы парциальных давлений газа для наддува после заправки (воздуха, азота, гелия и др.)  $p_r$  и давления насыщенных паров компонента топлива  $p_s$ :

$$p_{\sigma} = p_r + p_s.$$

Давление насыщенных паров компонента топлива зависит только от температуры топлива:

$$\lg p_s = b_1 + b_2/T + b_3 \lg T,$$

где  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  — коэффициенты.

Давление газа

$$p_r = G_0 B T / V_{п}^T,$$

где  $G_0 = p_{r0} V_{п0} / (R T_0)$  — начальная масса газа в газовой свободной подушке (обычно полагают, что  $G_0 = \text{const}$ , так как бак считается герметичным, индекс «0» — характеризует начальное состояние);  $B$  — универсальная постоянная газа, используемого

для наддува свободной подушки после заправки.

Объем газовой подушки

$$V_{п}^T = V_{полн}^T - V_{запр}^T = V_{ном} [1 + 3\alpha (T_{ном} - T)] + \Delta V_{леф} - V_{запр}^T.$$

Верхний индекс « $T$ » характеризует состояние параметра при текущей температуре  $T$ .

Объем заправляемого топлива

$$V_{запр}^T = G_{запр} / \rho + \Delta V_{запр}.$$

В первом приближении  $\Delta V_{запр}$  можно считать независимой от температуры компонента.

При малом изменении плотности, зависящей от сортности компонента,

$$V_{запр}^T = V_{запр}^{T_0} [1 + \beta_m (T - T_0)],$$

где  $\beta_m$  — коэффициент объемного расширения компонента топлива;  $V_{запр}^{T_0}$  — объем топлива, заправленного в бак при температуре  $T_0$ .

При хранении заправленного изделия для обеспечения автоматического поддержания давления в заданных пределах иногда используют предварительное насыщение компонентов топлива газом до равновесных концентраций, определяемых заданными давлениями и температурами.

В этом случае при определении объемов газовой подушки, наряду с приведенными уравнениями, необходимо учитывать уравнение динамического массообмена газа подушки с компонентом топлива:

$$\frac{dG_0}{dt} = \beta F \Delta c,$$

где  $\beta$  — коэффициент массообмена, зависящий от числа Релея  $Ra$ ;  $F$  — площадь поверхности массообмена (зеркала топлива в баке);  $\Delta c$  — изменение средней концентрации растворенного газа;  $t$  — время.

Применение насыщенных компонентов позволяет уменьшить объем газовой подушки при том же заданном диапазоне баковых давлений.

Перед запуском двигателя бак наддувается до определенного начального давления  $p_{зап}$  от наземных систем. В начальный момент запуска двигателя начинается расход компонента из бака и давление в подушке может резко снизиться из-за задержки подачи газа в подушку. Это свойственно как системам газобаллонного бортового наддува, где задержка определяется срабатыванием агрегатов автоматики и временем транспортировки газа, так в еще большей мере системам с газогенераторным наддувом, у которых эта задержка может составлять несколько секунд. Величина снижения зависит от началь-

ного объема подушки и расхода компонента из бака до начала работы основной системы наддува. Снижение давления перед насосами ТНА может привести к срыву запуска двигателя. Это предотвращается выбором подушки соответствующего объема и некоторым превышением начального давления в баке над пусковым давлением.

Иногда отмеченный выше эффект понижения давления при запуске компенсируют путем наддува газовой подушки от специальной системы на участке от начала запуска двигателя до выхода на режим основной газогенераторной системы наддува.

Параметры дренажно-предохранительной системы также влияют на объем начальной газовой подушки в баке. Давление газа в магистрали наддува обычно существенно больше давления в баке. Инерционность дренажно-предохранительных устройств и трение в их механических системах могут быть значительными. Поэтому при малых подушках максимальное давление может приближаться к давлению в системе наддува.

При расчете объема заправляемого топлива при заданном объеме бака определение минимального потребного объема газовой подушки является ответственной операцией. При его выборе обычно учитывают все факторы: погрешность изготовления баков по объему, ошибку в выдаче дозы при заправке, изменение температуры компонентов при заправке и хранении, изменение плотности компонента в зависимости от температуры и сортности, температурные и силовые деформации бака и др.

**Заборные устройства.** Одной из характерных особенностей работы ДУ ракет-носителей является запуск двигателей на каждом блоке при наличии положительных перегрузок. Эти перегрузки обеспечивают постоянный контакт заборных устройств в баках с компонентами топлива и вместе с этим бесперебойную их подачу к двигателям. Заборные устройства являются одними из основных устройств топливных систем ракет-носителей.

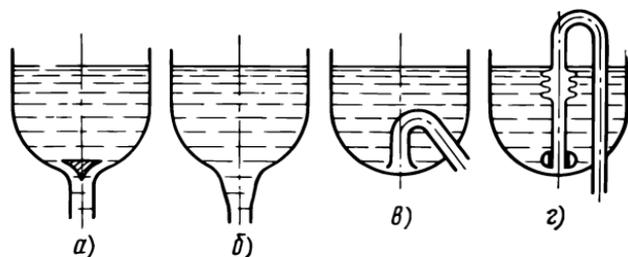
Основной функциональной задачей заборных устройств ракет-носителей является сведение к минимуму воронкообразования при окончании выработки компонента топлива из бака, т. е. обеспечение минимальных остатков топлива, а также исключение захвата газа и механических загрязнений, способных привести к срыву работы ДУ.

На ракетах-носителях, которые не имеют значительных боковых инерциальных сил, обычно применяются заборные устройства в виде сливных отверстий в нижних днищах баков с различными воронкогасящими устройствами и противопровальными тарелками, а также сифонные заборные устройства.

На рис. 1.5 приведены схемы некоторых наиболее распространенных заборных устройств, применяемых для обеспечения бесперебойной подачи компонентов топлива к двигателю.

Рис. 1.5. Схемы заборных устройств топливных баков:

*a* — с тарелью; *б* — беспровального; *в* — конического; *г* — сифонного



Компонент топлива, который остается в топливном баке и в магистрали питания в момент нарушения сплошности потока на входе в насос двигателя, называют гидравлическим невыработываемым остатком топлива.

Нарушение сплошности потока может являться следствием следующих трех основных процессов в заборных устройствах: кавитации, воронкообразования, динамического понижения уровня свободной поверхности.

Увеличение скорости потока в заборном устройстве бака приводит к уменьшению статического давления. Кавитация наступает тогда, когда статическое давление в потоке становится ниже давления насыщенных паров компонента топлива. При этом гидравлические потери в заборном устройстве возрастают. Поэтому заборное устройство должно быть спроектировано так, чтобы в нем не возникла кавитация. Даже при значительном уровне компонента топлива в баке над заборным устройством может образоваться вихревая воронка с закруткой жидкости. Образующийся при этом газовый жгут проникает в магистраль питания и нарушает сплошность потока. Причиной возникновения вращательного движения жидкости над заборным устройством могут явиться кориолисовы силы, кавитационные явления в заборном устройстве, различные загромождения в баке, приводящие к несимметричному притеканию жидкости к заборному устройству, а также различные начальные возмущения. Несмотря на сложность механизма возникновения вихревой воронки, она может быть ликвидирована установкой в зоне заборного устройства направляющих радиальных ребер, экранов и других устройств. При устранении закручивания к концу выработки топлива из бака при некотором уровне жидкости над заборным устройством происходит искривление свободной поверхности. Это явление называют динамическим понижением уровня свободной поверхности жидкости. Образуется так называемая провальная воронка без закручивания жидкости. Подход этой воронки к заборному устройству вызывает попадание газа в магистраль питания.

Гидравлические остатки топлива могут быть существенно уменьшены при применении на заборных устройствах различ-

ных тарелей и других устройств, уменьшающих уровень компонента топлива, при котором происходит прорыв газа в магистраль питания.

Для управления движением космического аппарата в пространстве широко используются ДУ, представляющие собой системы иногда с несколькими десятками двигателей малой тяги, установленными в различных каналах стабилизации, и общей системой питания. К этим системам предъявляются весьма жесткие требования, во многом отличные от тех, которые предъявляются к ДУ ракет-носителей. Это объясняется, прежде всего, необходимостью многократного включения всех двигателей космического аппарата как в условиях невесомости, так и в условиях отрицательных и боковых перегрузок, а также их импульсным режимом работы.

Эти условия накладывают дополнительно ряд специальных требований на организацию вытеснения и забора топлива из баков космических аппаратов. Так, топливная система космического аппарата должна:

обеспечивать управление положением топлива и разделением жидкой и газообразной сред в баках;

обеспечивать постоянный контакт всего компонента или его части с заборным устройством бака при любых направлениях перегрузок;

предотвращать попадание газа в заборное устройство при запуске и во время работы ДУ.

Для удовлетворения этих требований в топливных системах космических аппаратов применяются устройства, основанные на различных способах разделения жидкости и газа: устройства с промежуточной перегородкой для вытеснительной подачи топлива из баков; капиллярные устройства и др.

В качестве перегородки в вытеснительных устройствах подачи используются эластичные мешки или диафрагмы, поршни или сильфоны (рис. 1.6).

Эластичные диафрагмы (мембраны) изготавливаются из металла с концентрическими гофрами или из полимерной пленки, армированной металлической фольгой.

Эластичные мешки изготавливаются из пленки, стойкой к жидким и газообразным компонентам топлива. Материал должен быть пригоден для изготовления изделий необходимой формы.

Под давлением газа для наддува, подаваемого внутрь мешка, последний расправляется и вытесняет жидкое топливо, находящееся между мешком и баком, в расходную магистраль. Топливо может располагаться и внутри эластичного мешка.

Самым надежным средством разделения является металлический сильфон. Металлические сильфоны изготавливаются из тонкого металлического листа, сваренного или спрессованного по окружности в виде гофров. Сильфоны могут иметь кониче-

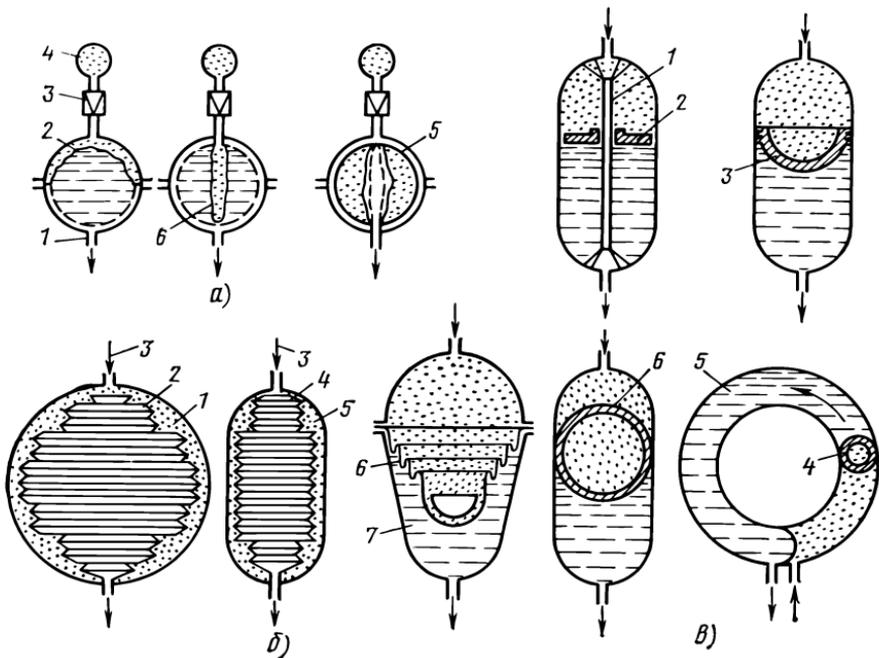


Рис. 1.6. Вытеснительные устройства с промежуточной перегородкой:

*a* — устройства с эластичной перегородкой:

1 — заборное устройство; 2 — металлическая диафрагма; 3 — редуктор; 4 — аккумулятор давления; 5 — сжимающая эластичная полость; 6 — расширяющаяся эластичная полость;

*б* — сифонные вытеснительные устройства:

1, 5, 7 — топливные баки; 2 — сифон сферического бака; 3 — направление наддува бака; 4 — сифон цилиндрического бака; 6 — эластичный телескопический мешок;

*в* — поршневые вытеснительные устройства:

1 — направляющая труба; 2 — поршень с зазором; 3 — поршень с уплотнением; 4, 6 — сферические поршни; 5 — торový бак

скую или цилиндрическую форму. Жидкое топливо можно располагать как внутри, так и снаружи сифона. Расположение топлива внутри сифона более экономично, так как при этом остаток топлива минимален, однако появляется опасность перерасчетной деформации (удлинение сифона) при осевых перегрузках во время выведения на орбиту, при включении маршевого двигателя космического аппарата.

Наиболее перспективны для высококипящих топлив, обладающих значительными силами поверхностного натяжения, капиллярные устройства, которые обладают простотой, обусловленной отсутствием движущихся частей, а также не требуют внешних источников энергии для своей работы.

Существуют два способа реализации капиллярных устройств: удержание части топлива в районе заборного устройства (рис. 1.7, *a*) и стабилизация основной массы топлива (рис. 1.7, *б*).

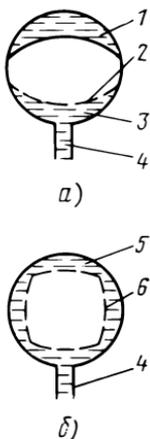


Рис. 1.7. Капиллярные устройства:  
*a* — удерживающие часть топлива; *б* — стабилизирующие основную массу топлива;  
 1 — топливо, масса которого нестабилизирована; 2 — удерживающий экран; 3 — топливо, масса которого стабилизирована; 4 — заборник; 5 — основная масса топлива; 6 — пристеночный экран

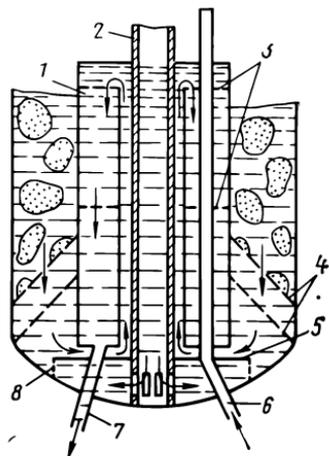


Рис. 1.8. Капиллярное накопительное устройство маршевой ДУ космического корабля «Аполлон»:

1 — центральный коллектор; 2 — первичный преобразователь уровня; 3 — капиллярные перегородки с отверстиями диаметром 1,5 мм; 4 — зонтичные экраны с отверстиями диаметром 0,5 мм; 5 — гаситель скорости потока; 6 — направление потока заправляемого топлива и подводимого для наддува газа; 7 — направление потока топлива, подаваемого к двигателю; 8 — перфорированный лист с отверстиями диаметром 0,6 мм

Первый способ используется для ДУ одноразового запуска, после чего масса топлива стабилизируется. Второй способ применяется для ДУ многократного запуска.

Для обеспечения многократного запуска маршевой ДУ космического корабля «Аполлон» используется капиллярное накопительное устройство, изображенное на рис. 1.8.

В топливной системе лунного экспедиционного отсека космического корабля «Аполлон» используется капиллярное накопительное устройство в виде перевернутого колпака с перфорированной перегородкой (рис. 1.9). Днище бака накопительного устройства сохраняет топливо при отрицательных ускорениях, в то время как перфорированная перегородка предотвращает переток жидкости при боковых ускорениях. Стабилизация всей массы топлива осуществляется с помощью двигательной реактивной системы управления перед запуском основного двигателя.

Капиллярные элементы изготавливаются из коррозионно-стойкой стальной проволочной сетки. Чтобы увеличить площадь проточной части и, следовательно, получить конструкцию с малыми потерями давления, сетку гофрируют. Удерживаю-

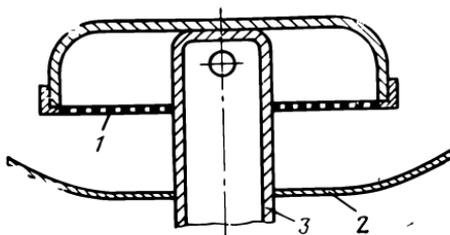


Рис. 1.9. Капиллярное накопительное устройство:

1 — перфорированная перегородка с отверстиями диаметром 0,87 мм; 2 — днище бака; 3 — выходной патрубок

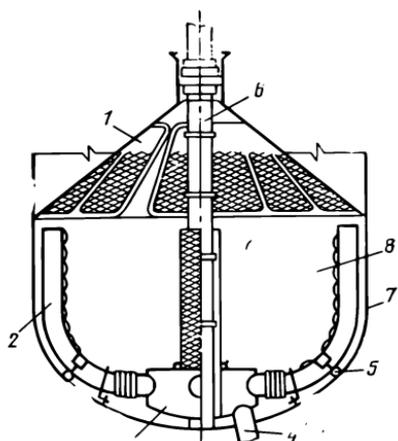


Рис. 1.10. Схема топливозаборников ДУ орбитального маневрирования МТКК «Спейс Шаттл»:

1 — сетчатый экран; 2 — пристеночные заборные магистрали (четыре пояса); 3 — коллектор; 4 — трубопровод питания; 5 — дренажное устройство; 6 — штанга топливоизмерительного устройства; 7 — бак; 8 — задний резервуар

шая способность смоченной сетки достаточна для предотвращения прорыва паров при рабочих ускорениях среды.

На рис. 1.10 показана схема топливозаборников ДУ орбитального маневрирования МТКК «Спейс Шаттл». Высота бака 2,4 м, диаметр основания 1,25 м. Сетчатый экран разделяет бак на передний отсек и задний резервуар-ловушку. Сетчатый экран удерживает топливо в заднем резервуаре во время маневров МТКК с отрицательными ускорениями, а также в условиях невесомости, но позволяет перетекать топливу в период работы двигателей, как это видно на рис. 1.11. Натурные испытания показали, что при выбранной схеме газ не перетекает через сетчатые экраны в топливо, а резервуары заполняются топливом, пока оно имеется в переднем отсеке баков. Топливо без газовых включений поступает через разделительный сетчатый экран баков в резервуар даже в условиях, когда объем переднего отсека бака остается заполненным лишь на 40%. Даже при действии отрицательных ускорений в полете топливо из резервуара не перетекает обратно в передний отсек бака через сетчатый экран.

**Устройства заправки.** Заправка ракет-носителей и космических аппаратов компонентами топлива и сжатыми газами осуществляется от наземных систем. Связь ПГС с этими системами обеспечивается обычно посредством клапанов и трубопроводов, которые входят в состав топливной системы ДУ.

Структура системы заправки определяется эксплуатационными требованиями к ракетно-космическим комплексам.

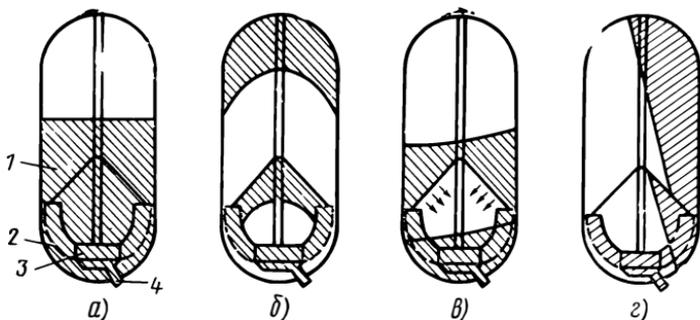


Рис. 1.11. Положение топлива в баках ДУ орбитального маневрирования МТКК «Спейс Шаттл»:

*а* — при работе маршевых двигателей; *б* — перед запуском двигателей орбитального маневрирования; *в* — при работе двигателей орбитального маневрирования; *г* — при подаче топлива в двигатель подсистемы реактивного управления. Номера позиций соответствуют номерам позиций на рис. 1.10. Штриховкой указано положение топлива

Средства заправки должны обеспечивать хранение и термостатирование топлива и газа в стационарных хранилищах или передвижных емкостях, их подачу из хранилища в баки и баллоны ракеты-носителя и космического аппарата с необходимыми расходами и давлениями, наддув баков после окончания заправки до заданных давлений и т. п.

Другой не менее важной задачей средств заправки является подготовка компонентов топлива в части насыщения их газом или, наоборот, удаления газа из них с последующей подачей в баки ДУ. Суть вопроса состоит в том, что для обеспечения хранения ракет-носителей в заправленном состоянии с автоматическим поддержанием пусковых давлений в заданном диапазоне часто используется свойство таких ракетных топлив, как четырехокись азота, керосин, этиловый спирт, несимметричный диметилгидразин, увеличивать количество растворенного газа с повышением температуры и, наоборот, выделять газ с понижением температуры.

При этом концентрация растворенного в компонентах газа прямо пропорциональна давлению в свободных газовых объемах баков. Современные наземные средства позволяют насыщать компоненты газом до заданных концентраций и затем, выравнивая давления в топливных баках ДУ и газовых полостях наземных емкостей, осуществлять заправку без опасения снизить установленные значения концентраций.

При заправке баков космических аппаратов возникает необходимость возможно более полного удаления газа из компонентов топлива, так как опасность выделения в системах подачи свободного газа из топлива и пребывание ДУ в условиях невесомости может привести к попаданию газа на входы в двигатели и нарушению режимов их работы. Современные на-

земные средства позволяют осуществлять деаэрацию компонентов и производить вакуумную заправку ДУ.

Ракетно-космические системы заправляются от стационарных средств заправки, ПГС которых иногда сложнее ПГС ракеты.

В настоящее время все большие требования предъявляются к точности заправки, а следовательно, и к средствам, определяющим ее точность. Заправка может быть массовой и объемной. Для массовой заправки требуется наличие сложных высокоточных весов или специальных дозирующих устройств. Так как ракета на стартовом устройстве жестко связана с наземными средствами множеством электро-, пневмо- и гидрокоммуникаций, обеспечить высокую точность выдачи массовой дозы весьма сложно. В случае реализации объемного способа контроля заправки необходимо точное измерение температуры компонентов топлива для оценки количества заправляемого продукта, которая в течение времени заправки может существенно изменяться. При объемной заправке контроль заправляемой объемной дозы осуществляется либо с помощью устройств контроля уровня, стационарно устанавливаемых в баках, либо с помощью съемных систем контроля, например радиационных, не требующих контакта с контролируемой средой. Применение съемных устройств контроля уровня наиболее целесообразно, так как они не входят в массу космического аппарата. Пересчет объемной дозы на массовую осуществляется аналитическими методами, учитывающими изменение плотности компонента от температуры.

### 1.3. СИСТЕМЫ НАДДУВА И ДРЕНАЖА

Системы наддува топливных баков обеспечивают создание в газовых подушках давлений, необходимых для заполнения и запуска двигателей, а также для их нормальной работы в полете. Системы наддува взаимосвязаны со многими системами ДУ, и их характеристики оказывают существенное влияние на эффективность ДУ в целом. На современных ракетах с ЖРД находят применение газобаллонные, газогенераторные, химические или испарительные системы наддува, использующие жидкие или твердые компоненты топлива и источники энергии. В ДУ, использующих в качестве компонентов криогенные топлива, для наддува можно применять эти же газифицированные компоненты. Химические системы наддува основаны на впрыске в бак соответствующего жидкого реагента.

Обычно система наддува включает в себя следующие элементы:

источник энергии — это или аккумулятор давления в виде шаробаллонов с газом, или патрон с твердым зарядом, или

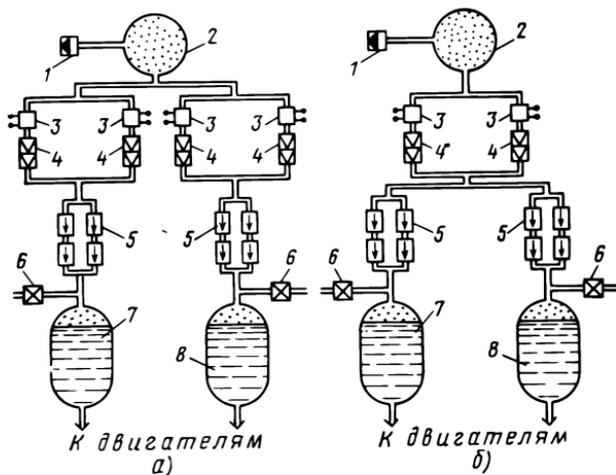


Рис. 1.12. Газобаллонные системы наддува топливных баков:

*а* — с автономной системой наддува; *б* — с комбинированной системой наддува; 1 — разъем; 2 — баллон с газом; 3 — соленоидный клапан; 4 — редуктор; 5 — обратный клапан; 6 — предохранительный клапан; 7 — окислитель; 8 — горючее

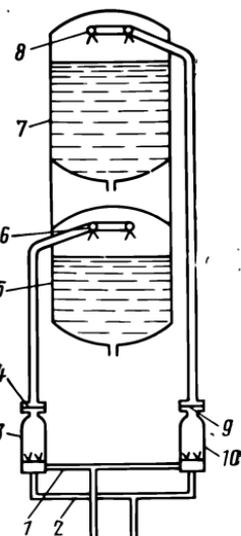


Рис. 1.13. Газогенераторная система наддува топливных баков:

1 — магистраль подачи окислителя в газогенераторы; 2 — магистраль подачи горючего в газогенераторы; 3, 10 — газогенераторы наддува; 4, 9 — разделительные мембраны; 5 — бак горючего; 6, 8 — коллекторы наддува; 7 — бак окислителя

емкость с дополнительным реагентом, или связанные с ЖРД газогенераторы, смесители, испарители;

агрегаты управления — это заправочные пусковые и отсечные клапаны, обратные клапаны, редукторы или дроссели, сигнализаторы давления, контролирующие уровень параметров наддува и связанные с системой управления, которая, в свою очередь, осуществляет выдачу команд на клапаны наддува; пневматические и гидравлические линии, соединяющие между собой источник энергии, агрегаты управления и газовые подушки топливных баков.

Структурные и функциональные схемы систем наддува во многом определяются назначением ДУ, на которые они устанавливаются. Так, на ДУ космических аппаратов с большой продолжительностью функционирования и повышенными требованиями к надежности находят применение в основном системы наддува от аккумуляторов давления с широким применением дублирования и резервирования элементов, последовательно-параллельным соединением агрегатов (рис. 1.12, 1.13, 1.14, 1.15).

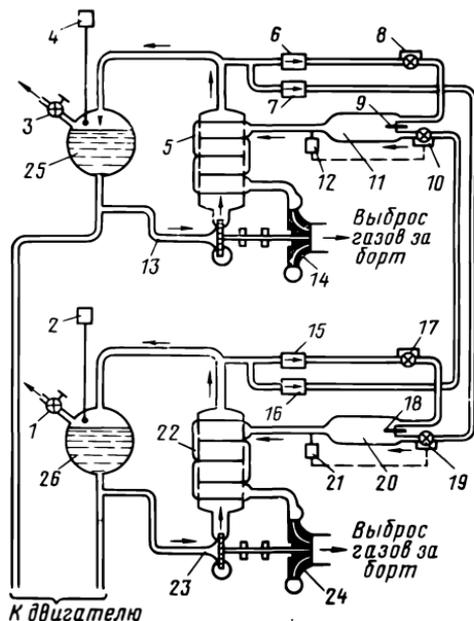


Рис. 1.14. Схема системы наддува баков основными компонентами топлива  $O_2$  и  $H_2$ :

1, 3 — дренажно-предохранительные клапаны; 2, 4 — первичные преобразователи давления в баке; 5, 22 — теплообменники; 6, 7, 15, 16 — обратные клапаны; 8, 10, 17, 19 — клапаны регулирования расхода; 9, 18 — воспламенители; 11, 20 — камеры сгорания двухкомпонентного топлива; 12, 21 — первичные преобразователи температуры; 13, 23 — насосы; 14, 24 — турбины; 25 — бак с жидким водородом; 26 — бак с жидким кислородом

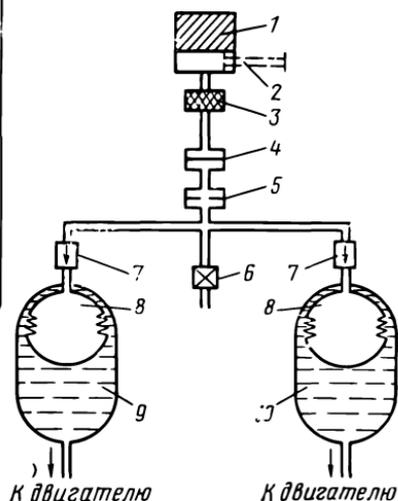


Рис. 1.15. Система наддува баков от газогенератора на твердом топливе:

1 — газогенератор; 2 — воспламенитель; 3 — фильтр; 4 — разрывная диафрагма; 5 — калиброванный жиклер; 6 — предохранительный клапан; 7 — обратный клапан; 8 — вытеснительный мешок; 9 — окислитель; 10 — горючее

На ДУ ракет-носителей можно применять все системы перечисленных ранее типов. Определяющими факторами при выборе являются свойства компонентов (криогенные, высококипящие), условия эксплуатации, традиции и т. д.

Системы наддува топливных баков по назначению обычно подразделяются на системы предварительного и основного (или полетного) наддува.

Необходимость предварительного наддува баков после заправки диктуется требованиями обеспечения условий хранения ДУ, а также поддержания уровня пусковых давлений в диапазоне, обеспечивающем бескавитационную работу насосов и нормальное заполнение и запуск двигателей до момента выхода на режим агрегатов основного наддува. Кроме того, избыточное давление в тонкостенных баках придает им устойчивость, особенно во время увеличения перегрузок, действующих

на элементы конструкции при запуске двигателей. В современных ДУ широкое распространение нашли газобаллонные системы предварительного наддува с азотом, гелием и воздухом в качестве рабочего тела. Они, как правило, располагаются не на ДУ и связываются с последней через разъемные соединения.

Системы основного наддува призваны обеспечивать заданный диапазон давлений на входе в двигатель во время работы ДУ. Причем выбор характеристик систем должен учитывать возможность дросселирования двигателей и изменения их режимов, а следовательно, изменение расходов топлива из баков, а также внешнего давления, запасов топлива и перегрузок во время полета. Последние факторы могут существенно менять влияние давления топлива в баках и магистралях подачи на уровень давлений на входе в двигатели.

В газобаллонных системах наддува (см. рис. 1.12) рабочими телами является гелий, азот или воздух высокого давления. Указанные газы обладают сравнительно высокой работоспособностью, недефицитны, взрывобезопасны, технологичны в производстве и удобны в эксплуатации.

Главными направлениями совершенствования газобаллонных систем наддува являются повышение надежности путем резервирования и дублирования агрегатов управления и линий подачи газа, а также снижения удельных массовых характеристик путем применения сжиженных или сильно переохлажденных газов. Это реализуется выполнением аккумуляторов давления в виде сосудов Дьюара, в которых газ хранится при сверхкритическом давлении, использованием криогенных топлив или размещением баллонов в одном из топливных баков.

В газогенераторной системе наддува получение газа осуществляется путем сжигания компонентов топлива при определенном соотношении их масс или в специальных газогенераторах, а также путем отбора части газа из основных газогенераторов двигателей с последующей балластировкой его компонентами до получения соответствующих значений параметров (см. рис. 1.13, 1.14). Основные тенденции совершенствования систем определяются требованиями улучшения массовых характеристик и выражаются в переходе на высокотемпературный наддув. Переход с 550...750 К (температур газогенераторного газа) на 950...1110 К обеспечивает улучшение массовых характеристик ДУ в связи с повышением энергетических характеристик газа, снижением расходов компонентов топлива на наддув, уменьшением тепловых остатков из-за меньшего прогрета поверхностных слоев компонентов сухим газогенераторным газом и меньшей конденсации последнего на зеркале жидкости.

Известны системы наддува, в которых используются для работы летучие жидкости, например жидкие аммиак и фреон. В процессе перехода летучего вещества из жидкого состояния в газообразное в ограниченном объеме газовой подушки проис-

ходит повышение давления, которое может быть использовано для вытеснения топлива из баков. Такие системы находят применение в ДУ малой тяги. Постоянное давление наддува в такой системе поддерживается путем стабилизации температуры летучего вещества. В качестве источников тепловой энергии можно использовать электрические батареи, теплопоглощительные системы и т. п. Нагреватели включаются по командам сигнализаторов давления в топливном баке. Разделение топлива и пара газа в баках осуществляется эластичными разделителями, например сифонами.

Наиболее компактным источником рабочего газа обычно является твердое топливо, у которого температура продуктов сгорания лежит в пределах 1370...1470 К. В течение многих лет для этих целей использовались топлива двух типов: двухосновные с большим недостатком окислителя (жидкие нитроэфиры) и смесевые топлива на основе нитрата аммония. Жидкие нитроэфиры могут диффундировать к границам заряда твердого ракетного топлива, уменьшая его прочность. Продукты сгорания этих топлив имеют чрезмерно высокую температуру или содержат в большом количестве твердые частицы углерода. Составы на основе нитрата аммония имеют относительно низкую плотность, гигроскопичны и сравнительно плохо воспламеняются [30].

Другой разновидностью твердых источников газа для наддува являются азиды щелочных и щелочно-земельных металлов. Их преимущества — высокое содержание азота, высокая температура плавления и хорошая термическая устойчивость. Азот, получаемый при термическом разложении азида, практически не содержит газообразных примесей. В качестве основного азотосодержащего компонента используется азид натрия. Содержание азота в нем 64,6%. Его генерация может быть осуществлена в результате экзотермической реакции азид натрия с окислителем типа пирхлората, нитрата, сульфата, оксида или гидроксида легких металлов (см. рис. 1.15).

Существуют системы наддува, в которых газ можно получать в процессе контролируемой реакции, протекающей непосредственно в баках между одним компонентом топлива и дополнительным компонентом (так называемый химический наддув). Такая система наддува эффективна при использовании в ракетах на самовоспламеняющихся компонентах топлива. Дополнительный компонент можно впрыскивать на свободную поверхность топлива в баке или в массу топлива ниже ее поверхности. Установлено, что в первом случае дополнительный компонент необходимо впрыскивать в виде сплошной струи. При этом следует избегать дробления струи в процессе впрыскивания и разбрызгивания при ее контакте со свободной поверхностью топлива в баке, поскольку увеличение глубины проникновения струи в массу топлива способствует снижению

температуры получаемого газа до приемлемого уровня, а дробление и разбрызгивание может привести к интенсивному горению капель. Горящие капли не должны попадать на стенку бака. Лучше впрыскивать подальше от стенки и под большим углом ( $40\text{...}90^\circ$ ) для лучшего проникновения струи. При поверхностном впрыскивании требуется меньший расход дополнительного компонента. Впрыскивание на свободную поверхность обеспечивает больший удельный объем продуктов реакции, меньшее повышение температуры основного компонента топлива и более высокую температуру газа. При экспериментальных исследованиях получали температуру газа в подушке  $920\text{...}1070$  К. Температура топлива через 15 с повышалась на  $1\text{...}1,5$  К, при этом реакции в баке протекали с массовыми соотношениями компонентов  $0,14\text{...}0,42$  (все данные приведены для бака горючего, заправленного гидразином). В качестве дополнительного компонента использовался пятифтористый хлор [30].

Установлено, что характер распыления, расход реагента и давление влияют на колебания характеристик наддува. Основные преимущества химического наддува — возможность точного регулирования давления и приемлемый уровень температур стенок баков и топлива, а также высокая эффективность.

Дополнительный компонент хранится под давлением в небольшом баке и периодически впрыскивается в главный топливный бак через клапан, которым управляет реле давления. Существенным недостатком химического способа наддува является сложность организации одинаковых условий впрыскивания топлива в процессе его выработки из баков.

#### 1.4. АГРЕГАТЫ ПГС

**Общие сведения.** ПГС представляют собой разветвленную сеть трубопроводов с управляющими агрегатами, оказывающими воздействие на параметры движения и состояния компонентов топлива, газа и вспомогательных жидкостей.

Требования, предъявляемые к агрегатам, определяются характером их работы и условиями эксплуатации. Поскольку степень надежности системы и всего изделия в целом равна произведению степеней надежности составляющих элементов, требование высокого значения этого параметра является основным.

Кроме того, все агрегаты должны:

обладать малой массой;

не накладывать жестких ограничений на компоновку системы;

быть совместимыми с воздействующими факторами, т. е. работать при вибрациях, перегрузках, температурах и давлениях, определяемых условиями работы ДУ в целом;

иметь малое гидравлическое сопротивление (что противоречит требованиям малых габаритных размеров и масс);  
не создавать колебаний в потоке движущейся среды, которые могли бы ухудшить работу ПГС;  
в закрытом положении быть герметичными по уплотняющим парам;  
не реагировать с рабочей средой;  
иметь низкую стоимость.

ПГС может включать агрегаты и коммуникации различного наименования, наиболее распространенными из которых являются клапаны, демпфирующие устройства, регуляторы, жесткие и гибкие трубопроводы, сильфоны, соединения трубопроводов.

**Клапаны.** Режимы работы ДУ во многом определяются работой агрегатов систем управления и регулирования, к числу которых относятся клапаны, воздействующие на количественные характеристики среды (скорость, давление, расход и т. д.).

По назначению клапаны можно разделить на запорные, предохранительные, регулирующие и др.

По принципу основного действия (перекрытия потока среды) клапаны можно разделить на две категории: с затвором, перемещающимся вдоль потока, и с затвором, движущимся поперек оси потока.

По роду силового воздействия клапаны делятся на электромагнитные, гидравлические клапаны, пневмоклапаны, пироклапаны, мембранные клапаны и ручные вентили. В клапанах для уменьшения мощности привода может быть применена разгрузка, в этом случае движение запорного или регулирующего органа происходит благодаря внешнему воздействию или энергии рабочей среды.

По способу уплотнения подвижных соединений и корпуса клапаны подразделяются на сальниковые, сильфонные и мембранные.

Клапаны могут быть одноразового или многократного действия.

Запорные клапаны включают в работу или отключают в заданный момент соответствующий участок трубопровода. Как правило, все запорные клапаны выполняются с внешним приводом и могут быть отнесены к одному из двух типов: нормально открытый или нормально закрытый.

Нормально открытым клапаном (рис. 1.16, а) называют агрегат, который при отсутствии управляющего усилия на штоке 1 открыт усилием пружины 2. Под воздействием управляющего усилия клапан закрывается, причем усилие, действующее на шток, должно быть выбрано так, чтобы обеспечивалась герметичность клапана при заданном входном статическом давлении.

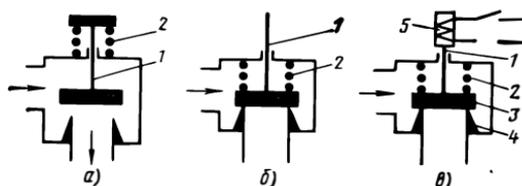


Рис. 1.16. Схемы запорных клапанов:

*а* — нормально открытого; *б* — нормально закрытого; *в* — нормально закрытого с электромагнитным приводом

Нормально закрытый клапан (рис. 1.16, б) при отсутствии управляющего усилия на штоке 1 усилием пружины 2 закрыт и должен быть герметичен при давлении на входе  $p_{вх}$ . Под действием внешнего усилия на шток клапан открывается.

В зависимости от направления движения штока с запорным органом различают клапаны прямого и обратного действия. В клапанах прямого действия направление движения запорного органа противоположно направлению потока среды, а в клапанах обратного действия — совпадает с направлением потока.

Клапан может управляться дистанционно электромагнитным, гидравлическим или пневматическим приводом.

Основные узлы и принцип работы клапана с электромагнитным приводом можно проследить на примере функционирования нормально закрытого клапана (рис. 1.16, в). В обесточенном состоянии клапан закрыт усилием пружины 2. При подаче напряжения на электромагнит 5 якорь втягивается внутрь и приподнимает тарель 3 клапана над седлом 4. В таких клапанах движение штока 1 с тарелью происходит только под воздействием усилия электромагнита, при выборе габаритных размеров и мощности которого необходимо учитывать воздействие на тарель клапана полного гидростатического давления среды при движении штока. Поэтому для уменьшения усилия внешнего привода, действующего на шток клапана, применяется разгрузка тарели либо механическим путем, либо рабочей средой с помощью обвода.

Под механической разгрузкой понимается уменьшение перепада давлений на подвижные части клапана, что может быть достигнуто введением дополнительных полостей с поршнями, мембранами или сильфонами. В частности, применение двухседельной конструкции клапана устраняет одностороннее воздействие среды ввиду равенства давлений на верхнюю половину тарели 4 и нижнюю половину тарели 2 и равенства диаметров седел 1 и 3 (рис. 1.17, а). Тяговое усилие электромагнита 6 определяется жесткостью пружины 5 уплотняющей тарели. Существенным недостатком данной конструкции является то, что для обеспечения полной герметичности в седлах требуется высокая точность изготовления деталей и узлов, чтобы расстояние между седлами было равно расстоянию между тарелями.

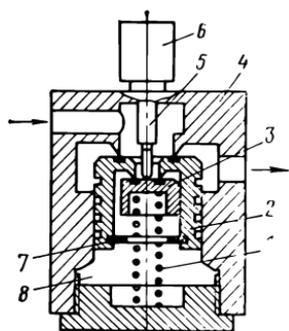
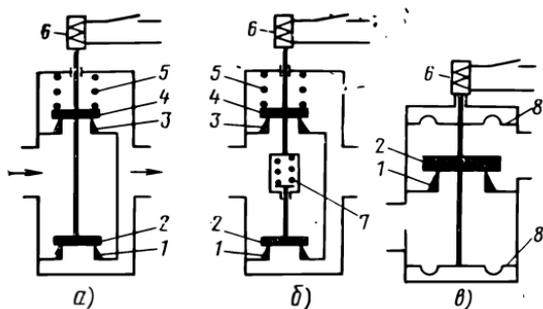


Рис. 1.17. Схемы запорных клапанов с механической разгрузкой:

*а* — двухседельный клапан; *б* — двухседельный клапан с тарелками, соединенными пружиной; *в* — мембранный клапан

Рис. 1.18. Запорный клапан с разгрузкой с помощью обвода:

*1* — пружина; *2* — главный клапан; *3* — вспомогательный клапан; *4* — корпус; *5* — шток; *6* — электромагнит; *7* — стопорное кольцо; *8* — полость

Такой недостаток может быть устранен удалением жесткой связи между тарелками и введением пружины 7 (рис. 1.17, б).

Для газообразных сред разгрузку можно осуществить с помощью клапана с мембранами 8 (рис. 1.17, в) или сильфонами, эффективная площадь которых равна площади прохода в седле.

В клапанах с разгрузкой с помощью обвода энергия давления рабочей среды используется как для перемещения подвижных частей, так и для обеспечения необходимой герметичности посадки тарели на седле. В таких клапанах исполнительное устройство содержит кроме главного клапана вспомогательный клапан, перекрывающий обводное отверстие. В нормально закрытом топливном клапане (рис. 1.18) разгрузка осуществляется посредством вспомогательного клапана 3. Если электромагнит 6 обесточен, то главный клапан 2 через вспомогательный клапан 3 прижат к седлу пружиной 1 и давлением жидкости, находящейся в полости 8, куда она прошла по диаметральному зазору между клапаном 2 и корпусом 4. В момент подачи напряжения на электромагнит его якорь передвигается вниз и воздействует на шток 5 и клапан 3, опуская его до упора в стопорное кольцо 7. На клапане 3 выполнены предельные прорезы. По этим прорезям жидкость поднимается из полости 8 и уходит через центральное отверстие в клапане 2 после того, как клапан 3 отходит от своего седла. В результате давление под клапаном 2 уменьшается и жидкость, находящаяся над клапаном 2, перемещает его вниз.

Клапаны с электромагнитным приводом устанавливаются в ПГС на магистралях наддува баков, продувки двигателей, управления пневмоагрегатами, на топливных магистралях и т. д.

В тех случаях, когда для управления запорным клапаном требуется приложение больших усилий, электромагнитное устройство привода становится слишком громоздким и целесообразно применять агрегаты, движение управляющего органа которых происходит под воздействием давления жидкости или газа, подводимого в специальную полость управления.

В ПГС широкое распространение получили пневмоклапаны, управление которыми осуществляется сжатым газом, действующим на поршень управляющей полости (рис. 1.19). При подаче газа в полость 5 поршень 2 и соединенный с ним шток 3 тарели 4 клапана перемещаются в крайнее левое положение, преодолевая усилие пружины 1. В исходное состояние подвижные элементы возвращаются под действием пружины 1, при этом выходит газ из полости 5.

Широко применяются также пневмоклапаны двойного управления, в которых тарель в исходное состояние возвращается под действием управляющего газа. Как и клапаны с электромагнитным приводом, пневмоклапаны могут быть выполнены с разгрузкой.

Пневмоклапаны функционируют при заправке баков топливом, надуве их газом, выпуске газа и жидкости из баков, управляют движением топлива в расходных магистралях и т. д. В частности, для операций заправки и слива применяется агрегат, управляемый сжатым газом, который называется заправочно-сливным клапаном (ЗСК). Приведенный на рис. 1.20 ЗСК в режимах слива и заправки (в открытом состоянии) может иметь два положения: частичное открытие и полное открытие. Для частичного открытия газ под высоким давлением поступает в клапан через штуцер 6, давит на поршень 1 и поднимает шток 3 и тарель 4 ЗСК над седлом 5. Ход поршня 1 в данном случае определяется расстоянием его до плоскости 7 корпуса. Топливо подается в горловину 8 и через зазор между тарелью и седлом поступает в бак. Для полного открытия ЗСК в по-

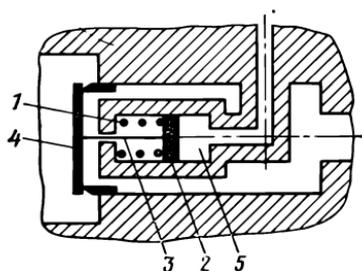


Рис. 1.19. Схема пневмоклапана:  
1 — пружина; 2 — поршень; 3 — шток; 4 — тарель клапана; 5 — полость

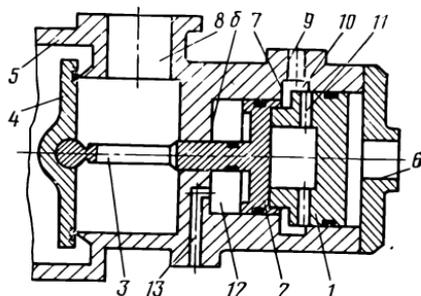


Рис. 1.20. Схема заправочно-сливного клапана (ЗСК) с двумя положениями

лость 10 через штуцер 9 подается газ. Откуда он через отверстия 11 в поршне 1 поступает под поршень 2 и передвигает его вместе со штоком 3 и тарелью 4 до тех пор, пока поршень 2 не упрется в полость корпуса. ЗСК закрывается при подаче газа в полость 12 через штуцер 13.

Так как агрегат установлен на топливном баке, то он должен быть герметичен и стоек к компонентам ракетного топлива. При этом конструкция ЗСК (см. рис. 1.20, 1.21) должна удовлетворять двум противоречивым требованиям. С одной стороны, для уменьшения массы габаритные размеры агрегата необходимо выбирать минимальными, с другой стороны, чем меньше габаритные размеры, тем меньше проходное сечение щели ЗСК между тарелью 4 и седлом 5, больше сопротивление ЗСК, больше мощности заправочных насосов и продолжительнее время заправки и слива.

Широкое применение пневмоклапаны с дистанционным управлением нашли в системах дренажа и подачи топлива в двигатели. Дренажные клапаны предназначены для сброса газа из емкостей и топливных баков. Поскольку время подготовки изделия к пуску регламентировано, то для обеспечения сброса среды за заданный промежуток времени сопротивление клапана в открытом положении желательно иметь минимальным. Сообщенный с баком дренажный клапан должен быть герметичным как в статическом состоянии, так и при вибрациях в диапазоне частот, которые могут наблюдаться в летных условиях.

Топливные клапаны должны исключать возможность попадания компонентов топлива в камеру сгорания до запуска и после выключения двигателя, обладать по возможности минимальным гидравлическим сопротивлением, быть стойкими в агрессивных компонентах топлива. Для топливных клапанов конструкция силового привода имеет большое значение, поскольку она определяет скорость срабатывания клапана, являющуюся

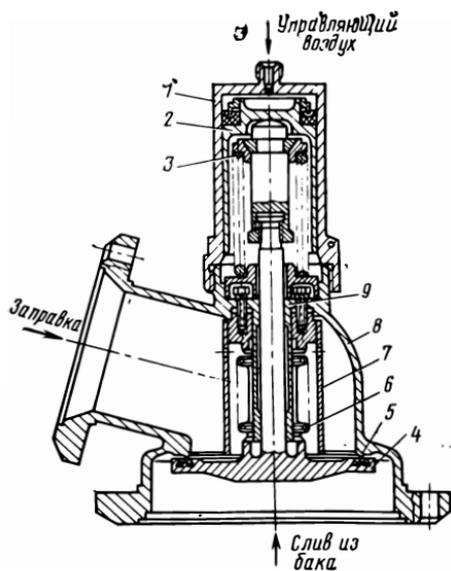


Рис. 1.21. Схема ЗСК для криогенных жидкостей:

1 — цилиндр; 2 — поршень; 3 — возвратная пружина; 4 — тарель; 5 — седло; 6 — силиконовый уплотнитель; 7 — отражатель; 8 — корпус; 9 — направляющая втулка

ся одной из определяющих характеристик. С одной стороны, для уменьшения импульса последствия и разброса параметров двигателя (тяги, времени выхода на режим и т. д.) желательно время срабатывания клапана иметь минимальным, но, с другой стороны, увеличение скорости подвижных частей клапана может привести к недопустимому увеличению гидроудара. Оптимум в этом случае будет определяться удовлетворением ТУ на двигатель и на систему питания. При выборе силового привода необходимо иметь в виду, что разнородные компоненты в момент запуска должны поступить в газогенератор или в камеру сгорания в строго определенное время и в заданном соотношении, что также определяется скоростью срабатывания топливных клапанов.

Малое время работы при относительно невысоких массе и габаритных размерах может быть получено при использовании в качестве силового привода пиропатрона. В этом случае движение запорного органа клапана осуществляется газом высокого давления, который образуется при сгорании пиротехнического состава. Для каждой операции (открытия или закрытия) надо применять отдельный агрегат. При наличии пироклапанов разброс параметров индивидуальных систем значительно ниже, чем при наличии пневмоклапанов вследствие быстроты действия пиропатронов. Кроме того, применение пироклапанов сокращает время подготовки изделия к пуску, так как контроль работы агрегатов на стартовом устройстве осуществляется в основном лишь визуально и проверкой электрической цепи пиропатрона.

Недостаток пироклапанов состоит в том, что все они, как правило, одноразового действия, осуществляют только импульсное воздействие и не дают возможности в широком диапазоне варьировать время их срабатывания. Нежелательно использование пироклапанов на стендовом оборудовании в связи с

необходимостью их замены после каждого испытания. Пироклапаны по воздействию на запорный орган делят на пироклапаны непосредственного действия и пироклапаны с чековым устройством. В приведенном на рис. 1.22, а пироклапане непосредственного действия давление газов при сгорании пиропатрона 1 действует на поршень 2 и срезает мембрану 3. В результате запорный орган 4, перемещаясь, заклинивается в седле 5 и отделяет входную магистраль от выходной.

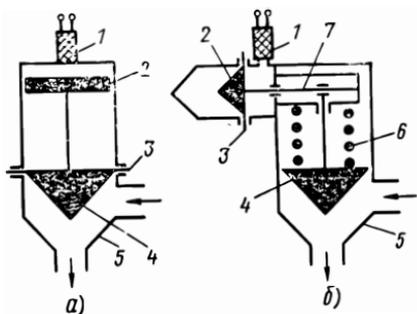


Рис. 1.22. Схемы нормально открытых запорных пироклапанов: а — непосредственного действия; б — с чековым устройством

На рис. 1.22, б приведена схема пироклапана с чековым устройством. В процессе горения пиропатрона 1 под давлением пороховых газов освобождается чека 7, в результате под действием усилия пружины 6 и давления среды запорный орган 4 садится на седло 5.

Предохранительные клапаны ограничивают возможность выхода давления в системе за заданные границы и обеспечивают движение среды в заданном направлении. Они входят в состав каждой ПГС.

Принцип действия предохранительных клапанов, применяемых в пневмо- и гидросистемах, основан на уравнивании внешней силой (пружиной) давления среды, действующего на запорный орган клапана, который под действием этой силы перекрывает проходное сечение. Площадь проходного сечения должна быть такой, чтобы обеспечить заданный расход среды при определенных давлениях до и после клапана, при этом на клапан накладывается ограничение по обеспечению стабильного давления в системе для различных расходов среды.

Одной из характеристик, определяющих качество клапанов в статическом (установившемся) режиме, является чувствительность к изменениям давления  $\delta = \Delta p/p$ , где  $\Delta p$  — превышение давления над номинальным значением  $p$ . Чувствительность предохранительного клапана зависит от силы трения подвижных частей, от формы седла и конструкции запорного органа.

Работа предохранительного клапана определяется его расходной характеристикой, представляющей собой зависимость давления в системе от расхода через клапан. На рис. 1.23 связь между расходом  $G$  и давлением  $p$  при подъеме клапана над седлом (при увеличении расхода) выражается кривой  $a$  и при посадке клапана на седло (при понижении расхода) — кривой  $b$ . Причем давление  $p_{н.о.}$ , соответствующее началу открытия клапана, выше значения  $p_{с.}$ , при котором клапан садится на седло в процессе снижения давления. Разница в давлениях определяет гистерезис, причинами которого являются в основном жесткость пружины и трение подвижных деталей, а также изменения на переходных режимах сил давления среды, сил инерции и сил гидродинамического происхождения, действующих на запорный орган.

Предохранительные клапаны подразделяются:

по выполнению запорного органа на шариковые, конические, с элементом растяжения, разрывные, тарельчатые;

по подъему клапана на низкоподъемные с ходом тарели клапана  $h \leq 0,05 d_c$  (где  $d_c$  — диаметр отверстия в седле) и высокоподъемные с ходом клапана  $h \geq 0,25 d_c$ ;

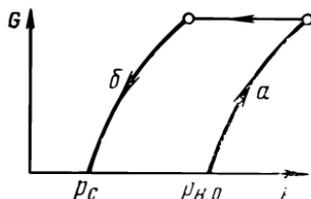


Рис. 1.23. Расходная характеристика предохранительного клапана

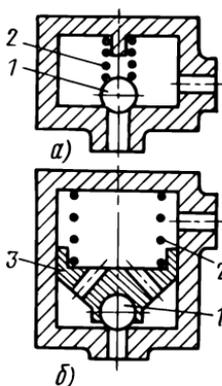


Рис. 1.24. Схемы шариковых предохранительных клапанов:  
*a* — с нецентрированным шариком; *b* — с шариком, центрированным в опоре

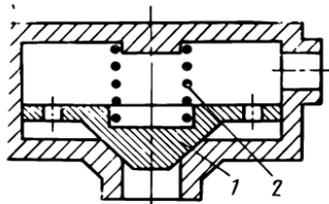


Рис. 1.25. Схема конического клапана:  
 1 — запорный корпус; 2 — пружина

по характеру нагрузки на рычажно-грузовые, пружинные и с импульсным управлением;

по направлению воздействия давления среды на запорный орган на клапаны прямого и обратного действия.

Наиболее простым из предохранительных клапанов является шариковый клапан (рис. 1.24), который может быть выполнен в двух вариантах: с нецентрированным шариком 1, удерживаемым пружиной 2, и с шариком, центрированным в опоре 3. В таких клапанах шарик при длительной работе вследствие вибраций может неравномерно выработать гнездо. Поэтому шариковые клапаны применяются в системах с относительно небольшим давлением и кратковременным действием.

Несколько совершеннее конические клапаны, у которых конус центрируется и не может поворачиваться (рис. 1.25), благодаря чему уменьшается износ опорной поверхности. Однако при перепуске среды такие клапаны склонны к вибрациям.

Иногда в системах, работающих на низком давлении, например, для аварийного слива жидкости, устанавливаются кла-

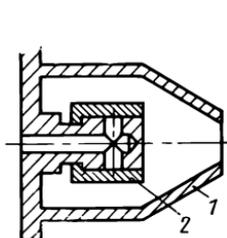


Рис. 1.26. Схема клапана с трубкой растяжения:  
 1 — корпус; 2 — трубка растяжения

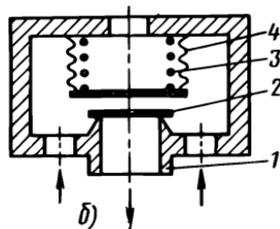
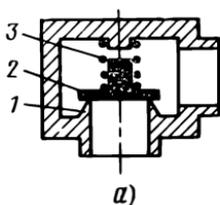


Рис. 1.27. Схемы тарельчатых низкоподъемных пружинных клапанов:  
*a* — прямого действия; *b* — обратного действия

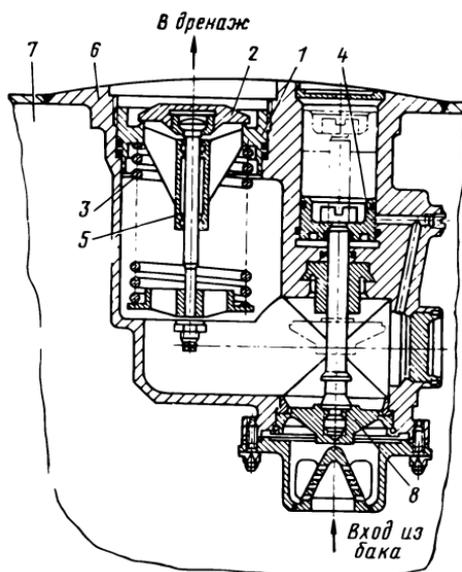


Рис. 1.28. Конструкция тарельчатого ампулированного предохранительного клапана прямого действия:

1 — седло; 2 — тарель; 3 — возвратная пружина; 4 — поршень; 5 — направляющая втулка; 6 — корпус; 7 — емкость; 8 — ампулизирующая мембрана

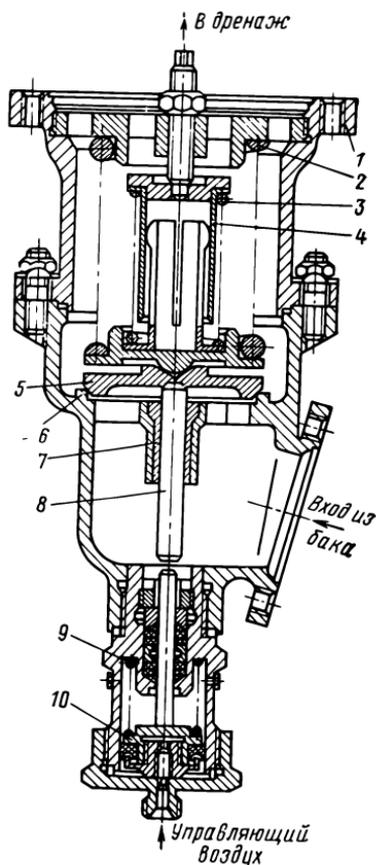


Рис. 1.29. Дренажно-предохранительный низкоподъемный клапан:

1 — корпус; 2 — основная пружина; 3 — малая пружина; 4 — направляющая втулка; 5 — тарель; 6 — седло; 7 — опорная направляющая втулка; 8 — шток тарели; 9 — возвратная пружина управляющего цилиндра; 10 — поршень управляющего цилиндра

паны с трубкой растяжения, выполненной из эластичного материала или пластмассы (рис. 1.26).

Такие клапаны в ПГС применяются довольно редко из-за плохой герметичности, повышенных допусков на давление открытия, наличия в их конструкции дефицитных эластичных материалов, стойких к агрессивным компонентам. Эти клапаны отличаются малыми габаритными размерами и применяются, когда затруднительно использование клапанов другой конструкции.

К простейшим клапанам относятся и разрывные клапаны. Когда давление превышает допустимое, в этих клапанах раз-

рушается диафрагма или приводится в действие механизм, разрушающий ее.

Наиболее широкое распространение в ПГС получили тарельчатые предохранительные клапаны. Запорный орган этих клапанов выполнен в виде тарели, прижатой к седлу упругим элементом (пружиной). На рис. 1.27 приведены схемы тарельчатых низкоподъемных пружинных клапанов прямого и обратного действия. В клапане прямого действия при превышении давления в системе заданного, определяемого усилием пружины 3, тарель 2 клапана поднимается над седлом 1, выпуская через образовавшуюся щель из системы газ. Такие клапаны довольно просты по конструкции, и герметичность их определяется лишь силой пружины, прижимающей тарель к седлу. Конструкция одного из таких клапанов показана на рис. 1.28.

Герметичность может быть повышена выполнением клапана по схеме обратного действия (см. рис. 1.27, б). Если давление в системе не превышает заданного, определяемого усилием пружины 3, то тарель 2 клапана прижата к седлу. При повышении давления в системе на сильфон 4 начинает действовать сила, направленная в сторону открытия. Эта сила определяется разностью эффективных площадей сильфона и тарелей 2 клапана. Движение тарели при открытии происходит в направлении, противоположном потоку через клапан. Такие клапаны сложнее клапанов прямого действия и требуют применения пружин с большим усилием затяжки.

Особенностью и достоинством низкоподъемных клапанов является возможность получения пропорциональной зависимости расхода от давления при подъеме тарели над седлом (рис. 1.29).

Высокоподъемные предохранительные клапаны, как правило, применяются при относительно большом расходе газа и там, где можно допустить различие в давлениях открытия и закрытия клапана. Эти клапаны по принципу работы можно разбить на клапаны активного действия, реактивного действия и клапаны с импульсным управлением.

В высокоподъемных предохранительных клапанах активного действия увеличенный подъем тарели достигается выполнением площади тарели большей, чем проходная площадь седла, благодаря чему увеличивается рабочая площадь, воспринимающая давление. Закрытие такого клапана происходит при меньшем давлении в системе, чем его открытие, из-за возникновения дополнительной силы, действующей на тарель при открытом клапане.

В клапанах реактивного действия увеличение подъема осуществляется под действием силы, обусловленной кинетической энергией газа и приложенной к тарели, находящейся на некотором расстоянии от седла по потоку выходящей среды.

В ряде конструкций высокоподъемных предохранительных клапанов используется принцип одновременного совмещения активного и реактивного действий.

Предохранительные клапаны с импульсным управлением срабатывают при возникновении импульса, созданного вспомогательным органом управления (пилотным клапаном, электромагнитом и т. д.), при этом рабочая среда направляется в соответствующий привод, который открывает основной клапан, предназначенный, как правило, для больших рабочих давлений и расходов. Пропускная способность предохранительного клапана с импульсным управлением определяется только размерами и сопротивлением основного клапана.

Для предотвращения обратного перетекания среды и обеспечения герметичности при отсутствии движения в магистралях по течению рабочей среды устанавливаются предохранительные клапаны, называемые клапанами обратного действия. Основными элементами любого клапана обратного действия (см. рис. 1.30) являются: корпус 1 с седлом, запирающее устройство — тарель 2, пружина 3.

При определении потерь напора в магистрали от источника до потребителя необходимо учитывать и потери давления  $\Delta p$  на обратном клапане, так как он установлен непосредственно в движущейся среде. Эти потери зависят от конструкции обратного клапана и могут составлять значительную часть полных потерь давления по магистрали. При проектировании их определяют по обычным формулам гидравлики (для случая отсутствия вибраций подвижных частей клапана) в зависимости от скорости  $v$  и плотности  $\rho$  потока:

$$\Delta p = \xi \rho v^2 / 2,$$

где  $\xi$  — коэффициент сопротивления клапана, зависящий от его конструкции.

Регулирующие клапаны обеспечивают поддержание расхода рабочей среды или давления в магистралях, емкостях и в баках в заданных пределах. Основными их элементами являются регулирующее устройство, исполнительный механизм и исполнительная связь, соединяющая регулирующее устройство и исполнительный механизм.

Регулирующие клапаны обычно выполняются в виде дросельного устройства с регулируемой площадью сечения отверстия для прохода рабочей среды и делятся на клапаны непосредственного или косвенного действия. Клапаны непосредственного действия работают с использованием энергии, транс-

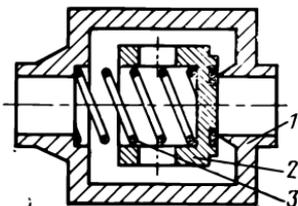


Рис. 1.30. Схема клапана обратного действия:

1 — корпус с седлом; 2 — тарель клапана; 3 — пружина

портируемой по трубопроводу рабочей среды. Их исполнительный орган в корпусе перемещается под воздействием на его привод рабочей среды.

Ко второй группе относятся регулирующие клапаны, в которых положение исполнительного органа фиксируется приводом, действующим от постороннего источника энергии, управляемого внешними импульсами. Регулирующие клапаны, предназначенные для понижения давления газа и обеспечения в заданных пределах постоянства давления на выходе при изменении расхода газа и давления на входе в клапаны, получили название редукторов. Понижение давления газа в редукторе происходит вследствие дросселирования потока при протекании его из полости высокого давления в полость низкого давления через проходное сечение малой площади. Из-за резкого изменения сечения газ приобретает в проходном сечении большую скорость, кинетическая энергия увеличивается, а давление соответственно падает. Далее газ поступает в полость низкого давления, где скорость потока гасится благодаря значительному увеличению площади сечения. Кинетическая энергия потока расходуется на трение, на образование вихревых течений и на преодоление гидравлических сопротивлений. Понижение давления при дросселировании определяется площадью проходного сечения.

По принципу действия редукторы разделяются на редукторы прямого и обратного действия в зависимости от того, совпадают или нет направления движения тарели в редукторе при открытии и усилия от газа высокого давления.

В редукторе прямого действия (рис. 1.31, *а*) газ высокого давления входит в полость 8 через штуцер 10, дросселируется в зазоре между тарелью 1 и седлом 2, поступает в полость низкого давления 9, а оттуда — к потребителю через штуцер 11.

При работе редуктора обратного действия (рис. 1.31, *б*) тарель 1 отведена от седла 2 суммарным воздействием на

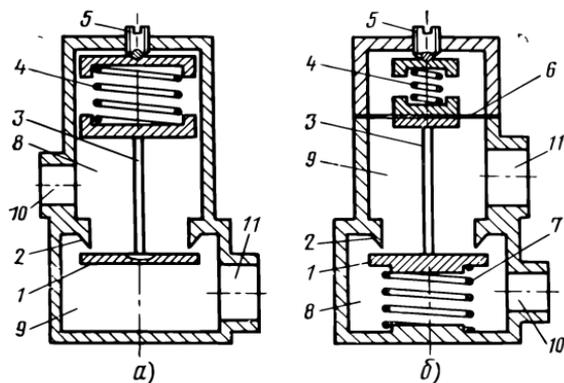


Рис. 1.31. Схемы редукторов:

*а* — прямого действия; *б* — обратного действия; 1 — тарель; 2 — седло; 3 — шток; 4, 7 — пружины; 5 — регулировочный винт; 6 — мембрана; 8 — полость высокого давления; 9 — полость низкого давления; 10, 11 — штуцеры;

шток 3 усилия пружин 4, 7 регулировочного винта 5 и давления газа в полости высокого давления 8 и в полости низкого давления 9. Газ высокого давления, поступающий в полость 8, дросселируется в зазоре между тарелью 1 и седлом 2 и поступает к потребителю через штуцер 11. Чем больше затяжка пружины 4 регулировочным винтом 5, тем больше зазор, меньше дросселируется газ и выше давление за редуктором.

Работа редуктора на различных режимах оценивается соответствием теоретической и действительной характеристик, представляющих зависимость давления на выходе от давления на входе.

При отсутствии расхода газа такая характеристика называется статической, при наличии — динамической характеристикой редуктора.

**Демпфирующие устройства.** Опыт летных испытаний ракет-носителей показывает, что на определенном участке траектории в некоторых случаях наблюдается значительное возрастание амплитуды продольных перегрузок, приводящее к нарушению нормального функционирования систем или даже разрушению конструкции. При этом, наряду с упругими продольными колебаниями корпуса ракеты-носителя, развиваются колебания давления той же частоты в гидравлических трактах ДУ.

Физическая картина указанного явления примерно следующая. Случайные возмущения тяги двигателя вызывают упругие колебания корпуса ракеты-носителя. Последние приводят к изменению объемов системы питания, колебаниям давления на днища баков, перемещениям чувствительных элементов регуляторов и т. п. В результате возникают колебания расходов топлива через камеру сгорания и массового соотношения компонентов, что, в свою очередь, вызывает колебание тяги. Амплитуда этих колебаний может оказаться больше амплитуды первоначальных возмущений, что приведет к раскачиванию ракеты. Опасность возникновения продольной неустойчивости ракеты-носителя тем больше, чем ближе собственные частоты колебаний корпуса и колебаний топлива в магистралях системы питания. Поэтому один из методов повышения запаса устойчивости, который нашел наибольшее распространение на практике, состоит в изменении динамических характеристик расходных магистралей. При этом стремятся понизить собственную частоту колебаний топлива путем установки в систему питания вблизи ТНА гидравлических аккумуляторов-демпферов. Конструктивная схема одного из них представлена на рис. 1.32.

В корпусе 1, который фланцем 6 крепится к системе питания, размещен сильфонный разделитель 2 жидкостной и газовой полости. Постоянство перепада на разделителе и минимальный его ход при колебаниях давления в системе подачи топ-

лива обеспечиваются подачей в газовую полость от специального источника через штуцер 7 газа и регулированием сброса подвижным золотником 5, связанным с днищем 4 разделителя. Такие демпферы надежны, но требуют специальной системы подачи в них газа.

Разработка стойких к агрессивным жидкостям и герметичных пластиков позволила создавать демпферы более простых конструкций. Конструкция одного из таких демпферов показана на рис. 1.33. На топливной магистрали устанавливается корпус 2 тороидальной формы, в котором размещены заполненные газом пластиковые секции 1, удерживаемые в корпусе перфорированной вставкой 3. Надежность демпфера обеспечивается установкой нескольких секций.

Другим эффективным способом снижения собственной частоты системы питания является уменьшение скорости распространения малых возмущений в магистрали путем введения в жидкость пузырьков неконденсирующего газа. Указанный метод был успешно реализован на ракете «Сатурн-5», причем для обеспечения необходимой упругости столба жидкого кислорода потребовался вдув гелия с расходом 0,045 кг/с.

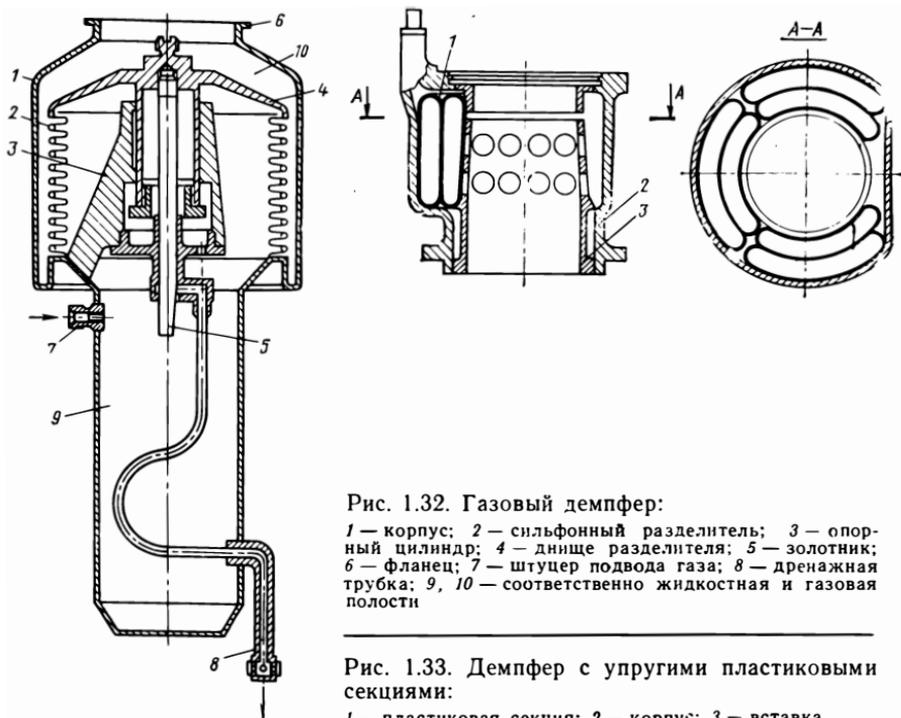


Рис. 1.32. Газовый демпфер:

1 — корпус; 2 — сифонный разделитель; 3 — опорный цилиндр; 4 — днище разделителя; 5 — золотник; 6 — фланец; 7 — штуцер подвода газа; 8 — дренажная трубка; 9, 10 — соответственно жидкостная и газовая полости

Рис. 1.33. Демпфер с упругими пластиковыми секциями:

1 — пластиковая секция; 2 — корпус; 3 — вставка

## 1.5. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЕЙ ТОПЛИВА В БАКАХ

Информация о количестве топлива, находящегося в баке, необходима:

для контроля уровней топлива в баках при заправке, сливе, хранении;

для проектирования систем одновременного опорожнения баков;

для измерения объема оставшегося топлива, которое в дальнейшем используется в системах выключения двигателя по полной выработке его компонентов либо для телеметрического контроля.

Задача измерения количества топлива в баке проще всего и в то же время наиболее точно решается измерением уровня топлива от какой-нибудь базы, хотя в принципе можно измерить и объем, например, с помощью объемных резонаторов.

Одним из главных требований, предъявляемых к системам одновременного опорожнения, является точность, которая обеспечивается точностью измерения уровня чувствительным элементом первичного преобразователя и точностью вторичной аппаратуры. Первичные преобразователи должны измерять уровни с точностью  $\pm 1$  мм во всех эксплуатационных условиях при изменении скорости движения уровня топлива в баках в широких пределах: от 2 мм/с при заправке до 50 мм/с в полете.

Дополнительные трудности возникают при измерении уровней криогенных топлив из-за расслоения топлива по плотности, которое, в свою очередь, является следствием расслоения температурного поля. Свободная поверхность топлива находится в возмущенном состоянии и область раздела жидкой и газообразной сред при заправке перегретого топлива может достигать 0,3 м.

Все системы измерения уровня топлива в баках можно разбить на дискретные и непрерывного измерения.

Первичный преобразователь дискретной системы указывает уровень топлива только в момент прохождения его через чувствительный элемент. Система непрерывного измерения уровня позволяет следить за изменением уровня топлива по всей высоте бака или в пределах части бака. Дискретные системы, как правило, более просты, это позволяет сделать их более надежными.

Чувствительные элементы первичных преобразователей систем измерения уровня могут быть индукционными, емкостными, ультразвуковыми и т. п.

Большой интерес представляют системы, которые позволяют контролировать уровень компонента топлива преобразователями, установленными вне бака, в частности, системы, основанные на определении границы жидкости и газа радионуклидными методами. Такие системы могут существенно повысить герме-



Рис. 1.34. Расположение преобразователей в баке системы контроля уровня топлива (а) и график изменения объема верхней части бака по его высоте  $H$  (б):

1 — первичный преобразователь; 2 — поплавок; 3 — гермовывод

точность баков, а следовательно, и эксплуатационную надежность всей ракеты-носителя.

При изменении температуры и сортности (плотности) топлива объем заправляемого топлива изменяется, а следовательно, меняются и уровни топлива в баках. Во многих случаях измерение уровней топлива в баке обеспечивается использованием дискретных многоточечных преобразователей, которые выдают командные сигналы на заправочные средства.

Система контроля уровней во время заправки выдает обычно четыре сигнала. По первому сигналу на определенном расчетном уровне уменьшается скорость заправки путем снижения расхода топлива наземными средствами заправки. По второму сигналу контролируется исполнение перевода наземных средств заправки на уменьшенный расход. Это необходимо для повышения точности определения уровня, на котором выдается третий сигнал, прекращающий заправку. Четвертый сигнал аварийный и выдается на выключение насосных наземных станций при непрохождении третьего сигнала.

На рис. 1.34 показано расположение преобразователей в баке системы контроля уровня топлива и приведен график изменения объема верхней части бака по его высоте. Каждому уровню соответствует свой чувствительный элемент. Число чувствительных элементов и расстояние между ними определяются диапазоном измерения и допустимой его погрешностью. Диапазон измерения уровней лежит в пределах 0,2 ... 1,5 м, дискретность измерений — в пределах 0,01...0,06 м.

Наибольшее распространение в дискретной системе измерения уровня получил поплавковый преобразователь с индуктивным чувствительным элементом (рис. 1.34, а).

ЖРД при изготовлении настраивается на соотношение компонентов топлива с точностью  $\pm 2\%$ . В полете под действием различных возмущений соотношение компонентов топлива может изменяться в еще большем диапазоне. Это может привести к израсходованию одного из компонентов топлива до момента выключения ЖРД. Чтобы этого не произошло, необходим гарантийный запас топлива. Для уменьшения гарантийного запаса целесообразно применение систем управления соотношением компонентов топлива. Эти системы основываются на измерении

уровней компонентов в баках или на измерении секундных расходов топлива через ЖРД.

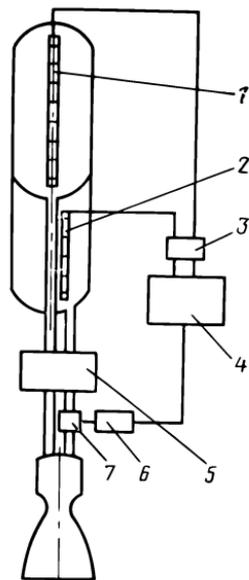
Наиболее широкое практическое применение получила система одновременного опорожнения баков (СОБ). СОБ обеспечивает одновременное расходование компонентов топлива из баков ракеты-носителя к моменту выключения ЖРД путем регулирования в допустимых пределах соотношения компонентов топлива, проходящего через ЖРД. Применение СОБ позволяет компенсировать погрешности поддержания постоянным соотношения компонентов в ЖРД и заправки топливных баков ракеты. Эффективность применения СОБ характеризуется рассогласованием уровней в баках окислителя и горючего в момент окончания работы ЖРД, которое может обеспечить система, и массой системы. В общем случае СОБ могут быть построены на различных принципах измерения количества компонентов топлива и отличаться многообразием, которое определяется особенностями конструктивной компоновки ракеты-носителя, требуемой точностью и рядом других факторов.

Большинство разработанных СОБ представляет собой дискретные системы автоматического регулирования, состоящие из преобразователей уровней, расположенных в баках ракеты-носителя, усилительно-преобразовательных устройств (УПУ), счетно-решающих устройств (СРУ), исполнительных органов. При наличии на борту ракеты-носителя вычислительной машины она может взять на себя функции СРУ. Структурная схема СОБ показана на рис. 1.35. Уровни, а следовательно, и объемы компонентов в баках контролируются преобразователями дискретных систем измерения уровней. При прохождении зеркалом топлива  $i$ -й контрольной точки вырабатываются сигналы  $\Delta t_{i0}$  и  $\Delta t_{ir}$ .

УПУ по сигналам  $\Delta t_{i0}$  и  $\Delta t_{ir}$  формируют сигналы временного рассогласования уровней

$$\Delta t_i = \Delta t_{i0} - \Delta t_{ir}.$$

Эти сигналы поступают в СРУ, которое вычисляет необходимый угол поворота привода исполнительного органа. Исполнительным органом системы является дроссель, установленный в линии подачи одного из компонентов, чаще всего линии горючего, и приводимый в действие электрическим приводом. Дроссель



1, 2 — преобразователи; 3 — УПУ; 4 — СРУ; 5 — ТНА; 6 — привод; 7 — дроссельный регулятор

изменяет соотношение компонентов топлива в соответствии с командами системы регулирования. Преобразователи системы измерения уровня расставляются так, чтобы одновременное их срабатывание происходило, когда действуют только расчетные программные возмущения.

## 1.6. ЖИДКИЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА

**Предъявляемые требования.** Тип используемого топлива в значительной степени определяет характеристики двигателя, летательного аппарата, выбор материалов и конструкций. Массовые характеристики топлива накладывают отпечаток на условия эксплуатации. К топливам предъявляются различные требования, часто противоречивые. На практике топливо выбирается на основании компромиссных решений.

Основными показателями, определяющими качество топлива, являются удельный импульс тяги и объемный удельный импульс тяги. Это значит, что топливо должно обладать высокими энергетическими характеристиками и иметь возможно большую плотность, которая позволяет иметь баки меньшего объема, а следовательно, меньшую массу ракеты и меньшее аэродинамическое сопротивление. В каждом конкретном случае при выборе типа топлива необходимо найти оптимальное соотношение между удельным импульсом тяги и плотностью топлива.

Кроме удельного импульса тяги и плотности на выбор компонентов топлива влияют его физико-химические свойства, эксплуатационные характеристики, а также техническая доступность.

Все жидкие ракетные топлива по физическому состоянию можно разделить на два больших класса: криогенные топлива (сжиженные газы), имеющие низкую температуру кипения, и высококипящие топлива, которые при обычных температурах и давлениях представляют собой жидкости. Криогенные топлива, примером которых могут служить жидкие кислород, водород, фтор, интенсивно испаряются, и для их хранения применяются теплоизолированные емкости. Это так называемые недолгохраняемые топлива. Высококипящие или, как их еще называют, топлива длительного хранения, могут храниться при обычных температурах без существенных потерь. Имеется ряд ракетных топлив, имеющих относительно низкую температуру кипения, но относящихся к долгохраняемым. Таким топливом, в частности, является широко применяемый в настоящее время окислитель четырехокись азота, который, хотя и имеет невысокую температуру кипения, но может долго храниться в баке при небольшом повышенном давлении.

Применение самовоспламеняющихся компонентов топлива выгоднее, чем несамовоспламеняющихся, так как это дает возможность упростить систему запуска и ПГС ДУ, уменьшить объ-

ем и массу камеры сгорания. Кроме того, при этом уменьшаются опасность взрыва в камере сгорания при запуске и остановке ЖРД. Самовоспламеняющиеся топлива должны обладать небольшой длительностью периода задержки самовоспламенения, который должен быть не более 0,03 с.

Однокомпонентное топливо является в основном либо окислителем, либо горючим. Энергия разложения выделяется благодаря неустойчивому расположению атомов в молекуле. Таким расположением атомов обладают молекулы гидразина, перекиси водорода, нитрометола, нитроглицерина, изопропилнитрата, окиси этилена и другие молекулы.

Однокомпонентное топливо может представлять собой искусственные смеси и растворы двух и более различных горючих и окислителей: растворы органических веществ в азотной кислоте и тетранитрометане, смеси метилнитрата и метилового спирта, смесь перекиси водорода, этилового спирта и воды и т. п.

К жидким ракетным топливам предъявляются следующие требования:

1. Упругость насыщенных паров в рабочем диапазоне температур при хранении и полете ракеты должна быть минимальной, так как при этом достигаются минимальные давления наддува топливных баков, а следовательно, и минимальная их масса.

2. Температура замерзания топлива должна быть такой, чтобы топливо было в жидком состоянии при минимальных температурах, которые могут быть в условиях эксплуатации. Для ракет эта температура должна быть не выше 233 К. Однако этому требованию не отвечают некоторые широкоприменяемые в настоящее время компоненты топлива, в особенности окислители. Приходится применять различные системы подогрева, чем усложняется процесс их эксплуатации, или налагать определенные ограничения.

3. Температура кипения должна быть возможно более высокой, и желательно, чтобы она была не ниже 323 К. Это требование особенно важно для компонента, который используется для охлаждения ЖРД.

4. Температура разложения компонента, применяемого для охлаждения ЖРД, должна быть высокой.

5. Вязкость должна быть возможно более низкая, так как при этом потери давления при движении топлива по трубопроводам минимальны. Вязкость не должна сильно возрастать при понижении температуры.

6. Поверхностное натяжение топлив для ракет-носителей должно быть небольшое, так как с его уменьшением улучшается распыление топлива при подаче его в камеру сгорания ЖРД. К топливам космических аппаратов, имеющих ДУ, в которых применяются топливные баки с использованием капиллярных систем удержания топлива, предъявляются прямо противополо-

Жидкости при температуре $T$	Скорость звука $a$ , м/с	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Угол смачивания $\theta$ , градус ( $\frac{\text{стекло}}{\text{сталь}}$ )	Критическое давление $P_{кр}$ , Па	Критическая температура $T_{кр}$ , К	Кинематическая вязкость $\nu 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	Поверхностное натяжение $\sigma 10^3$ , Н/м	Давление насыщенных паров, $P_e$ , ГПа	Модуль упругости $K$ , Па	Температура кипения $T_{кип}$ , К
H <sub>2</sub> O $T=293$ К	1460	998,2	0 70...90	22,12	647,2	10	72,8	23,4	21,3	373,1
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH $T=293$ К	1170	789,3	—	6,38	516,1	15,2	22,8	56	10,8	351,6
Керосин $T_1$ $T=293$ К	1320	819	—	—	—	18,3	26,8	190	14,2	520
N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> $T=293$ К	1017	1450	0	10,03	431,1	3	27,9	980	14,9	294,4
Несимметричный диметилгидразин $T=293$ К	950	790	0 0 0	5,35	523,1	7,5	28	161	7,1	334,4
O <sub>2</sub> $T=90$ К	917,7	1132,1	0 0	5,09	154,77	1,67	13,2	994,3	9,5	90,18
H <sub>2</sub> $T=20$ К	1127	71	0 0	1,3	33,23	1,83	1,98	902,1	9,0	20,38

Примечание. Табл. 1 составлена по данным Э. В. Венгерского, Э. Ринга,

ложные требования — поверхностное натяжение должно быть большим.

7. При использовании ДУ космических аппаратов с баками с капиллярными системами для удержания топлива компоненты топлива обязательно должны смачивать конструктивные элементы бака.

8. Компоненты топлива, которые применяются в качестве охлаждающей жидкости в ЖРД, должны обладать высокими теплопроводностью и теплоемкостью.

9. Топливо должно быть химически стойким и в эксплуатационном диапазоне температур в течение всего требуемого срока

Таблица 1

Температура плавления $T_{пл}$ , К	Коэффициент молекулярной диффузии $D \cdot 10^9$ , $\text{м}^2/\text{с}$	Удельная теплота парообра- зования $r \cdot 10^4$ , Дж/кг	Удельная теплосмкость при постоянном давлении $c_p$ $10^{-3}$ Дж/(кгК)	Теплопроводность $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м · К)	Коэффициент Генри $\alpha \cdot 10^7 \cdot \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па})$					
					N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Kr	Воздух	He	O <sub>2</sub>
273,1	Для H <sub>2</sub> 3,6; для N <sub>2</sub> 1,9; для O <sub>2</sub> 2,3; для CO <sub>2</sub> 1,9	539	4,18	603	1,93	175	23,8	2,4	1	4,6
158,7	Для CO <sub>2</sub> —4,0	90,46	2,47	176	15,3	573	194	16,9	0,5	32,1
	Для N <sub>2</sub> ; 4,67 для He 14	23,76	2,0	115	14,4	—	—	17,7	0,35	29,4
261,9	—	41,39	1,53	133	21,1	—	—	30,6	0,93	—
215,1	Для N <sub>2</sub> 9,0	58,3	0,038	523	12,5	—	—	—	0,59	—
54,35	Для N <sub>2</sub> —6,3;	21,3	1,63	147	—	21,5	—	—	1,3	—
13,95	для He —8,64	44,7	2,38	118	0	—	—	—	—	0

В. А. Григорьева [5, 8, 31].

хранения не должно подвергаться значительному разложению, т. е. не должно выделять твердые и смолистые осадки, а также газообразные продукты разложения.

10. В компонентах ракетных топлив не должно быть более 0,005% механических примесей. Наличие механических примесей может привести к засорению фильтров, жиклеров, форсунок ЖРД, а также к сильному износу насосов.

11. Токсичность компонента топлива должна быть минимальной (но при соответствующих мерах безопасности токсичность высокоэффективного компонента топлива не является препятствием для его применения).

12. Компоненты топлива при хранении, транспортировке и эксплуатации в случае соединения с атмосферным воздухом, возможных проливов, при ударах и загрязнениях должны быть достаточно взрыво- и огнебезопасны. Гигроскопичность должна быть небольшая, так как она приводит к снижению концентрации компонентов и, как следствие, к увеличению агрессивности по отношению к металлам, а также к засорению кристаллами.

13. Ракетные топлива, предназначенные для широкого использования, должны быть пригодны для изготовления в больших количествах в промышленных условиях.

14. Стоимость топлива, отнесенная к удельной тяге топливной смеси, должна быть минимальной.

В ряде случаев свойства топлив можно существенно улучшить, добавляя в него небольшое количество другого вещества — ингибитора.

Характеристики ДУ в большинстве случаев определяются характеристиками окислителя, а выбор пригодных окислителей ограничен, причем ни один из существующих окислителей не является идеальным с точки зрения приведенных выше требований.

Выбор горючего довольно широк. В настоящее время наиболее широкое применение получили два типа окислителей: жидкий кислород и окислители на основе азотной кислоты и окислов азота. Возможно применение в качестве окислителей жидкого фтора и перекиси водорода. Из горючих широко применяются керосин, водород, несимметричный диметилгидразин, гидразин, азрозин, триэтиламин, ксилидин, скипидар.

Основные физико-химические параметры некоторых окислителей и горючих представлены в табл. 1.

Как топлива могут применяться сочетания жидких компонентов топлива, порошков металлов (алюминия, лития, бериллия, бора, циркония) и желирующего вещества. Это так называемые тиксотропные топлива. Такие топлива имеют большую плотность в сочетании с хорошими энергетическими характеристиками. Недостатком этих топлив является большая вязкость. При работе с этими топливами возникают трудности их длительного хранения и подачи к ЖРД, а также организации рабочего процесса в нем.

Перспективны жидкие топлива со свободными радикалами.

Свободный радикал — это электрически нейтральный атом или группа атомов с неустойчивым расположением электронов. Свободный радикал может вступать во взаимодействие с другим свободным радикалом или молекулой, образуя устойчивую молекулу. При этом выделяется большое количество тепла. Реализация этого вида источника энергии заключается в получении и стабилизации свободных радикалов в жидком ракетном топливе и иницировании в ЖРД реакции рекомбинации. Однако свободные радикалы очень неустойчивы. Время существования

свободного радикала пропорционально экспоненте  $—E/VT$ , где  $E$  — энергия активации;  $V$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура. При нормальной температуре время существования свободных радикалов равно  $10^{-3}…10^{-8}$  с. Чтобы обеспечить достаточно длительное время существования свободных радикалов, необходимо иметь очень низкие температуры (5 К). Дополнительные сведения о ПГС ДУ можно получить, ознакомившись с книгой Н. М. Беляева «Расчет пневмогидравлических систем ракет» (М., Машиностроение, 1983).

**Насыщение газами.** Разработка ДУ ракет некоторых типов вызвала необходимость решения целого ряда принципиальных вопросов обеспечения их длительного пребывания в готовности к пуску, весьма тесно взаимосвязанных с задачами выбора оптимальных массовых и энергетических характеристик ДУ, в частности с обеспечением минимальных объемов газовых подушек в топливных баках. При создании ДУ таких ракет минимальные объемы газовых подушек ограничиваются в основном необходимостью поддержания в заданном диапазоне баковых давлений при колебаниях температур компонентов топлива и окружающей среды.

Верхняя граница давления при этом определяется допустимыми напряжениями из условия ползучести материалов стенок баков, нижняя — устойчивостью конструкции. Сезонные и суточные колебания температуры в пусковых установках порождают процессы нестационарного теплообмена между топливом и окружающей средой, следствием которого становятся изменения объемов компонентов в баках и объемов газовых подушек. При этом давление в газовых подушках изменяется не только из-за изменения объема топлива, но и вследствие изменения давления насыщенных паров компонентов и температуры газа наддува. Кроме этого, теплообмен баков с окружающей средой сопровождается массообменными процессами через границу раздела компонент — газовая подушка, что оказывает существенное влияние на изменение давления в баках.

Последний из перечисленных факторов часто используется для уменьшения объемов газовых подушек при сохранении заданных диапазонов изменения баковых давлений путем подбора газа для наддува и учета его характеристик по растворимости (абсорбции) и выделению (десорбции) из компонентов топлива как функции температуры и давления. Практически наибольший эффект достигается при предварительном насыщении окислителя и горючего газом до определенных концентраций и заправкой насыщенного топлива в баки.

Протекание процессов абсорбции и десорбции газа характеризуется статикой и кинетикой. Статика определяет состояние, которое устанавливается при весьма продолжительном соприкосновении фаз и для бесконечно разбавленных растворов, каковыми считаются ракетные топлива, подчиняется закону Генри,

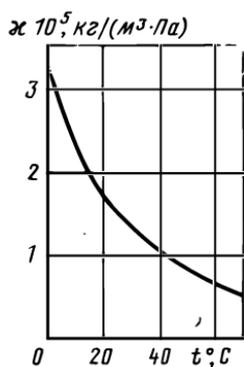


Рис. 1.36. График изменения коэффициента Генри при изменении температуры при растворении углекислого газа в воде ( $p = 1,013 \cdot 10^5$  Па)

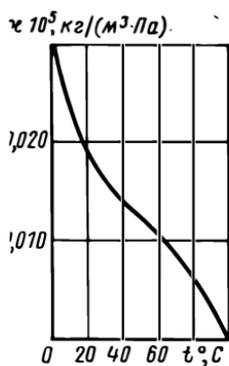


Рис. 1.37. График изменения коэффициента Генри при изменении температуры при растворении азота в воде ( $p = 1,013 \cdot 10^5$  Па)

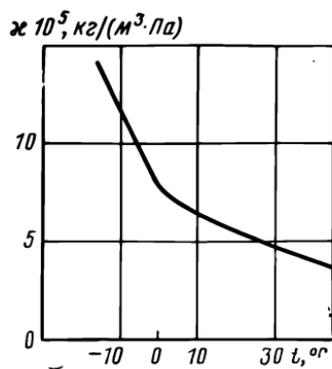


Рис. 1.38. График изменения коэффициента Генри при изменении температуры при растворении углекислого газа в этиловом спирте ( $p = 1,013 \cdot 10^5$  Па)

в соответствии с которым растворимость газа прямо пропорциональна давлению над жидкостью:

$$c = \chi p,$$

где  $c$  — равновесная концентрация газа в жидкости;  $p$  — парциальное давление газа в подушке;  $\chi$  — коэффициент Генри.

Коэффициент Генри определяется физико-химическими свойствами жидкости и в диапазоне рассматриваемых давлений является функцией температуры.

У некоторых жидкостей, например воды, процесс растворения газов сопровождается выделением тепла, и растворимость газа в них с повышением температуры понижается. Графики зависимости коэффициента Генри от температуры для различных газов и жидкостей представлены на рис. 1.36, 1.37, 1.38.

Существует, однако, ряд жидкостей органического происхождения, растворение газов в которых сопровождается поглощением тепла. Растворимость газа в них с ростом температуры повышается. К таким жидкостям относятся керосин, азотный тетраоксид, несимметричный диметилгидразин, чистый этиловый спирт, четырехокись азота. Графики изменения коэффициента Генри при изменении температуры для ряда таких жидкостей представлены на рис. 1.39, 1.40.

В случае смеси газов растворимость каждого определяется его парциальным давлением  $p_i$ , которое в соответствии с законом Дальтона можно определить так:

$$p_i = p \varphi_i = m_i \frac{M}{\mu_i} \frac{BT}{V},$$

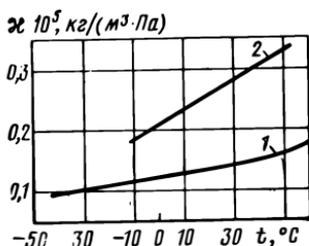


Рис. 1.39. График изменения коэффициента Генри при изменении температуры ( $p=1,013 \cdot 10^5$  Па):

1 — растворение азота в несимметричном диметилгидразине; 2 — растворение азота в четырехокиси азота

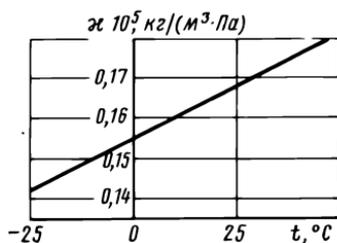


Рис. 1.40. График изменения коэффициента Генри при изменении температуры и при растворении воздуха в смеси этилового спирта (95%) с водой (5%) ( $p=1,013 \cdot 10^5$  Па)

где  $\varphi_i, m_i$  — объемная и массовая доли  $i$ -го газа в смеси;  $\mu_i$  — относительная молекулярная масса  $i$ -го газа;  $M, V, B, T$  — масса, объем, температура, газовая постоянная смеси.

Из этой зависимости следует, что объем газа, растворяющегося при постоянной температуре в жидкости, не зависит от его парциального давления.

Закон Генри и все графики, представленные на рис. 1.41, соответствуют равновесному состоянию жидкости и газа.

Процессы массообмена между жидкостью и газом определяются как условиями хранения и течения жидкости, так и их физико-химическими свойствами.

Кинетика абсорбции, т. е. скорость процесса массопередачи, определяется степенью отклонения системы топливо — газ от равновесия, физическими свойствами топлива и газа, способом соприкосновения фаз. Процесс растворения газа в компоненте складывается из процессов переноса молекул через границу раздела фаз и движения молекул в пределах газовой подушки и топлива. Считается, что на свободной поверхности топлива концентрация растворенного газа соответствует равновесной, а процесс массопередачи к поверхности обусловлен наличием разности объемных концентраций  $\Delta c$  газа и описывается уравнением

$$J_r = \frac{dG_r}{dt} = \beta F \Delta c,$$

где  $J_r$  — поток массы газа;  $G_0$  — масса газа в газовой подушке;  $\beta$  — коэффициент массоотдачи;  $F$  — площадь поверхности массоотдачи.

В общем случае скорость процесса массопереноса определяется скоростью процесса диффузии газа в жидкости, т. е. скоростью переноса газа к границе жидкость — газ, скоростью непосредственно процесса десорбции газа на поверхности и скоростью отвода выделившегося газа в подушке бака. При этом по-

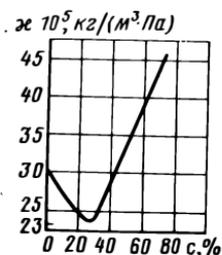


Рис. 1.41. График изменения коэффициента Генри при растворении кислорода в смеси этиловый спирт— вода при изменении объемной концентрации спирта ( $p=1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $t=20^\circ\text{C}$ ).

ток массы газа лимитируется процессами молекулярной и конвективной диффузии в жидкости и определяется законом Фика

$$J_r = - (D + \varepsilon_d) F \frac{dc}{dz},$$

где  $D$ ,  $\varepsilon_d$  — коэффициенты молекулярной и конвективной диффузии;  $\frac{dc}{dz}$  — изменение концентрации растворенного газа по высоте бака.

Экспериментально показано, что  $\varepsilon_d$  превосходит значение  $D$  в  $10^5$  и более раз. Это обусловлено реальными условиями хранения ракет в пусковых установках, когда из-за теплообмена с окружающей средой топливо в баках начинает циркулировать со скоростью, зависящей от температурного градиента.

Кинетика растворимости газа в топливе имеет чрезвычайно сложный характер. В настоящее время нет надежного метода для определения коэффициента массопередачи на основе теоретических данных либо данных, полученных в лабораторных условиях. Наиболее надежные результаты по кинетике растворимости газа в топливе можно получить только при экспериментах, проведенных в условиях, близких к натурным.

## 2

# ФАКТОРЫ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ПГС ДУ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

### 2.1. УСЛОВИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Внешние факторы, воздействующие на ДУ в процессе эксплуатации, во многом определяют ее устройство, а также виды и условия нагружений, которые необходимо воспроизвести или смоделировать при отработке с целью проверки работоспособности агрегатов, систем и всей ДУ.

Внешними воздействующими факторами (ВВФ) называются явления или процессы, внешние по отношению к объекту, в частности ПГС ДУ, или его составным частям. Рассмотрим характеристики основных из них.

Атмосферное давление создается массой воздуха в данном месте земной поверхности. Состояние атмосферы в нижних и в верхних слоях изменяется в зависимости от времени суток, времен года, от географических координат местности и, наконец, от метеорологической обстановки.

Колебания атмосферного давления вследствие изменения погоды вблизи поверхности земли достигает величин порядка  $\pm 7\%$ , а при тропических бурях — порядка  $\pm 10\%$ . На состояние атмосферы влияют гравитационные силы и солнечное излучение [2].

Законы изменения параметров атмосферы с высотой устанавливаются по результатам, полученным с помощью шаров-зондов, геодезических ракет и орбитальных аппаратов. В настоящее время можно составить следующую ориентировочную картину среднего состояния атмосферы.

Атмосфера простирается до высоты более 2000 км, где она переходит в межпланетный газ. До высоты 11 км параметры воздуха приблизительно описываются уравнениями

$$p = p_0 \left( 1 - \frac{n-1}{n} \frac{gh}{BT_0} \right)^{\frac{n}{n-1}};$$

$$T = T_0 - \frac{n-1}{n} \frac{gh}{B},$$

где  $n \approx 1,23$ ;  $B/g = 29,27$  кг·м/(кмоль·гр);  $g$  — ускорение свободного падения;  $h$  — высота над уровнем моря, м;  $p_0$ ,  $T_0$  — давление и температура на уровне моря.

Химический состав атмосферы до высоты 90 км остается практически неизменным, на больших высотах газ сильно ионизирован. Его относительная молекулярная масса до высоты приблизительно 95 км сохраняется равной 28,97, а затем к высоте 165 км уменьшается до 27,9 [2].

Химический состав атмосферы и наличие в ней незначительных примесей и заряженных частиц, наряду с другими причинами, влияет на температурный режим атмосферы. Начиная с 11 км, температура воздуха остается почти неизменной и равной в среднем  $-56^\circ\text{C}$ . Затем с высоты 30 км наблюдается повышение температуры до максимума (примерно на  $80^\circ\text{C}$ ) на высоте 50 км, после чего температура снова начинает понижаться. С высоты приблизительно 100 км происходит постепенное повышение температуры, что обусловлено солнечной радиацией и бомбардировкой верхних слоев атмосферы космиче-

скими частицами. Здесь температура сильно колеблется в течение суток. Установлено, что на высотах 250...300 км температура, а точнее температурный молекулярно-кинетический эквивалент, составляет 1000...2000 К. Однако вследствие сильного разрежения передача энергии от газа к космическому аппарату оказывается совершенно ничтожной и баланс между тепловой энергией, полученной от газа и потерянной аппаратом через радиацию, устанавливается при низкой температуре. Несравненно большее значение здесь приобретает подвод теплоты солнечной радиацией и от бортовых источников. Как источник тепловой энергии Солнце может быть аппроксимировано черным телом с температурой 6000°C. Тогда тепловой эквивалент Земли — черное тело с температурой — 21°C, а температура космического пространства эквивалентна температуре черного тела — 270°C [23].

Необходимые для расчетов параметры атмосферы берут из таблицы стандартной атмосферы.

От свойств атмосферы зависят аэродинамические силы и моменты на участке выведения космического аппарата.

Изменение давления и температуры влияет на режим теплообмена топливных баков, нарушает в ряде случаев герметичность и расположение подвижных элементов в системах.

Температура для различных климатических зон Земли колеблется от —75 до +50°C. Вызванные колебаниями температуры тепловое воздействие может быть стационарным, периодическим и непериодическим. Установившийся режим теплообмена космического аппарата с внешней средой создаст стационарное тепловое воздействие. Периодическое тепловое воздействие образуется при кратковременных включениях ДУ, суточном изменении температуры окружающей среды, регулярном солнечном облучении и т. д. Изменение температуры окружающей среды может влиять на физико-химические и механические свойства материалов.

При повышении температуры ускоряется развитие некоторых дефектов в материалах, понижающих прочность конструкций, ухудшающих функциональные и электрические характеристики систем. При одновременном воздействии теплоты и механических нагрузок многие материалы легко деформируются. У ряда материалов при нагреве происходит химическое разложение и ускоряется старение, что приводит к изменению их характеристик. В зонах с холодным климатом могут быть резкие колебания температуры, при этом на поверхностях и внутри ДУ конденсируется влага. Периодические расширения и сжатия соприкасающихся металлических и пластмассовых деталей могут вызывать их разрушение и нарушение герметичности систем. Резкие колебания температуры приводят к разрушению паяных, сварных, клепаных и других соединений, отслоению и растрескиванию покрытий, появлению утечки рабочих тел.

Влажность — один из наиболее опасных воздействующих климатических факторов. Она ускоряет коррозию материалов, изменяет электрические характеристики диэлектриков, вызывает тепловой распад материалов, гидролиз и многие другие явления, приводящие к механическим повреждениям систем.

Абсолютная влажность является функцией температуры. Максимальная абсолютная влажность изменяется на 7% при изменении температуры на 1°C.

Одной из основных характеристик воздуха является точка росы — температура, при которой находящийся в атмосфере водяной пар достигает состояния насыщения.

Для большинства процессов относительную влажность качественно оценивают по следующей шкале:

- свыше 80% — очень влажно;
- свыше 70 ... 80% — влажно;
- свыше 50 ... 70% — нормально;
- свыше 30 ... 50% — сухо;
- 30% — очень сухо.

При насыщении относительная влажность составляет 100%.

При работе изделия во влажной атмосфере влага обволакивает его снаружи и может проникнуть внутрь. Проникновение влаги в изделие сопровож-

дается корродированием материалов, изменением размеров элементов конструкций и узлов, короблением деталей, понижением их механической прочности.

Водяная пленка на поверхности материалов быстро загрязняется, вследствие чего увеличивается ее проводимость. Проводящая электрический ток пленка способствует появлению токов утечки, может привести к коротким замыканиям в электрических цепях и разрушить внутрисхемную разводку у полупроводниковых приборов. Вследствие высокой диэлектрической постоянной воды при работе электрических и радиоэлектронных устройств во влажной атмосфере возникает емкостной эффект, который проявляется в изменении сопротивления изоляции, поверхностного сопротивления изоляционных материалов, индуктивности и емкости, коэффициента рассеяния и добротности, а также в уменьшении пробивного напряжения.

Если температура окружающей среды падает ниже точки росы, при которой относительная влажность равна 100% и содержащийся в воздухе водяной пар достигает состояния насыщения, то выпадают осадки в виде росы, снега, воды, инея, тумана. Количество осадков измеряют в миллиметрах. Осадкам в 1 мм соответствует 0,001 м<sup>3</sup> воды, распределенной на поверхности 1 м<sup>2</sup>. Свежевыпавший снег занимает примерно десятикратный объем по сравнению с водой. Осадки воздействуют своей механической энергией, понижают температуру, повышают влажность.

Наличие осадков и тумана обычно ухудшает условия работы систем. Осадки и туман действуют на изделия так же, как повышенная влажность воздуха.

Влага, оставшаяся после дождя, может способствовать коррозии металлов, так как в ней содержатся растворенные кислоты и соли. Особенно сильное разрушающее воздействие могут оказывать морская вода и морской туман, резко ускоряющие коррозию вследствие содержащихся в них солей хлора, магния и других элементов.

Примеси в воздухе в виде песка, пыли, дыма и промышленных газов также являются факторами воздействия, которые необходимо учитывать при эксплуатации.

Пыль — смесь твердых частиц в воздухе. Естественная пыль состоит из космических и земных частиц. В атмосфере осаждается 0,12 ... 0,15 м пыли за 100 лет [2]. Техническая пыль образуется при сжигании топлива, износе и обработке деталей. Технической пыли в высокоразвитых странах осаждается на два порядка больше, чем естественной. Серьезную проблему представляют для больших городов дымовые газы, содержащие в сравнительно больших количествах серу, из которой образуются в итоге сернистая и серная кислоты, соединения фтора, аммиак, цианистый водород, пары ртути и другие активные вредные химические соединения.

Примеси в воздухе могут вызывать нарушение функционирования электрических элементов, изменять режимы теплообмена, вызывать механические повреждения, усиливать коррозионные процессы и т. д.

## **2.2. ФАКТОРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПОД ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

**Потеря материалов в космическом вакууме.** Низкие давления космоса вызывают ускоренную сублимацию (испарение) поверхностных слоев материалов конструкций. При длительном пребывании космического аппарата в вакууме сублимация приводит к уменьшению массы материала, изменению свойств его поверхностного слоя и другим нежелательным эффектам.

Состояние поверхности (поверхностные напряжения, загрязнения) может влиять на скорость сублимации. Приблизительно оценить ее можно по следующим формулам.

Скорость сублимации неравновесного испарения чистого вещества с поверхности определяется потоком массы вещества, сублимирующего в единицу времени с единичной площади

$$j_i = \frac{C_i(p_s - p_v)}{\sqrt{2\pi B T_s}}, \quad (2.1)$$

где  $C_i$  — коэффициент испарения ( $0 \leq C_i \leq 1$ );  $p_s$  — равновесное давление насыщенного пара вещества при температуре его поверхности  $T_s$ ;  $p_v$  — давление в облаке паров;

$$B = B_0/\mu; \quad (2.2)$$

$B_0$  — универсальная газовая постоянная;  $\mu$  — молекулярная масса паров.

При сублимации в высоком и сверхвысоком вакууме  $p_v \approx 0$ , поэтому уравнение (2.1) упрощается и принимает вид

$$j_i = \frac{C_i p_s}{\sqrt{2\pi B T_s}} = C_i j_m, \quad (2.3)$$

где  $j_m$  — масса частиц, сталкивающихся в единицу времени с единичной площадью поверхности сублимации в условиях термодинамического равновесия. Значение  $j_m$  в килограммах на метр в квадрате на секунду определяется по формуле

$$j_m = 0,58 \frac{p_s T_s}{\mu}. \quad (2.4)$$

Уравнения (2.1), ..., (2.4) хорошо выполняются лишь при условии, что давление окружающей среды, по крайней мере, на порядок ниже равновесного давления пара ( $p_v \ll p_s$ ) и что лишь пренебрежимо малое количество испаряющихся атомов или молекул возвращается к поверхности испарения. Если вакуум недостаточный ( $p_v \sim p_s$ ), испарившиеся молекулы сталкиваются с молекулами остаточного газа и возвращаются к поверхности испарения. При этом фактическая скорость испарения будет ниже расчетной.

Наиболее точно скорость сублимации определяется экспериментально в условиях, моделирующих космические. В космическом пространстве одновременно с вакуумом действуют также электромагнитные и корпускулярные излучения. Так как энергия связи атомов (молекул) в материале может быть более низкой, чем энергия соответствующих видов излучений (квантов или частиц), то совместное действие вакуума и излучений может усилить эффект сублимации. Это особенно существенно для материалов, которые интенсивно поглощают излучения (например, для  $Fe_2O_3$  и  $ZnO$ , интенсивно поглощающих ультрафиолетовое излучение).

**Изменение оптических радиационных характеристик в вакууме.** В результате удаления защитных газовых и оксидных пленок, а также сублимации поверхностных слоев, имеющих толщину, кратную длине волны излучения, изменяются оптические радиационные характеристики поверхности.

Результаты исследований совместного воздействия вакуума (приблизительно  $10^{-6}$  Па) и ультрафиолетового излучения (с длиной волны не менее 0,22 мкм) на некоторые покрытия свидетельствуют о том, что у белых покрытий в результате таких воздействий обычно возрастает отражательная способность. Органические краски подвержены изменениям в большей степени, чем неорганические. Оптические радиационные характеристики материалов при достаточно низких температурах не могут существенно изменяться из-за низких скоростей сублимации и отсутствия изменения состава. Однако весьма малые потери  $O_2$ , а также  $N_2$  и  $H_2O$  в вакууме при высоких температурах могут вызвать значительные изменения излучательной способности керамик некоторых типов.

**Теплопередача в вакууме.** В вакууме практически отсутствуют конвективный теплообмен и теплопроводность среды, а передача тепла извне происходит только путем лучистого обмена. Кроме того, в вакууме затруднена теплопередача через статически прикасающиеся между собой части изделий из-за микронеровностей поверхности и вакуумных промежутков между ними.

Различают три режима течения газов и в соответствии с этим три режима теплопередачи в них: вязкостный, молекулярно-вязкостный и молекулярный. Границы между этими режимами приближенно определяются значениями безразмерного критерия Кнудсена  $K_n$ , который равен отношению средней длины свободного пробега  $L_0$  частиц газа к характеристическому линейному размеру рассматриваемой системы  $l$ :

$$K_n = L_0/l.$$

Границы режимов следующие:

$K_n \leq 0,005$  — вязкостный режим;

$0,005 < K_n \leq 5,0$  — молекулярно-вязкостный режим.

$K_n > 5,0$  — молекулярный режим.

Характер теплообмена в газе существенно зависит от режима течения газа. При вязкостном и молекулярно-вязкостном режимах теплообмен складывается из передачи тепла теплопроводностью, конвекцией и излучением. При молекулярном режиме конвекция и теплопроводность пренебрежимо малы и теплопередача осуществляется главным образом благодаря лучистому обмену.

Из кинетической теории газов известно, что теплопроводность газа в широком диапазоне не зависит от давления. Когда средняя длина свободного пробега молекул газа становится больше характеристических размеров системы, теплопроводность начинает уменьшаться пропорционально давлению. При переходе к молекулярному режиму теплопроводность газа становится пренебрежимо малой.

**Изменение механических свойств материалов в вакууме.** При предельно низких давлениях космоса наружные или внутренние поверхности раздела в материалах могут нарушаться, в результате чего механические свойства материалов изменяются. Это может быть следствием возникновения либо микроскопических поверхностных трещин, либо интеркристаллитной коррозии.

Из-за изменения свойств поверхностных слоев могут меняться также объемно-механические свойства материалов (прочность при ползучести, сопротивление усталости и т. п.).

При нормальных атмосферных условиях поверхности материалов защищены оксидными пленками, а последние, в свою очередь, покрыты адсорбированными газовыми слоями. В вакууме поверхностные адсорбированные газовые слои улетучиваются, а оксидные пленки могут разрушаться. Вследствие этого адгезия (когезия) возрастает и трение увеличивается.

Все рассмотренное выше относится к отрицательным воздействиям вакуума. В настоящее время проводятся работы по полезному использованию космического вакуума:

для управления положением космического аппарата с помощью диффузионных и сублимационных поверхностей;

для создания сублимационных микродвигателей и т. п.

**Физические характеристики окружающей среды.** Околосолнечное космическое пространство заполнено газовыми частицами главным образом солнечного происхождения. Солнце состоит (в массе) в основном из водорода (приблизительно 90%) и гелия (приблизительно 9%). Газовые частицы со скоростями от 300 до 800 км/с эжектируются из активных областей Солнца в околосолнечное пространство и образуют стационарные потоки плазмы — «солнечный ветер». «Солнечный ветер», состоящий главным образом из ионов водорода и гелия, характеризуется средней концентрацией ионизированных атомов водорода в единице объема и температурой  $T = 10^5$  К. Условия в межпланетной среде довольно сильно изменяются в зависимости от солнечной активности (11-летний цикл, 27-дневные вариации и вспышки). В период повышенной солнечной активности, после появления на Солнце хромосферных вспышек, средние скорости частиц могут возрастать приблизительно до 1000 км/с, а концентрации — до  $10^9$  м<sup>-3</sup>.

На рис. 2.1 приведены приближенные данные о концентрациях некоторых газов на различных расстояниях от поверхности Земли (при средней солнечной активности).

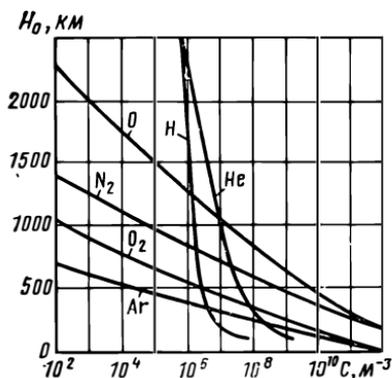


Рис. 2.1. Зависимость концентрации с нейтрального газа в земной атмосфере от высоты над уровнем моря  $H_0$

На небольших (до 100 км) расстояниях от поверхности Земли газ существует практически только в виде нейтральных молекул; на расстояниях, превышающих 100 км, возрастает концентрация электронов и ионов, а на расстояниях более 800 км газ существует преимущественно в виде атомов. При удалении от поверхности Земли на несколько тысяч километров газ-выс частицы обнаруживаются преимущественно в ионизированном состоянии.

Луна обладает массой, меньшей массы Земли. Вследствие этого к настоящему времени она утратила основную часть своей первоначальной атмосферы. Ксенон, криптон, аргон и другие компоненты имеются в составе лунной атмосферы. Концентрация нейтральных частиц у поверхности Луны составляет  $10^{11} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Согласно данным [23], полученным с космического аппарата «Аполлон-14», давление в атмосфере Луны изменяется от  $6,7 \cdot 10^{-3}$  днем до  $2,7 \cdot 10^{-10}$  Па ночью. На рис. 2.2 представлена зависимость концентрации нейтральных частиц в лунной атмосфере от расстояния до ее поверхности.

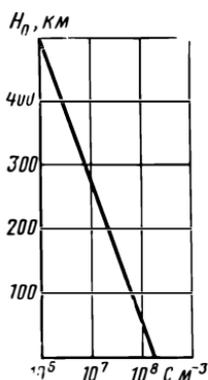


Рис. 2.2. Зависимость концентрации с нейтральных частиц в атмосфере Луны от расстояния до ее поверхности  $H_0$

Атмосфера Земли находится в непрерывном движении и изменении, что связано со многими причинами, в частности с активностью Солнца.

При удалении от поверхности Земли на 100...150 км длина среднего свободного пробега частиц остаточного газа становится равной нескольким десяткам метров, т. е. становится соизмеримой с характеристическими линейными размерами космических аппаратов. Эти условия в соответствии с принятой в вакуумной технике классификацией тождественны высокому вакууму.

Атмосфера Земли не однородна. Состав газа на расстояниях от поверхности Земли, равных 100 км или больших, существенно различен как в химическом отношении, так и по физическому состоянию частиц (молекулы, атомы, ионы). Однако на расстояниях до 100 км атмосфера химически почти однородна.

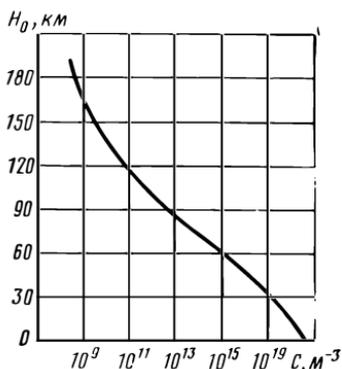


Рис. 2.3. Зависимость концентрации с нейтрального газа в атмосфере Марса от расстояния до его поверхности  $H_0$

Масса Марса меньше массы Земли. На рис. 2.3 представлена зависимость концентрации нейтральных частиц газа в атмосфере Марса от расстояния до его поверхности. В основу построения зависимости принята модель с 100% -ной поверхностной концентрацией  $\text{CO}_2$ , концентрацией нейтральных частиц  $c = 2,78 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$  при  $T = 210 \text{ К}$ . Как показывают данные, полученные американскими межпланетными станциями «Маринер-6» и «Маринер-7», температура поверхности Марса колеблется от 200 до 300 К, а давление — от 0,5 до 10 кПа.

Основной компонент атмосферы планеты —  $\text{CO}_2$  (на больших удалениях  $\text{CO}_2$  может диссоциировать — фотодиссоциировать на  $\text{CO}$  и  $\text{O}$ ). В атмосфере Марса обнаружены также следы  $\text{H}_2\text{O}$  и других веществ.

Венера, как показывают результаты исследований, проведенных с помощью межпланетных автоматических станций «Венера-4», «Венера-5», «Венера-6», «Венера-7», «Маринер-5», обладает чрезвычайно плотной атмосферой.

Давление вблизи поверхности равно 9 МПа, а температура — приблизительно  $500^\circ\text{C}$ . В состав атмосферы вблизи поверхности Венеры входят приблизительно 95%  $\text{CO}_2$ , менее 7%  $\text{N}_2$ , 0,4...1,5%  $\text{O}_2$  и менее 1%  $\text{H}_2\text{O}$  [22].

На расстоянии около 1000 км от поверхности Венеры концентрация атомарного водорода равна приблизительно  $10^9 \text{ м}^{-3}$ , на расстоянии приблизительно 6000 км —  $10^8 \text{ м}^{-3}$  и на расстоянии 20 000 км —  $10^7 \text{ м}^{-3}$ .

**Излучение Солнца.** Солнце — единственный мощный источник лучистой энергии в нашей планетной системе. Суммарная мощность солнечного излучения  $3,86 \cdot 10^{23} \text{ кВт}$ . В переводе на  $1 \text{ м}^2$  видимой поверхности Солнца это составляет 64 000 кВт. На расстоянии  $0,15 \cdot 10^9 \text{ км}$  (т. е. на орбите Земли) плотность солнечного лучистого потока в соответствии с квадратичным законом ослабевает до  $1373 \pm 20 \text{ Вт/м}^2$ . Эту плотность называют солнечной постоянной и обозначают  $S_{\odot}$ . В настоящее время эта величина определена с точностью  $\pm 2\%$ . Кроме этих изменений, имеются еще сезонные вариации  $S_{\odot}$  на  $\pm 3,5\%$ , обусловленные эллиптичностью орбиты Земли.

В расчетах тепловых режимов изделий обычно принимают, что средняя энергетическая яркость Солнца равна  $2,02 \cdot 10^{-9} \text{ кд/м}^2$ , а его радиационная температура (т. е. температура абсолютно черного тела, которое, имея угловой размер Солнца, создает в вакууме на поверхности, перпендикулярной к падающим лучам лучистую энергетическую освещенность, равную солнечной) составляет 5785 К [23]. Полагают, что излучательная способность Солнца равна 0,99. Такое предположение в ряде случаев может оказаться недостаточно точным. На самом деле спектр Солнца отличается от спектра абсолютно черного тела при температуре 5785 К, а распределение яркости по солнечному диску неодинаково. В центре визуальная яркость в 1,22 раза больше средней. Ближе к краю яркость солнечного диска уменьшается и изменяется длина волны. Эта зависимость, сильнее всего проявляющаяся вблизи края солнечного диска графически изображена на рис. 2.4.

Удельный вес красных лучей по мере удаления от центра солнечного диска к его краю возрастает.

Вокруг Солнца существует меняющаяся светящаяся корона. Ее температура около  $10^6 \text{ К}$ , а диаметр превышает диаметр Солнца иногда в 2...3 раза. Лучистый поток от короны примерно в  $0,9 \cdot 10^6$  раз слабее потока от самого Солнца и приблизительно вдвое слабее света полной Луны [23]. Поэтому при решении задач, связанных с тепловым режимом космических аппаратов, излучением короны всегда можно пренебречь. Однако корона генерирует излучение в ультрафиолетовом диапазоне длин волн ( $2 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-2} \text{ мкм}$ ), что важно знать при изучении воздействия коротковолновой радиации на оптические характеристики терморегулирующих покрытий изделий, хотя мощность ультрафиолетового излучения, обусловленного короной, составляет менее 2% от мощности ультрафиолетового излучения, обусловленного солнцем.

Большое значение в тепловом балансе изделий имеет длинноволновая область спектра (от 0,3 до 3 мкм), в которой сосредоточено около 92% всей лучистой энергии Солнца. На область длин волн от 0,3 до 0,38 мкм приходит-

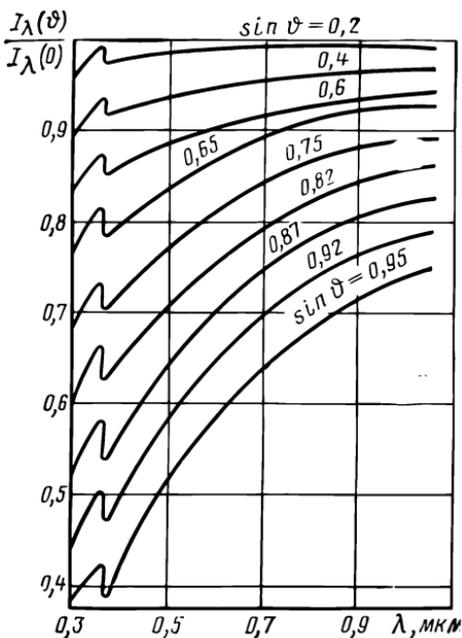
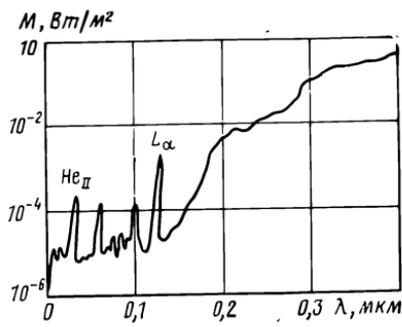


Рис. 2.4. Зависимость яркости диска Солнца  $I_{\lambda}(\vartheta)$  от длины волны  $\lambda$  для различных расстояний от центра Солнца ( $\vartheta$  — телесный угол)

Рис. 2.5. Спектральное распределение интенсивности излучения Солнца при максимуме солнечных пятен



ся около 6% энергии Солнца, а на область от 0,2 до 0,3 мкм — примерно 1,4%. И тем не менее именно эта коротковолновая часть спектра заслуживает особого внимания, так как ультрафиолетовая радиация является одной из причин, вызывающих изменение коэффициентов лучеиспускания внешних поверхностей космических аппаратов, определяющих их тепловой режим.

Верхней границей коротковолновой области солнечного спектра условно считается ультрафиолетовая граница видимой части спектра с длиной волны излучения 0,38 мкм. Большая часть энергии излучения этой области (около 75%) содержится в части спектра от 0,2 до 0,38 мкм.

Спектральное распределение интенсивности излучения  $M$  Солнца в ультрафиолетовой и рентгеновской областях показано на рис. 2.5.

Как видно из рисунка, в коротковолновой части, начиная примерно с 0,18 мкм, на непрерывный спектр излучения накладывается ряд эмиссионных линий. Наиболее интенсивная из них линия излучения атомарного водорода; так называемая линия «Лайман-альфа»,  $L_{\alpha}$  ( $\lambda=0,1216$  мкм) со средней интенсивностью около  $0,5 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>, вторая по интенсивности линия ионизированного гелия  $He_{II}$  ( $\lambda=0,0304$  мкм) с интенсивностью около  $0,03 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>. Энергия непрерывного излучения, включая энергию фона в более коротковолновой части спектра, обычно превосходит энергию, содержащуюся в эмиссионных линиях (за исключением отдельных наиболее ярких линий).

В рентгеновской области спектра интенсивность излучения зависит от солнечной активности. Одним из проявлений солнечной активности являются солнечные пятна, появление которых имеет 11-летнюю периодичность.

Вариации интенсивностей упругих эмиссионных линий становятся заметными с уменьшением длины волны. Интенсивность непрерывного солнечного излучения в области  $\lambda > 0,15$  мкм практически не меняется во времени. Содержание  $\gamma$ -лучей в солнечной радиации ничтожно, и их влиянием можно пренебречь.

**Биологические внешние воздействующие факторы.** Биологические воздействия в значительной степени влияют на надежность и работоспособность некоторых агрегатов и систем, космических аппаратов и ракет-носителей, причем это особенно заметно при наличии грибковых образований. Оптимальны-

ми условиями для развития грибковых заболеваний, в частности плесени, являются влажность воздуха более 85%, температура 20 ... 30°C и застой воздуха. Именно под воздействием плесени происходят наибольшие разрушения пластмасс, дерева, резины, кожи. Плесень образует на поверхности материала водную пленку, которая способствует их химическому разложению и потере важнейших свойств.

Кроме того, на надежность оборудования влияют насекомые, особенно термиты. Определенную опасность для аппаратуры (в основном кабелей и проводов) могут представить грызуны: крысы и мыши.

Защиту от биологических факторов воздействия осуществляют химическим и конструктивным методами. Наиболее эффективна защита конструктивными методами, в том числе путем замены материалов, на которых может образоваться плесень или съедобных для насекомых и грызунов, изменением внутреннего климата устройств, уменьшением влажности воздуха, созданием надежных защитных оболочек и т. п.

### 2.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

**Общие понятия.** В процессе эксплуатации ДУ и входящие в нее системы подвергаются целому комплексу механических воздействий. Это статические и динамические нагрузки при транспортировке и на старте, при заправке и надуве топливных баков, при работе на активном участке и на орбите.

Классификация воздействующих факторов механического характера представлена в табл. 2.

Как видно из таблицы, механические воздействия представляют собой статические, вибрационные и ударные нагрузки, линейные ускорения и акустический шум.

К статически действующим силам относятся медленно изменяющиеся силы, т. е. силы, время приложения которых велико по сравнению с некоторым характерным для рассматриваемого устройства временем. К динамически действующим силам относятся быстро изменяющиеся силы, время приложения которых (или существенное изменение во времени их значений) сравнимо с этим характерным временем. Для космических аппаратов таким характерным временем является период собственных упругих колебаний какого-либо тона. Примером динамически действующей силы, возбуждающей упругие колебания, является тяга в период запуска и выключения двигателя. Примером статически действующих сил может быть сила тяжести или тяга при изменении высоты полета. Одна и та же сила может быть в одном случае статической, в другом — динамической.

Таблица 2



При проектировании и эксплуатации космических аппаратов рассматривают два типа колебаний:

траекторные колебания — колебания космического аппарата<sup>1</sup> как абсолютно жесткого тела, зависящие в основном от параметров траектории полета. Эти колебания определяют динамику полета космического аппарата — его устойчивость и управляемость; частоты траекторных колебаний находятся в диапазоне от долей до нескольких герц;

упругие колебания — изменения напряженно-деформированного состояния космического аппарата. Эти колебания могут привести к возникновению опасных напряжений, ухудшению условий работы систем и аппаратуры. Частоты упругих колебаний, влияющих на общее напряженно-деформированное состояние космического аппарата, охватывают диапазон до 2500 Гц.

Сила тяжести, некоторые динамические силы, давления в баках и тяга являются постоянно действующими силами. Номинальные значения этих сил, мало изменяющиеся от одного экземпляра<sup>1</sup> данной конструкции к другому, всегда учитываются при определении параметров так называемого невозмущенного (программного) движения космического аппарата. Поэтому их часто называют программными силами. Всякое отклонение действительных значений внешних сил от программных относят к категории внешних возмущающих сил. По своей природе возмущающие силы являются случайными функциями времени. Так, случайным является воздействие на аппарат в определенный момент полета порыва ветра определенной структуры и интенсивности или отклонение направления действия тяги от продольной оси и т. п.

**Нагрузки, обусловленные динамическими параметрами атмосферы.** Условия работы космического аппарата в полете во многом зависят от состояния окружающей атмосферы. Значения аэродинамических сил, действующих на космический аппарат в атмосфере, определяются скоростью и высотой его полета, а также плотностью и температурой воздуха. Совместное влияние плотности воздуха  $\rho$  и истинной скорости полета  $v$  на эти силы характеризуется скоростным напором  $\rho v^2/2$ . Так как  $\rho$  сильно уменьшается с высотой, то скоростной напор может достигать сравнительно больших значений только в приземном слое атмосферы толщиной 20...30 км, который обычно называют плотным слоем атмосферы, ибо в нем содержится основная масса воздуха. Температура влияет на нагрев оболочки корпуса космического аппарата, на

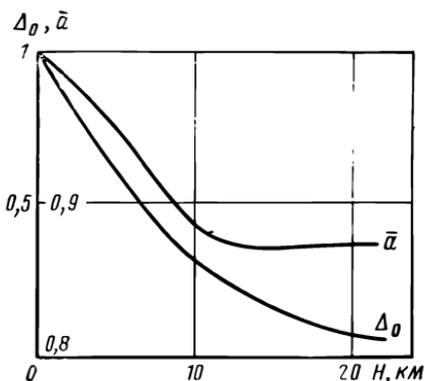


Рис. 2.6. График изменения относительной плотности воздуха  $\Delta_0$  и относительной скорости звука  $\bar{a}$  по высоте

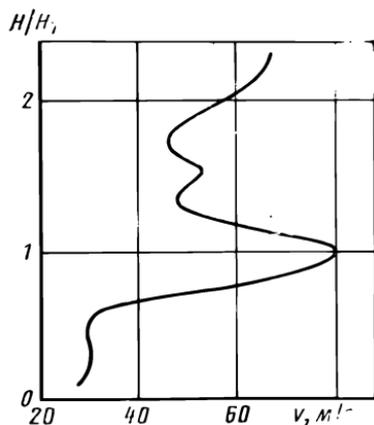


Рис. 2.7. График изменения средней скорости ветра по относительной высоте  $H/H_T$

скорость распространения звука  $a$ , т. е. на полетное число Маха  $M = v/a$  и плотность воздуха.

Ввиду непрерывных колебаний значений параметров атмосферы при расчете номинальной траектории пользуются некоторыми средними зависимостями плотности воздуха и скорости распространения звука от высоты, которые задаются обычно в виде таблиц так называемой стандартной неподвижной атмосферы. Для примера на рис. 2.6 даны зависимости относительной плотности воздуха  $\Delta_0 = \rho/\rho_0$  и относительной скорости звука  $\bar{a} = a/a_0$  от высоты, где  $\rho_0, a_0$  — соответственно плотность воздуха и скорость звука на уровне моря при нормальных условиях.

Отклонение действительных значений параметров атмосферы от стандартных учитывается введением дополнительных аэродинамических нагрузок (возмущающих сил). Во многих случаях эти дополнительные нагрузки, в частности из-за ветра, оказываются определяющими для прочности конструкции тяжелого космического аппарата.

Действие ветра на космический аппарат в полете сводится к изменению значения и направления его скорости относительно воздуха. Приблизительно влияние ветра можно оценить изменением углов атаки и скольжения, а также соответствующим изменением скоростного напора.

Скорость ветра зависит от географической широты места старта, времени года и даже суток, а в основном от высоты полета  $H$ . С увеличением последней скорость ветра сначала возрастает, достигая своего наибольшего значения на высоте тропопазы  $H_T$ , а затем уменьшается. Примерный график изменения средней скорости ветра  $v$  по относительной высоте показан на рис. 2.7. Замечено, что во многих районах Земли в области тропопазы иногда наблюдаются большие по толщине (порядка нескольких километров) установившиеся воздушные течения большой протяженности — так называемые струйные течения. Ширина этих течений иногда достигает 600 км. Максимальные значения средних скоростей воздуха в этих струйных течениях доходит до 100 м/с. Наиболее интенсивные струйные течения наблюдаются зимой в районе Тихого океана, где зафиксированы максимальные скорости ветра 120 и даже 180 м/с. Максимальные скорости ветра над восточной частью Северной Америки достигают 130 м/с, а над Центральной ее частью — 160 м/с [3].

В больших пределах изменяются и значения сдвигов скорости ветра по высоте. Практически эти сдвиги определяются как разность скоростей ветра на двух сравнительно близко расположенных высотах (300 и 500 м), деленная на разность этих высот. Наиболее часто (с вероятностью 40...50%) встречаются сдвиги порядка 0,015...0,025 1/с. В некоторых ветреных районах отмечаются (с вероятностью 2...3%) сдвиги порядка 0,07...0,08 1/с. Имеется предположение, что большим скоростям ветра соответствуют большие сдвиги. Данные по сдвигу являются важной характеристикой ветрового потока, ибо они определяют его профиль, а следовательно, и характер его воздействий на космический аппарат.

Наряду с установившимися перемещениями больших масс воздуха в атмосфере существуют местные вихревые течения небольшой протяженности, но со сравнительно большими скоростями, которые получили название порывов ветра. Наличие больших турбулентностей отмечено во всех слоях атмосферы в зоне кучево-дождевых облаков, над пересеченной местностью и особенно на флангах струйных течений.

В первом приближении при расчете нагрузок можно пользоваться условно законом изменения истинной скорости порыва ветра в направлении движения космического аппарата (рис. 2.8), определяемым выражением

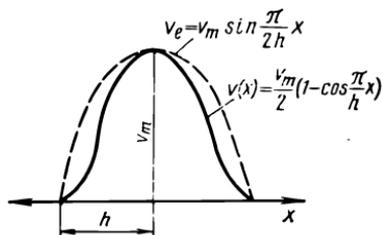


Рис. 2.8. Условные профили порыва ветра

$$v(x) = \frac{v_m}{2} \left( 1 - \cos \pi \frac{x}{h} \right),$$

где  $x$  — текущее значение  $h$ ;  $v_m$  — индикаторная скорость порыва ветра.

Расстояние  $h$ , на протяжении которого скорость порыва ветра изменяется от нуля до максимального значения, лежит в пределах 30...60 м. Значение  $h$  увеличивается с увеличением эффективной скорости ветра  $v_l$ . Установлено, что влиянием высоты полета (до 12,5 км) и скорости установившегося ветра на значение  $v_l$  практически можно пренебречь. Истинное значение индикаторной скорости порыва ветра  $v_m$  при таком способе обработки экспериментальных данных будет примерно в 1,3...1,8 раза больше значения эффективной  $v_l$ . Так как наибольшие измеренные значения  $v_l$  в указанном диапазоне высот были около 15 м/с, то можно предполагать, что максимальные значения  $v_m$  будут порядка 15...30 м/с.

Исходя из установившейся изотропности атмосферы при порывах ветра направление скорости ветра предполагается перпендикулярным вектору скорости космического аппарата, т. е. воздействие ветра оценивается эквивалентным изменением угла атаки.

Отсутствие достаточных сведений о действительных характеристиках атмосферной турбулентности привело к необходимости применения условных способов учета ее воздействия на космические аппараты, т. е. к нормированию ее параметров. В результате часто при расчетах учитывается отдельно реакция космических аппаратов на одиночные порывы ветра и так называемые циклические порывы, что имитирует в какой-то мере воздействие непрерывной атмосферной турбулентности. При этом циклический порыв представляется в виде нескольких следующих друг за другом (на расстоянии 70...300 м) порывов ветра сравнительно малой интенсивности, имеющих противоположные направления. Вообще говоря, выбор расчетного ветрового режима зависит от конкретных требований, предъявляемых к космическому аппарату.

**Нагрузки, обусловленные массовыми характеристиками.** Прежде чем приступить к определению нагрузок и динамических характеристик конструкции, составляются эпюры распределения массы по длине корпуса для всех случаев нагружения. На стадии эскизного проектирования по приближенным формулам, оценивается общая масса космического аппарата, масса компонентов топлива и лимиты масс для основных его узлов: ДУ, системы управления, и всех отсеков корпуса. В процессе разработки проекта и выполнения проекторочных расчетов на прочность эти массы уточняются и более ясно вырисовывается характер их распределения. На стадии подготовки рабочих чертежей конструкции точно рассчитываются массы элементов корпуса, положение центра тяжести аппарата и его моменты инерции относительно продольной  $I_x$  и поперечных  $I_y, I_z$  осей, проходящих через центр тяжести.

Весовые эпюры для каждого отсека строятся с учетом характера воздействия грузов на силовую часть корпуса. Так как обычно многие грузы крепятся к корпусу в продольном и поперечном направлениях различными конструктивными элементами, то и распределение составляющих веса по этим направлениям также будет различным. Например, вес жидкости у ракет баллистического типа с несущими баками передается на корпус в продольном направлении (в месте присоединения нижнего днища бака к обечайке) в виде распределенной по контуру поперечного сечения нагрузки, в поперечном направлении — в виде поверхностной нагрузки (гидростатического давления), распределенной по части длины бака ниже зеркала жидкости. У ракет с подвесными баками как в поперечном, так и в продольном направлении вес жидкости и вес конструкции самих баков передается на корпус в виде системы сосредоточенных сил (в местах крепления баков к корпусу). Способ построения эпюр распределения веса зависит от нужной точности исходных данных.

Посредством численного или графического интегрирования указанных эпюр определяются поперечная  $Q_G$  и продольная  $N_G$  силы в любом сечении (абсциссой  $x_1$  корпуса). Их сумма будет равна весу всех элементов конструкции, лежащих по одну сторону от этого сечения:

$$Q_G(x_1) = \int_0^{x_1} q_{Gy}(x_1) dx_1 + \sum_{i=1}^k G_{yi}; \quad (2.5)$$

$$N_G(x_1) = \int_0^{x_1} q_{Gx}(x_1) dx_1 + \sum_{i=1}^k G_{xi},$$

где  $k$  — число элементов конструкции;  $q_{Gx}$ ,  $q_{Gy}$  — продольные и поперечные силы, обусловленные весом.

Через  $G_{xi}$ ,  $G_{yi}$  обозначены силы, обусловленные весом сосредоточенных грузов и приложенные к корпусу на участке с координатами  $(0, x_i)$ . При креплении этих сосредоточенных грузов к корпусу в нескольких сечениях в качестве  $G_{xi}$  и  $G_{yi}$  берутся соответствующие опорные нагрузки.

Повторное интегрирование эпюры  $Q_G(x_1)$  дает значения изгибающего момента  $M_G(x_1)$  в этом сечении:

$$M_G(x_1) = \int_0^{x_1} \int_0^{x_1} q_{Gy}(x_1) dx_1 dx_1 + \sum_{i=1}^k G_{yi}(x_1 - x_{1i}) + \sum_{i=1}^k \Delta M_{Gj}.$$

Здесь  $x_{1i}$  — абсцисса места крепления (в поперечном направлении) сосредоточенного груза к корпусу,  $\Delta M_{Gj}$  — сосредоточенные моменты от массы грузов в сечении с абсциссой  $x_{1j}$  на участке с координатами  $0, x_1$ . В конечном сечении корпуса (при  $\bar{x}_1 = l$ ) поперечная сила  $Q_G(l)$  будет равна полному весу аппарата  $G$ , а изгибающий момент  $M_G(l) = G(l - x_{1r})$ , где  $x_{1r}$  — абсцисса центра тяжести космического аппарата,  $l$  — его длина.

Масса космического аппарата в полете определяется как сумма массы конструкции  $m_k$  (с полезным грузом) и текущей массы топлива  $m_t$ :

$$m(t) = m_k + m_t(t) = m_k + m_{t0} - \int_0^t \frac{dm_{t0}}{dt} dt, \quad (2.6)$$

где  $m_{t0}$  — начальная (стартовая) масса топлива, которая в общем случае зависит от способа заправки и температуры топлива  $\frac{dm_{t0}}{dt}$  — секундный расход массы.

Удобно вместо времени  $t$  пользоваться относительным временем  $\bar{t} = t/T$ , где  $T$  — некоторое фиктивное время, равное времени, в течение которого сгорела бы вся стартовая масса космического аппарата  $m_0 = m_k + m_{t0}$  с секундным расходом топлива  $\frac{dm_{t0}}{dt}$ :

$$T = m_0 \int \frac{dm_{t0}}{dt}. \quad (2.7)$$

В этом случае при постоянном секундном расходе топлива формула (2.6) может быть записана в более простом виде:

$$m(t) = m_k + m_{t0} \left( 1 - \frac{t}{m_{t0}} \frac{dm_{t0}}{dt} \right) = m_0 (1 - \bar{t}). \quad (2.8)$$

Очевидно, что при  $\bar{t} = 0$   $m(0) = m_0$ , а при  $\bar{t} = \bar{t}_k$  (в конце участка активного полета)

$$m(\bar{t}_k) = m_0 (1 - \bar{t}_k). \quad (2.9)$$

Обычно конечная масса космического аппарата зависит не только от массы самой конструкции  $m_k$ , но и от массы остатков топлива в баках, и лишь в предельном случае

$$m(\bar{l}_k) = m_k.$$

Параметр  $\bar{l}_k$  — важная характеристика конструкции космического аппарата, особенно баллистического типа. Он связан простой формулой с относительной конечной массой  $\mu_k = 1 - \bar{l}_k$ , которая в соответствии с известной формулой Циолковского определяет конечную скорость космического аппарата. Иными словами, параметр  $\bar{l}_k$  является своего рода критерием качества конструкции. Чем больше  $\bar{l}_k$ , тем более совершенна (при заданном значении  $m_r$ ) конструкция космического аппарата.

Массовые моменты инерции относительно осей связанной системы координат, например оси  $z_i$ , вычисляются по формулам вида

$$I_{z_i} = \frac{1}{g_0} \left[ \int_0^l q_{Gy}(x_1) (x_1 - x_{1T})^2 dx_1 + \sum_{i=1}^k G_{yi} (x_{1Ti} - x_{1T})^2 \right], \quad (2.10)$$

где  $x_{1Ti}$  — абсцисса центров тяжести сосредоточенных грузов.

Моменты инерции, масса и положение центра тяжести характеризуют динамические свойства космического аппарата и во многом определяют режимы нагружений при отработке.

**Нагрузки от тяги.** Из уравнения движения точки переменной массы следует, что при отделении от тела частицы массой  $\frac{dm}{dt}$  с относительной скоростью  $v_t$  на это тело действует реактивная сила, равная

$$P_D = v_t \frac{dm}{dt}. \quad (2.11)$$

При полете в плотных слоях атмосферы на опору камеры сгорания, кроме силы  $P_D$ , действует дополнительная сила, пропорциональная разности давлений газов на среде сопла  $p_c$  и давления внешней среды на наружную поверхность корпуса сопла  $p_H$ ,

$$P_{ст} = (p_c - p_H) F_0, \quad (2.12)$$

где  $F_0$  — площадь выходного сечения сопла двигателя.

Обычно оперируют с суммарным значением этих сил, которое и называют тягой  $P$ :

$$P = P_D + P_{ст}. \quad (2.13)$$

Принято эту суммарную силу для любой высоты полета выражать через стендовое значение тяги двигателя  $P_0$ , которое находится посредством измерения усилий в стержнях рамы ДУ при наземных испытаниях.

Из выражений (2.12) и (2.13) следует, что при  $p_H = p_0$  (где  $p_0$  — атмосферное давление у Земли) стендовое значение тяги равно

$$P_0 = P_D + F_0 (p_c - p_0).$$

Определив из этого выражения составляющую  $P_D$  (не зависящую от  $H$ ), получим окончательное выражение для тяги

$$P = P_0 + F_0 (p_0 - p_H). \quad (2.14)$$

Тяга по своей природе является поверхностной силой. Однако на корпус она передается либо в виде сосредоточенных сил (в местах присоединения рамы ДУ), либо в виде распределенной по контуру поперечного сечения кор-

пуса нагрузки (при наличии сравнительно большого числа опорных точек у рамы).

Так как относительная скорость  $v_l$  зависит в основном от теплотворной способности топлива и является постоянной для каждого двигателя, то характер изменения тяги во времени определяется изменением секундного расхода, иными словами конструкцией двигателя, схемой его запуска и выключения, а также режимом регулирования расхода компонентов топлива в процессе полета.

Законы нарастания и спада тяги в процессе запуска и выключения двигателя устанавливаются обычно экспериментально.

В некоторых случаях эти законы могут быть описаны уравнениями вида

$$P(t) = P_0(1 - e^{-\tau t}). \quad (2.15)$$

У некоторых двигателей иногда наблюдаются пусковые пики тяги, превышающие  $P_0$ .

Если не учитывать газодинамические отклонения вектора тяги, то можно предположить, что линия ее действия совпадает с продольной осью сопла и камеры сгорания. Тогда точность совпадения направления действия тяги с продольной осью космического аппарата, проходящей через центр тяжести, определяется в основном погрешностями монтажа самой ДУ и отсеков корпуса космического аппарата. Таким образом, в общем случае приходится считаться с наличием как поперечной составляющей тяги  $P_{1y} = \Delta\beta P$ , так и статического возмущающего момента (относительно поперечной оси, проходящей через центр тяжести космического аппарата), равного

$$M_{Pb} = P[\Delta y_1 - \Delta\beta(x_{1n} - x_{1T})], \quad (2.16)$$

где  $\Delta y_1$ ,  $\Delta\beta$  — эксцентриситет и угол наклона вектора тяги;  $x_{1n}$  — абсцисса места крепления рамы ДУ к корпусу (рис. 2.9). При использовании нескольких ДУ возможно появление как статических (на рабочем режиме), так и динамических (на переходных режимах) возмущающих моментов, обусловленных разбросом значений тяги отдельных двигателей.

**Аэродинамические нагрузки.** При движении в плотных слоях атмосферы на космический аппарат действуют внешние поверхностные аэродинамические силы. Значения этих сил в каждой точке поверхности корпуса характеризуются нормальной  $p^n$  и касательной  $p^\tau$  составляющей давления (рис. 2.10).

Нормальное давление можно представить в виде суммы статического атмосферного давления воздуха  $p_H$  и некоторого избыточного аэродинамического давления  $\Delta p^n$ , пропорционального скоростному напору  $q$ :

$$p^n = p_H + \Delta p^n.$$

Значение этого избыточного давления зависит от угла атаки  $\alpha$ , числа  $M$  и формы корпуса. Характер распределения  $\Delta p^n$  по контуру поверхности корпуса и закон изменения его по  $M$  и  $\alpha$  обычно устанавливают эксперименталь-

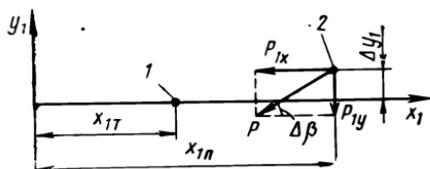


Рис. 2.9. Составляющие тяги в связанной системе координат:

1 — центр тяжести; 2 — место крепления рамы ДУ к корпусу

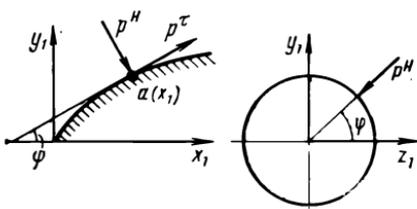


Рис. 2.10. Составляющие аэродинамической силы

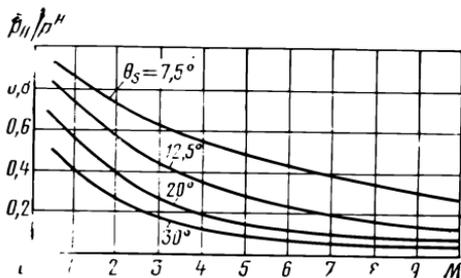


Рис. 2.11. Зависимость относительного давления от  $M$  и  $\theta_s$  для конуса

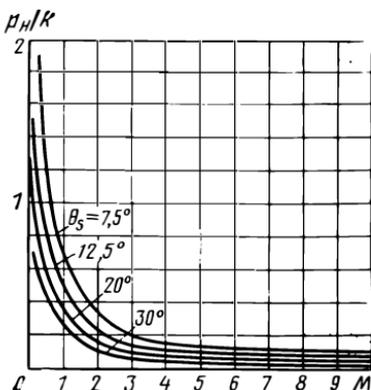


Рис. 2.12. График изменения  $p_H/k$  при изменении  $M$  при разных  $\theta_s$  для конуса

но, путем продувок специальных дренированных моделей. Только для некоторых форм тел, например для конической поверхности при малых углах атаки, стационарные значения  $\Delta p^H$  с достаточной точностью могут быть определены теоретическим путем. В частности, при  $\alpha=0$  это давление, одинаковое для всех точек конуса, зависит только от числа  $M$  набегающего потока и угла полураствора конуса  $\theta_s$ . Зависимости  $p_H/p^H$  от  $M$  при разных  $\theta_s$ , определенные по таблицам Копалла, представлены на рис. 2.11. Этими зависимостями можно пользоваться и для приближенного вычисления  $p^H$  для передней части корпуса, выполненной из усеченных конусов, беря местные значения  $\theta_s$ .

При углах атаки, отличных от нуля, ( $\alpha < 5^\circ$ ) и при  $M < 5$  давление  $p^H$  с достаточной точностью можно находить по формуле

$$p^H(\alpha) = p^H(\alpha = 0) - k\alpha \cos \theta_s.$$

Значения коэффициента  $k$  определяются по графикам, приведенным на рис. 2.12. Для  $M > 5$  с успехом можно пользоваться ньютоновской теорией, причем иногда не делая ограничений на угол атаки.

Обычно на передней (конической) части корпуса  $p^H$  значительно превосходит  $p_H$ . На цилиндрической части корпуса нормальное давление при сверхзвуковых скоростях мало отличается от атмосферного. Большие отрицательные значения  $\Delta p^H$  (при  $M > 1$ ) наблюдаются только на днище корпуса и особенно при свободном полете аппарата. Наличие струи выходящих из сопла газов существенно изменяет донное давление  $p_d^H$ . В некоторых случаях оно может даже превосходить  $p_H$ . Зависимость  $p_d^H$  от числа  $M$  с учетом взаимодействия внешнего потока со струей двигателя определяется в каждом конкретном случае экспериментально. При высоких дозвуковых скоростях полета большие отрицательные значения  $\Delta p^H$  появляются и за угловыми точками контура корпуса (в местах стыков конических частей с цилиндрическими). В зоне  $0,7 < M < 1,1$  в местах сочленения цилиндрической поверхности с конической наблюдается резкое изменение местного статического давления. Это давление характеризуется в основном углом полураствора конической части корпуса и углом атаки аппарата. Для сравнительно малых значений указанных параметров максимальное местное статическое давление приближенно определяется формулой

$$p_{\max} = p_H [0,25 + \sqrt{2} (\sin \theta_s + \alpha \cos \theta_s)^2].$$

Касательная составляющая давления  $p^t$  практически одинакова для всех точек поверхности корпуса. Ее значение зависит только от скорости и высоты полета. При расчетах на прочность элементов конструкции, воспринимающих аэродинамические силы, влиянием этой составляющей можно пренебречь почти во всех случаях (исключение, в частности, составляют элементы конструкции, перемещающиеся в полете в плоскостях, образующих малый угол с направлением полета).

При исследовании прочности конструкции приходится чаще всего оперировать с суммарными усилиями от аэродинамических сил. Имея графики распределения давления  $\Delta p^n(x_1, \varphi)$  для различных контуров, вычисляют погонные значения составляющих аэродинамических нагрузок (продольной и поперечной сил), пользуясь приближенными выражениями

$$\frac{\partial x(x_1)}{\partial x_1} = 2\pi a(x_1) p^t + a(x_1) \int_0^{2\pi} \Delta p^n(x_1, \varphi) \operatorname{tg} \varphi(x_1) d\varphi; \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial y(x_1)}{\partial x_1} = a(x_1) \int_0^{2\pi} \Delta p^n(x_1, \varphi) \sin \varphi d\varphi, \quad (2.18)$$

где  $a(x_1)$  — радиус корпуса в сечении с абсциссой  $x_1$ ,  $\varphi(x_1)$  — угол между осью  $x_1$  и касательной к образующей оболочки корпуса в том же сечении (см. рис. 2.10).

Учитывая зависимость  $\Delta p^n$  от  $\alpha$  и  $q$ , эти формулы обычно пишут в виде

$$\frac{\partial x_1}{\partial x_1} = qS \frac{\partial C_{1x}}{\partial x_1};$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial x_1} = qS\alpha \frac{\partial C_n^\alpha}{\partial x_1}.$$

Здесь  $S$  — некоторая характерная площадь, например площадь миделя корпуса;  $C_{1x}$  — коэффициент лобового сопротивления;  $C_n^\alpha$  (или  $C_{1y}^\alpha$ ) — производная по углу атаки от коэффициента поперечной аэродинамической силы, так что

$$\frac{\partial C_n^\alpha}{\partial x_1} = \frac{a(x_1)}{\alpha S} \int_0^{2\pi} \Delta p^n(x_1, \varphi) d\varphi. \quad (2.19)$$

Основная часть аэродинамической нагрузки действует на головную (коническую) часть корпуса. На расстоянии двух-трех диаметров от места стыка конической части с цилиндрической подъемная сила при малых углах атаки практически уже не действует. Роль цилиндрической части при расчете  $y_1(x_1)$  существенно возрастает лишь при больших углах атаки.

Интегрируя (2.19) по  $x_1$ , можно найти значения продольной  $N_a$  и поперечной  $Q_a$  составляющих силы и изгибающего момента  $M_a$  в любом сечении с абсциссой  $x_1$  корпуса, обусловленных аэродинамической нагрузкой:

$$N_a(x_1) = qS \int_0^{x_1} \frac{\partial C_{1x}}{\partial x_1} dx_1; \quad (2.20)$$

$$Q_a(x_1) = qSa \int_0^{x_1} \frac{\partial C_n^a(x_1)}{\partial x_1} dx_1; \quad (2.21)$$

$$M_a(x_1) = qSa \int_0^{x_1} dx_1 \int_0^{x_1} \frac{\partial C_n^a(x_1)}{\partial x_1} dx_1. \quad (2.22)$$

Сила донного сопротивления

$$X_n = (p_n^H - p_H) \Delta F_d,$$

где  $\Delta F_d$  — площадь дна корпуса, свободная от воздействия струи двигателя, при герметичном корпусе двигателя отсека прикладывается в конце сечения (при  $x_1 = l$ ). При негерметичном корпусе двигателя отсека, т. е. при малом отличии давления внутри отсека от внешнего донного давления, местом приложения силы  $X_n$  можно считать место присоединения к корпусу ближайшего к хвосту днища герметичного отсека.

Сумма  $N_a(l)$  и  $X_n$  равна силе полного лобового сопротивления космического аппарата  $X$ . Обычно  $X$  достигает своего максимального значения в области больших скоростных напоров.

При расчете нагрузок приходится пользоваться как общими, так и распределенными аэродинамическими характеристиками. Поэтому всегда особое внимание уделяется согласованию расчетов составляющих  $y_1(x_1)$  и  $M_a(x_1)$  по данным дренажных и весовых продувок. Практически это осуществляется по-

средством некоторой корректировки эпюры  $\frac{\partial C_n^a(x_1)}{\partial x_1}$  (в основном на цилиндрическом участке корпуса).

Для космических аппаратов пакетной схемы, оснащенных боковыми ускорителями, расчет продольных и поперечных составляющих сил и изгибающих моментов, обусловленных аэродинамическими нагрузками, проводится отдельно для каждого ускорителя (с учетом соответствующих реакций в местах их соединения).

Характер приложения поперечных составляющих стационарных аэродинамических сил к корпусу в основном определяется законом изменения углов атаки во времени.

**Акустическое воздействие.** Акустическое воздействие связано с возбуждением сильных колебаний среды в диапазоне звуковых частот. Источником акустических колебаний являются различного рода шумы, создаваемые, например, работой двигателей.

На границе газовой струи, истекающей из сопла ракетного двигателя со сверхзвуковой скоростью, обычно образуется зона турбулентного потока, которая генерирует в окружающее воздушное пространство звуковые волны различной частоты. Толщина этой зоны (а следовательно, и предельные масштабы распространяющихся вниз по потоку вихрей) непрерывно увеличивается по мере удаления от среза сопла. Соответственно изменяется и спектр частот пульсаций раздаваемого точками струи акустического давления. В области, расположенной вблизи среза сопла, находятся источники высокочастотных звуковых волн, а в области струи, расположенной ниже по потоку, — источники в основном низкочастотных звуковых волн. В области смешения, в которой поток остается сверхзвуковым, возможно генерирование дополнительных пульсаций давления, обусловленное взаимодействием ударных волн с турбулентным потоком.

Интенсивность шума, создаваемого такой струей, пропорциональна ее средней скорости в степени от 6 до 8. При этом ее акустическая мощность составляет 0,4 ... 0,8% от механической мощности двигателя. Отсюда следует, что с увеличением тяги двигателя космических аппаратов возможно пропор-

циональное увеличение суммарного уровня акустической нагрузки на поверхность их корпуса. В тех случаях, когда эти уровни равны 150 дБ и более, воздействие акустических нагрузок оказывает существенное влияние на режимы вибраций элементов конструкции космического аппарата, на функционирование различных приборов и сопротивление усталости отдельных частей корпуса аппарата, расположенных вблизи струи. Иногда, например при кольцевом расположении сопел многокамерного двигателя (когда имеются сравнительно большие свободные площади днища корпуса космического аппарата между соплами), пульсация акустического давления внутри двигательного отсека может приводить к вынужденным продольным упругим колебаниям конструкции в целом, иными словами, может оказывать влияние и на прочность даже тех узлов конструкции, которые находятся внутри корпуса космического аппарата.

Напряжения в конструкции в основном определяются видом функции амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) конструкции. Поэтому отдельные элементы имеют наибольшие колебания с собственными частотами. Колебания могут существенно увеличиваться из-за механической передачи энергии с одной поверхности на другую.

При анализе вибраций от шума ракетных двигателей приходится рассматривать вероятностные характеристики распределения амплитуд. Это распределение близко к распределению Релея и может быть описано уравнением

$$P\left(\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right) = \frac{\sigma}{\bar{\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}\right)^2},$$

где  $\sigma$  — пиковое напряжение;  $P$  — вероятность появления пиковых напряжений;  $\bar{\sigma}^2$  — средний квадрат напряжения.

Средний квадрат напряжения определяется соотношением

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{\pi}{4\gamma} \omega_0 S(\omega_0) \sigma_0^2,$$

где  $\gamma$  — коэффициент демпфирования;  $\omega_0$  — собственная частота колебаний конструкции;  $S(\omega_0)$  — ордината функции шума;  $\sigma_0$  — напряжение в конструкции от постоянно действующего единичного давления.

**Невесомость.** При свободном полете космического аппарата гравитационные силы и ускорения имеют значения, намного порядков меньшие, чем в обычных земных условиях. Такие условия принято называть невесомостью. В этом случае при движении топлива в гидросистемах доминируют не вес и сила давления, а силы межмолекулярного взаимодействия как внутри жидкости, так и между жидкостью и газом (паром), жидкостью и ограничивающими ее стенками. Дополнительное влияние на жидкость оказывают ускорения и силы, обусловленные аэродинамическим торможением, работой двигателей ориентации и стабилизации, солнечным давлением, неоднородностью гравитационного поля Земли и т. п. Порядок перегрузок, обусловленных этими факторами, лежит в диапазоне  $10^{-5}$ ... $10^{-9}g$ .

Проверка влияния упомянутых сил на работоспособность ПГС ДУ и топливо в баках, отработка заборных устройств, систем питания и т. д. требует создания специальных экспериментальных установок.

Силы межмолекулярного взаимодействия на границе жидкость — пар, жидкость — твердая стенка отличаются от сил взаимодействия молекул в толще жидкости. Вследствие этого на границах раздела возникает избыточная по сравнению с энергией остального объема потенциальная энергия  $E$ , пропорциональная площади поверхности раздела  $S$ :

$$E = \sigma S.$$

Эта энергия локализуется на поверхности раздела (несколько молекулярных слоев) и называется поверхностной. Коэффициент пропорциональности  $\sigma$  равен поверхностной плотности энергии и называется поверхностным натяжением. Величина  $\sigma$ , по существу, является работой, которую надо затратить на перенос молекулы изнутри объема к поверхности раздела, когда площадь этой поверхности возрастает на единицу, т. е. увеличение поверхности требует затраты работы сил поверхностного натяжения. Известно, что устойчивое равновесие любой системы характеризуется минимальным значением ее энергии. Применяя это положение к жидкости, можно утверждать, что жидкость в равновесии должна иметь минимум свободной поверхности. Это, в свою очередь, означает, что должны существовать силы, препятствующие увеличению поверхности, — силы поверхностного натяжения.

Вообще говоря, нормальное состояние жидкости в невесомости — наличие искривленной поверхности. Плоской ее делают внешние силы (взаимодействие с другими поверхностями, гравитационные силы, перегрузки).

Кривизна поверхности жидкости и наличие сил поверхностного натяжения, действующих по касательной к поверхности раздела, приводит к сжатию объема и возникновению внутри него сил давления, направленных перпендикулярно к поверхности и уравнивающих действие поверхностных сил. При этом для сферического объема жидкости радиуса  $R$  избыточное давление жидкости определяется известным соотношением

$$p = 2\sigma/R.$$

Поверхностное натяжение  $\sigma$  имеет размерность силы на единицу длины и измеряется в ньютонах на метр.

Величина  $\sigma$  является физической константой для системы жидкость — пар и зависит от давления и температуры. Зависимость  $\sigma$  от температуры по данным В. В. Кафарова приближенно аппроксимируется выражением

$$\sigma = 1,085T_{\text{кип}} \left( \frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}}{\mu} \right)^{2/3} 10^{-3},$$

где  $T_{\text{кип}}$  — температура кипения жидкости при нормальных условиях, К;  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$  — соответственно плотность жидкости и плотность пара;  $\mu$  — молекулярная масса жидкости.

Изменение  $\sigma$  при изменении температуры может быть вычислено по формуле

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left( \frac{T_k - T_2}{T_k - T_1} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  — поверхностное натяжение при температуре  $T_1$  и  $T_2$  соответственно;  $T_k$  — критическая температура, К.

В критической точке  $\sigma = 0$ .

Если жидкость, имеющая свободную поверхность, соприкасается со стенкой, то возможны два случая:

1. Полное смачивание, когда вся поверхность стенки покрывается жидкостью или ее пленкой. Это типично для криогенных жидкостей.

2. Частичное смачивание, когда жидкость покрывает лишь часть поверхности стенки.

Чаще встречается случай частичного смачивания. При этом на линии смачивания жидкость и стенка образуют угол  $\theta$  (рис. 2.13), который называется краевым или углом смачивания. Значение  $\theta$  меняется от 0 до 180°. Если  $\theta \leq 90^\circ$ , то жидкость называется смачивающей (гидрофильной), а если  $\theta > 90^\circ$ , — то несмачивающей (гидрофобной). Краевой угол является функцией давления и температуры. С увеличением давления значения  $\theta$  медленно растут. Для гидрофобных жидкостей отмечается увеличение краевого угла с ростом температуры, для гидрофильных эта зависимость обратная.

Значения  $\sigma$  и  $\theta$  определяются эмпирическим путем и сильно зависят от чистоты поверхности контакта и находящихся в жидкости поверхностно-активных веществ. В табл. 3 представлены некоторые справочные данные по  $\sigma$  и  $\theta$ .

Оценка перегрузок, обусловленных на космических аппаратах действием поверхностных сил, показывает, что их порядок находится на уровне  $10^{-5}g$ .

Следует отметить также, что капиллярные эффекты проявляются при работе гидросистем не только в условиях невесомости. При работе ДУ на насыщенных газом компонентах топлива процессы выделения свободного газа на границах раздела жидкость — газ, жидкость — стенка трубопровода в системах подачи и образования двухфазных потоков во многом определяются значениями  $\sigma$  и  $\theta$ .

В земных условиях при наличии гравитационного поля маловязкие жидкости в достаточно большом объеме принимают форму сосуда, в который они залиты. Свободная поверхность топлива занимает положение, перпендикулярное действию суммарных массовых сил. В общем случае это положение не соответствует

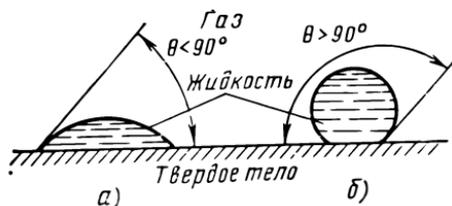


Рис. 2.13. Краевой угол:

а — смачивающая жидкость; б — несмачивающая жидкость

Таблица 3

Жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	Поверхности контакта	$\sigma \cdot 10^3, \text{Н/м}$	$\theta, \text{градус}$
Вода	20	Сталь, воздух	72	70...90
	98	Сталь, воздух	59	
Этиловый спирт	20	Сталь, пар	22	26
Четырехокись азота	20	Сталь, пар	—	0
		Алюминий, пар		
Несимметричный диметилгидразин	25	Сталь, пар	28	0
		Алюминий, пар		
Водород	-252	Сталь, пар	2	0
Кислород	-183	Сталь, пар	13	1,3...7
Азот	-183	Сталь, пар	6,2	0
	-196	Сталь, пар	8,3	
	-183	Алюминий, пар	—	7

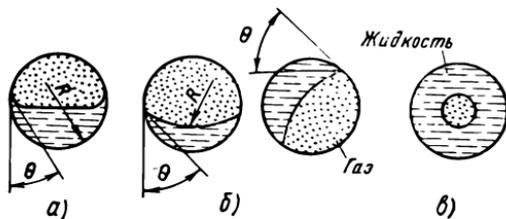
Примечание. Таблица составлена по данным Э. Ринга и В. А. Григорьева.

минимуму свободной энергии. При наступлении невесомости протекает процесс, ведущий к уменьшению свободной энергии системы топливо — газ — стенки бака. Ограниченный объем жидкости, не соприкасающейся с твердыми стенками и окруженной газом (паром), принимает под действием поверхностного натяжения сферическую форму. Эта форма отвечает устойчивому равновесию жидкости, так как сфера обладает минимальной поверхностью при данном объеме и, следовательно, минимальной свободной энергией.

При контакте жидкости с твердыми стенками на форму ее поверхности влияет явление смачивания. Разумеется, форма поверхности различна для емкостей различных форм. Топливные емкости космических аппаратов чаще всего имеют сферическую форму или форму цилиндра с сферическим дном. При наличии тяготения топливо находится в нижней части бака, газ — в верхней (рис. 2.14, а). С наступлением невесомости поверхность

Рис. 2.14. Положение смачивающей жидкости в сферическом баке:

*a* — равновесное состояние в гравитационном поле; *б, в* — равновесное состояние в условиях невесомости



раздела смачивающей жидкости и газа принимает форму, обеспечивающую условие  $1/R = \text{const}$ , где  $R$  — величина, определяемая значениями  $\sigma$  и  $\theta$ . Этому условию удовлетворяет только сферическая поверхность. Так как в условиях невесомости нет разницы между «верхом» и «низом», то жидкость может располагаться в любой части бака (рис. 2.14, б).

При  $\theta = 0$  газ собирается внутри топлива, обволакивающего всю внутреннюю поверхность бака, при  $\theta = 180^\circ$  (топливо, абсолютно не смачивающее поверхность стенок бака) топливо оказывается окруженным газом. Эти положения соответствуют минимуму свободной энергии системы. При  $0 < \theta < 180^\circ$  в экспериментах наблюдаются положения, когда одна фаза находится внутри другой (рис. 2.14, в).

# 3

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОТРАБОТКИ ПГС ДУ

---

### 3.1. ОТРАБОТКА КАК ЭЛЕМЕНТ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Рассматриваемые в данном разделе проблемы ограничены рамками отработки опытных образцов: агрегатов, механизмов, систем стендовых и штатных ДУ, т. е. этапами лабораторно-стендовых и летных испытаний ДУ ракетной и космической техники до передачи ее в серийное производство.

В широком смысле отработка любого сложного технического объекта — один из важнейших компонентов обеспечения и контроля заданных уровней его качества. Именно на этой стадии создания новой техники возможно получить экспериментальные показатели, определяющие действительный технический уровень объекта. Совершенно очевидно, что достижение высоких показателей качества возможно только в случае, если организационно-методические принципы отработки сформулированы на начальной стадии создания изделия и последовательно реализуются на всех его стадиях.

Термин качество и основные его показатели определяются в ГОСТ 15 467—79.

*Качество* — совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Качество формируется на всех стадиях создания продукции: от определения ее необходимости до периода эксплуатации. Показатели качества закладываются в процессе конструкторских и технологических разработок, обеспечиваются в процессе производства, проявляются и проверяются в процессе отработки и эксплуатации.

*Показатель качества продукции* — количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, составляющих ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления.

*Уровень качества продукции* — относительная характеристика качества продукции, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемой продукции с базовыми значениями соответствующих показателей.

Необходимость в определении уровня качества возникает: при планировании уровня качества;

при выборе оптимального варианта изделия;  
при контроле качества продукции при обработке;  
при передаче изделия в серийное производство;  
при эксплуатации изделия;  
при снятии с производства и при эксплуатации устаревшего изделия.

Показатели качества продукции характеризуют:

эффективность применения изделия по назначению (показатель назначения);

способность изделия сохранять значения эксплуатационных показателей на определенном уровне в заданном интервале времени (показатель надежности);

годность изделия к эксплуатации человеком (эргономический показатель);

способность изделия к перемещению — транспортабельность;

оптимальность затрат материалов средств, оборудования, труда и времени на подготовку и изготовление изделия (технологичность);

особенности конструктивного выполнения изделия, обусловленные возможностью реализации его функциональных свойств (конструктивный показатель);

затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию изделия и экономический эффект эксплуатации (экономический показатель).

Качество — понятие относительное, поэтому для оценки его уровня необходимо базовое изделие, с уровнем качества которого сравнивается рассматриваемое изделие. За базовые показатели качества могут быть приняты:

показатели качества, содержащиеся в ТЗ;

перспективные технико-экономические показатели изделий данного вида, определенные методами технического прогнозирования;

уровень качества гипотетического изделия, превышающий уровень качества лучших современных образцов.

При этом показатели качества должны отвечать следующим требованиям:

отражать свойства изделия и изменения его качества во времени;

обеспечивать условия сопоставимости изделий одного назначения.

Показатель качества  $K$  сложного изделия зависит от показателя качества  $a$  элементов, составляющих это изделие:

$$K = \sum_{i=1}^m M_i a_i,$$

где  $M_i$  — коэффициент весомости  $i$ -го элемента, характеризующего в количественном отношении степень влияния показателя

качества  $i$ -го элемента  $a_i$  на качество изделия;  $m$  — число элементов в изделии.

На стадии разработки, изготовления, обработки и эксплуатации изделия на его качество влияет огромное число факторов управленческого, организационного, технико-экономического, информационного, социально-психологического, воспитательного и правового характера. Вот перечень основных организационных, технических и информационных факторов:

- качество технических решений;
- качество конструкторской и технической документации;
- качество применяемых материалов и комплектующих изделий;
- полнота использования возможностей стандартизации и унификации;
- структура и полнота экспериментальной отработки изделия;
- состояние экспериментальной и испытательной базы, уровень средств измерительной и обрабатывающей техники;
- технический уровень производственного оборудования, оснастки, средств контроля;
- квалификация персонала;
- уровень информационного обеспечения;
- осведомленность о конструкции и качестве аналогичных изделий;
- осведомленность о методах их производства и условиях отработки и эксплуатации;
- осведомленность о свойствах материалов и комплектующих изделий;
- плановмерность и ритмичность работы;
- качество техобслуживания и ремонта оборудования;
- обеспеченность производственным оборудованием, оснасткой, инструментом, технической документацией;
- обеспеченность средствами контроля, измерения, вычислительной техникой;
- обеспеченность материалами и комплектующими элементами.

В рамках производственного предприятия обеспечение и контроль заданного уровня качества изделий осуществляется комплексной системой управления качеством продукции (КСУКП).

КСУКП — это совокупность управляющих органов и объектов управления, взаимодействующих с помощью информационных и материально-технических средств.

При управлении качеством продукции КСУКП является частью системы управления предприятием и охватывает все стадии жизненного цикла изделия и все стороны деятельности предприятия, в частности:

- прогнозирование и формирование качества изделия на стадии разработки;

разработку методов и поддержание порядка контроля качества технической документации, порядка внесения изменений в нее;

обеспечение установленного уровня качества при изготовлении изделия;

экспериментальную обработку изделия;

контроль и оценку качества изделия на всех стадиях жизненного цикла;

повышение технического уровня производственной и испытательной баз;

материально-техническое обеспечение;

хранение, транспортирование, эксплуатацию и ремонт продукции;

подбор, расстановку и повышение квалификации кадров.

Управляющий орган КСУКП — руководство предприятия, разрабатывающего и изготавливающего изделие. Ему помогает специализированное подразделение управления качеством, с которым взаимодействуют подразделения координации и анализа работ, надежности, стандартизации, научно-технической информации, анализа результатов испытаний, технико-экономического анализа, метрологии, перспективной технологии, а также отдел технического контроля (ОТК) и автоматическая система управления (АСУ).

Организационно-методической основой КСУКП являются стандарты предприятия, выпущенные на основе действующих ГОСТов и ОСТов и определяющие работу всего механизма управления качеством продукции, а также регламентирующие нормы и правила в области управления и организации производства.

Термин *надежность изделия* и основные понятия, характеризующие ее, приведены в ГОСТ 27.002—83.

*Надежность* — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Таким образом, в современной технике под надежностью изделий в зависимости от его назначения и условий применения понимают сочетание таких свойств изделия, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

*Безотказность* — свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

*Работоспособное состояние* — состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

*Отказ* — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

*Долговечность* — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

*Предельное состояние* — состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

*Ремонтопригодность* — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

*Сохраняемость* — свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтнопригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования.

*Технический ресурс (ресурс)* — наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

*Срок службы* — календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

Из приведенных определений видно, что понятие надежности теснейшим образом связано с работоспособностью изделия и является одним из показателей его качества.

В рамках КСУКП при разработке и создании нового изделия на стадии эскизного проекта основным документом, определяющим комплекс конструктивных, научно-методических и организационно-технических мероприятий, направленных на получение требуемых значений показателей надежности, является программа обеспечения надежности (ПОН), которая в конечном счете определяет структуру процесса отработки. При составлении ПОН учитывается:

- требуемый уровень надежности разрабатываемого изделия; его новизна и сложность;
- характер и объем производства, условия эксплуатации изделия;

- возможность определения степени соответствия фактического уровня надежности изделия предъявляемым требованиям на этапах проектирования, производства, отработки и эксплуатации.

Следует отметить, что ПОН основывается на достигнутых ранее результатах по надежности. ПОН должна включать:

- перечисление задач по обеспечению надежности, методов их решения, объектов испытаний, а также сроки решения каждой задачи;

порядок документирования и контроля состояния работ, перечень мероприятий по обеспечению выполнения работ в плановые сроки.

ПОН должна содержать требования по обеспечению безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтпригодности. Их надо вырабатывать с учетом специфики разрабатываемого изделия и в соответствии с существующими ГОСТами или ОСТАми. ПОН должна быть скоординирована с программой по обеспечению безопасности.

На этапе проектирования и отработки к ПОН предъявляются следующие требования:

1. В ПОН должны быть определены основные требования по надежности к комплектующим элементам и изделию, соответствующие ТЗ, приведены и обоснованы основные показатели надежности, определена номенклатура объектов для экспериментальной проверки или подтверждения показателей надежности.

2. ПОН должна предусматривать реализацию мероприятий по обеспечению надежности уже на этапе разработки и согласования ТЗ на проектирование изделия путем анализа конструктивных решений с точки зрения обеспечения заданных требований по надежности.

3. В ПОН должны быть изложены требования к программам испытаний комплектующих изделия опытных образцов и самих изделий, обеспечивающие получение данных, необходимых для определения соответствия характеристик надежности спроектированного изделия ТЗ.

ТЗ и программы испытаний должны обуславливать возможность подтверждения уровня надежности на отдельных этапах испытаний, что, вообще, характерно для изделий мелкосерийного производства, в котором на начальных этапах испытаний оценка истинного уровня надежности не представляется возможной, а повышение показателей надежности происходит по мере перехода на последующие этапы и уточняется по данным эксплуатации изделия. Кроме того, ТЗ и программы испытаний должны устанавливать необходимое число образцов для испытаний и критерии оценки надежности.

Результаты испытаний должны содержать:

- сведения о наработке образцов и отказах с выявлением наиболее ненадежных элементов и интенсивности отказов;
- оценку влияния отказов на надежность изделия;
- характеристики ремонтпригодности;
- сведения о предельных возможностях образцов и условиях безопасного их использования;
- характеристики работы в системе оператор — машина.

4. В ПОН должно быть указано, что ТЗ и программы испытаний опытных образцов следует планировать с учетом воздействия наиболее неблагоприятных сочетаний условий окружаю-

шей среды и рабочих режимов, установленных ТЗ на разработку.

Желательно проведение дополнительных испытаний на ресурс, по выявлению типичных отказов, установлению пределов безопасности применения изделий. С учетом результатов этих испытаний может быть произведена оценка уровня надежности (определена интенсивность отказов или ожидаемая вероятность отказа) в неблагоприятных условиях эксплуатации. При этом исходные требования по надежности всех комплектующих элементов изделия должны включать:

- показатели надежности;
- предельные характеристики функционирования образца;
- критерии отказов;
- продолжительность и другие условия эксплуатации.

5. ПОН должна предусматривать применение на изделии максимально возможного числа унифицированных образцов.

6. В ПОН должны быть предусмотрены мероприятия по выявлению критических элементов изделия, требующих повышенного внимания при проектировании и обработке.

Основные признаки критичности:

новизна и сложность конструкции, утяжеленность режимов эксплуатации;

влияние отказов на безопасность применения изделия или невозможность выполнения задачи из-за отказа;

необходимость специальных способов обращения;

потребность в длительной подготовке к действию;

сложность ремонтных работ при отказе;

высокая стоимость.

На этапе производства к ПОН предъявляются следующие требования:

1. В ПОН должны быть предусмотрены мероприятия, обеспечивающие улучшение методов управления процессом производства и его контроля, а также повышение квалификации личного состава.

2. В ПОН должны быть:

приведены методы анализа и контроля уровня надежности на этапе производства и технологических процессов;

намечены мероприятия по оценке степени влияния хранения, консервации, транспортировки, ремонта на надежность изделия;

перечислены мероприятия по сбору и обработке информации о дефектах и отказах.

На этапе эксплуатации к ПОН предъявляются следующие требования:

1. В ПОН должны быть отражены основные требования к эксплуатационной документации, особенно к ее качеству;

2. В ПОН должны быть намечены мероприятия по изучению персоналом правил эксплуатации, обеспечению точности соблю-

дения инструкций по эксплуатации, по автоматизации обслуживания изделия и контролю его параметров, по сбору и анализу информации об отказах.

### **3.2. ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОТРАБОТКИ**

Конечная цель отработки вытекает из понимания ее как комплекса организационно-технических мероприятий по обеспечению эффективного экспериментального определения показателей качества опытных образцов, соответствия их характеристик ТЗ по всем диапазонам изменения эксплуатационных факторов. Успешное осуществление поставленной цели возможно только при условии выполнения ряда методологических положений, являющихся обобщением современного опыта создания сложных изделий новой техники и заключающихся в следующем:

1. Максимально точное и полное изложение в ТЗ на изделие требований к продукции и ее характеристикам.

2. Анализ на стадии проектирования изделия его показателей качества и определение технического уровня предприятия-разработчика с учетом КСУКП для оценки возможности получить заданные показатели при изготовлении, отработке и эксплуатации изделия.

3. Разработка ПОН.

4. Разработка комплексной программы экспериментальной отработки (КПЭО).

КПЭО — организационно-технический документ, определяющий номенклатуру и состав объектов испытаний, их цели и задачи, порядок проведения, а также содержащий сведения о порядке оценки показателей надежности по результатам экспериментальной отработки, о подтверждении требований по безопасности, о порядке отработки конструкторской и эксплуатационной документации, о контроле выполнения КПЭО.

КПЭО выпускается на стадии разработки рабочей документации на опытный образец изделия в развитие плана обеспечения надежности.

5. Выпуск ТЗ на разработку опытных образцов (агрегатов, механизмов, систем, стендовых изделий) с точным и полным изложением технических требований, в том числе к образцам, предназначенным для лабораторно-стендовой отработки, в части:

максимальной штатности конструкторской и технологической документации;

штатности условий производства и контроля;

оптимальности оснащения объектов испытаний дополнительными средствами измерения при условии сохранения штатных средств измерений и мест их установки на объектах.

Под штатной здесь понимается документация и технология, в соответствии с которой изготавливаются агрегаты, механизмы,

системы для летного (натурного) изделия. Дело в том, что при изготовлении опытных образцов для отработки в стендовых условиях отступления от штатности диктуются обычно соображениями удобства монтажа (демонтажа) объектов испытаний или их элементов в экспериментальной установке, обеспечения возможности быстрой сборки (разборки) объектов испытаний для перенастройки или устранения дефектов, необходимости выполнения дополнительных измерений для расширения информативности эксперимента и т. п. Однако очевидные достоинства таких отступлений от штатности могут привести к неадекватности процессов в натуральных и экспериментальных системах: введение дополнительных узлов разъема в агрегатах и магистралях систем нарушает штатность жесткостных характеристик, изменяет геометрические, временные и динамические параметры объекта испытаний.

При отработке могут возникнуть проблемы переноса результатов испытаний на штатный объект. Этому способствует также практикуемое иногда введение дополнительных измерений с помощью штучеров или трубок отбора штатных первичных преобразователей, что приводит к искажению получаемой информации, затрудняя в последствии сравнение результатов измерений при стендовых и натуральных испытаниях. Опыт создания сложных изделий показывает, что стремление к максимальному сохранению штатности образцов, используемых для лабораторно-стендовой отработки, обеспечивает повышение эффективности выявления конструктивных и технологических дефектов. Поэтому каждое решение по нарушению штатности опытных образцов должно быть тщательно взвешено и должны быть оценены последствия этого мероприятия.

Вопрос выбора оптимального объема дополнительных измерений при лабораторно-стендовой отработке представляет собой весьма важную проблему, так как информативность экспериментов и достоверность получаемых результатов во многом влияют на эффективность отработки. Современный подход к решению этой проблемы рассмотрен в последующих разделах.

6. Разработка ТЗ на испытания, программ испытаний, технических условий на опытные образцы с изложением точных и полных технических требований к ним и их комплектации, целей и задач испытаний с описанием системы и структуры отработки, видов и режимов нагружений, а также методик проведения экспериментов и определения технических характеристик образцов. В программе испытаний должно быть указано число объектов испытаний. В ней, как в ПОН и КПЭО, должны найти отражение:

методики проверки технических характеристик изделий во всем диапазоне изменения эксплуатационных условий и воздействующих факторов;

мероприятия, обеспечивающие максимальную приближенность условий испытаний к условиям эксплуатации и комплексность воздействующих факторов;

научный подход к вопросам планирования экспериментов (назначению режимов испытаний, определению их числа и продолжительность);

этапность обработки: переход от простых структур при завершении их испытания к более сложным (от агрегатов к системам, от систем к стендовым изделиям и далее к штатным изделиям);

методики проверки взаимовлияния и взаимодействия агрегатов и механизмов в системах, а систем в изделиях;

необходимость проведения специальных испытаний на надежность;

необходимость проведения испытаний при противоположных сочетаниях воздействующих факторов, на режимах с параметрами, выходящими за пределы, обусловленные технической документацией для оценки запасов работоспособности изделий.

7. Разработка и согласование с предприятиями-смежниками и строгое выполнение плана поставки опытных образцов на испытания;

8. Проверка технических характеристик образцов на всех уровнях:

при получении комплектующих материалов и элементов;

на стадии изготовления;

на всех этапах обработки.

9. Обеспечение эффективности работы служб контроля качества (подразделений КСУКП, нормоконтроля, метрологии, а также ОТК) и контроля выполнения КПЭО.

10. Обеспечение высокого технического уровня средств измерений, регистрации и обработки при испытаниях (по точности, эксплуатационным и динамическим характеристикам). Это залог оперативного получения достоверной информации о техническом состоянии изделий и протекающих в них процессах. Повышение эффективности обработки внедрением новейших средств и методов технического диагностирования, а также вычислительной техники.

11. Оснащение испытательных подразделений современным стендовым оборудованием, обеспечивающим весь спектр необходимых видов и режимов нагружений, комплексность воздействующих факторов.

12. Обеспечение глубокого и всестороннего анализа результатов испытаний, сбора и анализа информации о состоянии обработки, о дефектах и отказах на всех этапах обработки. Основное направление анализа дефектов и отказов — оценка их влияния на успешное выполнение изделием своих основных задач или оценка отклонений в программе, к которым могут привести эти дефекты и отказы. При этом обязательным правилом долж-

но быть выявление причин всех без исключения дефектов и отказов.

В настоящее время в ракетно-космической технике при создании опытных образцов изделий нашли распространение несколько систем проведения испытаний ПГС ДУ и их элементов.

Здесь мы рассмотрим две системы: систему испытаний ПГС ДУ в три этапа (исследовательские, стендовые, контрольные испытания) и систему сертификационных испытаний, которая также может состоять из нескольких этапов.

*Исследовательские испытания* проводятся обычно на этапе эскизного проектирования с целью поиска новых схемных и конструктивных решений, разработки новых технологических процессов. Объектами испытаний являются, как правило, макеты опытных образцов. Конструкторская, технологическая и испытательная документация на макеты не отвечает требованиям к документации на опытные образцы, приведенным ранее.

*Стендовые (отработочные) испытания* имеют своей целью определение показателей качества опытных образцов и технической документации, а также доведение их до соответствия предъявляемым требованиям. На основании результатов стендовых испытаний дается заключение о возможности использования технической документации для изготовления опытных образцов агрегатов, механизмов и систем для штатного изделия и допуске их к натурным испытаниям в составе изделия.

Для агрегатов, механизмов, систем и стендовых изделий в целом стендовые испытания делятся на три подэтапа:

I подэтап — автономная отработка агрегатов, механизмов, узлов и других элементов ПГС ДУ, в который входят: предварительные, доводочные и приемочные испытания.

II подэтап — автономная отработка систем.

III подэтап — комплексная отработка систем в составе стендовых изделий.

I подэтап стендовых испытаний проводится для решения вопроса о соответствии предложенного варианта агрегата, механизма, узла заданным требованиям и доводки его конструкции до полного соответствия этим требованиям.

При предварительных испытаниях определяется:

правильность конструктивных решений, выбора материалов и технологических процессов;

соответствие выходных параметров образца, испытываемого в заданных режимах нагружений, параметрам, заданным технической документацией;

правильность выбранной методики испытаний.

В процессе предварительных испытаний проводятся мероприятия по доведению образца до работоспособного состояния, могут осуществляться его схемные и конструктивные изменения. Положительные результаты предварительных испытаний дают право на проведение доводочных испытаний.

Доводочные испытания призваны обеспечить подтверждение работоспособности образца во всем диапазоне заданных условий и режимов нагружений. Выходные параметры образца должны соответствовать технической документации. Режимы и объем доводочных испытаний планируются таким образом, чтобы по результатам испытаний отдельных образцов можно было оценить показатели качества всей совокупности образцов, изготовленных в соответствии с принятой конструкторской и технологической документацией.

В процессе доводочных испытаний допускается усовершенствование выбранной конструкции и уточнение технологических процессов изготовления образцов, а также отрабатывается конструкторская, технологическая и эксплуатационная документация. Положительные результаты этих испытаний дают право на проведение чистовых испытаний, а также на установку и эксплуатацию агрегатов, механизмов, узлов в составе систем и стендовых изделий. После корректировки конструкторской и технологической документации по результатам доводочных испытаний изготовленные по этой документации опытные образцы подвергаются приемочным (чистовым) испытаниям. На них подтверждается способность образцов безотказно функционировать в заданных условиях и при заданных режимах нагружений в течение установленного технической документацией времени.

Положительные результаты приемочных испытаний дают право допуска агрегатов, механизмов, узлов к установке на штатные изделия. При необходимости для подтверждения работоспособности образцов в течение заданных технической документацией длительных гарантийных сроков эксплуатации параллельно приемочным испытаниям проводятся ресурсные испытания. Для этих испытаний выделяется специальная партия опытных образцов.

II подэтап — автономная отработка систем проводится:

- для определения соответствия систем конструкторской и технологической документации;

- для определения технических характеристик систем, границ и запасов ее работоспособности с учетом воздействий, имитирующих (или представляющих) реальные нагружения и условия эксплуатации как до начала функционирования, так и в процессе работы;

- для проверки и подтверждения правильности методов расчета параметров систем;

- для изучения совместного функционирования и взаимовлияния агрегатов механизмов, узлов в системах;

- для оценки показателей надежности систем по результатам испытаний;

- для отработки конструкторской, технологической и эксплуатационной документации;

для выявления отказов и причин, вызывающих их, проведения мероприятий по устранению этих причин и проверки эффективности принятых решений.

По положительным результатам испытаний систем корректируется техническая и технологическая документация, а образцы, изготовленные по откорректированной документации, допускаются к III подэтапу.

III подэтап — комплексная отработка систем в составе стендовых изделий проводится:

для подтверждения соответствия характеристик ПГС ДУ в целом технической документации;

для совместной отработки систем в условиях, близких к реальным, с одновременным воспроизведением различных воздействующих факторов;

для уточнения режимов и условий работы систем и агрегатов при совместном функционировании, оценки их взаимного влияния;

для проверки работоспособности ПГС ДУ при имитации аварийных и других нештатных ситуаций;

для предварительной оценки показателей надежности по результатам стендовых испытаний;

для проверки отработанности технологии изготовления и для определения достаточности и правильности выбора контрольно-измерительных средств и испытательного оборудования;

для проверки полноты и отработанности комплекта конструкторской и технологической документации;

для отработки эксплуатационной документации;

для выявления отказов и причин, вызывающих их, проведения мероприятий по их устранению и определения эффективности принятых решений;

для определения готовности изделия к натурным испытаниям.

Некоторые элементы штатного наземного оборудования, устройства и аппаратура для обеспечения натуральных испытаний ПГС ДУ (например, пульта для проверок и контроля) проходят стендовые испытания без подэтапов. Целью этих испытаний является определение характеристик опытных образцов, проверка их соответствия технической документации (ТЗ, ТУ).

*Контрольные испытания* имеют своей целью определение показателей качества опытных образцов агрегатов, механизмов, систем и проверку их соответствия действующей технической документации. Контрольным испытаниям обычно подвергаются опытные образцы, прошедшие стендовые испытания. По положительным результатам этих испытаний дается разрешение на применение данных образцов в составе штатного изделия или на проведение других видов испытаний.

Число агрегатов, механизмов, систем, стендовых изделий, необходимых для проведения испытаний, а также виды и нормы

нагружений определяются соответствующими стандартами из учета особенностей разрабатываемого изделия, его назначения, условий эксплуатации, степени новизны и сложности.

Каждому этапу и подэтапу испытаний обязательно предшествует *входной контроль*, который проводится для проверки соответствия образца технической документации и для определения его пригодности к проведению следующего этапа обработки. Входной контроль включает в себя: проверку наличия и правильности оформления сопроводительной документации, в которой приведены показатели качества, комплектность образца и гарантийные сроки; внешний осмотр (убеждаются в целостности тары, стопорении, пломбировки, покрытий, заглушек, резьб, разъемов, кабельной сети, в отсутствии механических повреждений и следов коррозии, влаги и загрязнений на разъемах); проверку технических характеристик на соответствие технической документации. Результаты входного контроля дают статистическую информацию об исходном техническом состоянии опытных образцов, поставляемых на испытания.

Входной контроль осуществляется по инструкции предприятия-поставщика продукции, а в случае изготовления и испытания изделия на одном предприятии — по инструкции подразделения-разработчика или по технической документации на поставку или разработку. Инструкция по входному контролю содержит: перечень документации, подлежащей входному контролю, технологическую последовательность операций и процедур со ссылкой на техническую документацию, перечень контролируемых параметров и контрольно-поверочной аппаратуры, указания по технике безопасности.

Окончанием процесса обработки ПГС ДУ считаются межведомственные и летно-конструкторские испытания опытных образцов, целями которых являются: подтверждение соответствия основных характеристик ДУ техническим требованиям при функционировании в условиях эксплуатации, отработка эксплуатационной документации, проверка готовности изделия и конструкторской документации к передаче в серийное производство.

За рубежом широкое распространение нашла система испытаний, получившая название сертификационных.

*Сертификационные испытания* распространяются на все элементы изделия (агрегат, механизм, систему) и на изделие в целом. Главные цели этих испытаний — демонстрация способности изделия выполнять свои функции во всем диапазоне изменения эксплуатационных условий, определение пределов его работоспособности, аттестация образца на соответствие стандарту или ТУ.

Важнейшими и обязательными предпосылками получения эффективности системы сертификационных испытаний считаются:

1. Разработка ТУ, технических требований, стандартов или других аналогичных документов, в которых четко и предельно точно установлены требования, предъявляемые к объекту испытаний, и описаны методы измерений его характеристик.

2. Проведение испытаний на всех уровнях иерархической структуры объекта с преобладанием большего объема испытаний на нижних уровнях. Организация выборок таким образом, чтобы они максимально отражали реальные возможности, а также отклонения, присущие производству и методам испытаний.

3. Испытания образцов, изготовленных только по штатной документации, в штатных условиях производства и контроля.

4. Обеспечение, где это возможно, комплексного воздействия эксплуатационных факторов.

5. Испытания в основном на предельно допустимых технической документацией режимах.

6. Проверка взаимодействия и взаимовлияния элементов нижней иерархии (агрегатов) в структурах высшей иерархии (системах).

7. Проверка всех элементов объекта испытания, в том числе резервных.

8. Выявление и анализ причин всех отказов и дефектов, их влияния на выполнение изделием его функций, дефектация образца в случае отказа. Ни один отказ не должен приниматься как случайное событие.

9. Приемочные испытания перед каждым этапом сертификационных испытаний. Следует отметить, что на низшем уровне иерархии (агрегат, механизм) приемочные испытания могут выходить за рамки входного контроля и включать в себя такие виды испытаний, как термовакuumные, вибродинамические и т. п.

Считается, что собственно сертификационные испытания не обеспечивают полной статистической демонстрации показателей надежности, так как по экономическим и техническим соображениям трудно поставить на испытания выборку из партии образцов, которая бы в достаточной мере характеризовала их качество. Поэтому система сертификации предписывает, наряду с проведением собственно испытаний, осуществление надзора за работой КСУКП как наиболее действенного средства повышения эффективности системы. Оценка КСУКП включает выяснение следующих вопросов:

1. Отвечает ли техническая оснащенность предприятия и КСУКП на предприятии требованиям, обуславливающим выпуск продукции в соответствии с заданными техническими требованиями?

2. На каком уровне организована на предприятии систематическая проверка качества продукции?

3. Выявляются ли в процессе производства образцы, не соответствующие техническим требованиям? Каков их процент?

4. Выявляются ли причины снижения качества и устраняются ли они?

По результатам обследования делается заключение, насколько предприятие уделяет внимание всем аспектам КСУКП и постоянно ли высок уровень качества продукции.

В качестве иллюстрации использования системы сертификации обратимся к данным по испытаниям космического корабля «Аполлон».

Перед летными испытаниями было проведено 712 испытаний основного блока и 505 испытаний лунной кабины. Сюда не входят 300 испытаний на уровне подсистем и отдельных систем. Обычно наработка образца составляла полный цикл испытаний на Земле и два ресурса работы в полете. При обнаружении дефектов и проведении доработок испытания повторялись полностью, элементы, выработавшие ресурс, заменялись.

На уровне агрегатов и механизмов были проведены испытания большого объема. Сертификационным испытаниям подвергались штатные образцы, изготовленные в тех же условиях производства, что и образцы, идущие на товарную поставку. Это позволило учесть все изменения, вносимые в конструкцию или процесс производства и способные вызвать отказы новых типов. Для испытаний выделялось не менее двух образцов. Обязательно испытывались все резервные элементы. Везде, где было возможно, обеспечивалась комплексность воздействующих факторов (влажность в сочетании с загрязнением и загазованностью, температура в сочетании с вакуумом и т. п.). При испытаниях блоков тщательно исследовалось взаимодействие и взаимовлияние составляющих их систем. Обычно испытания проводились при предельных значениях внешних нагрузок, ожидаемых в реальных условиях.

Чтобы найти дефекты в образцах, идущих на сертификационные испытания, проводили приемочные испытания.

Режимы испытания определялись целесообразностью увеличения объема отработки и экономическим аспектом этого увеличения. При этом проводился тщательный анализ результатов предыдущих испытаний и выделялись только напряженные сочетания режимов работы.

Грамотная организация сертификационных испытаний позволила исключить повторение отказов и свести к минимуму отказы в полете. Результаты испытаний показали, что при отработке доля конструкторских дефектов составила 67%, а дефектов, обусловленных изготовлением и сборкой, — 33%. Из общего числа выявленных дефектов 30% нашли во время приемочных испытаний.

### 3.3. ОСНОВЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ОТРАБОТКИ. НОРМЫ ИСПЫТАНИЙ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

**Общие сведения.** Отработке опытных образцов ПГС ДУ присущ ряд особенностей, оказывающих влияние на планирование этого процесса:

возможность разложения объекта на элементы и группы элементов различных уровней с учетом условий испытаний и воспроизведения воздействующих факторов;

поэтапность отработки с разбиением общей задачи на ряд промежуточных, присущих каждому этапу, соответствующему определенному иерархическому уровню;

многофакторность эксплуатационных условий и множество контролируемых параметров;

малое число опытных образцов, выделяемых для испытаний.

В связи с этим планирование отработки складывается из двух взаимосвязанных направлений: реализации изложенных организационно-методических принципов отработки и определения норм испытаний, в частности числа опытных образцов, необходимых для подтверждения показателей качества изделия.

При планировании отработки возникает проблема обоснования и выбора объема испытаний опытных образцов на всех структурных иерархических уровнях. Рассматривая ПГС ДУ как сложную техническую систему, можно считать, что на современном уровне развития техники и производства требуемый показатель надежности (безотказности) таких изделий находится на уровне 0,95...0,99. При переходе к функциональным элементам низшего уровня структуры (например, к агрегатам) значение показателя надежности достигает 0,9999 и более. Используя положения теории надежности, можно показать, что для экспериментальной демонстрации такого показателя потребуются испытания примерно 5000 агрегатов при условии безотказности работы их всех. Естественно, что проведение экспериментов такого объема неосуществимо ни по техническим, ни по экономическим соображениям. Из этих же соображений вытекает, что в реальных условиях отработки опытных образцов трудно назначить выборку для испытаний агрегатов (механизмов), обеспечивающую статистическую демонстрацию показателя надежности с приемлемой доверительной вероятностью 0,91...0,95.

Поиск решения затронутой проблемы имеет несколько аспектов. Во-первых, предшествующий опыт создания образцов ракетно-космической техники позволяет утверждать, что, хотя испытания небольших выборок и не гарантируют статистической демонстрации показателя надежности, они обеспечивают достаточную уверенность в конструкции вновь разрабатываемых изделий. Этому способствует и практическая реализация организационно-методических принципов отработки, обуславливающих четкое функционирование КСУКП и проведение испытаний в не-

сколько последовательных этапов, когда при переходе от одного этапа к другому обеспечивается накопление статистической информации о показателях надежности элементов, составляющих изделие.

Во-вторых, значения показателя надежности агрегатов, механизмов подтверждаются при испытаниях более сложных структур, т. е. подсистем и систем в целом. В этом случае возникает необходимость определения некоторого минимального объема испытаний элементов систем с целью выявления «грубых промахов» в конструкции или процессе изготовления изделия.

В-третьих, решение проблемы можно искать в ограничении объема выборок за счет увеличения наработки опытных образцов при испытаниях. При этом возможно проведение испытаний до достижения заранее заданной наработки или до отказа.

Однако и в этих случаях задача экспериментального подтверждения надежности не исключается из разряда проблемных, так как на нижнем уровне структуры, как правило, не удастся подтвердить показатель надежности, превышающий 0,995.

Существенные, негативные с точки зрения объема испытаний, коррективы в формулировку задачи экспериментального подтверждения надежности вносит итеративность процесса отработки, т. е. последовательное приближение конструкции изделия к той степени совершенства, при котором она отвечала бы предъявляемым требованиям. В результате доработок каждая новая партия образцов является выборкой из новой генеральной совокупности и, строго говоря, экспериментальная оценка надежности для нее должна проводиться заново по результатам испытаний только этой выборки. Это значит, что если на автономном этапе отработки агрегатов для подтверждения показателей качества запланировано испытание  $n_{\text{зач}}$  зачетных образцов, то из-за выявленных дефектов потребное число образцов  $n_{\Sigma}$  может существенно превысить зачетное:

$$n_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k n_i + n_{\text{зач}},$$

где  $n_i$  — число дефектных образцов на  $i$ -м цикле отработки.

Рассмотрим некоторые аспекты связи числа образцов, выделенных для испытаний, объема их испытаний и показателей надежности.

**Оценка показателя надежности по альтернативной информации.** Альтернативная информация по результатам испытаний объектов («да» — успех, «нет» — отказ) представляется в виде числа успехов и числа отказов  $m$  в  $n$  испытаниях. Такой подход к оценке результатов, в котором во внимание принимается только исход испытания и не рассматривается вся получаемая информация о работоспособности объекта, большей частью дает заниженную оценку показателя надежности. Однако он облада-

ет и несомненным достоинством, так как позволяет получить оценку на основании обобщенного подхода, т. е. одновременно учитывает и конструктивные особенности объекта, и качество его изготовления, и правила его эксплуатации. Кроме того, для объектов, характеристики которых описываются комплексом параметров, зачастую оценка показателя надежности на основании альтернативной информации является единственно возможной.

При альтернативной информации и числе отказов  $m \neq 0$  в качестве несмещенной состоятельной и эффективной оценки показателя надежности выбрано математическое ожидание  $E$  частоты успехов биномиального распределения

$$E = 1 - m/n,$$

а в качестве меры точности — выборочная дисперсия, которая является несмещенной и эффективной оценкой дисперсии оценки  $E$ :

$$D^2[E] = E(1 - E)/(n - 1).$$

В случае, если число отказов  $m = 0$ , могут быть рекомендованы следующие формулы для оценки показателя надежности и меры точности этой оценки:

$$E = 1 - \frac{1}{2(n + 2)}; \quad (3.1)$$

$$D^2[E] = \frac{1}{4(n + 2)^2} \frac{5n + 7}{n + 3}. \quad (3.2)$$

Непосредственный расчет показателя надежности по формулам (3.1) и (3.2) показывает, что для его экспериментального подтверждения требуется значительный объем испытаний, что не всегда является возможным. В связи с этим на практике для оценки показателя надежности используется априорная информация о надежности изделий аналогов. При этом существенным является определение аналога. Анализ возможности исследования информации по аналогам проводится качественно и количественно. Качественный анализ преследует цель подтвердить физическое подобие конструкций с точки зрения функционирования и появления отказов. Строгих рекомендаций по этому вопросу не существует, однако можно с определенной степенью осторожности к аналогам отнести однотипные конструкции, являющиеся модификацией данного вида и проверенные в одинаковые (или более тяжелых) условиях эксплуатации. Однако и в этом случае при объединении информации требуется проверка ее однородности на основе статистических критериев.

Для практического применения можно рекомендовать следующие формулы объединения информации при оценке показателя надежности:

$$E = \frac{E_0^2(1 - E_0) + (n - m)D^2[E_0]}{E_0(1 - E_0) + nD^2[E_0]}$$

и

$$D^2[E] = \frac{E^2(1 - E)D^2[E_0]}{E_0(1 - E_0) + nD^2[E_0]},$$

где  $E_0, D^2[E_0]$  — априорная информация по результатам испытаний о показателе надежности аналогов.

При этом в качестве формального критерия возможности применения формул объединения информации служит условие

$$(n - m)/(n + 1) \leq E_0 \leq (n - m + 1)/(n + 1).$$

**Оценка показателя надежности по результатам длительных испытаний.** В процессе длительных испытаний партии из  $n$  образцов регистрируется наработка  $i$ -го образца  $R_i$  до отказа. При экспериментальном законе изменения безотказности и интенсивности отказов  $\lambda = 1/\bar{R} = \text{const}$ , где  $\bar{R}$  — среднее значение наработки до отказа, имеем следующую формулу для оценки, показателя надежности

$$E = e^{-R_i/\bar{R}}.$$

Причем значение  $\bar{R}$  вычисляется по формуле

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i.$$

Если испытания проводятся до отказа  $r$  образцов в партии из  $n$  образцов с наработкой  $R_i$   $i$ -го образца, значение средней наработки вычисляется по формуле

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^r R_i + (n - r)R_r}{r},$$

где  $R_r$  — наработка  $r$ -го образца.

**Нормы испытаний и планирование эксперимента.** Нормы испытаний должны обеспечивать проверку заданных характеристик опытного образца, его показателей качества и определять для всех уровней иерархической структуры изделия:

виды воздействующих факторов и их количественные характеристики;

число образцов для испытаний;

наработку каждого образца и кратность испытаний.

Нормы испытаний устанавливаются с учетом накопленного опыта по экспериментальной отработке предыдущих разработок в зависимости от типа и назначения изделия, предъявляемых к

нему технических требований, условий эксплуатации и хранения в заправленном состоянии. При этом принимается во внимание новизна, преемственность и унификация создаваемого изделия, а также возможности экспериментальной базы и существующие методы проведения и информационного обеспечения испытаний.

При обработке ПГС ДУ ракет-носителей и космических аппаратов на всех структурных уровнях в качестве основных воздействующих факторов рассматриваются: температура; давление; влажность окружающей среды; состав, температура и давление компонентов топлива и других рабочих тел; уровень и продолжительность ударных и вибродинамических нагружений, имитирующих транспортировку изделия, а также работу двигателей на участках выведения на орбиту и маневрирования на ней; продолжительность нахождения в заправленном состоянии; концентрация растворенных в топливе газов; продолжительность и цикличность работы ДУ; солнечная радиация; длительность пребывания в условиях невесомости.

Количественные характеристики воздействующих факторов назначаются согласно указанным выше условиям и обобщаются соответствующими документами (ОСТ, стандарт предприятия, ТУ, ТЗ).

Воспроизведение воздействующих факторов осуществляется на экспериментальных установках и вызывает необходимость проведения большого числа видов испытаний (таблица 4).

При определении числа образцов и значений наработки руководствуются изложенными выше положениями и доводами, а также опытом, накопленным в отечественной и зарубежной практике при создании предшествующих образцов ракетной и космической техники. На основании этого считается, что при принятых структурных схемах уверенность в достаточности автономной отработки агрегатов и механизмов можно обеспечить поставкой на каждый подэтап испытаний от 3 до 10 зачетных образцов. На уровне систем и изделий число образцов уменьшается соответственно до 1...4. При этом каждый агрегат, система и изделие в подавляющем большинстве случаев подвергаются нескольким видам испытаний.

При определении норм испытаний часто возникает необходимость оценки объема ресурсных испытаний того или иного агрегата.

Испытания, проводимые на этапе автономной отработки, имеют своей целью подтвердить работоспособность объекта в течение заданной наработки. При этом наработка задается или временем, или числом циклов (срабатываний). Введем следующие обозначения:

- $R_{\text{ТР}}$  — требуемая наработка агрегата по ТЗ на разработку;
- $R_{\text{П}}$  — максимальная наработка агрегата в процессе функционирования в полете;
- $R_{\text{Н}}$  — плановая наработка агрегата;

## Испытания

на прочность	на внешние и внутренние воздействующие факторы	на работоспособность	на надежность
<p>Транспортная тряска Линейные (центробежные) нагрузки Виброиспытания: кратковременные динамические нагрузки ударные нагрузки на прочность от внутреннего (внешнего) давления на статическую прочность акустические</p>	<p>Температурные: при повышенной (пониженной) температуре при циклическом изменении температуры На давление: в условиях внешней атмосферы вакуумные при повышенном давлении при условиях циклического изменения давления На влажность: коррозионные на влагостойкость на осадки на морской туман, морскую воду в спецсредах В кислородной среде В гелиево-воздушной среде На солнечную радиацию На тепловую радиацию На токсичность На пожаро-, взрывобезопасность На невесомость</p>	<p>Снятие характеристик На срабатывание На функционирование На раскрытие механизма На герметичность На стыкуемость На целостность электрических цепей Проверка сопротивления изоляции Проливочные Продувочные</p>	<p>Проверка работоспособности: при форсированных режимах при неблагоприятных сочетаниях воздействующих факторов на предельных режимах  при неблагоприятном сочетании допусков при нештатных ситуациях На режимах с параметрами, значения которых выходят за пределы, приведенные в ТУ Ресурсные На длительное хранение и эксплуатацию (на долговечность, сохраняемость, ремонтпригодность, безотказность)</p>

$R_0$  — объем испытаний при отработке (безотказная суммарная наработка);

$R_r$  — гарантированный остаточный ресурс по завершении эксплуатации объекта.

Очевидно, что должно выполняться условие

$$R_0 \geq R_{\text{тр}} + R_r,$$

при этом

$$R_{\text{тр}} = R_{\text{п}} + R_{\text{н}}. \quad (3.3)$$

Наработка  $R_{\text{н}}$  складывается из плановых наработок объекта при контрольных операциях на заводе-изготовителе  $R_3$ , техническом  $R_{\text{т}}$  и стартовом комплексах  $R_c$ :

$$R_{\text{н}} = (R_3 + R_{\text{т}} + R_c) k_1. \quad (3.4)$$

Коэффициент  $k_1$  учитывает возможность превышения в ходе контрольных испытаний изделия плановой наработки объекта за счет возможных повторных испытаний изделия, связанных с восстановлением отказавших систем. На практике значение коэффициента  $k_1$  следует принимать равным среднему числу отказов на изделии, доработки по которым связаны с необходимостью расхода ресурса данного агрегата. При отсутствии таких сведений рекомендуется выбирать значение  $k_1 = 1,5 \dots 2$ .

Тогда

$$R_{\text{тр}} = (R_3 + R_{\text{т}} + R_c) k_1 + R_{\text{п}}.$$

Гарантией безотказной работы объекта является запас наработки, определяемой остаточным ресурсом после завершения эксплуатации объекта. Обычно остаточный ресурс определяется по наработке объекта в полете из условия

$$R_{\text{п}} + R_r = k_2 R_{\text{п}}. \quad (3.5)$$

Значение коэффициента  $k_2$  на практике принимается в диапазоне 1,3...2. Но

$$R_{\text{тр}} + R_r = R_{\text{п}} + R_{\text{н}} + R_r = k_2 R_{\text{п}} + R_{\text{н}} = (k_2 + \alpha) R_{\text{п}},$$

где  $\alpha = R_{\text{н}}/R_{\text{п}}$ .

Отсюда имеем первое необходимое условие для определения объема испытаний

$$R_0 \geq (k_2 + \alpha) R_{\text{п}}. \quad (3.6)$$

С другой стороны, нельзя допускать, чтобы  $R_{\text{н}}$  была намного больше  $R_{\text{п}}$ , так как в этом случае полетная работа агрегата вновь выпадет на конец выработки ресурса. Поэтому вводится ограничение в виде условия

$$R_{\text{н}} = k_3 (R_{\text{тр}} + R_r)$$

$$\text{или } \alpha R_{\text{п}} k_3 = (R_{\text{тр}} + R_r),$$

где  $k_3$  — коэффициент. На практике  $k_3 \leq 0,5$ .

С учетом уравнения (3.3) имеем второе условие для определения объема испытаний

$$R_0 \geq \frac{\alpha}{k_3} R_n. \quad (3.7)$$

Учитывая практические рекомендации в отношении коэффициентов, окончательно имеем следующие соотношения для расчета объема испытаний, определяющие минимальное значение  $R_0$ :

если  $\alpha \leq 1,5$ ,

$$R_0 \geq (1,5 + \alpha) R_n, \quad (3.8)$$

если  $\alpha > 1,5$ ,

$$R_0 \geq 2\alpha R_n. \quad (3.9)$$

*Пример. Определить минимальный объем испытаний, если заданы следующие наработки (в часах срабатывания) агрегатов  $R_3=21$ ;  $R_T=9$ ;  $R_c=0$ ;  $R_n=50$ . Коэффициент  $k_1=2$ .*

В этом случае по формуле (3.4) рассчитываем

$$R_n = (21 + 9 + 0) \cdot 2 = 60.$$

Определяем значение  $\alpha$ :

$$\alpha = R_n / R_n = 60 / 50 = 1,2.$$

Так как полученное значение  $\alpha$  меньше 1,5, то значение  $R_0$  определяем по формуле (3.8):

$$R_0 = (1,5 + 1,2) \cdot 50 = 135.$$

Таким образом, при проведении отработки партия образцов, представленная на испытания, должна продемонстрировать не менее 135 безотказных срабатываний по каждому образцу.

В соответствии с задачами отработки и нормами испытаний осуществляется планирование экспериментов, причем одновременно по нескольким направлениям.

В настоящее время во многих отраслях техники находит широкое применение теория планирования экспериментов, в основе которой лежит идея одновременного варьирования всеми действующими в эксперименте факторами. При этом отработка рассматривается как проведение эксперимента в многофакторном пространстве, определяемом множеством конструктивных параметров, множеством условий применения и множеством режимов нагружений.

Необходимо отметить некоторые обстоятельства, ограничивающие возможность применения положений теории планирования экспериментов при экспериментальной отработке сложных технических систем, каковыми являются ПГС ДУ.

Во-первых, теория планирования экспериментов требует четкого определения выходного параметра (целевой функции), в то время как у ПГС ДУ и их элементов таких параметров бывает, как правило, несколько и не все из них удается однозначно представить в количественном виде (например, неразрушение конструкции, полная герметичность и т. п.).

Во-вторых, требуется управляемое изменение всех факторов, действующих в эксперименте, в том числе и конструктивных, что в силу существующего способа изготовления образцов с параметрами, принадлежащими полю допуска, является затруднительным.

В-третьих, применение положений теории ограничено практически 6...8 факторами, в то время как в сложном техническом эксперименте их бывает существенно больше.

Поэтому в практике отработки ПГС ДУ более традиционным является назначение режимов испытаний при противоположных сочетаниях воздействующих факторов, а также при добавлении к ним режимов, протекающих при номинальных значениях параметров.

Другое направление — планирование испытаний по оценке показателя надежности на основе длительной наработки. При этом предполагается экспоненциальный закон изменения показателей надежности во времени  $t$  с постоянной интенсивностью отказов  $\lambda$ :

$$E(t) = e^{-\lambda t}.$$

Для времени  $t$ , равного заданной по ТЗ плановой наработке  $R_n$ , по истечении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена, имеем

$$E = e^{-\lambda R_n}.$$

Интенсивность отказов  $\lambda$  по результатам испытаний можно оценить по формуле

$$\lambda = m/s,$$

где  $m$  — число отказавших агрегатов, а  $s$  — суммарная наработка партии из  $n$  образцов, включая  $m$  отказавших.

Отсюда

$$E = e^{-mR_n/s}.$$

Решив данное соотношение относительно  $s$ , имеем гарантированное условие для подтверждения заданного значения показателя надежности

$$s \geq -\frac{mR_n}{\ln E}.$$

С другой стороны, суммарная наработка

$$s = R_m + (n - m) R_{исп},$$

где  $R_m$  — суммарная наработка отказавших образцов;  $R_{\text{исп}}$  — планируемая наработка при испытаниях.

Таким образом, число образцов  $n$  и наработка  $R_{\text{исп}}$  должны удовлетворять неравенству

$$(n - m) R_{\text{исп}} \geq - \frac{m R_n}{\ln E} - R_m.$$

Так как априорное значение  $R_m$  неизвестно, то опустив эту величину, можно перейти от неравенства к следующему равенству, ограничивающему минимальное значение наработки:

$$(n - m) R_{\text{исп}} = - \frac{m R_n}{\ln E}.$$

Исходя из высокой надежности образцов, предположим, что при испытаниях возникает не более одного отказа за наработку  $R_{\text{исп}}$ . Возьмем случай, когда  $m = 1$ .

Тогда

$$(n - 1) R_{\text{исп}} = - \frac{R_n}{\ln E}.$$

По данному соотношению составлены номограммы для определения наработки при испытаниях (рис. 3.1), пользуясь которыми можно составить необходимый план длительных испытаний по подтверждению оценки показателя надежности:

1. По незначительному ресурсу  $R_n$  и требуемой оценке надежности  $E$ , задавая планируемой наработкой, можно определить число образцов для испытаний.

2. Исходя из требуемой оценки показателя надежности, назначенного ресурса работы и располагаемого числа испытываемых образцов, можно определить планируемую наработку.

3. По результатам испытаний при заданном ресурсе и числе испытываемых образцов можно определить уровень подтверждаемой надежности.

*Пример 1. Требуемая оценка показателя надежности агрегата  $E = 0,995$ , назначенный ресурс (общая наработка при заводских испытаниях, хранении, подготовке к работе, и работа)  $R_n = 7$  срабатываниям. Определить число образцов для испытаний исходя из планируемого числа срабатываний при испытаниях для каждого образца — 200 раз.*

Найдя на номограмме (рис. 3.1)  $R_n = 7$  срабатываниям, проводим перпендикуляр до пересечения с кривой  $E = 0,995$  и от точки пересечения проводим горизонталь до пересечения с вертикалью, опущенной из точки  $R_{\text{исп}} = 200$  срабатываниям. По ближайшей от точки пересечения влево по горизонтали наклонной прямой определяем число образцов  $n = 8$ .

*Пример 2. Нормируемая оценка показателя надежности при эксплуатации  $E = 0,999$ , назначенный ресурс  $R_n = 15$  срабатываниям, число образцов — 18. Определить планируемую наработку  $R_{\text{исп}}$ .*

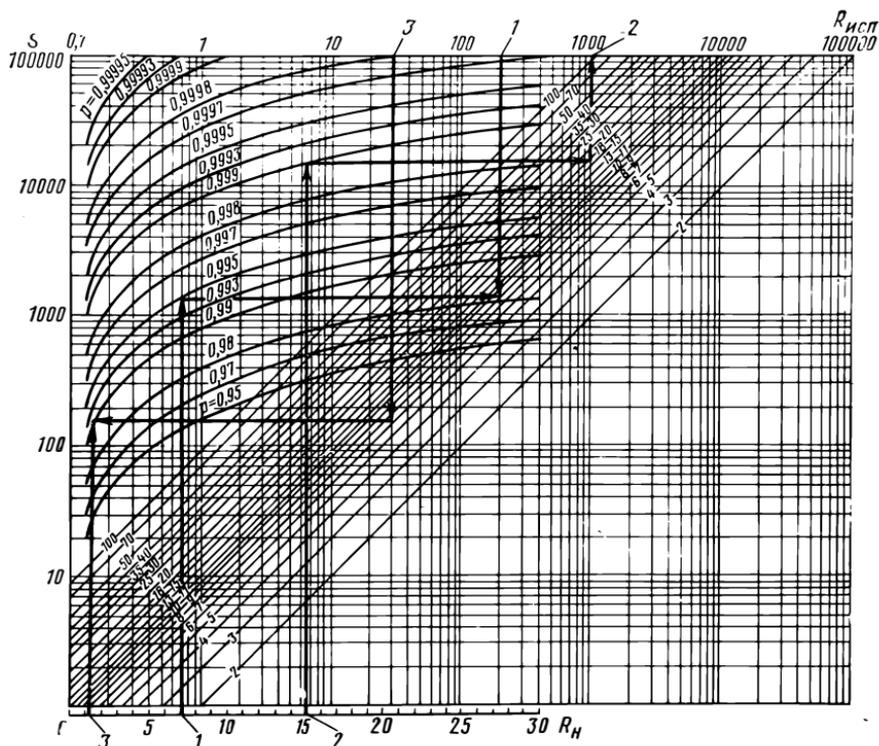


Рис. 3.1. Номограммы для определения наработки при испытаниях:

1, 2, 3 — номера рассмотренных примеров

Из точки  $R_n=15$  срабатывания на шкале назначенного ресурса проводим перпендикуляр вверх до пересечения с кривой  $E=0,999$  и, проводя горизонталь до прямой  $n=18$ , на шкале  $R_{исп}$  над точкой пересечения получаем требуемую наработку — 1000 срабатываний.

Пример 3. Изделие имеет назначенный ресурс  $R_n=1,35$  ч. Планируется проведение испытаний 56 образцов до 30 ч каждого. Определить значение показателя надежности.

На номограмме находим  $R_{исп}=30$  ч. Из этой точки проводим перпендикуляр до пересечения с прямой, соответствующей 6 образцам. От точки пересечения проводим горизонталь до пересечения с вертикалью, проведенной из точки, соответствующей назначенному ресурсу  $R_n=1,35$  ч. Из номограммы следует, что экспериментально подтвержденная оценка показателя надежности  $E \geq 0,99$ .

Длительные испытания по подтверждению оценки показателя надежности нужно проводить на образцах агрегатов, выполнен-

ных по штатной документации, скорректированной по результатам чистовых испытаний, и прошедших нагружения в объеме этого этапа.

**Определение эффективности испытаний.** В практике обработки сложных систем известен метод оценки эффективности испытаний на основе анализа отказов на протяжении всего цикла испытаний: от испытаний агрегатов до испытаний летных изделий.

Такая оценка эффективности основана на предположении, что любой элемент или другая более сложная структура содержат в себе ряд дефектов или «слабых мест», которые могут быть обнаружены в результате испытаний. Это предположение дополняет положение теории надежности о существовании начального периода отказов, за которым следует период постоянной (или убывающей) интенсивности случайных отказов в течение всего срока службы объекта. Допускается также, что интенсивность случайных отказов не зависит от программы испытаний.

Вероятность выявления отказов зависит от числа имеющихся неисправностей и степени совершенства программы обработки. Эффективность испытаний можно выразить отношением числа неисправностей, обнаруженных на любом этапе из  $k$  испытаний, к числу имеющихся отказов на этом этапе и записать в виде

$$\mathcal{E}_k = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N},$$

где  $n_i$  — число неисправностей, обнаруженных во время  $i$ -го испытания;  $N$  — число имеющихся отказов;  $\mathcal{E}_k$  — эффективность этапа из  $k$  испытаний.

Общая эффективность испытаний определяется отношением числа неисправностей, обнаруженных во время наземных испытаний, к общему числу неисправностей, в которое входят неисправности, обнаруженные при наземных и летных испытаниях.

Другой способ определения эффективности испытаний предусматривает концентрацию внимания на отказах, обнаруженных не в результате автономных испытаний, а значительно позднее, на более высоком уровне сборки или при летных испытаниях. Эти отказы называются невыявленными. Таким образом, эффективность испытаний может быть выражена через коэффициент невыявленных отказов  $E_k$ , который определяется по формуле

$$E_k = \left( N - \sum_{i=1}^k n_i \right) / N = 1 - \mathcal{E}_k.$$

Несомненно, что окончательная цель — получение эффективности испытания, равной единице (или 100%), а это значит, что в полете не может быть никаких неисправностей или невыявленных отказов в течение всего установленного срока службы изделия.

## ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ПГС ДУ

---

### 4.1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И КРИТЕРИАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

**Общие сведения.** Широкое применение при решении задач наземной отработки находит моделирование процессов в ПГС ДУ. Развитие моделирования диктуется спецификой устройства и особенностями эксплуатации ракетно-космической техники. Использование в ДУ токсичных, криогенных и взрывоопасных компонентов топлива, работа в условиях невесомости и глубокого вакуума, больших динамических и тепловых нагрузок, а также другие технические, экономические и экологические факторы часто затрудняют, делают невозможным или нецелесообразным проведение испытаний на натуральных объектах со штатными рабочими телами, вынуждая прибегать к моделированию условий и режимов эксплуатации. Большое значение имеет моделирование процессов и на этапе проектирования новых образцов ракетно-космической техники.

При отработке ПГС ДУ применяется моделирование на масштабных моделях со строгим выполнением положений теории подобия. Так в основном определяются характеристики ПГС на стационарных режимах работы: при проливке систем питания, заборных устройств, систем наддува и т. п. В ряде случаев, когда по условиям задачи или эксперимента соблюдение всех критериальных соотношений не представляется возможным, прибегают к частичному моделированию или имитации натуральных условий работы на штатных или стендовых установках, а также на масштабных моделях. Так решаются задачи определения параметров неустановившегося движения жидкости и газа при запуске и выключении ДУ, определения динамических характеристик ПГС, в том числе давлений при гидроударах. Возможности современной вычислительной техники вызвали бурное развитие нового направления моделирования, получившего название математического. Математическое моделирование находит применение при исследовании сложных гидродинамических или тепломассообменных процессов, физическое моделирование которых ограничено невозможностью создания корректной модельной установки, а организация натурального эксперимента нереализуема по техническим причинам (например, из-за отсутствия средств измерений). Примером математического моделирования могут

служить моделирование конвективного теплопереноса в топливных баках в условиях длительного хранения заправленных ракет-носителей или процессов тепломассообмена при нестационарном течении газонасыщенной жидкости по магистралям питания ДУ. В подобных случаях на основании существующей физической модели процесса разрабатывается математическая модель, адекватность моделей подтверждается расчетами и сопоставлением результатов расчета с данными измерений, полученными на экспериментальной установке, которая, как правило, воспроизводит аналогичные, но не модельные натурным физическим процессам. После этого при необходимости осуществляется уточнение математической модели и затем проводится так называемый математический эксперимент — расчетные исследования характеристик натурной системы при вариациях воздействующих факторов.

В ряде случаев при исследовании динамических процессов в ПГС ДУ находят применение аналоговые моделирующие системы.

Моделирование представляет собой метод исследования свойств определенной системы посредством изучения свойств другой системы, более удобной для исследования и находящейся в определенном соответствии с первой системой. В основе метода лежит изучение физических закономерностей, определяющих протекание исследуемых явлений, и выявление в результате анализа уравнений, описывающих эти закономерности, соотношений, однозначно определяющих взаимосвязь изучаемых процессов во всем диапазоне изменения параметров. На практике этот метод чаще всего реализуется в экспериментальном исследовании моделируемого объекта, базирующемся на соответствии определенной части свойств моделируемого объекта и замещающей его модели.

Так как подавляющее большинство процессов, протекающих в ПГС ДУ, связано с физическими явлениями, в основе которых лежат законы гидромеханики и тепломассообмена, рассмотрим их математическую интерпретацию и покажем вытекающие из анализа уравнений соотношения, определяющие условия подобия исследуемых явлений.

Почти все приведенные далее уравнения являются выражением фундаментального закона сохранения материи, и при их выводе используется общий логический стереотип, заключающийся в выделении в изучаемом пространстве элементарного объема и рассмотрении равенства потока субстанции (массы, количества движения, теплоты и т. д.) через поверхность, ограничивающую этот объем, изменении количества этой субстанции внутри объема в единицу времени.

**Гидродинамика.** Если движение изотропной однофазной жидкости происходит при постоянной температуре, то оно определяется переменными величинами  $v_x, v_y, v_z, p, \rho$ , для нахождения которых необходимо наличие пяти уравнений. Этими уравнения-

ми являются: уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности), уравнения движения для каждого направления и уравнение состояния.

Если обозначить через  $\bar{v}$  вектор скорости, то уравнение сохранения массы можно записать в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{v}) = 0 \quad (4.1)$$

или в компонентах скорости:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0.$$

При рассмотрении движения несжимаемой жидкости изменением плотности можно пренебречь ( $\rho = \text{const}$ ,  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ ) и упростить уравнение сохранения массы:

$$\operatorname{div} \bar{v} = 0. \quad (4.2)$$

Уравнение движения представляет собой математическую запись закона сохранения импульса для элементарного объема движущейся вязкой жидкости. В форме, именуемой уравнением Навье — Стокса, оно имеет вид

$$\rho \frac{d\bar{v}}{dt} = -\operatorname{grad} p + \mu \Delta \bar{v} + \frac{1}{3} \mu \operatorname{grad}(\operatorname{div} \bar{v}) + \bar{f}. \quad (4.3)$$

Здесь  $\Delta$  — оператор Лапласа;  $\mu$  — динамическая вязкость;  $\bar{f}$  — объемная сила (например, сила тяжести).

Знак минус при первом члене правой части свидетельствует о том, что увеличение скорости происходит в направлении понижения давления  $p$ , а факт наличия в уравнении не самого давления, а лишь его градиента показывает, что значение давления в жидкости определено с точностью до произвольной постоянной.

Так как

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \operatorname{grad} \bar{v} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + v_x \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + v_z \frac{\partial \bar{v}}{\partial z},$$

а оператор Лапласа для любой составляющей скорости, например  $v_x$ , записывается как

$$\Delta v_x = \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2},$$

уравнение движения в координатном виде представляет систему

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + f_x; \end{aligned}$$

$$\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + f_y; \quad (4.4)$$

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + f_z.$$

Первые члены левых частей уравнений системы (4.4) и называются динамическими или инерционными и характеризуют нестационарность процесса течения. Три последующих члена именуются конвективными и определяют изменение скоростного напора в направлениях осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Вторые и третьи члены правой части называются вязкостными и определяют влияния вязкостных сил, причем третьи отражают деформацию элементарного объема из-за сжимаемости жидкости.

Так как размерность всех членов системы (4.4) можно представить в виде  $xmt^{-2}t/(x^2t)$ , где  $x$  — координата;  $m$  — масса, то само уравнение Навье — Стокса можно трактовать как уравнение сохранения потока импульса. При этом конвективные члены отражают перенос количества движения в направлении понижения давления, а вязкостные — от мест с большой скоростью к местам с меньшей скоростью.

Для несжимаемой жидкости уравнение движения (4.3) может быть записано в виде:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \text{grad } \bar{v} = - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \bar{v} + \frac{f}{\rho}, \quad (4.5)$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость.

Для жидкостей уравнением состояния является зависимость, связывающая по аналогии с законом Гука изменение объема с изменением давления:

$$dp = -K dV/V,$$

где  $K$  — объемный модуль упругости жидкости;  $V$  — рассматриваемый объем жидкости.

Так как при этом имеется в виду сжатие определенной постоянной массы жидкости  $m$ , то можно утверждать, что

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0.$$

Тогда  $dV/V = -d\rho/\rho$  и уравнение состояния для жидкости имеет вид

$$dp = K d\rho/\rho. \quad (4.6)$$

Объемный модуль упругости жидкостей, применяемых в ПГС ДУ, изменяется в диапазоне  $(0,8...2)10^9$  Па. Для сравнения отметим, что модуль упругости стали  $2,2 \cdot 10^{11}$  Па; алюминия  $0,69 \times 10^{11}$  Па; резины  $0,8 \cdot 10^7$  Па.

Уравнение состояния газа имеет вид

$$p = \rho B T$$

или в дифференциальной форме:

$$dp = B (\rho dT + T d\rho).$$

$$\text{При } T = \text{const} \quad d\left(\frac{p}{\rho}\right) = \frac{dp}{\rho} - \frac{p d\rho}{\rho^2} = 0$$

и уравнение состояния преобразуется в выражение

$$dp = p d\rho / \rho. \quad (4.7)$$

Таким образом, при изотермическом законе изменения параметров газа его объемный модуль упругости численно равен давлению среды. При изменении давления газа по адиабатическому закону эта величина равна  $k\rho$ , где  $k$  — показатель адиабаты, а уравнение состояния имеет вид

$$dp = k p d\rho / \rho. \quad (4.8)$$

Из этого следует, что, если процесс движения упругой среды протекает в условиях, когда изменением температуры можно пренебречь, он описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v}) = 0;$$

$$\rho \frac{d\bar{v}}{dt} = -\text{grad } p + \mu \Delta \bar{v} + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div } \bar{v}) + f; \quad (4.9)$$

$$dp = K d\rho / \rho.$$

Эти уравнения образуют замкнутую систему, которая при определенных краевых условиях может быть решена относительно переменных  $\bar{v}$ ,  $p$  и  $\rho$ .

Уравнение движения в системе (4.9) трактуется, так же как уравнение сохранения энергии движущегося элемента упругой среды. Действительно, после умножения всех членов уравнения на  $\bar{v}$  получим

$$\rho \frac{d}{dt} \left( \frac{\bar{v}^2}{2} \right) = -\bar{v} \text{grad } p + \mu \bar{v} \Delta \bar{v} + \frac{1}{3} \mu \bar{v} \text{grad}(\text{div } \bar{v}) + \bar{v} \bar{f}. \quad (4.10)$$

Выражение (4.10) показывает, что изменение кинетической энергии элемента единичной массы происходит из-за изменения сил давления и деформации элемента силами вязкости. Однако это

уравнение не учитывает внутренних энергетических процессов в движущейся среде — изменения температуры и связанного с этим изменения объема. Поэтому если, например, в процессе движения среды имеет место теплообмен и изменением температуры пренебречь нельзя, то движение будет определяться уже переменными  $p, \rho, \bar{v}, T$  и для замыкания задачи необходимо рассмотрение уравнения энергии.

В основе вывода уравнения энергии лежит первое начало термодинамики, в соответствии с которым тепловой поток  $d\bar{q}$  к элементарному объему упругой среды, выделившийся вследствие работы вязких сил, идет на увеличение внутренней энергии и работу расширения:

$$d\bar{q} = \frac{p}{dt} \left( d\varepsilon + pd \frac{1}{\rho} \right), \quad (4.11)$$

где  $\varepsilon = c_V T$  — внутренняя энергия элементарного объема среды;  $c_V$  — удельная теплоемкость среды при постоянном объеме.

Если предположить, что  $c_V$  мало меняется с изменением температуры, а последняя зависит от времени протекания процесса и координат, то после дифференцирования выражение для  $\varepsilon$  получим

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = c_V \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \text{grad } T \right). \quad (4.12)$$

Выражение для  $d\bar{q}$  имеет вид

$$d\bar{q} = \text{div} (\kappa \text{grad } T) + \mu D, \quad (4.13)$$

где первый член характеризует теплообмен элементарного объема с окружающей средой путем теплопроводности ( $\kappa$  — теплопроводность), а второй — работу деформации этого объема под действием сил вязкости, которая не идет на изменение кинетической энергии, а переходит в тепло и рассеивается в жидкости. Функцию  $D$  называют диссипативным членом. Он представляется выражением

$$D = 2 \left[ \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} (\text{div } \bar{v})^2 + \\ + \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2.$$

Подставляя выражения (4.12), (4.13) в уравнение (4.11) и принимая во внимание, что в соответствии с уравнениями неразрывности  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\text{div } \bar{v}$ , работу расширения представляем как  $pd \left( \frac{1}{\rho} \right) = \frac{p}{\rho} \text{div } \bar{v} dt$ , а уравнение энергии записываем в виде

$$\rho c_V \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \operatorname{grad} T \right) + p \operatorname{div} \bar{v} = \operatorname{div} (\kappa \operatorname{grad} T) + \mu D. \quad (4.14)$$

Следует подчеркнуть, что уравнение (4.14) определяет внутренние энергетические процессы в элементарном объеме.

Таким образом, если при движении упругой среды необходим учет изменения внутренней энергии, процесс движения описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \bar{v}) &= 0; \\ \rho \frac{d\bar{v}}{dt} &= -\operatorname{grad} p + \mu \Delta \bar{v} + \frac{1}{3} \mu \operatorname{grad} (\operatorname{div} \bar{v}) + \bar{f}; \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\rho c_V \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \operatorname{grad} T \right) + p \operatorname{div} \bar{v} = \operatorname{div} (\kappa \operatorname{grad} T) + \mu D;$$

$$dp = K \frac{d\rho}{\rho}.$$

При необходимости, для получения уравнения сохранения энергии от всех возмущений, действующих на движущийся элемент жидкости, используют сумму уравнений (4.14) и (4.10).

Системы дифференциальных уравнений (4.9) или (4.15) описывают широкий класс физических явлений и имеют сколь угодно большое число частных решений. Решение, соответствующее данной конкретной задаче, определяется с помощью краевых условий. Краевые условия включают в себя граничные и начальные условия.

Граничные условия определяют значения переменных на границе области, в которой протекает рассматриваемый процесс.

Начальные условия определяют поле переменных в начальный или конечный моменты протекания рассматриваемого конкретного процесса. Для стационарного (установившегося) процесса, в котором поля характеризующих его переменных не меняются во времени, начальные условия отпадают. Поэтому конкретный стационарный процесс однозначно выделяется только граничными условиями.

При рассмотрении задач, связанных с движением жидкости (газа), важнейшими граничными условиями являются условия течения в непосредственной близости к ограждающей поверхности (к стенке трубопровода, поверхности обтекаемого тела). Так, когда ограждающая поверхность непроницаема, нормальная к ней составляющая вектора скорости потока среды равна нулю. Опытом установлено, что составляющая скорости потока, касательная к твердой поверхности, равна нулю. При этом на единицу поверхности твердого тела со стороны жидкости действует сила, равная потоку импульса, проходящему через эту поверхность. Это обстоятельство является следствием «прилипа-

ния» вязкой реальной жидкости к твердой поверхности. Исключение составляет только движение сильно разреженного газа. Таким образом, если плоскость  $xz$  касательна в данной точке к поверхности, а ось  $y$  — нормальна к ней, то граничные условия на стенке могут быть выражены следующим образом:

$$v_{x\text{ст}} = v_{z\text{ст}} = 0; \left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)_{\text{ст}} = \left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)_{\text{ст}} = 0;$$

$$v_{y\text{ст}} = 0; \left(\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)_{\text{ст}} = \frac{\tau}{\mu},$$

где  $\tau$  — касательное напряжение на стенке, обусловленное движением вязкой жидкости. Здесь индексом «ст» обозначены параметры стенки.

Последнее условие записано в соответствии с известной гипотезой Ньютона о наличии вязкостных сил.

В местах втекания и вытекания жидкости граничные условия задаются распределением скоростей и давлений.

На границе раздела подвижных фаз, например жидкости и газа в плоскости  $xz$ , скорость не должна обращаться в ноль и выполняются следующие условия:

тангенциальные составляющие скорости непрерывны:

$$v_{x\text{ж}} = v_{x\text{г}}; v_{z\text{ж}} = v_{z\text{г}};$$

нормальные составляющие скорости обращаются в ноль:

$$v_{z\text{ж}} = v_{z\text{г}} = 0.$$

Здесь индексами «ж» и «г» обозначены параметры, относящиеся соответственно к жидкости и газу.

Если движению жидкости (газа) сопутствуют тепловые процессы, то граничные условия дополняются условиями теплообмена на ограждающих поверхностях. Способов задания таких условий три.

Граничное условие первого рода задается распределением температуры на поверхностях раздела как функции положения точки поверхности и времени. В ряде практически важных задач оказывается возможным положить, что температура на твердой стенке одинакова во всех ее точках.

Граничное условие второго рода задается тепловым потоком, пронизывающим поверхность раздела, как функцией точек этой поверхности и времени.

Граничное условие третьего рода связывает температуру твердой стенки с температурой окружающей среды через заданное значение коэффициента теплоотдачи от стенки к этой среде. В этом случае

$$T_{\text{ст}} = T_{\text{ж}} + \frac{q}{\alpha},$$

где  $T_{ст}$ ,  $T_{ж}$  — температуры стенки и жидкости;  $q$  — плотность теплового потока (удельный тепловой поток);  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи.

Выражая  $q$  через градиент температуры в твердой стенке, получим

$$T_{ст} = T_{ж} - \frac{x_{ст}}{\alpha} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{ст}$$

или

$$\left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{ст} = - \frac{\alpha}{x_{ст}} (T_{ст} - T_{ж}).$$

Начальные условия сводятся к функциям, например

$$T = T_0(x, y, z);$$

$$p = p_0(x, y, z);$$

$$\bar{v}_0 = v_0(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}),$$

дающим распределение температур, давлений и скоростей в рассматриваемой области в некоторый момент. Здесь индексом «0» обозначены значения параметров в начальный момент.

Сложность систем уравнений (4.9) и (4.15) не позволяет проинтегрировать их в общем виде. Это заставляет идти по пути упрощения уравнений как отбрасыванием несущественных для данной конкретной задачи членов, так и заменой сложных связей между величинами на более простые. Для оценки значения отдельных членов уравнений, принятых допущений, упрощений и т. п. нужно знать зависимость между искомыми величинами, т. е. решать уравнения. Замкнутый круг, получающийся таким образом, в некоторой мере разрывается использованием результатов экспериментов и построением эмпирических соотношений, связывающих искомые величины. Анализ этих соотношений дает пути упрощения исходных уравнений. Правильность и точность введенных упрощений оценивается сопоставлением результатов расчетов и опытов.

Одной из основных задач теории подобия является установление правил, на основе которых можно обобщать и распространять результаты опытов, проведенных в одних условиях, на другие, а также определение границ применения этих обобщений. Методы теории подобия представляют научную основу моделирования физических явлений, т. е. замены изучения интересующего нас натурального процесса физически подобным процессом на модели.

Из теории подобия следует, что подобными являются процессы одной и той же физической природы, описываемые тождественными математическими выражениями, у которых поля безразмерных параметров геометрически тождественны. Это зна-

чит, что два явления физически подобны, если по заданным характеристикам одного можно получить характеристики другого простым пересчетом, который аналогичен переходу от одной системы единиц к другой. Условия подобия требуют также геометрического подобия исследуемых систем и тождественности граничных условий в модельной и натурной системах.

Коэффициенты пересчета полей переменных подобных явлений получают путем приведения уравнений к безразмерному виду и выявления безразмерных комплексов (критериев подобия), равенство которых для всего класса рассматриваемых явлений обуславливает тождественность описывающих их уравнений и характеризует подобие этих явлений.

В качестве иллюстрации сказанному рассмотрим одномерное установившееся напорное течение вязкой несжимаемой жидкости и установим необходимые и достаточные условия подобия таких течений. Если направление одномерного течения совпадает с осью  $x$ , то, пренебрегая объемной силой, уравнение Навье — Стокса (4.5) можно записать в виде

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}.$$

Приведем уравнение к безразмерному виду. Для этого все размерные переменные величины определим в частях характерного для них масштаба. Пусть поток течет в трубе радиусом  $l$  (или обтекает тело длиной  $l$ ). Тогда  $l$  характеризует масштаб области, в которой происходит движение. Все линейные размеры и текущую координату будем измерять в безразмерных величинах  $X = x/l$ . Пусть  $U_0$  — скорость потока, втекающего в трубопровод. Выберем ее за масштаб скорости. Тогда безразмерное значение скорости  $U = v_x/U_0$ .

В этом случае уравнение Навье — Стокса в безразмерном виде запишется так:

$$\frac{U_0^2}{l} U \frac{\partial U}{\partial X} = -\frac{U_0^2}{l} \frac{\partial P}{\partial X} + \nu \frac{U_0}{l^2} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2}$$

или

$$U \frac{\partial U}{\partial X} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\nu}{U_0 l} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2},$$

где  $P = p/(\rho U_0^2)$  — безразмерное давление.

В последнее уравнение входит только один безразмерный комплекс  $\nu/(U_0 l)$ , обратная величина которого получила название числа Рейнольдса  $Re = U_0 l/\nu = \rho U_0 l/\mu$ .

Уравнение сохранения массы (4.2) для рассматриваемого движения жидкости в безразмерном виде запишется как  $\frac{\partial U}{\partial X} = 0$ .

Тогда одномерное стационарное течение вязкой несжимаемой жидкости будет описываться системой уравнений

$$U \frac{\partial U}{\partial X} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2}; \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial U}{\partial X} = 0.$$

Тождественность безразмерной системы (4.16) для рассматриваемой совокупности процессов будет обеспечена при равенстве для этой совокупности чисел Re.

Таким образом, для обеспечения подобия потоков, описываемых системой (4.16), необходимо и достаточно:

чтобы исследуемые системы были геометрически подобны (например, чтобы были одинаковы отношения длины и диаметра трубопроводов);

чтобы граничные условия были тождественны (например, чтобы были тождественны условия входа и выхода из трубопровода);

чтобы было  $\text{Re} = \text{idem}$ .

Отсюда вытекают и условия моделирования потоков такого рода: варьируя параметрами, определяющими число Re (выбирая жидкость другой плотности, вязкости, другие геометрические размеры и т. п.), но сохраняя значение его соответствующим натурным условиям, получают параметры модели.

Число Re имеет определенный физический смысл. Если число Re представить как  $\text{Re} = \frac{\rho U_0^2}{\mu U_0/l}$ , то становится ясно, что оно характеризует соотношение кинетической энергии потока и энергии вязкостных сил. В связи с этим из системы (4.16) следует, что при  $\text{Re} \gg 1$  последним членом в уравнении Навье — Стокса можно пренебречь. Это значит, что при больших Re вязкие силы малы и играют второстепенную роль. Жидкость, не имеющую вязкости, называют идеальной. Пренебрежение вязкостными силами существенно упрощает решение уравнений движения жидкости, так как в уравнении Навье — Стокса исчезают вторые производные и уравнение (4.5) сводится к уравнению Эйлера

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \text{grad } \bar{v} = -\text{grad } \frac{p}{\rho} + \frac{\bar{f}}{\rho},$$

которое, если объемная сила  $\bar{f}$  — сила тяжести и течение одномерное, для стационарного потока идеальной несжимаемой жидкости имеет интеграл — уравнение Бернулли

$$gz + p/\rho + v^2/2 = \text{const},$$

где  $z$  — высота столба жидкости в трубе.

Уравнения движения идеальной жидкости в связи с их простотой широко используются в практических инженерных расчетах. Однако в теоретическом плане они порождают противоречие, пути преодоления которого должны быть известны. Действительно, многочисленные экспериментальные исследования показывают, что при движении реальной жидкости на поверхности твердого тела (стенка трубопровода) скорость течения должна быть равна нулю. Между тем из законов движения идеальной жидкости, не накладывающих каких-либо ограничений на касательную составляющую скорости вблизи поверхности, следует, что жидкость движется здесь со скоростью, сравнимой со скоростью течения вдали от твердой поверхности. Это противоречие преодолевается предположением о том, что вблизи от твердой поверхности должна существовать узкая область, в которой касательная составляющая скорости претерпевает резкое изменение от нуля на поверхности до определенных значений (например, отличающихся на 1% от скорости невозмущенного потока) на внешней границе. Этот слой жидкости получил название динамического пограничного слоя (ПС). Торможение жидкости в ПС происходит только благодаря вязким силам. Математически это выражается в том, что в ПС велик градиент скорости в нормальном к стенке направлении и велики члены в уравнении Навье — Стокса, характеризующие вязкость и даже содержащие вторые производные, при малой вязкости жидкости. Явления, происходящие в ПС, служат источником гидродинамического сопротивления.

Анализ решения уравнений движения и неразрывности ПС позволил установить, что толщина ПС  $\delta_0$  является функцией числа  $Re$  и оценивается выражением  $\delta_0 \approx 5,2l/\sqrt{Re}$ , где  $l$  — характерный размер объекта обтекания (длина трубопровода, диаметр трубопровода и т. п.), а число  $Re$  определяется по характерной скорости  $v_0 = \sqrt{\tau/\rho}$ , т. е. по скорости, обеспечивающей на стенке касательное напряжение  $\tau$  реального вязкого потока.

В соответствии с вышеизложенным при проведении инженерных расчетов принимается следующая физическая модель течения. Полагается, что в системе движется идеальная жидкость ( $\mu = 0$ ), а обусловленные вязкостью реальной жидкости потери энергии сосредоточены в тонком пограничном слое. При установленном движении потери соотносятся со скоростным напором (удельной кинетической энергией) и выражаются известным соотношением

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4.17)$$

где  $\Delta p_{\text{тр}}$  — потери давления из-за вязких сил;  $\lambda$  — коэффициент потерь на трение;  $l, d$  — длина и диаметр трубопровода;  $v$  — средняя скорость в сечении трубопровода.

Далее для проведения расчетов в уравнение движения идеальной жидкости вводится выражение (4.17).

Связь между вязкостью реального потока и  $\lambda$  находится приравниванием сил, обусловленных наличием касательных напряжений  $\tau$ , силе, обусловленной  $\Delta p_{тр}$  и необходимой для преодоления сопротивления трения. Для трубопровода круглого сечения с гладкими стенками эти равенства дают

$$\lambda = 8\tau / (\rho v^2).$$

Для ламинарного потока при  $Re < 8 \cdot 10^4$  последнее выражение принимает вид

$$\lambda = 64 / Re.$$

Для турбулентного потока имеем полуэмпирическое соотношение

$$\lambda = \frac{1}{[2 \lg (Re \sqrt{\lambda}) - 0,8]^2}.$$

**Нестационарные процессы в гидросистемах питания ДУ.** Не установившееся движение жидкости в трубопроводах питания двигателей с учетом сжимаемости среды обычно рассматривается как одномерное:  $v = v(x, t)$ ,  $p = p(x, t)$ . Нестационарные процессы описываются при этом упрощенной системой уравнений (4.9) с заменой вязкостных членов эквивалентным касательным напряжением:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v) = 0;$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x} - \tau \Pi; \quad (4.18)$$

$$dp = K \frac{d\rho}{\rho},$$

где  $\Pi$  — смачиваемый периметр;  $K$  — объемный модуль упругости жидкости.

В системе (4.18) возможны упрощения.

В уравнении движения можно пренебречь конвективным членом  $\rho v \frac{\partial v}{\partial x}$ , характеризующим изменение скоростного напора по длине трубопровода. В ряде случаев оказывается возможным отказать от учета потерь в системе уравнений, предполагая, что они сосредоточены на концах трубопроводов и будут учтены в граничных условиях. Вместо первого уравнения системы (4.18) — уравнения состояния учет сжимаемости жидкости и упругости стенок трубопроводов можно осуществить введением в систему (4.18) выражения для скорости распространения упругих возмущений  $a$ .

Из физики известно, что  $a^2 = \frac{dp}{d\rho}$ . Подставляя в это выражение значение  $\frac{dp}{d\rho}$  из уравнения состояния, получим

$$a = \sqrt{K/\rho}.$$

С учетом упругости стенок трубопроводов

$$a = \sqrt{\frac{K_0}{\rho}} = \frac{1}{\sqrt{\rho/K + \rho d/(\delta E)}},$$

где  $E$  — модуль упругости материала стенки;  $K_0$  — приведенный модуль упругости системы питания;  $\delta$ ,  $d$  — толщина и диаметр трубопровода.

Исключение уравнения состояния из системы (4.18) производится представлением члена  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  в уравнении сохранения массы

в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial p}{\partial t}.$$

В результате принятых допущений и преобразований оказывается, что неустановившееся движение сжимаемой жидкости в трубопроводе постоянного сечения с достаточной степенью достоверности может быть описано системой линейных дифференциальных уравнений гиперболического типа в частных производных:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x}; \tag{4.19}$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{a^2} \frac{\partial p}{\partial t}.$$

При определенных краевых условиях система (4.19) описывает возникновение и распространение в гидравлических линиях возмущений давления и скорости, гидроударов, провалов давлений и других волновых переходных процессов.

При линейных и однородных уравнениях граничных условий система допускает аналитические решения.

Наиболее важные из них следующие.

Если время закрытия пускового клапана двигателя  $t_3$  мало по сравнению со временем двойного пробега волны возмущения по магистрали  $t_0 = 2l/a$ , то максимальное давление при гидроударе в системе определится по формуле, полученной Н. Е. Жуковским:

$$p = p_0 = \rho v_0 a,$$

где  $p_0$  и  $v_0$  — установившиеся давление и скорость в трубопроводе до начала закрытия клапана;  $p$  — давление при гидроударе. При  $t_3 > t_0$  и линейном законе торможения потока

$$p - p_0 = \rho v_0 a t_0 / t_3.$$

Анализ решения уравнений (4.19) также показывает, что в гидравлической системе при изменении режимов ее работы одновременно возникают волны давления и скорости. Причем для однофазных потоков возмущение давления  $\Delta p$  порождает возмущение скорости  $\Delta v$ :

$$\Delta p = \Delta v / \rho a.$$

В результате взаимодействия возмущений с граничными условиями соотношение между давлением и скоростью может меняться. В общем случае при колебаниях в системах питания соотношение давления и скорости на границах трубопровода выражается комплексным числом, называемым граничным импедансом  $Z$  или комплексным сопротивлением:

$$Z = \frac{p(x, t)}{v(x, t)}.$$

Вещественная часть  $Z$  характеризует активное сопротивление, а мнимая часть — реактивное сопротивление, т. е.  $Z$  определяет сдвиг по фазе между колебаниями скорости и давления.

Реактивное сопротивление обусловлено наличием на конце трубопровода сосредоточенной упругости: демпфера, кавитационной каверны и т. п. Активное сопротивление возникает вследствие наличия на конце инерционного звена, например, резкого сужения трубопровода, регулятора и т. п.

Используя аналитическое решение системы (4.19) методом Фурье, можно определить собственные частоты колебаний системы питания или получить выражение для передаточной функции при вынужденных колебаниях на входе.

Пусть начальные условия ( $t=0$ ) представлены в виде

$$p(x, 0) = p; \quad \frac{\partial p(x, 0)}{\partial t} = 0;$$

$$v(x, 0) = 0; \quad \frac{\partial v(x, 0)}{\partial t} = 0,$$

а граничные условия ( $t > 0$ ) в виде:

1. Стык бака и трубопровода:

$$x = 0; \quad p(0, t) = p_0; \quad \frac{\partial p(0, t)}{\partial t} = 0.$$

2. Открытый конец трубопровода

$$x = l; \quad p(l, t) = 0; \quad \frac{\partial v(l, t)}{\partial x} = 0.$$

### 3. Закрытый конец трубопровода

$$x=l; v(l, t)=0.$$

В соответствии с методом Фурье решение системы (4.19) ищется в виде

$$v(x, t) = v(x) e^{i\omega t}; \quad p(x, t) = p(x) e^{i\omega t},$$

где  $\omega$  — собственная круговая частота системы.

Полагая, в свою очередь,  $v(x) = A e^{k_1 x}$  и  $p(x) = B e^{k_2 x}$ , где  $A$  и  $B$  — произвольные постоянные, после подстановки  $v$  и  $p$  в уравнения (4.19) и соответствующих преобразований получаем характеристическое уравнение системы

$$k^2 + (\omega/a)^2 = 0,$$

с корнями

$$k_1 = i\omega/a; \quad k_2 = -i\omega/a.$$

В результате решение системы (4.19) имеет вид

$$v(x) = C_1 e^{k_1 x} + C_2 e^{k_2 x};$$

$$p(x) = \rho a (C_2 e^{k_2 x} - C_1 e^{k_1 x}),$$

где  $C_1$  и  $C_2$  произвольные постоянные, которые определяются граничными условиями.

После их нахождения можно получить соотношения между параметрами потока в начале и конце трубопровода

$$v(0) = \frac{1}{2} v(l) (e^{-k_2 l} + e^{-k_1 l}) + \frac{1}{2\rho a} p(l) (e^{-k_2 l} - e^{-k_1 l});$$

$$p(0) = \frac{\rho a}{2} v(l) (e^{-k_2 l} - e^{-k_1 l}) + \frac{1}{2} p(l) (e^{-k_2 l} + e^{-k_1 l}).$$

Эти соотношения используются для определения частот собственных колебаний жидкости в трубопроводах питания. Рассмотрим два простейших случая:

1. Трубопровод состыкован с баком и имеет закрытый конец (граничные условия 1 и 3).

Преобразуя выражения для  $v(0)$ ,  $p(0)$  в соответствии с граничными условиями, получаем характеристическое уравнение

$$e^{k_1 - k_2} = 1,$$

решение которого имеет вид

$$\frac{l}{a} \omega = \frac{2n-1}{2} \pi \quad \text{или} \quad f = \frac{4}{2n-1} \frac{l}{a},$$

где  $n = 1, 2, \dots$ ;  $f$  — частота системы.

Это значит, что частота первого тона собственных колебаний трубопровода с закрытым концом равняется  $4l/a$ .

2. Трубопровод состыкован с баком и имеет открытый конец (граничного условия 1 и 2).

В этом случае решение характеристического уравнения дает при  $n=1, 2, \dots$   $\frac{l}{a}\omega = n\pi$  или  $f = 2l/na$ . Это значит, что частота первого тона собственных колебаний трубопровода с открытым концом равна  $2l/a$ . Эта же частота сохранится, если на концах трубопровода при вынужденных колебаниях сосредоточены активные гидравлические сопротивления.

Решение системы (4.19) может быть приведено к виду

$$v(0) = v(l) \operatorname{ch} k_0 + \frac{1}{\rho a} p(l) \operatorname{sh} k_0;$$

$$p(0) = \rho a v(l) \operatorname{sh} k_0 + p(l) \operatorname{ch} k_0,$$

$$\text{где } k_0 = i\omega l/a.$$

Если считать, что  $Z_1$  и  $Z_2$  — импедансы соответственно на входе и выходе из трубы, а  $p_1$  — гармоническое возмущение давления на выходе, то

$$p_1 = p(l) + Z_2 v(l);$$

$$v_0 = p_0/z_1.$$

Используя эти уравнения, можно получить выражения комплексных передаточных функций, например для выходного сечения трубы:

$$K = \frac{p(l)}{p_1} = \frac{1}{(1 + Z_2/Z_1) \cos \frac{\omega l}{a} + i(Z_2 + 1/Z_1) \sin \frac{\omega l}{a}}.$$

Здесь  $\omega l/a$  — безразмерная частота колебаний. Каждому значению частоты соответствует комплексное передаточное число. Совокупность комплексных чисел при изменении частоты на комплексной плоскости образует амплитудно-фазовую частотную характеристику, дающую полное представление о вынужденных гармонических колебаниях на входе в трубопровод, т. е. амплитуду и сдвиг по фазе между  $p$  и  $v$  в зависимости от частоты.

Из вышеизложенного следует, что даже в простейших случаях граничные условия существенным образом влияют на нестационарные процессы в системах питания.

При исследовании реальных систем питания, состоящих из трубопроводов различных проходных сечений, при нелинейных и неоднородных уравнениях граничных условий, описывающих переходные процессы в агрегатах, расположенных на концах

гидравлических линий, пользуются машинными методами решения.

Например, когда рассматривается закрытие пускового клапана двигателя по времени начальные условия ( $t=0$ ):

$$p(x, 0) = p_0; \quad \frac{\partial p(x, 0)}{\partial t} = 0;$$

$$v(x, 0) = v_0; \quad \frac{\partial v(x, 0)}{\partial t} = 0,$$

а граничные условия ( $t > 0; x = 0$ ):

1. Стык бака и трубопровода:

$$p(0, t) = p_0; \quad \frac{\partial p(0, t)}{\partial t} = 0; \quad x = l.$$

2. Стык трубопровода и клапана:

$$v(l, t) = A(t) \sqrt{\frac{2p(l, t)}{\rho}}.$$

Функция  $A(t)$  определяет закон изменения проходного сечения клапана и коэффициента гидравлических потерь по времени.

Для решения системы (4.19) успешно применяются методы математической физики с использованием ЭВМ, например метод характеристик или метод сеток.

При исследованиях нестационарных процессов система уравнений (4.19) используется в тех случаях, когда решающим фактором физического процесса являются упругие свойства гидравлических линий (например, при расчете процессов распространения гидроударов или падений давлений). В практике расчетов, однако, встречаются задачи другого рода. Например, определение скорости и времени разгона жидкости в системе после открытия клапана, определение времени заполнения трубопровода, определение максимального давления при гидроударе в системе при неполном торможении потока. Для решения таких задач удобнее использовать уравнение неустановившегося движения жидкости без учета упругих свойств системы, т. е. уравнение Эйлера, дополненное членом, учитывающим потери на трение и местные сопротивления. Для горизонтального трубопровода с постоянной

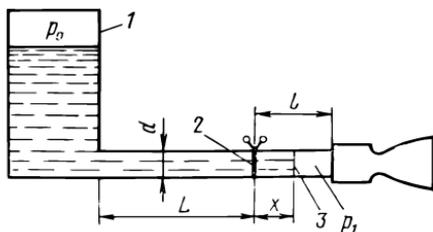


Рис. 4.1. Схема системы питания ЖРД:

1 — бак; 2 — пусковой клапан; 3 — фронт жидкости

площадью поперечного сечения (рис. 4.1) уравнение Эйлера можно записать в виде

$$\rho \frac{dv}{dt} + \frac{d}{dx} (1 + \zeta_{\Sigma}) \frac{\rho v^2}{2} = -\frac{dp}{dx}$$

или

$$\rho \frac{dv}{dt} dx + d(1 + \zeta_{\Sigma}) \frac{\rho v^2}{2} = -dp,$$

где  $\zeta_{\Sigma}$  — коэффициент потерь на местные сопротивления и трение в системе.

После интегрирования по  $x$  в пределах от 0 до  $x$  имеем

$$\rho(L+x) \frac{dv}{dt} + (1 + \zeta_{\Sigma}) \frac{\rho v^2}{2} = p_0 - p_1, \quad (4.20)$$

где  $x$  — расстояние от клапана до фронта движущейся жидкости;  $p_0$  — начальное давление в системе;  $p_1$  — давление перед фронтом движущейся жидкости.

Из-за нелинейности (наличия члена с  $v^2$ ) это уравнение по времени проинтегрировать не удастся. Однако, принимая во внимание, что  $v = \frac{dx}{dt}$ , и ставя условие, что при  $x=0$   $v=0$  (в начальный момент клапан закрыт — движения жидкости нет), уравнение можно проинтегрировать относительно  $v$  по  $x$ . После замены  $dt$  на  $dx/v$ , полагая  $p_0 - p_1 = \Delta p$ , уравнение (4.20) можно записать в виде

$$\frac{\rho(L+x)}{dx} d(v^2) + \rho(1 + \zeta_{\Sigma}) v^2 = 2\Delta p.$$

Это уравнение допускает разделение переменных и интегрирование относительно  $v^2 = f(x)$ . После интегрирования получаем

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho(1 + \zeta_{\Sigma})} \left[ 1 - \left( \frac{L}{L+x} \right)^{1+\zeta_{\Sigma}} \right]}. \quad (4.21)$$

Выражение (4.21) определяет изменение скорости по мере перемещения фронта жидкости в заполняемом трубопроводе под действием перепада давления  $\Delta p$ .

Выражения, аналогичные выражению (4.21), получены и для составных горизонтальных и вертикальных трубопроводов различной площади поперечного сечения. Если система питания состоит из  $n$  участков площадью поперечного сечения  $F_i$  и длиной  $l_i$ , а площадь поперечного сечения и длина заполняемого участка  $F$  и  $l$ , то при давлении в баке  $p_0$ , высоте столба жидкости в баке  $H_0$  и произвольном  $x$  скорость жидкости, заполняющей трубопровод, определяется следующими выражениями:

для вертикального трубопровода

$$v = \sqrt{\frac{2 \left( p_0 + g\rho H_0 + g\rho \sum_{i=1}^n l_i - g\rho \sum_{i=1}^n l_i \frac{F}{F_i} - p_1 \right)}{\rho r}} \times \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n l_i \frac{F}{F_i}}{\sum_{i=1}^n l_i \frac{F}{F_i} + x} \right]^r + \frac{2}{\rho(r+1)} \left[ \left( \sum_{i=1}^n l_i \frac{F}{F_i} + x \right) - \frac{\left( \sum_{i=1}^n l_i \frac{F}{F_i} \right)^{r+1}}{\left( \sum_{i=1}^n l_i \frac{F}{F_i} + x \right)^r} \right]; \quad (4.22)$$

для горизонтального трубопровода

$$v = \sqrt{\frac{2(p_0 + g\rho H_0 - p_1)}{\rho r} \left[ 1 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n l_i \frac{F}{F_i} \right)^r}{\left( \sum_{i=1}^n l_i \frac{F}{F_i} + x \right)^r} \right]}, \quad (4.23)$$

где  $r = 1 + \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{F^2}{F_i^2} + \sum_{i=1}^n \zeta_i \frac{F^2}{F_i^2}$

— суммарный коэффициент потерь на трение и местные сопротивления в трубопроводе.

Если известна длина заполняемого трубопровода  $l$ , то, используя методы приближения, можно определить время заполнения:

$$t = \int_0^l \frac{dx}{v}; \quad t \approx \sqrt{\frac{\rho(1 + \zeta_\Sigma)}{2\Delta p}} \left\{ l + \frac{1}{2\zeta_\Sigma} \left[ 1 - \left( \frac{L}{L+l} \right)^{\zeta_\Sigma} \right] \right\}.$$

Для определения максимального давления при гидравлическом ударе в системе, например после заполнения участка трубопровода длиной  $l$  и последующего полного торможения потока, используется следующая расчетная схема. Сначала по

формуле (4.21) определяется скорость жидкости  $v$  на участке длиной  $l$ . Затем по формуле Жуковского определяется давление при гидроударе.

С помощью зависимостей (4.21), ..., (4.23) и известных характеристических соотношений решения системы (4.19) можно получить выражение для оценки давления при гидроударе и при неполном торможении потока, например при столкновении жидкости с дроссельной шайбой или форсунками камеры сгорания. При этом предполагается, что истечение через местное сопротивление происходит под давлением при гидроударе, а режим течения квазистационарный.

Тогда совместное решение относительно давления при гидроударе  $p$  одного из характеристических соотношений системы (4.19)

$$p_0 - \rho a v = p - \rho a v_{ш}$$

и уравнения для скорости  $v_{ш}$  течения через шайбу под давлением при гидроударе

$$v_{ш} = \varphi \sqrt{2p/\rho}$$

дает

$$= (\sqrt{\rho a v + \varphi^2 a^2 \rho / 2} - \varphi a \sqrt{\rho / 2})^2, \quad (4.24)$$

где  $\varphi$  — коэффициент скорости, учитывающий местные потери в системе при истечении через дроссельную шайбу;  $v$  — скорость подхода фронта жидкости к шайбе по формулам (4.21), ..., (4.23).

Во всех приведенных выше уравнениях неустановившегося движения учет потерь на трение с помощью коэффициента  $\lambda$ , являющегося функцией числа  $Re$  и шероховатости стенок трубопроводов, а также потерь на местные сопротивления посредством коэффициента  $\zeta_x$ , зависящего от геометрических размеров и конфигурации трактов, производился исходя из предположения о квазистационарности процесса течения при определении значений  $\lambda$  и  $\zeta_x$ . Вообще говоря, это не совсем верно. Дело в том, что при нестационарном течении жидкости и колебаниях скорости происходит деформация поля скоростей по сечению потока по сравнению с полем скоростей при установившемся движении, а это, в свою очередь, изменяет закон распределения касательных напряжений в потоке и зависимости для определения  $\lambda$ . При нестационарном течении, кроме перестройки полей скоростей, на значение  $\zeta_x$  влияют инерционность массы жидкости, находящейся в каналах гидравлического сопротивления. Интерпретируя уравнение (4.20) для течения жидкости через гидравлическое сопротивление, можно показать влияние инерционности на значение коэффициента  $\zeta_x$  при неустановившемся движении:

$$\zeta_{\text{д}} = \left( \Delta p - \rho l \frac{dv}{dt} \right) \frac{2}{\rho v |v|},$$

где  $v$  — скорость в местном сопротивлении;  $\Delta p$  — перепад на местном сопротивлении при стационарном течении;  $l$  — протяженность канала гидравлического сопротивления.

Теоретическим и экспериментальным путями показано, что значения  $\lambda$  и  $\zeta_{\text{д}}$  для неустановившегося движения отличаются от их значений для установившегося движения. Для небольших ускорений и низких частот колебаний эти расхождения невелики и ими в практических расчетах пренебрегают, а для частот, превышающих сотни герц, различия ощутимы и их необходимо учитывать.

**Конвективная диффузия в жидкости.** К числу процессов массообмена в ПГС ДУ относятся процессы растворения газа в жидкости (адсорбция) или выделение из нее свободного газа (десорбция). Эти процессы протекают на границе контакта жидкости и газа и называются гетерогенными.

Как уже указывалось, растворимость газа в жидкости подчиняется закону Генри. Перенос вещества осуществляется двумя путями. При наличии разности концентраций растворенного в жидкости газа имеет место молекулярная диффузия. В случае же движения среды растворенный или свободный газ увлекается перемещающейся жидкостью и переносится вместе с ней, т. е. имеет место конвективный перенос. Сумма этих процессов называется конвективной диффузией. Полагая движение жидкости стационарным и ламинарным, в соответствии с законом Фика вектор удельного потока вещества в килограммах на квадратный метр-секунду можно выразить формулой

$$\vec{j} = c\vec{v} - D \text{grad } c,$$

где  $c\vec{v}$  — определяет конвективный, а  $D \text{grad } c$  — концентрация газа в жидкости. Коэффициент диффузии  $D$  является функцией концентрации и температуры. Знак минус показывает, что диффузионный поток направлен от мест с большей к местам с меньшей концентрацией.

Используя формулы баланса потока вещества через поверхность элементарного объема и изменения концентрации вещества внутри этого объема, получают соотношение

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\text{div } \vec{j}.$$

Подстановка в последнюю формулу выражения для  $\vec{j}$  дает уравнение молекулярной диффузии

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div } (D \text{grad } c) - \text{div } (c\vec{v}). \quad (4.25)$$

Если пренебречь сжимаемостью жидкости и зависимостью коэффициента диффузии от температуры, то уравнение (4.25) упрощается:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{v} \text{grad } c = D \Delta c \quad (4.26)$$

или в координатном представлении:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right). \quad (4.27)$$

Для стационарного процесса массообмена уравнение (4.26) принимает вид

$$\bar{v} \text{grad } c = D \Delta c. \quad (4.28)$$

Уравнение конвективной диффузии по существу и по форме сходно с уравнением гидродинамики Навье-Стокса. Если уравнение (4.28) выражает баланс количества движения, переносимого в жидкости, то уравнение (4.27) — баланс потока вещества.

Приведение уравнения (4.28) к безразмерному виду дает

$$U_x \frac{\partial C}{\partial X} + U_y \frac{\partial C}{\partial Y} + U_z \frac{\partial C}{\partial Z} = \frac{1}{\text{Pe}} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} \right), \quad (4.29)$$

где  $\text{Pe} = U_0 L / D$  — число Пекле,  $C = c / c_\infty$ ;  $L$  — характерный размер, на котором происходит изменение концентрации;  $c_\infty$  — постоянная концентрация в толще жидкости;  $U_0$  — характерная скорость движения.

Левая часть уравнения (4.29) характеризует конвективный перенос вещества, правая — молекулярную диффузию. Так как все безразмерные члены имеют порядок единицы, то соотношение между конвективным и диффузионным переносом характеризуется единственным числовым параметром — безразмерным числом  $\text{Pe}$ . Оно при массопереносе имеет то же значение, что число  $\text{Re}$  при течении жидкости.

Если число  $\text{Pe}$  мало, то распределение концентрации определяется процессом молекулярной диффузии. Это имеет место при достаточно малой скорости движения жидкости и в областях малого масштаба. Если же число  $\text{Pe}$  велико, то распределение концентрации определяется конвективным переносом и молекулярной диффузией можно пренебречь.

Отношение числа  $\text{Pe}$  к числу  $\text{Re}$  дает безразмерное соотношение, получившее название числа Прандтля:

$$\text{Pr} = \text{Pe} / \text{Re} = \nu / D,$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость.

Число  $\text{Pr}$  не зависит от скорости течения и определяется исключительно физическими константами, характеризующими

перенос импульса и вещества чисто молекулярным механизмом. При  $Pr=1$  имеет место подобие между переносом импульса и вещества.

Для ламинарных потоков у газов  $\nu$  и  $P$  имеют одинаковый порядок, так что  $Pr \approx 1$ . Иначе обстоит дело у жидкостей. Кинематическая вязкость воды  $\nu \approx 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, а коэффициент диффузии молекул газа в водных растворах имеет порядок  $D \approx 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Поэтому у жидкостей  $Pr \approx 10^3$ . При этом имеется тенденция роста числа  $Pr$  с увеличением кинематической вязкости пропорционально квадрату последнего. Из этого следует, что уже при малых скоростях движения среды конвективный перенос в жидкости преобладает над молекулярной диффузией.

Процесс массопереноса складывается из двух важных этапов: движения массы к поверхности раздела и перехода массы через границу раздела.

Так как в подавляющем большинстве физических процессов в ПГС ДУ последний этап протекает с большей скоростью, то рассматривается следующая физическая модель массообмена. На поверхности раздела  $c_0=0$ , так как все количество вещества, доставленное сюда конвекцией, мгновенно переходит границу раздела. В то же время конвективные токи обеспечивают интенсивное перемешивание среды до поверхности раздела, т. е. до поверхности раздела везде концентрация одинакова и равна  $c_\infty$ . Из этих рассуждений формируются граничные условия задачи. Например, если массообмен идет на границе раздела жидкость — пузырек газа радиуса  $r_0$ , то граничные условия имеют вид

при  $r \rightarrow \infty$   $c = c_\infty$ ;

при  $r = r_0$   $c_0 = 0$ ,

где  $r$  — текущий радиус.

Из рассмотренной физической модели следует, что вблизи поверхности раздела должен существовать тонкий слой жидкости, в котором происходит быстрое изменение концентрации. В нем производные от концентрации по координатам очень велики, вследствие чего правая часть уравнения (4.27), выражающая молекулярную диффузию, делается соизмеримой с левой, несмотря на малый коэффициент диффузии  $D$  и большое число  $Pe$ . Этот тонкий слой, где интенсивно проявляются процессы молекулярной диффузии, принято называть диффузионным пограничным слоем. Так как  $D \ll \nu$ , толщина диффузионного пограничного слоя  $\delta$  существенно меньше толщины вязкостного пограничного слоя  $\delta_0$  и для ламинарных потоков, если поверхность раздела представляет собой твердую стенку и  $\delta_0 \sim \sqrt{\nu L/U_0}$ , определяется по формуле  $\delta \sim (D/\nu)^{1/3} \delta_0 = \delta_0 / Pr^{1/3}$ . Если поверхность раздела — жидкость, то  $\delta \approx \delta_0 / Pr^{1/2}$ . Выраже-

ние для диффузионного удельного потока вещества через границу раздела приблизительно можно представить в виде  $j = Dc_\infty/\delta$ . Таким образом, удельный поток вещества определяется коэффициентом молекулярной диффузии, например при обтекании пластинки

$$j \approx \alpha_1 Dc_\infty \text{Pr}^{1/3} \sqrt{U_0/\nu}, \text{ где } \alpha_1 \text{ — коэффициент пропорциональности.}$$

Проводя аналогию между движением вязкой жидкости и конвективной диффузией, уравнение гидромеханики можно трактовать как уравнение сохранения потока импульса, а уравнение диффузии как уравнение сохранения потока вещества.

При турбулентном движении перенос вещества к поверхности раздела осуществляется турбулентными пульсациями, а значения  $\nu_{\text{турб}}$  и  $D_{\text{турб}}$  для жидкостей существенно превышают соответствующие значения кинематической вязкости и коэффициента молекулярной диффузии при ламинарном движении и по своему порядку становятся равными (здесь и далее индексом «турб» обозначены параметры турбулентного течения). По данным Дж. Дейли и С. С. Кутателадзе числа Прандтля для жидкостей и газов при турбулентном течении примерно одинаковы и колеблются в пределах 0,5...0,7. Это, конечно, сказывается на распределении концентрации в пограничном слое, но только до диффузионного подслоя, где турбулентный механизм переноса вещества уступает диффузионному, который и определяет в конечном счете поток массы через границу раздела. Если при ламинарном течении закон распределения концентрации в пограничном слое линейный, то при турбулентном течении имеет место логарифмический закон, но только до диффузионного подслоя, который и определяет поток массы через границу раздела. В связи с этим выражение для толщины диффузионного подслоя

$$\delta \sim \frac{D^{1/4}}{U_0^{1/4}} \delta_0^{3/4} \sim \frac{\delta_0}{\text{Pr}^{1/4}}$$

отличается от выражения, полученного для ламинарного течения, так же как и от выражения, полученного для потока на пластинку:

$$j \approx \alpha_2 U_0 c_\infty / \text{Pr}^{3/4}.$$

Из этих выражений видно, что при турбулентном течении диффузионный поток пропорционален скорости или числу  $\text{Re}$ , тогда как при ламинарном режиме он пропорционален корню, квадратному из скорости. Далее, диффузионный поток при турбулентном течении пропорционален коэффициенту диффузии в степени  $1/4$ , а не в степени  $1/3$ , как при ламинарном потоке. Таким образом, улучшение условий перемешивания снижает диффузионное сопротивление границы раздела.

Так как в состав уравнения (4.28) входит скорость, процесс массообмена не может быть рассмотрен без уравнения, определяющего поле скоростей, т. е. без уравнения движения.

Рассматривая в качестве примера уравнения стационарного движения и массообмена в пограничном слое, определим условия подобия массообменных процессов.

В безразмерном виде эти уравнения имеют вид

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial X} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 U_x}{\partial Y^2};$$

$$U_x \frac{\partial C}{\partial X} + U_y \frac{\partial C}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pe}} \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2},$$

а граничные условия выражаются соотношениями:

при  $Y = \infty$   $U_x \rightarrow 1$ ;  $C \rightarrow 1$ ;

при  $Y = 0$   $U_x = U_y = 0$ ;  $C = 0$ .

Из приведенных уравнений следует, что стационарные массообменные процессы будут подобны при соблюдении геометрического подобия, подобия граничных условий и равенства чисел  $\text{Re}$  и  $\text{Pe}$ , т. е. при  $\text{Re} = \text{idem}$ ;  $\text{Pe} = \text{idem}$  или при  $\text{Pr} = \text{Pe}/\text{Re} = \nu/D = \text{idem}$ , где  $\text{Pr}$  — число Прандтля.

В задачах массообмена основной интерес представляет удельный поток вещества. Его также удобно выразить через безразмерный критерий — число Нуссельта  $\text{Nu}$ :

$$j = \frac{Dc_\infty}{L} \text{Nu},$$

отсюда

$$\text{Nu} = \frac{L}{Dc_\infty} j.$$

Число  $\text{Nu}$  связывает площадь поверхности раздела с толщиной диффузионного пограничного слоя:  $\text{Nu} = L/\delta$ . В этом случае результаты обработки экспериментальных данных представляются как

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}).$$

**Теплоперенос в жидкостях.** Процесс переноса теплоты в движущейся жидкости во многих отношениях сходен с процессом конвективной диффузии. Теплоту, как и диффундирующее вещество, можно рассматривать как некоторую гипотетическую среду, переносимую конвективным и молекулярным механизмами.

В неравномерно нагретой жидкости, характеризующейся полем температур  $T(x, y, z)$ , возникает поток теплоты, перено-

симой благодаря молекулярной теплопроводности, пропорциональный градиенту температуры. Отнесенный к единице площади поверхности он может быть выражен формулой

$$\bar{q}_x = -\kappa \text{grad } T,$$

где  $\bar{q}_x$  — диффузионный тепловой поток, Дж/(кг·К);  $\kappa$  — теплопроводность Вт/(м·К), зависящая от  $T$  и физических свойств среды.

Значение  $\kappa$  для газов находится в пределах  $2 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К), а для органических жидкостей —  $2 \cdot 10^{-1} \dots 1,0$  Вт/(м·К).

По аналогии конвективный тепловой поток  $\bar{q}_v$  определяется формулой

$$\bar{q}_v = \rho c_p \bar{v} T,$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении.

Если пренебречь сжимаемостью жидкости и работой расширения, то баланс потока теплоты через поверхность элементарного объема и изменение теплосодержания этого объема можно выразить соотношением

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \text{grad } T \right) = \text{div} (\kappa \text{grad } T). \quad (4.30)$$

Полученное уравнение, определяющее распределение температуры в движущейся жидкости, имеет весьма сложный характер, поскольку входящие в него величины  $\rho$ ,  $c_p$  и  $\kappa$  зависят от температуры.

Однако в большинстве практических задач исследования тепловых процессов в гидросистемах ДУ приходится довольствоваться приближением, в котором все материальные константы считаются независимыми от температуры. Тогда уравнение теплопереноса в жидкости записывается в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \text{grad } T = \chi \Delta T, \quad (4.31)$$

где  $\chi = \kappa / (\rho c_p)$  — температуропроводность, м<sup>2</sup>/с. Температуропроводность характеризует скорость изменения температуры в среде при прохождении через нее теплового потока, пропорционального  $\kappa$ .

Между уравнением (4.31) и уравнением конвективной диффузии (4.26) имеется незначительное сходство. Из этих уравнений следует, что температуропроводность жидкости  $\chi$  изменяется в более широких пределах, чем коэффициент диффузии  $D$ . Тепловое число Прандтля, определяемое как

$$\text{Pr}_T = \nu / \chi,$$

может принимать значения от 6,75 для воды до 7250 для глицерина.

Распределение температур в стационарном потоке определяется уравнением

$$\bar{v} \operatorname{grad} T = \chi \Delta T. \quad (4.32)$$

Когда по условию задачи сжимаемостью среды и работой расширения пренебречь нельзя (например, при движении двухфазного потока), процесс теплопереноса описывается уравнением энергии (4.14).

Наличие конвективного члена в уравнении (4.31) свидетельствует о том, что для получения картины распределения температур в потоке необходимо решение системы из трех уравнений: теплопереноса, движения и сохранения массы.

Граничные условия тепловых задач имеют такой же характер, как у диффузионных задач или у задач, рассмотренных при выводе уравнения энергии.

Анализ приведенных к безразмерному виду уравнений (4.2), (4.5), (4.31) дает следующие критериальные соотношения, определяющие условия подобия тепловых процессов:

1.  $Nu = \alpha L / \kappa$  характеризует соотношение между конвективным переносом теплоты и переносом теплоты за счет теплопроводности. Число  $Nu$  является обычно искомой величиной, поскольку оно определяется коэффициентом конвективного теплообмена  $\alpha$ . При теплообмене через границу раздела сред коэффициент  $\alpha$  определяет процесс теплопереноса через эту границу. Если  $\alpha$  задан по условию задачи, то безразмерный комплекс  $\alpha L / \kappa$  является числом Био  $Bi$ . Число  $Bi$  характеризует также связь между полем температур в твердой стенке и условиями теплоотдачи на ее поверхности, являясь мерой отношения внутреннего и внешнего термических сопротивлений, тогда  $\kappa$  — теплопроводность стенки.

2.  $Pe = vL / \chi$  характеризует соотношение между скоростью конвективного переноса теплоты и скоростью изменения температуры в среде за счет теплопроводности.

3.  $P_{rT} = \nu / \chi = \mu c_p / \kappa$  определяется независимыми от скорости физическими константами, характеризующими соотношение переноса количества движения и теплового потока за счет теплопроводности. Число  $P_{rT}$  является мерой подобия температурных и скоростных полей в потоке.

4.  $Fo = \chi t / L$ , где  $Fo$  — число Фурье, характеризует время протекания нестационарного процесса теплопереноса, а также связь между скоростью изменения температурного поля при изменении физических свойств среды и объема.

5.  $St = \kappa / c_p v$ , где  $St$  — число Стентона, определяет отношение интенсивности теплоотдачи и удельного теплосодержания потока.

6.  $Gr = \frac{g(T_1 - T_2)L^3}{T_2\nu^2}$ , где Gr — число Грасгофа, характеризует соотношение между подъемной силой, возникающей вследствие разностей плотностей, и вязкостными потерями, а также число Фруда Fr. Выражение  $(T_1 - T_2)/T_2$  определяет удельный температурный напор.

7.  $Fr = v^2/gL$ , где  $l$  — характерный геометрический размер, определяет критерий гравитационного подобия, являющийся мерой отношения сил инерции и тяжести в однородном потоке.

Числа Gr и Fr рассматривают, если теплоперенос обеспечивается естественной конвекцией, обусловленной разностью плотностей жидкости и разницей температур  $T_1 - T_2$  на границах исследуемой области или между поверхностью раздела и омывающей ее средой.

Кроме этого, условия подобия тепловых процессов в жидкости определяют также число Рейнольдса Re и число гомотехности Ho.

Ранее было показано, что при движении реальной жидкости вдоль твердой поверхности (стенки бака или трубопровода) наибольшее изменение скорости происходит в узком пристеночном слое, где наиболее отчетливо проявляется действие вязкости. Были также приведены зависимости, определяющие порядок толщины вязкостного и диффузионного пограничных слоев в зависимости от параметров потока.

В общем случае между полем скоростей и температур существует двухсторонняя связь, т. е. распределение скоростей зависит от распределения температур и наоборот.

Тепловым пограничным слоем называют пристенную область, в которой существенно проявляются тепловые возмущения. Эта область имеет толщину  $\delta_T$ , на которой температура потока меняется от ее значения на стенке  $T_{ст}$  до значения в невозмущенной среде  $T_{ж}$ . Здесь сосредоточено основное термическое сопротивление при переносе теплоты, так как на границе между твердым телом и жидкостью ( $\bar{v}=0$ ) удельный тепловой поток  $q$  определяется только теплопроводностью:

$$q = -\alpha \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\alpha}{x} Nu (T_{ст} - T_{ж}),$$

а удельный тепловой поток от тела к жидкости (или наоборот) определяется как

$$q = \alpha (T_{ст} - T_{ж}).$$

В этом случае порядок толщины  $\delta_T$  оценивается из условия  $q = \alpha (T_{ст} - T_{ж}) \approx \alpha (T_{ст} - T_{ж})/\delta_T$ ;  $\delta_T/x \approx 1/Nu_x$ ,

где  $Nu_x = \alpha x/\alpha$ .

Принимая во внимание, что  $Pr = Pe/Re$  и  $\delta \sim \frac{1}{\sqrt{Re}}$ , получаем при  $Pr = 1$   $\delta_T = \delta$ .

Если  $Pr > 1$ , то молекулярная вязкость больше молекулярной температуропроводности и гидродинамические возмущения распространяются вглубь потока более интенсивно, чем тепловые, следовательно при  $v \geq \chi$   $\delta \geq \delta_T$  и отношение  $\delta_T/x$  лежит между единицей и нулем. При этом предполагается, что тепловой пограничный слой лежит внутри вязкого подслоя, где изменение скорости происходит по линейному закону. Это соответствует процессу движения несжимаемой жидкости вдоль стенки топливного бака при небольших значениях  $\frac{\partial p}{\partial x}$ .

В этом случае в ламинарном пограничном слое выполняются соотношения

$$\delta/\delta_T = Pr^{1/3};$$

$$\alpha = \frac{x}{T_{ж} - T_{ст}} \left[ \frac{\partial (T - T_{ст})}{\partial y} \right]_{y=0} = \frac{2x}{\delta_T}.$$

Так как величина  $\delta$  является функцией длины стенки, то изменение  $\alpha$  по длине определяет зависимость

$$\alpha = 0,35x Pr^{1/3} \left( \frac{U_0}{v_x} \right)^{1/2}.$$

Для осредненного значения коэффициента теплоотдачи используется выражение

$$Nu = 0,66 Pr^{1/3} Re^{1/2}.$$

При естественной конвекции вдоль вертикальной стенки для  $Pr > 1$  средний коэффициент теплоотдачи может быть оценен с помощью соотношения

$$Nu/(Gr Pr)^{1/4} = 0,67.$$

Число  $Nu$  в данном случае определяется соотношением

$$Q = bx Nu (T_{ст} - T_{ж}),$$

где  $Q$  — тепловой поток;  $b$  — толщина стенки.

Для  $Pr > 1$

$$Nu'/(Gr Pr)^{1/4} = 0,8.$$

При установившемся турбулентном течении потока несжимаемой жидкости по трубопроводу гидросистем теплообмен является функцией чисел  $Re$  и  $Pr$ .

Из-за изменения толщины пограничного слоя в начале трубопровода коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  имеет повышенное значение в начальном участке трубы и постепенно снижается до некоторого постоянного значения, определяемого физическими

свойствами жидкости, скоростью течения и диаметром трубопровода.

Для  $0,7 < Pr < 200$  С. С. Кутателадзе рекомендует следующее выражение для оценки коэффициента теплоотдачи:

$$Nu = \frac{0,023 Pr Re^{0,8}}{1 + 2,14 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} \cdot$$

При расчете теплоотдачи газов с  $Pr \approx 1$   $Nu = 0,023 Pr^{0,4} Re^{0,8}$ .

## 4.2. УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Основные критериальные соотношения.** При моделировании неустановившихся гидродинамических процессов натурные и модельные системы должны быть геометрически подобны, а граничные условия тождественны. Приведение к безразмерному виду системы уравнений (4.9), (4.19) и анализ безразмерных комплексов при членах этих уравнений дает ряд критериев подобия нестационарных процессов, соблюдение постоянства которых является непременным условием моделирования:

числа Эйлера, определяемые скоростью потока и скоростью звука,

$$Eu_v = p/(\rho v^2) = \text{idem}; Eu_a = p/(\rho a^2) = \text{idem};$$

критерий трубопровода

$$Eu_{tr} = p/(a\rho v) = \text{idem};$$

число Рейнольдса

$$Re = \rho v d / \mu = \text{idem}.$$

Критерии гомохронности, определяемые скоростью потока и скоростью звука,

$$Ho_v = vt/x = \text{idem}; Ho_a = at/x = \text{idem}.$$

$Eu_v$  и  $Eu_a$  определяют подобие полей давления и являются мерой отношения статических давлений (перепадов) в потоке к динамическому напору (кинетической или акустической энергии). Близок к этим числам по физической сущности критерий трубопровода, являющийся мерой отношения статических давлений (перепадов) в потоке к изменениям давления, обусловленным упругими свойствами системы (например, гидроударами).

Критерии гомохронности характеризуют скорость изменения во времени поля скоростей течения, обусловленного или инерционными, или упругими свойствами системы.

При моделировании одновременно поддерживать постоянными все критерии сложно, а иногда и необязательно, если, например, исследуемый процесс лежит в области автомодельности

по ряду параметров. Обычно выбор определяющих критериев диктуется конкретными физическими условиями задачи. Рассмотрим некоторые случаи моделирования:

1. Моделирование волновых процессов. Возмущения скорости, вызванные распространением по трубопроводам возмущений давления, обычно существенно меньше скорости течения жидкости. Поэтому потери на трение от этих возмущений весьма малы, а скорости потока находятся в области автомодельности по  $Re$ . Поэтому, если объектом исследований не являются процессы диссипации энергии, выполнение условия  $Re = idem$  является необязательным. Определяющим в этом случае является равенство в натурной и модельной установках временных характеристик волновых процессов  $Ho = idem$ ;  $l_m/a_m = l_n/a_n$ , а также энергетических соотношений  $Eu = idem$ ;  $\rho_m a_m^2 / \rho_n = \rho_n a_n^2 / \rho_n$ , т. е.  $\rho_m = \rho_n a_m^2 / a_n^2$ . Здесь и далее индексами «м» и «н» обозначены параметры модельной и натурной установки. Моделирование волновых (акустических) процессов в гидравлических системах часто применяется при экспериментальных отработках.

2. Моделирование гидравлических ударов. Часто на практике возникает необходимость моделирования давлений при гидроударах (их максимальных значений) при проведении испытаний на натуральных установках, но при замене натурной жидкости другой, например нетоксичной. Некорректность такого моделирования заключается в трудности соблюдения постоянства критерия гомотронности, т. е. в несоответствии модельного и натурального времени распространения возмущений по трубопроводам, следовательно, и характера изменения давления при гидроударе по длине гидравлической системы. Однако в этом случае при соблюдении  $Eu_{тп} = idem$  и  $Eu_v = idem$ , т. е. при  $\rho_m v_m a_m = \rho_n v_n a_n$  и  $\rho_m v_m^2 / \Delta p_m = \rho_n v_n^2 / \Delta p_n$  на модельной установке может быть воспроизведено максимальное давление при гидроударе, которое возникает в натуральных условиях. Для этого при моделировании для обеспечения модельной скорости разгона жидкости  $v_m = v_n \frac{\rho_n a_n}{\rho_m a_m}$  надо в соответствии с приведенными соотношениями изменить только действующий на жидкость перепад давлений (давление в баке), т. е. обеспечить  $\Delta p_m = \Delta p_n \frac{\rho_n a_n^2}{\rho_m a_m^2}$ .

3. Моделирование времени заполнения гидросистемы. При моделировании на натуральных установках, но на модельных жидкостях времени заполнения гидравлической линии определяющими являются число  $Eu$ ;  $\rho_m v_m^2 / \Delta p_m = \rho_n v_n^2 / \Delta p_n$ ; критерий  $Ho$ ;  $v_n t_n / x_n = v_m t_m / x_m$ . Из приведенных соотношений при требовании  $t_m = t_n$  вытекает условие  $v_m = v_n$  и  $\Delta p_m = \Delta p_n \rho_m / \rho_n$ .

4. Моделирование стендовых систем питания. При проведении стендовой отработки ЖРД исключительно важным являет-

ся выполнение стендовых систем питания таким образом, чтобы они моделировали (или воспроизводили) условия работы натуральных систем на переходных режимах.

Для достижения поставленной цели на стендах, имеющих длину топливоподающих трубопроводов существенно большую, чем на штатных ДУ, применяются разделительные пусковые емкости, которые устанавливаются в трубопроводах на расстоянии от ЖРД, равном длине штатных систем питания.

При этом выполнение условий моделирования требует:

$$\text{равенства инерционных характеристик } \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{F_i} = \text{idem};$$

$$\text{равенства гидросопротивлений } \sum_{i=1}^n (\Delta p_r)_i = \text{idem};$$

$$\text{идентичности акустических характеристик } l_i/a_i = \text{idem},$$

где  $n$  — число участков трубопроводов системы питания с постоянной площадью сечения;  $\Delta p_r$  — гидросопротивление  $i$ -го участка.

Если система питания состоит из параллельных трубопроводов, например I и II, а моделируется одним, то

$$\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{F_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{F_i}\right)_I \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{F_i}\right)_{II}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{F_i}\right)_I + \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{F_i}\right)_{II}}.$$

Здесь индексы «I» и «II» относятся к параметрам трубопроводов I и II.

При моделировании запуска связки из  $N$  ЖРД с помощью одного ЖРД инерционные характеристики стендовой системы питания выбираются из условия

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{F_i}\right)_{\text{стенд}} = N \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{F_i}\right)_{\text{ДУ}}.$$

Расчетная оценка точности имитации на стенде частотных характеристик натуральных трубопроводов проводится по расхождению в значениях импедансов для одинаковых частот колебаний. Например, импеданс натурной системы питания, имеющей трубопровод с постоянной площадью поперечного сечения без учета потерь на трение,

$$Z(i\omega) = -i\rho a_n \operatorname{tg}\left(2\pi f \frac{l_n}{a_n}\right),$$

а входной импеданс насоса с частичной кавитацией

$$Z(i\omega) = \frac{B_1 - i\omega\rho B_2}{\frac{B_1}{\Delta p_r/G - S_n} - i\omega\rho},$$

где  $B_1$ ,  $B_2$  — упругость кавитационной каверны и кавитационное сопротивление;  $G$  — расход;  $S_n$  — тангенс угла наклона касательной к напорной характеристике насоса.

На практике имитация натурной системы питания составными трубопроводами большей длины дает удовлетворительные результаты, если характеристики  $l/F$ ;  $l/a$ ;  $\Delta p_r$  стенда отличаются не более чем на 10% от соответствующих характеристик штатной системы.

Моделирование стационарных процессов в гидросистемах ДУ по  $Re$  не нашло широкого применения по ряду причин. Во-первых, проливка маломасштабных моделей трубопроводов рабочими жидкостями с малыми расходами для определения потерь на трение не имеет смысла, так как их легко рассчитать. Пролитка же маломасштабных систем питания требует изготовления маломасштабных агрегатов, что неэффективно по экономическим соображениям. Во-вторых, идею использования модельных жидкостей для проливок модельных гидросистем не удается реализовать потому, что вязкость натуральных компонентов примерно на порядок меньше вязкости традиционных модельных жидкостей — воды и спирта. Из этого следует, что для выполнения равенства  $Re_m = Re_n$  требуется не уменьшение, а увеличение расхода жидкости.

В связи с этим определение потерь на гидравлические сопротивления в системах питания производится путем проливок натуральных систем на модельных жидкостях в пределах расходов, обеспечивающих автономность суммарного коэффициента сопротивления от числа  $Re$ . По результатам проливок определяют коэффициент потерь на местные сопротивления и трение  $\zeta_{\Sigma} = 2\Delta p_m / (\rho v_m^2)$ , после чего по  $\zeta_{\Sigma}$  рассчитывают  $\Delta p_n$  на натуральных режимах.

Когда расходы топлива превышают сотни килограмм в секунду, оказывается целесообразным использовать для определения гидравлических сопротивлений натуральных агрегатов и систем продувки на тяжелых газах типа фреон-13; -22; -113. Обеспечивая изотермическое течение газа, из условия  $Re_m = Re_n$ ;  $G_m = \mu_m / (\mu_n G_n)$ , где  $\mu$  — динамическая вязкость, можно получить значительную экономию рабочего тела.

Например, при  $G_n = 270$  кг/с,  $\mu_n = 102,4 \cdot 10^7$  Па·с и  $\mu_m = 1,65 \cdot 10^7$  Па·с модельный расход фреона-22 при  $120^\circ\text{C}$   $G_m = 4,35$  кг/с. При этом определение  $\Delta p_n$  по  $\Delta p_m$  осуществляется следующим образом. Полагая режимы течения подобными, имеем  $\zeta_{\Sigma m} = \zeta_{\Sigma n}$ ;  $\Delta p_m / (\rho_m v_m^2) = \Delta p_n / (\rho_n v_n^2)$ .

Но, так как  $G_m = \frac{\mu_m}{\mu_n} G_n$ , то

$$\Delta p_n = \Delta p_m \frac{\rho_m}{\rho_n} \frac{\mu_n^2}{\mu_m^2} \quad \text{или} \quad \Delta p_n = \zeta_{\Sigma m} \frac{G_n^2}{2g\rho_n F^2},$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения трубопровода.

Для обеспечения соответствующей точности изменение плотности газа при продувках не должно превышать 2%.

**Моделирование процессов при отработке сетчатых заборных устройств.** Как уже отмечалось, удержание топлива на входе в двигателях сетчатыми заборными устройствами в условиях невесомости или малых знакопеременных перегрузок происходит из-за капиллярных явлений на сетках, которые обусловлены наличием сил поверхностного натяжения.

Так как ракетные топлива являются смачивающими жидкостями по отношению к стенкам баков и материалу сеток, при прохождении по сетке поверхности раздела жидкость — газ в каждой ячейке сетки образуется мениск, направленный внутрь жидкости, а равнодействующая сила поверхностного натяжения направлена в сторону газовой подушки. Это значит, что условия равновесия произвольной ячейки выражаются соотношением

$$p_r = p_{ж} + 2\sigma/R,$$

где  $R$  — радиус кривизны поверхности раздела, а удерживающая способность сетки на границе раздела жидкость — газ определяется перепадом давления  $\Delta p_c = 2\sigma/R$ , который зависит при прочих равных условиях от размеров ячеек и характерного линейного размера свободной поверхности сетки  $H$ . Здесь и далее индексом «г» обозначены параметры газа, а индексом «ж» — параметры жидкости.

Для иллюстрации сказанного обратимся к рис. 4.2. В исходном состоянии топливо 1 располагается в баке 2, как показано на рис. 4.2, а, и полностью закрывает сетку 3, работающую как обычное гидравлическое сопротивление. При эволюции ракеты топливный бак может оказаться в положении, показанном на рис. 4.2, б. В этом случае часть топлива будет удерживаться ограничивающей его сеткой, а другая примет положение, обусловленное действующей перегрузкой  $n_x$ . В нижней части бака, где топливо находится слева и справа от сетки, давление будет одинаковым и равным  $p_r$ . В объеме топлива, ограниченном сеткой, давление по высоте  $H$  в соответствии с законом гидростатики будет уменьшаться. В связи с этим с ростом  $H$  будет уменьшаться  $R$  и увеличиваться перепад давления, действующий на поверхность раздела в ячейке. Сетка будет удерживать топливо до тех пор, пока  $\Delta p_c$  будет больше разности гидростатических давлений, действующих на наиболее удаленные друг от друга ячейки, т. е. будет соблюдаться неравенство  $2\sigma/R > H\rho n_x$ .

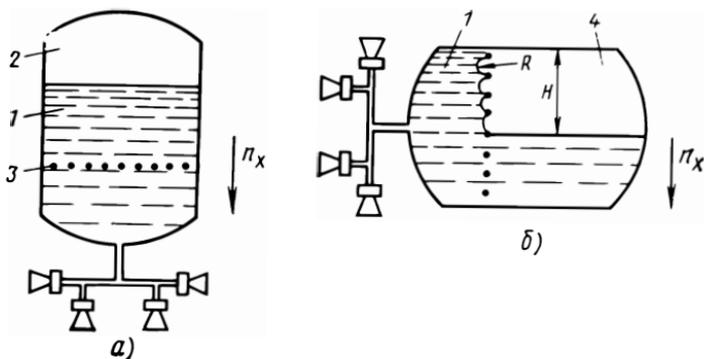


Рис. 4.2. Схема, иллюстрирующая работу сетчатого заборного устройства

Как только на любой ячейке перепад давления между топливом 1 и газом 2 превысит равнодействующую сил поверхностного натяжения, произойдет прорыв газа в левую жидкостную полость и уровни топлива справа и слева от сетки сравняются.

Другой режим работы сетчатых заборных устройств сепарационный. В результате воздействия знакопеременных перегрузок топливо в свободном объеме бака смешивается с газом, образуя дисперсную среду. При расходе топлива для питания двигателей пузырьки прижимаются к ячейкам сетки, в результате чего возникает поверхность раздела топливо — газ и проявляется капиллярный эффект. На пузырек со стороны потока действует давление, определяемое гидравлическими потерями на сетке, которое компенсируется равнодействующей сил поверхностного натяжения в ячейке. С течением времени поверхность сетки может так загромодиться пузырьками газа, что перепад на ней превысит капиллярное давление. Произойдет прорыв газа через сетку. Таким образом, условие равновесия сетки-сепаратора можно выразить соотношением

$$\zeta_c \rho v^2 / 2 \ll 2\sigma / R,$$

где  $\zeta_c$  — коэффициент гидравлических потерь на сетке, обусловленный в основном загромождением проходного сечения пузырьками газа.

В свете вышесказанного обработка систем питания в условиях невесомости или действия кратковременных перегрузок затрагивает следующие вопросы:

определение структуры газожидкостного объема в баках, формируемой под влиянием действующих перегрузок (их продолжительности, цикличности, величины);

проверку способности сетчатых заборных устройств при определенной структуре газожидкостной смеси удерживать жидкость и отделять от нее газовые пузырьки;

выбор определяющих критериев подобия и создание на их основе экспериментальных модельных установок.

Так как гидродинамические процессы в баках в условиях невесомости или кратковременных перегрузок определяются известными уравнениями сохранения, а действие поверхностных сил учитывается граничными условиями, то для полного моделирования рассматриваемых процессов, кроме геометрического подобия ПГС и идентичности граничных условий, необходимо соблюдение критериальных соотношений, вытекающих из анализа уравнений движения и неразрывности:

$$Eu = p/\rho v^2 = \text{idem}; \quad Re = vl/\nu = \text{idem};$$

$$Ho = vt/l = ngt^2/l = \text{idem};$$

$$Fr = v^2/(ng) = \text{idem};$$

$We = \rho v^2 l / \sigma = \text{idem}$ , где  $We$  — число Вебера, определяющее соотношение сил инерции и поверхностных сил;

$Bn = \rho ngl / \sigma = \text{idem}$ , где  $Bn$  — число Бонда, определяющее соотношение сил инерции и поверхностных сил;

$Ga = ngl^3/\nu^2 = \text{idem}$ , где  $Ga$  — число Галилея, определяющее соотношение сил внешнего воздействия и вязкостных сил и являющееся комбинацией чисел  $Fr$  и  $Re$ , причем  $Fr = We/Bn$ .

Анализ рассматриваемых физических явлений показывает, что определяющими в данной задаче являются числа  $Bn$ ,  $Ga$  и критерий  $Ho$ , а из пяти факторов  $\sigma/\rho$ ;  $\nu$ ;  $L$ ;  $ng$ ;  $t$  произвольно можно выбирать лишь два. Так, выбор модельной жидкости ( $\sigma/\rho$ ;  $\nu$ ) однозначно определяет реализуемые на модели перегрузки, время и масштаб моделирования. Это значит, что изучаемые процессы теоретически поддаются полному моделированию только при условии, если в модельной установке применяется модельная жидкость. Но, в связи с тем, что весьма трудно подобрать модельные жидкости с вязкостью, меньшей чем у натуральных компонентов, остро стоит проблема уменьшения масштаба моделей.

На практике, при невозможности обеспечить полное подобие исследуемых процессов, приходится проводить дополнительный детальный анализ физических явлений, исключая из рассмотрения факторы, не оказывающие значительного влияния на результаты опытов или лежащие в области автомодельности.

Такой анализ показывает, что в области автомодельности по числу  $Ga$  натурные явления с определенной степенью точности могут быть воспроизведены при соблюдении условий

$$k_{ng} = k_{\sigma/\rho} / k_l^2; \quad k_l = \sqrt{k_l^3 / k_{\sigma/\rho}},$$

где  $k_l$  — отношение модельного и натурального параметра, например  $k_l = l_M / l_N$  и т. д.

При этом представляется возможность произвольного выбора масштаба модели.

# 5

## ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ПГС ДУ

---

### 5.1. МАССООБМЕННЫЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО ТОПЛИВА

**Общие положения.** Физическое моделирование гидродинамических процессов в системах питания, работающих на топливах, представляющих однофазную капельную жидкость, находит широкое практическое применение. Этого нельзя сказать о моделировании процессов в системах питания, рабочая жидкость в которых содержит свободные газовые включения.

Как известно, в современных ракетах-носителях весьма широко используются ДУ, топлива в которых специально или в результате их контакта с окружающей средой насыщаются газом до равновесных состояний. При движении топлива такого рода в системах питания создаются условия для выделения растворенного газа и образования двухфазных потоков. Присутствие свободного газа в гидросистемах приводит к существенному изменению их гидравлических характеристик и к значительному усложнению расчетов параметров потока. При рассмотрении совместной работы системы питания с ЖРД приходится решать ряд весьма сложных проблем по определению частотных характеристик гидросистемы, параметров потока при запуске, выключении и изменении режимов работы, в том числе по определению давления при гидроударах и понижений давления на входе в ЖРД.

При проведении исследований в этой области, как и при рассмотрении движения капельной жидкости, гидролинии представляют в виде систем с распределенными параметрами, на концах которых сосредоточены свойства входящих в состав системы питания агрегатов и узлов.

Основным параметром, определяющим при такой постановке задачи упругие свойства гидролинии, является скорость распространения упругих возмущений или, как ее часто называют, скорость звука  $a$ .

Исследователями, занимающимися нестационарными процессами в системах питания, было установлено несоответствие экспериментальных значений скорости звука в гидросистемах расчетным значениям, полученным по известной формуле Жуковского

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho_{ж}/K + \rho_{ж}d/(\delta E)}},$$

где  $K$ ,  $E$  — модули объемной упругости жидкости и металла трубопровода;  $d$ ,  $\delta$  — диаметр и толщина стенки трубопровода. Причем разница между экспериментальными и расчетными значениями достигает иногда 300% при расчетных значениях 1000...1300 м/с.

Установлено, что снижение скорости распространения малых возмущений обусловлено наличием в системе дополнительной распределенной по длине трубопровода упругости в виде пузырьков газа. В общих чертах механизм этих явлений таков. Топливо в результате длительного контакта с газовой подушкой в баке или специального предварительного насыщения в заправочной емкости насыщается до равновесной концентрации, соответствующей баковому давлению. При открытии пускового клапана и начале движения топлива давление в трубопроводах падает ниже начального, которому соответствовало количество растворенного в топливе газа. Иногда нижний уровень давления в трубопроводе при неустановившемся процессе может оказаться ниже давления насыщенных паров топлива при данной температуре. Падение давления нарушает равновесие в системе топливо — газ — пар, и возникают предпосылки для выделения в потоке свободного газа и пара, а следовательно появления дополнительной распределенной упругости в системе.

При восстановлении давления начинается обратный процесс. Колебательный характер изменения давления и малый период колебаний (0,01...0,05 с) приводят к тому, что в каждом цикле колебаний процесс выделения и растворения газа может носить неравновесный характер. Причем равновесие между количеством газа и давлением в топливе не наступает до окончания переходного процесса. Это подтверждается возрастанием в ряде случаев при заполнении трубопровода ЖРД периода волновых колебаний давления. С увеличением в потоке количества пузырьков свободного газа существенно изменяется и внешняя картина переходных процессов — колебания становятся более размытыми, быстро затухают, уменьшаются значения давления при гидроударах. Детальное рассмотрение процессов газовыделения и образования газожидкостных потоков в трубопроводах проведено в последующих разделах. Следует отметить, что процессы газовыделения в системах питания совсем не всегда связаны с колебаниями давления акустической природы.

Весьма часто в трубопроводах преобладают колебания, обусловленные инерционными характеристиками или упругостью отдельных элементов системы питания. И тогда именно они создают предпосылки для образования двухфазного потока.

Период таких низкочастотных колебаний давления может на порядок превышать период акустических колебаний, а ампли-

туды изменения давлений создают условия для пребывания жидкости при давлениях ниже равновесного.

Из-за специфики работы системы питания энергетических установок, а также из-за особенностей их геометрических и гидравлических характеристик механизм образования двухфазных потоков существенно отличается от широко освещенных в литературе механизмов кипения и кавитации. Если при кипении и кавитации предполагают преобладание в пузырьках пара при значительных градиентах возмущающих факторов (тепловых потоков, давлений) и малых временах протекания, порядок которых составляет  $10^{-3}$  с, то рассматриваемые нами процессы характеризуются преобладанием в потоке газа, на порядок большими временами протекания процессов и неравновесным их характером, обусловленным неустановившимся движением топлива.

Неравновесность процессов массообмена обуславливается в том числе и отсутствием в гидравлических трактах большинства систем питания ЖРД местных сопротивлений с пережатыми проходными сечениями. С другой стороны, наличие таковых способствует интенсивному газовыделению и установлению ниже по потоку равновесных состояний в системе газ — топливо.

Изложенные представления о физической картине протекающих процессов говорят о том, что для определения параметров одномерного неустановившегося движения газотопливной смеси в гидросистеме недостаточно рассмотрения уравнений сохранения массы и количества движения. Здесь необходим учет закономерностей, определяющих межфазовые взаимодействия жидкой и газовой фаз, т. е. использование уравнений массообмена и теплопереноса. Это существенным образом усложняет построение математической модели исследуемых явлений и затрудняет их физическое моделирование. В дальнейшем речь пойдет о возможности математического моделирования таких процессов, в разработку основ которых большой вклад внес Э. В. Венгерский.

**Основные уравнения.** Образование двухфазной смеси из перенасыщенной жидкости связано с возникновением в ней растягивающих напряжений и образованием разрывов сплошности, заполняемых паром или растворенным в жидкости газом. Рост образовавшихся паровых или газовых пузырьков происходит как вследствие изменения давления, так и вследствие выделения в пузырьки растворенного в топливе газа или заполнения их паром в результате массообменных и теплообменных процессов пузырька и окружающей его жидкости. При возникновении газовых пузырьков вследствие выделения растворенного в жидкости газа пленка жидкости, окружающей пузырек, будет насыщена газом до концентрации, определяемой уровнем давления газа в пузырьке и коэффициентом растворимости Генри. Это значит, что на поверхности пузырька

$$c_0 = \kappa p_r,$$

где  $c_0$  — равновесная концентрация на границе раздела;  $p_r$  — парциальное давление газа в пузырьке.

Если жидкость насыщена до концентрации растворенного газа, равной  $c_\infty$ , то при снижении давления в пузырьке ниже уровня, при котором на поверхности пузырька концентрация  $c_0$  будет ниже  $c_\infty$ , вследствие разности концентраций  $c_\infty - c_0$ , являющейся так называемой движущей силой процесса диффузии, возникает поток массы газа, растворенного в жидкости, в пузырек, приток массы газа в пузырьке и при прочих неизменных условиях (температуре и давлении) рост пузырька. При отрицательной разности концентраций  $c_\infty - c_0$  происходит растворение находящегося в пузырьке газа в окружающей его жидкости и схлопывание пузырька. В общем случае скорость процесса выделения газа определяется скоростью процесса диффузии газа в жидкости, т. е. скоростью переноса газа к границе жидкости — газ, скоростью непосредственного процесса выделения (десорбции) газа на поверхности и скоростью процесса отвода выделившегося в объеме пузырька газа.

Согласно положениям молекулярно-кинетической теории поток газа  $j$  из пузырька через единичную площадку поверхности в единицу времени определяется формулой

$$j = \frac{1}{F} \frac{dm_r}{dt} = \frac{p_\infty - p_r}{\sqrt{2\pi B T}} \alpha = \frac{c_\infty - c_0}{\kappa \sqrt{2\pi B T}} \alpha, \quad (5.1)$$

где  $m_r$  — масса газа в пузырьке;  $p_\infty$  — давление в жидкости;  $\alpha$  — коэффициент аккомодации, зависящий от условий процесса;  $B$  — газовая постоянная;  $F$  — площадь поверхности раздела.

Массоперенос в жидкой фазе при наличии разности концентраций определяется процессом молекулярной диффузии на границе раздела в соответствии с первым законом Фика:

$$j = \frac{1}{F} \frac{dm_r}{dt} = -D(T, p) \left( \frac{\partial c}{\partial r} \right)_{r=R}, \quad (5.2)$$

где  $D(T, p)$  — коэффициент молекулярной диффузии;  $\left( \frac{\partial c}{\partial r} \right)_{r=R}$  — производная концентрации по нормали к поверхности пузырька;  $r$  — координата;  $R$  — текущий радиус пузырька. Это значит, что для определения потока газа в жидкости необходимо получение решения уравнения молекулярной диффузии

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (5.3)$$

относительно производной  $\frac{\partial c}{\partial r}$  при следующих начальных и граничных условиях:

при  $t=0$   $r=R$  и  $r \rightarrow \infty$ ;  $c=c_\infty$ ;

при  $t > 0$   $r=R$ ;  $c=c_0$  и (5.4)

при  $r \rightarrow \infty$   $c=c_\infty$ .

Решение уравнения (5.3) дает

$$\left(\frac{\partial c}{\partial r}\right)_{r=R} = (c_\infty - c_0) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\sqrt{\pi D t}}\right). \quad (5.5)$$

Тогда поток газа через единичную площадку, определяемый процессом молекулярной диффузии в жидкости,

$$j = -D(c_\infty - c_0) \left(1/R + 1/\sqrt{\pi D t}\right). \quad (5.6)$$

Сопоставление зависимостей (5.1) и (5.6) показывает, что начиная с ничтожно малых значений времен процесса (приблизительно  $10^{-14}$  с) скорость потока массы лимитируется процессом молекулярной диффузии в жидкости.

Вследствие молекулярного переноса происходит быстрое уменьшение концентрации растворенного в жидкости газа вблизи поверхности пузырька, увеличение размеров диффузионного пограничного слоя и снижение потока газа. Но на практике процесс чисто молекулярного переноса реализуется крайне редко, так как практически имеет место относительное движение слоев жидкости вблизи поверхности пузырьков и выравнивание концентрации растворенного газа движением частиц жидкости. В этом случае распределение концентрации в жидкости определяется уравнением конвективной диффузии

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{v} \text{ grad } c = D \Delta c. \quad (5.7)$$

Решение уравнения (5.7) нужно проводить совместно с уравнениями гидродинамики, описывающими течение жидкости вблизи поверхности массообмена и позволяющими определить распределение скоростей  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  в зависимости от координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и времени  $t$ . Уравнения динамики вязкой несжимаемой жидкости при условии изотермичности движения в векторной форме имеют вид

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = F - \frac{1}{\rho_{ж}} \text{ grad } p + \nu \nabla^2 \vec{v}; \quad (5.8)$$

$$\text{div } \vec{V} = 0, \quad (5.9)$$

где  $F$  — массовые силы;  $\nabla$  — оператор Гамильтона.

При симметрии потока относительно единичного пузырька целесообразно перейти к сферическим координатам (рис. 5.1).

В общем случае система уравнений гидродинамики потока и диффузии для несжимаемой жидкости, имеющей в бесконеч-

ности скорость движения, равную  $v_\infty(t)$ , и обтекающей единичный газовый пузырек, может быть представлена в сферической системе координат:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} = F_r - \frac{1}{\rho_{ж}} \frac{\partial p}{\partial r} + \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\text{ctg } \theta}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{2v_r}{r^2} - \frac{2\partial v_\theta}{r^2 \partial \theta} - \frac{2 \text{ctg } \theta}{r^2} v_\theta \right); \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} = F_\theta - \frac{1}{\rho_{ж} r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \left( \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{\text{ctg } \theta}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r^2 \sin^2 \theta} \right); \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (r^2 v_r \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} (r v_\theta \sin \theta) = 0; \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_r \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial c}{\partial \theta} = D \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial c}{\partial \theta} \right) + \frac{v^2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right]; \quad (5.13)$$

где  $v_\theta$ ,  $F_\theta$  — проекции векторов скорости и массовых сил на направление радиуса  $r$ ;  $v_r$ ,  $F_r$  — проекции вектора скорости и массовых сил на направление  $r$ .

Система уравнений сохранения количества движения (5.10) и (5.11), неразрывности (5.12) и диффузии (5.13) представляет собой замкнутую систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных для определения скорости ( $v_r$ ,  $v_\theta$ ), давления и концентрации в окрестности единичного пузырька, обтекаемого потоком жидкости, с учетом изменения площади поверхности пузырька вследствие массообменных процессов с растворенным в жидкости газом.

Текущий радиус пузырька  $R$  определяется с учетом изменения массы газа в нем по производной концентрации на поверхности пузырька в соответствии с уравнением (5.2). При условии изотермичности процесса, которое в первом приближении является оправданным вследствие превалирующего влияния на процесс в единичном пузырьке массы жидкости по сравнению с массой газа, изменение

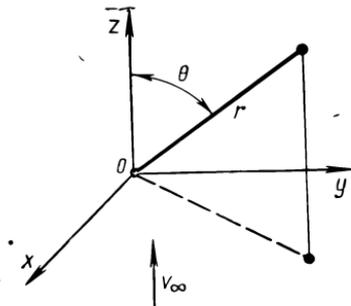


Рис. 5.1. Система сферических координат

радиуса пузырька может быть определено из условия изменения объема пузырька:

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{D}{\rho_r} \left( \frac{\partial c}{\partial r} \right)_{r=R} + \frac{R}{3\rho_r} \frac{\partial \rho_r}{\partial t}, \quad (5.14)$$

где  $\rho_r$  — плотность газа в пузырьке.

В общем случае процессы переноса массы не только зависят от поля скоростей, но и сами оказывают влияние на эти поля.

Решение полной системы уравнений гидродинамики и массопереноса возможно лишь численными методами при существенных упрощающих предположениях. Учет нестационарности потока и изменений площади поверхности раздела фаз, связанных с ростом или сокращением радиуса пузырька вследствие изменения давления в жидкости, а также процессов фазовых превращений еще более усложняет решение полной системы уравнений. Далее рассмотрены возможности упрощения системы уравнений диффузии и гидродинамики, а также приведены зависимости, уточняющие взаимодействие единичного пузырька и окружающей его жидкости применительно к условиям течения топлива в трубопроводах системы питания.

В соответствии с современными представлениями о механизме обтекания газового пузырька турбулентным потоком реальной жидкости вблизи поверхности раздела фаз, несмотря на существование касательной составляющей скорости, образуется пограничный слой, в котором проявляется существование вязких сил и который определяет диффузионный поток вещества в процессе массообмена. Для стационарного процесса диффузии при условии, что производные концентрации вдоль поверхности сферы пузырька малы по сравнению с производными по его радиусу, уравнение конвективной диффузии (5.13), описывающее распределение концентраций в пограничном слое, может быть преобразовано:

$$V_r \frac{\partial c}{\partial r} + v_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial \theta} = D \frac{\partial^2 c}{\partial r^2}. \quad (5.15)$$

Граничными условиями указанного уравнения являются

$$r=R; c=c(p_r, T_r) p_r; r \rightarrow \infty; c=c_\infty. \quad (5.16)$$

Здесь и далее индексом «г» обозначены параметры газа.

Кроме граничных условий принимается постоянство концентрации в точке натекания потока на поверхность пузырька, т. е.

$$r=R; \theta=0; c=c_\infty. \quad (5.17)$$

С помощью безразмерных значений скоростей, координат и концентраций уравнение (5.15) приводится к безразмерному виду

$$U_r \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{U_\theta}{r} \frac{\partial C}{\partial \theta} = \frac{2}{\text{Pe}} \frac{\partial^2 C}{\partial r^2}, \quad (5.18)$$

где  $\text{Pe} = 2Rv_\infty/D$  — число Пекле;  $C = c/c_\infty$ ,  $U = v/v_\infty$ ,  $\bar{r} = \frac{r}{R}$  —

безразмерные значения концентрации, скорости и координаты.

Как видно из уравнения (5.18), число  $\text{Pe}$  характеризует соотношение между конвективным и молекулярным переносами вещества. Так как для большинства жидкостей коэффициент молекулярной диффузии  $D \approx 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с, то для  $R \approx 10^{-4}$  м уже для относительных скоростей приблизительно  $10^{-2}$  м/с число  $\text{Pe} > 10^3$ , т. е. конвективный перенос вещества значительно эффективнее переноса молекулярной диффузией, поэтому обеспечивается изменение концентраций только в тонком пограничном слое.

Решение уравнения (5.15) с граничными условиями (5.16) и (5.17) при  $\text{Pe} \gg 1$  методом размерного анализа для вязкого режима обтекания газового пузырька ( $\text{Re} \ll 1$ ) и несжимаемой жидкости позволяет определить зависимость потока газа в единичный газовый пузырек вследствие конвективной диффузии растворенного в жидкости газа:

$$\frac{dm_\Gamma}{dt} = 4 \sqrt{\pi} (c_\infty - c_0) \sqrt{\frac{2}{3} v_{\Gamma,ж} D R^3}, \quad (5.19)$$

где  $v_{\Gamma,ж}$  — относительная скорость газа в жидкости при  $r \rightarrow \infty$ .

Для умеренных значений  $\text{Re}$  ( $R < 1$  см) выражение для потока газа отличается только числовым коэффициентом, который отражает соотношение скоростей на поверхности пузырька:

$$\frac{dm_\Gamma}{dt} = 8 \sqrt{\frac{\pi}{2}} (c_\infty - c_0) \sqrt{D v_{\Gamma,ж} F^3}. \quad (5.20)$$

При расчетах массообменных процессов для исключения влияния условий проведения эксперимента и использования аппарата теории размерности часто используется коэффициент массопередачи  $\beta$ , представляющий собой диффузионный поток вещества через единицу поверхности, отнесенный к движущей силе (разности концентраций):

$$\beta = \frac{dm_\Gamma}{dt} \frac{1}{4\pi R^2 (c_\infty - c_0)}.$$

Коэффициент массопередачи позволяет с помощью теории размерности составить выражение для безразмерного критерия Шервуда

$$\text{Sh} = 2R\beta/D. \quad (5.21)$$

При  $\text{Pe} > 10^3$  и  $\text{Re} < 1$  решение уравнения (5.18) для газового пузырька имеет вид

$$\text{Sh} = 0,65 \sqrt{\text{Pe}}. \quad (5.22)$$

С ростом  $\text{Re}$  происходит отрыв потока в кормовой части поверхности пузырька, что необходимо учитывать при расчете массообмена, так же как и влияние на массообмен образующихся за сферой вихрей. При безотрывном обтекании ( $\text{Re} < 100$  для газового пузырька) влияние режима обтекания на массообмен в уравнениях для функциональной зависимости Шервуда для газового пузырька предлагается учитывать с помощью поправочных коэффициентов:

$$\text{Sh} = \varphi(v_0) \sqrt{\text{Pe}}, \quad (5.23)$$

где  $\varphi(v_0) = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^{\theta_s} v_0 \sin^2 \theta d\theta}$ ;  $\theta_s$  — угол отрыва потока.

Аппроксимация зависимости  $\text{Sh} = f(\text{Pe}, \text{Re})$ , выполненная для газового пузырька с помощью уравнения (5.23), позволяет получить выражение, которое в диапазоне  $1 < \text{Re} < 100$  с достаточной точностью может быть использовано при расчетах:

$$\text{Sh} = 2 + 0,63 \text{Re}^{0,085} \text{Pe}^{0,5}. \quad (5.24)$$

Полученные соотношения для описания массообменных процессов между единичным пузырьком и окружающей его насыщенной жидкостью справедливы для квазистационарного процесса диффузии при пренебрежении первым членом в уравнении конвективной диффузии (5.13). Этот случай реализуется, когда изменение концентрации от  $c_\infty$  до  $c_0$  происходит в диффузионном слое. В начальный момент при возникновении газового пузырька концентрация растворенного в жидкости газа на границе раздела со стороны жидкости равна концентрации  $c_\infty$  в толще жидкости. В этом случае изменение концентрации происходит в тонком (молекулярном) слое, который с течением процесса вследствие выделения газа в пузырьки обедняется, что приводит к уменьшению диффузионного потока до уровня, определяемого уравнением стационарной диффузии (5.15). Для молекулярной диффузии решение уравнения нестационарного массопереноса (5.6) для газового пузырька позволяет получить выражение для критерия Шервуда в виде

$$\text{Sh}(t) = 2 \left( 1 + R/\sqrt{\pi D t} \right). \quad (5.25)$$

Анализ полученного выражения показывает, что время установления стационарного распределения концентраций для «чисто» молекулярного переноса довольно значительно (безразмерное время  $\bar{t} = Dt/R^2 \approx 1000$ ). Движение поверхности раздела приводит к перемешиванию слоев жидкости вблизи поверхности, что сокращает время установления стационарного процесса.

Для газового пузырька при  $Re < 1$  и  $Re \gg 1$  решение уравнения неразрывности (5.12) для распределения концентраций позволяет получить выражение

$$\left(\frac{\partial c}{\partial r}\right)_{r=R} = (c_\infty - c_0) \sqrt{\frac{3}{\pi Dt} + \frac{2}{3\pi} \frac{v_\infty}{DR}}. \quad (5.26)$$

Полученное выражение с учетом выражений (5.2) и (5.21) дает возможность провести анализ нестационарности массопереноса по соотношению

$$\frac{Sh(t)}{Sh} = \sqrt{9/Pe t + 1}, \quad (5.27)$$

где  $Sh(t)$  — критерий Шервуда для нестационарного процесса;  $t$  — безразмерное время (соотношение Фурье).

На рис. 5.2 представлены зависимости  $Sh(t)/Sh$ , рассчитанные с помощью выражений (5.25) и (5.27) для газового пузырька при различных значениях  $Pe$ . Согласно рисунку в реальных условиях течения ( $Pe > 10^3$ ) безразмерное время — время установления стационарного процесса массообмена довольно незначительно и может быть определено по формуле  $t \approx 1/Pe$ ,<sup>2/3</sup> что позволяет пользоваться приведенными зависимостями для квазистационарного приближения. Вместе с тем при рассмотрении колебательных процессов, которые приводят к изменению знака потока газа на границе пузырька, учет нестационарности процесса массообмена, по-видимому, необходим.

Массообменные процессы единичного пузырька, находящегося в нестационарном турбулентном потоке жидкости, имеют свои особенности. Предполагая, что массообменные процессы

не оказывают влияния на гидродинамику, а также, что давление в газовом пузырьке однозначно определяется давлением в потоке, запишем уравнение сохранения количества движения (5.8) для одномерного нисходящего потока вязкой жидкости в простом трубопроводе диаметром  $d$  в виде

$$\rho_{ж} \frac{dv_{ж}}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho_{ж} g - \lambda \frac{\rho_{ж} v_{ж}^2}{2d}, \quad (5.28)$$

где  $\lambda$  — коэффициент потерь на трение;  $x$  — координата. Здесь индексом «ж» обозначены параметры жидкости. Аналогичное уравнение для единичного газового пузырька радиуса  $R$  может быть записано так:

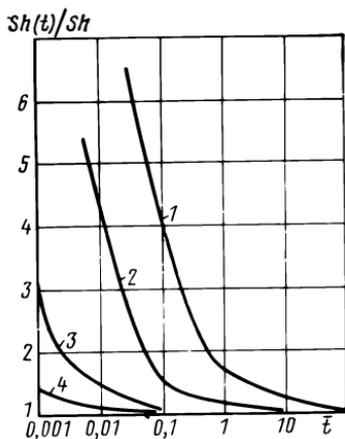


Рис. 5.2. Зависимость  $Sh(t)/Sh$  от  $\bar{t}$ :  
1 —  $Pe=0$ ; 2 —  $Pe=10^2$ ; 3 —  $Pe=10^3$ ;  
4 —  $Pe=10^4$

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_r \frac{dv_r}{dt} = -\frac{3}{4} \pi R^3 \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_r g + f, \quad (5.29)$$

где  $f$  — сила, действующая на пузырек со стороны потока жидкости и возникающая вследствие разности скоростей жидкости и пузырька.

Определив из уравнения производную давления, получим уравнение движения единичного пузырька:

$$\rho_r \frac{dV_r}{dt} = \rho_{ж} \frac{dV_{ж}}{dt} - g(\rho_{ж} - \rho_r) + \lambda \frac{\rho_{ж} v_{ж}^2}{2d} + \frac{f}{\frac{4}{3} \pi R^3}. \quad (5.30)$$

Сила взаимодействия пузырька и потока жидкости при нестационарном движении в рассматриваемом случае включает в себя силу трения, силу взаимодействия, возникающую вследствие так называемого эффекта «присоединенных» масс, а также силу Бассэ, возникающую из-за наличия гидродинамического сопротивления при нестационарном течении. При сферической форме пузырька и пренебрежении эффектами, связанными с его вращением (силами Жуковского и Мигнуса), выражение для силы взаимодействия может быть представлено в виде

$$f = f_m + f_{\mu},$$

где  $f_m$  — сила взаимодействия, связанная с эффектом «присоединенных» масс;  $f_{\mu}$  — сила гидродинамического сопротивления.

Сила взаимодействия, связанная с эффектом «присоединенных» масс, в общем случае с учетом изменения радиуса пузырька равна

$$f_m = \xi_m \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{ж} \left( \frac{dv_{ж}}{dt} - \frac{dv_r}{dt} \right) + (v_{ж} - v_r) \frac{3}{R} \frac{dR}{dt}, \quad (5.31)$$

где  $\xi_m$  — коэффициент формы, который при сферическом пузырьке принимается равным 0,5. Последний член в уравнении (5.31) учитывает силу, обусловленную «присоединенными» массами при увеличении радиуса пузырька.

Сила гидродинамического сопротивления зависит от режима обтекания (числа  $Re$ , полученного по относительной скорости) и для неустановившегося течения формула, определяющая эту силу, должна включать в себя члены, учитывающие переменность поступательного движения. Для сферы постоянного радиуса выражение для силы гидродинамического сопротивления при неустановившемся движении и  $Re \ll 1$  имеет вид

$$f_{\mu} = 6\pi\mu R v(t) + 6\sqrt{\pi\nu\rho_{ж}} R^2 \left[ \frac{v_0}{\sqrt{t_1}} + \int_0^t v(t) \frac{dt_1}{\sqrt{t-t_1}} \right], \quad (5.32)$$

где  $t_1$  — время начала отклонения скорости от стационарного значения  $v_0$ .

Выразив в квазистационарном приближении силу гидродинамического сопротивления как

$$f_{\mu} = c_{\mu} \frac{\rho_{\text{ж}} (\mathbf{v}_{\text{ж}} - \mathbf{v}_{\text{г}})}{2} \pi R^2,$$

где  $c_{\mu}$  — коэффициент гидравлического сопротивления пузырька, получим уравнение движения единичного газового пузырька в потоке жидкости в следующем виде:

$$\left( \rho_{\text{г}} + \frac{1}{2} \rho_{\text{ж}} \right) \frac{d\mathbf{v}_{\text{г}}}{dt} = \frac{2}{3} \rho_{\text{ж}} \frac{d\mathbf{v}_{\text{ж}}}{dt} + \frac{\lambda \rho_{\text{ж}} \mathbf{v}_{\text{ж}}^2}{2d} + \frac{3}{8} c_{\mu} \frac{\rho_{\text{ж}} (\mathbf{v}_{\text{ж}} - \mathbf{v}_{\text{г}})^2}{R} + \\ + \frac{3}{2} (\mathbf{v}_{\text{ж}} - \mathbf{v}_{\text{г}}) \frac{\rho_{\text{ж}}}{R} \frac{dR}{dt} - g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}).$$

Учитывая, что для газового пузырька в жидкости  $\rho_{\text{г}} \ll \rho_{\text{ж}}$ , уравнение движения можно значительно упростить:

$$\frac{d\mathbf{v}_{\text{г}}}{dt} = 3 \frac{d\mathbf{v}_{\text{ж}}}{dt} + \lambda \frac{\mathbf{v}_{\text{ж}}^2}{d} + 3 (\mathbf{v}_{\text{ж}} - \mathbf{v}_{\text{г}}) \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{3}{4} c_{\mu} \frac{(\mathbf{v}_{\text{ж}} - \mathbf{v}_{\text{г}})^2}{R} - 2g.$$

Отсюда выражение для относительной скорости газового пузырька в потоке  $\mathbf{v}_{\text{г.ж}} = \mathbf{v}_{\text{г}} - \mathbf{v}_{\text{ж}}$  имеет вид

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = 2 \frac{d\mathbf{v}_{\text{ж}}}{dt} + \lambda \frac{\mathbf{v}_{\text{ж}}^2}{d} - \frac{3}{4} c_{\mu} \frac{\mathbf{v}_{\text{г.ж}}^2}{2R} - 2g - 3 \frac{\mathbf{v}_{\text{г.ж}}}{R} \frac{dR}{dt}. \quad (5.33)$$

Для пузырька постоянного радиуса, всплывающего в безграничном объеме неподвижной жидкости, из уравнения (5.33) может быть получено известное выражение относительной скорости

$$\frac{d\mathbf{v}_{\text{г}}}{dt} = -\frac{3}{4} c_{\mu} \frac{\mathbf{v}_{\text{г}}^2}{R} - 2g. \quad (5.34)$$

Полученные в результате интегрирования уравнений (5.33), (5.34) зависимости времени стабилизации скорости газовых пузырьков от  $Re$  показывают, что в широком диапазоне изменения чисел  $Re$  ( $0,1 < Re < 100$ ) время стабилизации составляет менее 0,01 с.

Из уравнений (5.33) и (5.34) следует, что значение относительной скорости газового пузырька в потоке жидкости может значительно отличаться от значения скорости всплытия его в неподвижной среде. Это отличие связано с силами, действующими на пузырек вследствие имеющегося в потоке градиента давления, а для неустановившегося движения — и с ускорением несущего потока жидкости. При этом, если для стационарного нисходящего потока влияние архимедовой силы соизмеримо с влиянием сил, связанных с наличием градиента давления, и указанные силы компенсируют друг друга, то на режиме заполнения, сопровождающемся значительными ускорениями жидкости, влия-

ние сил, связанных с наличием градиента давления, оказывается преобладающим, что приводит к значительным положительным скоростям газового пузырька относительно жидкости.

Процесс массообмена, а также колебания давления в потоке приводят к изменению площади поверхности пузырька и движению слоев жидкости, окружающей пузырек. Уравнение неустановившегося безвихревого движения поверхности пузырька при условии несжимаемости жидкости и сферической симметрии было получено Релеем:

$$\rho_{ж} \left[ R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \right] = p_0 - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} - p_{\infty}, \quad (5.35)$$

где  $p_{\infty}$  — давление в жидкости при  $r \rightarrow \infty$ ;  $p_0$  — давление внутри пузырька.

Уравнение (5.35) показывает, что при расширении (сжатии) пузырька давление в окружающей жидкости отличается от давления в пузырьке на величину, зависящую от инерционности, вязкости поверхностного натяжения жидкости и скорости расширения (сжатия) пузырька. При этом, если поверхностное натяжение всегда увеличивает давление внутри пузырька, то инерционность и вязкость жидкости препятствуют изменению площади поверхности, т. е. при увеличении радиуса уменьшают давление в пузырьке, а при уменьшении — увеличивают давление.

Изменение давления в окружающем пузырьке потоке жидкости, а следовательно и давления внутри пузырька, а также процесс массообмена, приводящий к выделению в пузырек растворенного в жидкости газа, неразрывно сопровождаются изменением температуры парогазовой смеси и соотношения парциальных давлений пара и газа в пузырьке. При неизменном окружающем давлении увеличение массы газа в пузырьке приводит к снижению парциального давления пара, что влечет за собой испарение жидкости с внутренней поверхности пузырька, и понижению температуры окружающих пузырек слоев жидкости. Таким образом, даже при неизменном давлении, процесс массообмена единичного пузырька и окружающей его жидкости сопровождается возникновением разности температур и, следовательно, процессом теплообмена, который в общем случае зависит от термодинамических характеристик жидкости и растворенного газа. Учитывая малый размер пузырька, можно принять температуру парогазовой смеси равномерно распределенной по объему пузырька, т. е. пренебречь процессом теплообмена и массообмена внутри пузырька. Для этих условий уравнение изменения энергии для смеси газа и пара, заключенной в пузырьке, можно представить в виде

$$dQ = dU + pdV, \quad (5.36)$$

где  $dQ$  — изменение тепловой энергии;  $dU$  — изменение внутренней энергии смеси;  $dV$  — изменение объема пузырька.

Поступающая к пузырьку теплота состоит из подведенной теплопроводностью из жидкости, а также вносимой массовыми потоками пара и газа и расходуемой на фазовый переход, связанный с испарением жидкости и выделением растворенного газа.

С учетом известных термодинамических соотношений уравнение первого закона термодинамики (5.36) может быть представлено в виде

$$4\pi R^2 \lambda_{\tau} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} + (c_{p\tau} T - H_{\tau} - c_{V\tau}) \frac{dm_{\tau}}{dt} + (c_{pн} T - c_{Vн} T - H_{н}) \frac{dm_{н}}{dt} = \\ = (m_{\tau} c_{V\tau} + m_{н} c_{Vн}) \frac{dT}{dt} + p 4\pi R^2 \frac{dR}{dt}, \quad (5.37)$$

где  $\lambda_{\tau}$  — теплопроводность;  $c_p, c_V$  — удельные теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме;  $T$  — температура смеси в пузырьке, принимаемая равной температуре на линии насыщения при парциальном давлении  $p_{н}$ ;  $H$  — теплота фазового перехода; индексы «п» и «г» относятся к параметрам пара и газа.

Уравнение (5.37) составлено при условии пренебрежения изменением кинетической энергии, связанной с движением газа в пузырьке, а также потерями энергии вследствие пульсационного движения, сопровождающегося диссипацией из-за вязкости окружающей пузырек жидкости, т. е. при условии, что изменение температуры жидкости вблизи поверхности пузырька связано только с испарением или конденсацией. В этом случае значение производной температуры на поверхности пузырька определяется из решения уравнений теплопроводности, аналогичного уравнению конвективной диффузии

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_{\theta}}{r} = \chi \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{2\partial T}{r \partial r} \right] \quad (5.38)$$

при краевых условиях:

при  $t=0$   $r=R$ ,  $T=T_{\infty}$ ;  $r \rightarrow \infty$ ,  $T=T_{\infty}$ ;

при  $t > 0$   $r=R$ ,  $T=T_s(p_{н})$ ;  $r \rightarrow \infty$ ,  $T=T_{\infty}$ .

Здесь  $\chi$  — температуропроводность.

Результаты решения аналогичны полученным для уравнения конвективной диффузии, и безразмерные соотношения для теплообмена имеют вид

$$\xi_{\tau} = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{4\pi R^2 (T_{\infty} - T_0)};$$

$$Nu = 2R \xi_{\tau} \lambda_{\tau}; \quad Pe_{\tau} = 2R v_{\infty} / \chi.$$

Для пузырьков малого размера следует учитывать, что равновесное давление пара над вогнутой поверхностью жидкости бу-

дет ниже, чем над плоской поверхностью раздела, и может быть определено из соотношения Кельвина — Гельмгольца, которое для  $\rho_{ж} \gg \rho_{п}$  имеет вид

$$p_s = p'_s e^{-\frac{2\sigma}{R} \frac{1}{\rho_{ж} B_{п} T}},$$

где  $p_s$  — давление насыщенного пара над вогнутой поверхностью с радиусом кривизны, равным  $R$ ;  $p'_s$  — давление насыщенного пара над плоской поверхностью жидкости;  $B_{п}$  — газовая постоянная пара.

Расчетный анализ системы уравнений, проведенный методами численного интегрирования, выявил следующие особенности взаимодействия единичного пузырька и окружающей его жидкости. При снижении давления в жидкости ниже уровня, соответствующего равновесной концентрации растворенного в жидкости газа, и поддержании его постоянным, превышающим давление насыщенного пара при температуре жидкости, увеличивается объем пузырька вследствие выделения в него растворенного в жидкости газа. Скорость увеличения при этом определяется возмущением давления (снижением давления ниже равновесного), определяемым степенью пересыщения потока жидкости газом.

Увеличение пузырька вследствие диффузии газа сопровождается испарением топлива в пузырек из-за снижения в нем температуры парогазовой смеси и уменьшения парциального давления пара. Так как процесс теплообмена для большинства высококипящих топлив, а также модельных жидкостей, применяемых при обработке ПГС ДУ, происходит намного быстрее, чем процесс диффузии газа, при решении задачи о диффузионном увеличении парогазового пузырька при постоянном давлении в жидкости можно не учитывать изменение температуры в пузырьке, приняв  $T = T_s$ .

Анализ показывает, что подобное допущение справедливо, если термодинамические характеристики жидкости и растворенного в ней газа удовлетворяют неравенству

$$W = \frac{\alpha \sqrt{D\chi} \cdot H_{п}}{\lambda_{г}} \frac{dp_s}{dT} \frac{B_{г}}{B_{п}} < 1.$$

Величина  $W$  для 288 К составляет для пары азотный тетраоксид и азот  $1,54 \cdot 10^{-3}$ , для несимметричного диметилгидразина и азота  $1,75 \cdot 10^{-5}$ , для воды и воздуха  $1,01 \cdot 10^{-6}$ , для воды и  $CO_2$   $1,27 \cdot 10^{-4}$ .

В этом случае процесс испарения успевает завершиться полностью и парциальное давление газа в пузырьке может быть определено из очевидного соотношения

$$p_{г} = p_{\infty} - p_s(T_{ж}).$$

При постоянном давлении в жидкости процесс расширения происходит только вследствие диффузии газа и скорости изменения площади поверхности, даже при величинах пересыщения  $(c_\infty - p_{нж})/\rho_r$ , соизмеримых с единицей, позволяют пренебречь инерционными и вязкостным членами в уравнении Релея (5.35). Однако влияние вязкости жидкости проявляется при ее изменении из-за изменения относительной скорости роста пузырька и критерия  $Sh$ , определяющего массообмен. С увеличением вязкости скорость изменения радиуса уменьшается.

На процесс увеличения пузырька при постоянном давлении нестационарность критерия  $Sh$  влияет лишь на начальном этапе роста, что допускает использование для расчетов зависимости для стационарного массообмена (5.24).

Анализ уравнений взаимодействия единичного пузырька с потоком показывает, что для постоянного давления в жидкости изменение радиуса пузырька вследствие диффузии газа может быть рассчитано по уравнению (для  $2 < Re < 500$ )

$$\frac{dR}{dt} = \frac{c_\infty - p_{нж}}{\rho_r} \left[ \frac{D}{R} - 0,087 \frac{R^{3/4} D^{1/2}}{\nu^{2/3}} \left( \lambda \frac{v_{ж}^2}{d} - 2g \right)^{5/12} \right]. \quad (5.39)$$

Для пузырьков малых размеров, у которых дополнительное давление, вызываемое поверхностным натяжением, может быть соизмеримо с давлением насыщенных паров, парциальное давление газа в зависимости (5.39) должно определяться с учетом влияния поверхностного натяжения, т. е.

$$p_r = p_\infty - p_s(T_{ж}) + 2\sigma/R.$$

Несколько иначе проявляется влияние различных факторов на процесс изменения объема парогазового пузырька при колебаниях давления. В этом случае колебания объема пузырька вследствие изменения давления приводят к колебаниям температуры парогазовой смеси. Процессы испарения (конденсации), выделения газа в пузырек (растворения) и теплопроводности снижают амплитуду колебаний температуры, так как снижение температуры при увеличении объема компенсируется подводом теплоты с потоками газа и пара теплопроводностью и, наоборот, при уменьшении объема с повышением давления происходит конденсация и растворение находящегося в пузырьке пара и газа и отвод теплоты теплопроводностью. Это значит, что при колебаниях объема процессы тепло- и массообмена сопровождают друг друга и взаимосвязаны. Завершенность указанных процессов зависит от времени действия возмущения, т. е. они являются релаксационными, а следовательно, изменение температуры в объеме пузырька при колебаниях давления зависит как от амплитуды, так и от частоты колебаний. С уменьшением частоты колебаний амплитуда колебаний температуры вследствие большей завершенности процессов тепло- и массообмена уменьшается. Так, при

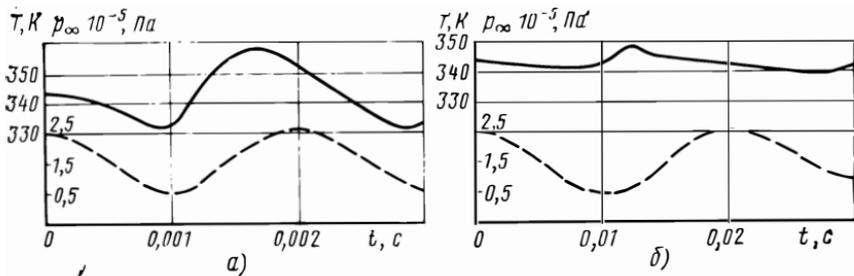


Рис. 5.3. Графики изменения температуры  $T$  среды в пузырьке (—) при колебаниях давления (---) в потоке с различной частотой  $f$ :  
 $a - f = 500$  Гц;  $b - f = 50$  Гц

амплитуде колебаний давления ( $0,5 \cdot 10^5 \dots 2,5 \cdot 10^5$ ) Па изменение температуры среды в пузырьке при частоте колебаний давления 500 Гц составляет 332...360 К, а при частоте 50 Гц — 340...347 К (рис. 5.3).

При ограниченных частотах колебаний, характерных для трубопроводов системы питания ( $f < 100$  Гц), влияние вязкости и сжимаемости жидкости согласно уравнению Релея (5.35) практически не сказывается на изменении параметров пузырька, так как собственная частота пузырьков оказывается выше частоты возмущения.

При колебаниях давления на изменение объема пузырька оказывает влияние нестационарность тепло- и массообмена: при колебаниях давления около уровня, соответствующего равновесной концентрации, процесс выделения газа при понижении давления происходит через большую площадь поверхности пузырька, чем процесс растворения при повышении давления.

Это обстоятельство приводит к увеличению объема пузырька. С указанными особенностями фазовых переходов, по всей вероятности, связан и специфический график изменения давления в системах питания при низкочастотных колебаниях (острые пики и плавные понижения давления).

На рис. 5.4 представлены результаты расчета зависимости  $R/R_0$ , где  $R_0$  — начальный радиус пузырька, при синусоидальном изменении давления в четы-

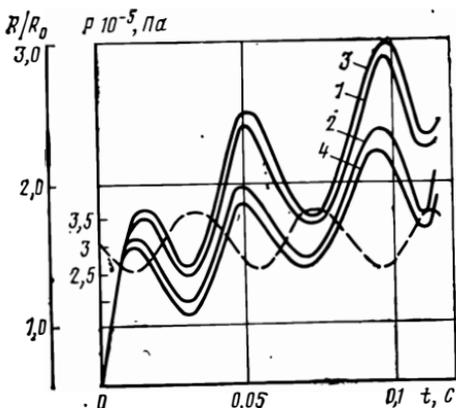


Рис. 5.4. Графики изменения относительного радиуса (—) пузырька при синусоидальном изменении  $p$  (---)

ной азотом, с частотой  $f=25$  Гц и амплитудой  $1 \cdot 10^5$  Па около среднего уровня  $3 \cdot 10^5$  Па, соответствующего равновесной концентрации  $0,5$  кг/м<sup>3</sup>. График 1 получен с учетом нестационарности процессов; график 2 — при использовании зависимостей для стационарного массообмена; график 3 — при учете влияния поверхностного натяжения ( $\sigma=0$ ); график 4 — по результатам расчета при условии стационарного массообмена и отсутствии поверхностного натяжения. Из графиков следует, что если при учете поверхностного натяжения относительный радиус пузырька изменяется мало, то пренебрежение в расчетах нестационарностью массо- и теплообмена при колебаниях давления может привести к существенным (около 20%) погрешностям.

## 5.2. СТРУКТУРА ГАЗОНАСЫЩЕННОГО ПОТОКА

**Механизм возникновения газовых пузырьков в системе питания.** Структура и характер распределения фаз в двухфазном газожидкостном потоке оказывают существенное влияние на особенности протекания процессов взаимодействия между фазами. Как показывают результаты исследований, со структурой двухфазного потока неразрывно связаны такие характеристики потока, как гидравлические потери давления, потери энергии из-за механического взаимодействия фаз, особенности распространения возмущений в потоке и др. От особенностей структуры двухфазного потока зависит также возможная схематизация процесса течения, выбор формы уравнений и методов, применяемых для исследования течения. Вместе с тем структура потока, распределение пузырьков по размерам оказывают влияние на характер и скорость протекания процессов обмена массой, теплотой и количеством движения между фазами.

Степень дисперсности газовой фазы влияет на характер изменения характеристик насосов, расположенных на выходах систем питания. Эти обстоятельства делают необходимым определение не только состава двухфазного потока, т. е. относительной концентрации фаз, но и характера ее распределения как по длине трубопровода, так и по объему пузырьков, составляющих газовую фазу. При этом следует отметить, что сама структура двухфазного потока определяется его гидродинамическими характеристиками.

Многочисленные исследования режимов течения двухфазных потоков, основанные на визуальных наблюдениях, показывают, что имеются различные формы течения, определяемые распределением фаз по сечению трубопроводов. По структуре потока режимы течения разделяются на пузырьковый, эмульсионный, снарядный, дисперсно-кольцевой и обращенный дисперсно-кольцевой.

При сравнительно небольших газосодержаниях потока и значительных его скоростях, которые могут реализоваться в систе-

мах питания, следует ожидать, что в большинстве случаев в трубопроводах возникает пузырьковый или эмульсионный режим течения. Эти режимы характеризуются равномерным распределением газа в виде дисперсных пузырьков.

Так, в вертикальных трубопроводах при нисходящих потоках устойчиво реализуется пузырьковый или снарядный режим течения при

$$K \leq 7; N \leq 0,1,$$

$$\text{где } K = \frac{\rho_r v_{0r}^2}{\sqrt{g\sigma(\rho_{ж} - \rho_r)}}; N = Fr We^{1,25} \left(1 - \frac{3I}{Ga^{0,55}}\right);$$

$$Fr = \frac{v_{ж} d g^{0,5} (\rho_{ж} - \rho_r)}{4\sigma^{3/4}}; We = \frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_r) d^2};$$

$$Ga = \frac{1}{\rho_{ж}} \left( \frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_r)} \right)^{1,5};$$

$v_{0r}$  — приведенная скорость газа (отношение объемного расхода к поперечному сечению трубопровода);  $v_{ж}$  — скорость жидкости.

Для горизонтальных потоков и нисходящего течения в наклонных трубопроводах предельным условием устойчивого существования снарядного режима является экспериментальная зависимость

$$Fr_c \gg (0,2 + 2i/\lambda) e^{-2,5\beta_r/\beta_{ж}^2},$$

где  $i = \sin \alpha$  — геометрический уклон, численно равный гидравлическому при безнапорном течении жидкости в наклонном трубопроводе;  $\alpha$  — угол между осью трубопровода и горизонталью (здесь  $\alpha \leq 10^\circ$ );  $\beta_r, \beta_{ж}$  — относительные объемные расходные концентрации газа и жидкости;  $Fr_c = v_c^2/gd$  — число Фруда, соответствующее скорости смеси  $v_c$ .

Для нисходящего потока и вертикального трубопровода такие зависимости неизвестны.

Нарушение пузырькового режима может произойти вследствие слияния пузырьков газа при образовании и движении их в потоке. Наличие градиентов давления и скорости в турбулентном потоке приводит к концентрации пузырьков в определенных кольцевых сечениях трубопровода (на расстоянии 0,6..0,8 радиуса трубопровода от его оси). Это обстоятельство способствует слиянию небольших пузырьков и образованию пробок. Однако перемещение пузырьков газа в область с повышенной интенсивностью пульсаций должно приводить к созданию условий их гидромеханической неустойчивости, нарушению сферичности формы и дроблению под действием пульсаций скорости потока несущей фазы. Это значит, что в общем случае двухфазный пузырьковый режим течения характеризуется широким спектром размеров отдельных парогазовых пузырьков, минимальный объ-

ем которых определяется условием их образования, а максимальный — условием дробления. В частном конкретном случае для определения закона распределения размеров пузырьков, составляющих газовую фазу, должны быть проанализированы не только эти условия, но и особенности течения, а также взаимодействия фаз, определяющих закон распределения.

Для двухфазных потоков на практике обычно применяют нормально-логарифмический закон распределения включений, в соответствии с которым функция распределения

$$f(R) = \frac{lg l}{\sqrt{2\pi} R lg \sigma} \exp \left[ - \left[ \frac{lg R - lg E(R_0)}{\sqrt{2} lg \sigma} \right]^2 \right],$$

где  $E(R_0)$  — математическое ожидание радиусов;  $\sigma$  — средне-квадратичное отклонение радиусов;  $l$  — характерный линейный параметр потока.

При известных минимальных  $R_{\min}$  и максимальных  $R_{\max}$  радиусах пузырьков в потоке среднее значение радиуса  $R_*$  при нормально-логарифмическом законе распределения может быть определено по формуле

$$R_* = \sqrt{R_{\min} R_{\max}}. \quad (5.40)$$

Для определения минимальных размеров газовых или парогазовых пузырьков следует более подробно остановиться на физической модели образования двухфазного потока в трубопроводах системы питания при течении в них насыщенного газом топлива.

Опыт эксплуатации различного рода гидравлических систем показывает, что в реальных условиях даже незначительное снижение в топливе давления ниже уровня, соответствующего равновесной концентрации растворенного в топливе газа, приводит к выделению газа и образованию газопаровых пузырьков. Это значит, что реальные жидкости неспособны выдерживать растягивающие напряжения и при пересыщении в них возникают разрывы.

Большинство исследователей кавитационных явлений сходятся во мнении, что причиной их возникновения являются поверхностные эффекты, возникающие при контакте жидкости с находящимися в ней мельчайшими нерастворенными газовыми включениями. В соответствии с гипотезой Гарвея нерастворенный газ располагается в микроскопических несмачиваемых жидкостью порах, находящихся в поверхности сосуда, или в несмачиваемых твердых примесях. В этом случае поверхностное натяжение жидкости образует выпуклый в сторону поры мениск, который снижает давление газа в поре ниже уровня давления в жидкости на величину, зависящую от поверхностного натяжения и радиуса кривизны мениска. Для несмачиваемой поры условием диффузи-

онного равновесия на поверхности, разделяющей жидкость и парогазовую полость, будет зависимость

$$(p_{\infty} - p_{п} - p_{г} - 2\sigma/R) \kappa = c_{\infty}.$$

В этом случае увеличение давления в жидкости приводит к уменьшению радиуса кривизны мениска, что компенсирует изменение концентрации на поверхности раздела и обеспечивает устойчивое существование газа в поре.

Следует отметить, что определяющим фактором в гипотезе Гарвея является отсутствие смачиваемости жидкостью поверхностей сосуда и находящихся в ней механических примесей. Большинство подтверждающих гипотезу Гарвея экспериментальных данных получено для воды. Смачиваемость большинства твердых поверхностей водой существенно зависит от степени их загрязнения. Экспериментальные данные об измерении краевых углов различных жидкостей имеют значительный разброс, однако для воды при температуре кипения эти углы никогда не превосходят  $90^{\circ}$ . Это значит, что чистые металлические поверхности смачиваются водой и, следовательно, поверхностные эффекты на границе жидкость — стенки сосуда должны исключать существование нерастворенного газа в микрополостях поверхности сосуда или трубопровода.

Вместе с тем большинство измерений краевых углов проводилось на обработанных поверхностях с параметром шероховатости  $Rz=32$  и в процессе эксперимента уделялось особое внимание исключению загрязнения поверхности органическими примесями. В реальных технических системах поверхность емкостей и трубопроводов имеет  $Rz$  намного больший и технологический процесс их изготовления не исключает загрязнения поверхности органическими примесями при контакте с охлаждающими и смазочными материалами. Кроме того, замеренное значение краевого угла не дает достаточного представления о микроскопическом угле  $\beta$  в имеющихся в материале мельчайших впадинах и трещинах. Это обстоятельство приводит к тому, что микровпадины на поверхности металла заполняются лишь частично и при  $\beta < \theta$  (где  $\theta$  — краевой угол) оказываются способными устойчиво сохранять газ в нерастворенном состоянии.

Все вышеизложенное является характерным не только для воды, но и для большинства жидкостей, в том числе для высококипящих топлив. Даже такие хорошие растворители органических веществ, как ацетон, спирты, эфиры и фреон, имеют краевые углы смачивания с металлическими поверхностями, отличные от 0.

Если насыщение ракетного топлива газом проводится в заправочных средствах с закольцовкой газовых объемов в процессе заправки, то это обстоятельство способствует сохранению газовых «зародышей» в микрополостях поверхности бака и трубопроводов.

Снижение давления в потоке ниже уровня, соответствующего равновесной концентрации растворенного в жидкости газа, приводит к процессу выделения газа из жидкости в микрополости, увеличению газовых пузырьков на поверхности трубопровода до размеров, определяемых условием обтекания растущих пузырьков основным потоком, снесению пузырьков в основной поток и увеличению пузырьков в потоке до размеров, определяемых условием дробления их в потоке.

Рассмотрим особенности увеличения объема парогазового пузырька на поверхности трубопровода системы питания при снижении давления ниже уровня, соответствующего равновесной концентрации. Указанный процесс представляет интерес с точки зрения решения общей задачи образования двухфазного потока, потому что такие характеристики процесса, как диаметр отрывающихся пузырьков, которые, будучи снесенными в поток, являются в нем «зародышами газовой фазы», их число, скорость увеличения объемов до момента отрыва и т. д., неразрывно связаны с кинетикой общего процесса газовой выделения и получением зависимости для определения относительной объемной концентрации газа в потоке.

Условия возникновения на поверхности трубопровода системы питания при напорном течении в них насыщенного газом топлива парогазовых пузырьков и увеличения их объема вследствие выделения в них газа имеет ряд характерных особенностей. К этим особенностям следует отнести, прежде всего, диффузионный характер процесса увеличения объемов пузырьков при отсутствии значительных тепловых потоков и перегрева жидкости.

Кроме того, в большинстве случаев к трубопроводам питания не предъявляется специальных требований по шероховатости поверхностей и конструктивно они, как правило, представляют

собой соединенные сваркой или с помощью фланцевых соединений секции сортовых трубопроводов. Внутренние поверхности трубопроводов системы питания редко имеют параметр шероховатости  $R_z > 80$ , поэтому в них есть значительное число «зародышей газовой фазы».

В общем случае при росте единичного пузырька, находящегося на стенке трубопровода, когда поверхность его омывается потоком жидкости (рис. 5.5), на пузырек действуют силы поверхностного натяжения  $P_\sigma$ , гидродинамического сопротивления основному потоку  $P_v$ , сопротивления со стороны жидкости изменению площади поверхности

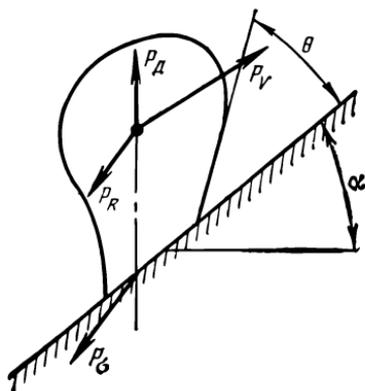


Рис. 5.5. Силы, действующие на единичный пузырек, находящийся на поверхности трубопровода

пузырька вследствие увеличения его радиуса  $R_R$  и выталкивающая (архимедова) сила  $P_g$ .

При увеличении радиуса пузырька на поверхности трубопровода превалирующее влияние на условие равновесия оказывают гидродинамические силы, возникающие при обтекании пузырька потоком жидкости. При этом средняя по поверхности пузырька скорость потока определяется профилем изменения скорости по сечению трубопровода. Для турбулентного течения жидкости, когда увеличение объема пузырька происходит целиком в вязком подслое, изменение скорости у поверхности трубопровода  $v_y$  можно принять изменяющимся по линейному закону

$$v_y = \frac{\tau_0}{\nu \rho} y = \frac{\lambda v_{ж}^2}{8\nu} y, \quad (5.41)$$

где  $\tau_0$  — напряжение трения;  $y$  — расстояние от поверхности трубопровода.

Для пузырька сферической формы ( $y=2R$ ) интегрирование зависимости (5.41) по высоте пузырька дает выражение

$$\bar{v}_R = \frac{\lambda v_{ж}^2}{8\nu} R, \quad (5.42)$$

где  $\bar{v}_R$  — средняя по поверхности пузырька скорость потока.

При учете краевого угла формула для определения средней поверхности пузырька скорости потока намного усложняется:

$$\bar{v}_R = \frac{\lambda v_{ж}^2 R}{8\nu} \frac{\sin \theta - \frac{\sin^3 \theta}{3} + (\pi - \theta) \cos \theta}{\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta} \quad (5.43)$$

Выражения для средней скорости, аналогичные выражениям (5.42), (5.43), обычно используются для расчета гидродинамической силы, действующей на пузырек, и определения радиуса оторвавшегося пузырька. Полученные при этом значения корректируют эмпирическими коэффициентами. Использование при подобных расчетах в уравнении коэффициента гидравлического сопротивления единичного пузырька, всплывающего в жидкости, дает существенную погрешность вследствие влияния на характер обтекания поверхности трубопровода и соседних пузырьков. Проведенная оценка показала, что число пузырьков газа, выделившихся из насыщенной жидкости на единице поверхности трубопровода питания, зависит от их размера. Это значит, что число «зародышей газовой фазы» оказывается достаточным для того, чтобы вся поверхность в зоне трубопровода, где создаются условия для газовыделения, была покрыта слоем пузырьков газа.

Такое распределение пузырьков на поверхности позволяет предположить, что слой этих пузырьков должен передать стенке трубопровода все касательные напряжения, которые возникают

при течении жидкости. В этом случае выражение для силы  $P_v$ , действующей на единичный газовый пузырек в момент его отрыва от набегающего потока жидкости, можно представить в виде

$$P_v = \pi R_d^2 \tau_0 = \frac{1}{8} \pi R_d^2 \rho_{ж} v_{ж}^2 \lambda, \quad (5.44)$$

где  $R_d$  — радиус оторвавшегося пузырька.

Коэффициент потерь на трение  $\lambda$  в выражении (5.44), очевидно, должен учитывать изменение относительной шероховатости трубопровода при наличии на нем газовых пузырьков. Если в качестве условной относительной шероховатости принять отношение диаметра пузырька к радиусу трубопровода, то для режима развитой шероховатости

$$\lambda = \frac{1}{[21g d / (4R_d) + 1,74]^2}, \quad (5.45)$$

где  $d$  — диаметр трубопровода.

Р. Штауб исследовал процесс отрыва паровых пузырей при значительных (до 8 м/с) скоростях движения потока жидкости. При существенных скоростях вынужденного движения форма пузырька в момент отрыва по наблюдениям Р. Штауба может быть принята полусферической. Полученное им соотношение для радиуса оторвавшегося пузырька при действии сил поверхностного натяжения и обтекания потоком имеет вид

$$R_d \approx 0,5\sigma / (\lambda \rho_{ж} v_{ж}^2). \quad (5.46)$$

На рис. 5.6 приведены графики изменения радиуса оторвавшегося пузырька, находящегося на поверхности, при равновесии действующих на него сил, рассчитанные по зависимости (5.46).

В области малых скоростей ( $v_{\infty} < 1$  м/с) радиус оторвавшегося пузырька определяется действием сил поверхностного натяжения и подъемной силы. В этом случае значение этого радиуса сохраняется неизменным.

Процесс диффузионного увеличения объема пузырька, находящегося на поверхности трубопровода, также имеет ряд особенностей по сравнению с рассмотренными здесь массообменными процессами увеличения объема единичного пузырька и массообменными процессами в омываемом его потоке жидкости. Эти осо-

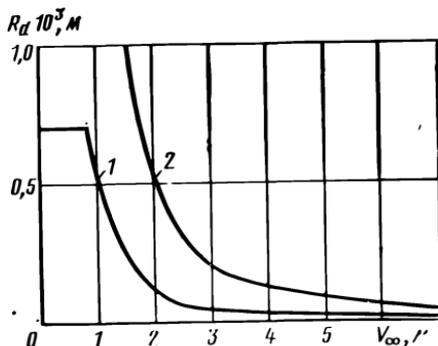


Рис. 5.6. Графики изменения радиуса оторвавшегося пузырька в различных жидкостях:

1 — азотный тетраоксид; 2 — вода

бенности связаны с отмеченными выше влиянием твердой поверхности и наличием соседних пузырьков газа. Указанные особенности намного осложняют расчет диффузионного увеличения объема пузырька на поверхности и требуют введения дополнительных упрощающих предположений.

Для расчета увеличения объема пузырьков на поверхности осесимметричного тела, обтекаемого потоком воды, выполненного Б. Р. Церкиным и К. В. Керминым на основе уравнения конвективной диффузии, использовалось предположение, что выделение газа в пузырек идет через поверхность, определяемую величиной  $\lambda R^2$ .

Еще сложнее учет особенностей размеров множества пузырьков. При одновременном увеличении размеров множества пузырьков возникает конкуренция за растворенный в жидкости газ, которая должна приводить к уменьшению скорости увеличения размеров множества пузырьков по сравнению со скоростью увеличения размера единичного пузырька. Вместе с тем при возникновении нескольких пузырьков наличие гидравлического сопротивления каждого пузырька приводит к более интенсивному перемешиванию жидкости и возрастанию скорости увеличения размеров соседних пузырьков.

Если предположить аналогично тому, как это было сделано при определении гидродинамического воздействия потока жидкости на пузырьки, находящиеся на поверхности, что они практически полностью покрывают стенку трубопровода, то удастся использовать для определения диффузионного увеличения размеров пузырька на поверхности решение задачи определения потока теплоты на внутреннюю поверхность трубопровода при турбулентном течении.

Для режима с развитой турбулентностью  $10^4 < Re < 10^5$  при значительных числах  $Pr > 200$  критерий

$$Sh = 0,023 Re^{0,8} Pr^{1/3}.$$

Окончательное выражение для приращения массы газа в пузырьке, находящемся на поверхности трубопровода, при полусферической его форме в процессе увеличения его размеров можно записать так:

$$\frac{dm_r}{dt} = 0,072 (c_\infty - c_0) R \frac{D^{0,66} v_{ж}^{0,8} d^{0,8}}{v^{0,47}}. \quad (5.47)$$

Представляет интерес сопоставление полученной зависимости с выражениями, выведенными из условия обтекания единичного пузырька. Для пузырька, находящегося целиком в вязком подслое и имеющего полусферическую форму, согласно уравнению (5.43) средняя по поверхности скорость

$$\bar{v}_R = \lambda v_{ж}^2 R / 6\pi\nu. \quad (5.48)$$

Выражение (5.48) с учетом формул для определения диффузионного критерия Шервуда  $Sh$  при  $Re > 1$  позволяет получить выражение для коэффициента массоотдачи:

для газового пузырька

$$\beta = 0,085 v_{ж}^{1,17} \lambda_r^{0,585} D^{0,5} R^{0,17} / \nu^{0,67}; \quad (5.49)$$

для жидкой сферы

$$\beta = 0,124 \lambda_r v_{ж} D^{2/3} / \nu^{2/3}. \quad (5.50)$$

В соответствии же с выражением (5.47) коэффициент массоотдачи на поверхность трубопровода

$$\beta = 0,023 D^{0,66} v_{ж}^{0,8} / (\nu^{0,47} d^{0,2}). \quad (5.51)$$

Вычисления, проведенные по формулам (5.49), ..., (5.51), показывают, что процесс переноса массы к пузырьку, находящемуся в пограничном слое турбулентного потока, см. формулу (5.51), проходит намного интенсивнее, чем процесс переноса массы к единичному пузырьку, обтекаемому с эквивалентной скоростью, см. формулы (5.49), (5.50).

**Условия дробления пузырька, гидравлические потери в двухфазном потоке.** При наличии градиента давления один из возможных механизмов разрушения газового пузырька связан с образованием микроструек жидкости. Из-за градиента давления происходит деформация пузырька, приводящая к появлению на его поверхности углубления, в которое проникает струйка жидкости, пронизывающая пузырек насквозь и разрушающая его. Предполагается, что при разрушении газового пузырька в турбулентном потоке жидкости из-за возникновения внутри пузырька вследствие подвижности поверхности раздела циркуляционных токов газ увлекается потоком обтекающей жидкости. Это приводит к созданию динамического напора  $\rho_r v_r^2$ , направленного против стабилизирующего действия сил поверхностного натяжения. Критический радиус пузырька в этом случае определяется по формуле

$$R_{кр} = \sqrt[3]{\frac{3}{c_{и}}} \cdot \frac{\sigma}{v_{ж}^2 \sqrt[3]{\rho_r \rho_{ж}^2}}, \quad (5.52)$$

где значение коэффициента гидравлического сопротивления  $c_{и}$  соответствует режиму дробления.

Относительная скорость пузырька и окружающей его жидкости в общем случае находится из условия совместного решения уравнения движения пузырька и окружающей его жидкости. Критический радиус воздушного пузырька, всплывающего в неподвижной воде при атмосферном давлении ( $v_{ж} \approx 0,3$  м/с), рассчитанный по формуле (5.52), составляет примерно  $10^{-2}$  м. Как уже отмечалось, относительная скорость в нестационарных потоках может значительно превышать указанные значения для

стационарных потоков. С этим обстоятельством связан экспериментально установленный факт наличия мелкодисперсной структуры газожидкостного потока на режимах заполнения. Вместе с тем предельный размер газового пузырька и для стационарного потока оказывается меньше рассчитанного по формуле (5.52) с учетом скорости всплытия. Это обстоятельство, по всей вероятности, объясняется наличием наложенных на осредненное течение турбулентных пульсаций давления и скорости.

Измерения турбулентных пульсаций скоростей, проведенные с помощью термоанемометров для различных условий течения, показали, что самые большие турбулентные пульсации скорости составляют примерно 10% осредненной скорости течения. Это позволяет оценить значение интенсивности продольных пульсаций скорости, автомодельных от числа Re потока, равным 2,8 динамической скорости, а масштаб их равным 0,3 радиуса трубы. Учитывая, что пульсации масштаба  $h$  связаны с крупномасштабными пульсациями по закону  $1/3$ , можно получить следующее выражение для турбулентных пульсаций скорости, действующих на газовый пузырек, находящийся в турбулентном потоке жидкости:

$$v = 2,8 v_{*j} \left( \frac{R_{кр}}{0,15d} \right)^{1/3}, \quad (5.53)$$

где  $v_{*j} = v_{*j} \sqrt{\lambda/8}$  — динамическая скорость. С учетом выражения (5.53) зависимость для дробления пузырька турбулентными пульсациями может быть представлена в виде

$$R_{кр} = 0,53 \frac{\sigma^{0,6} d}{v_{*j}^{1,2} \rho_r^{0,2} \rho_{ж}^{0,4} \lambda^{0,6}}. \quad (5.54)$$

На рис. 5.7 представлены результаты расчета по формуле (5.54) критического радиуса парогазового пузырька в различных жидкостях в зависимости от скорости течения. Результаты расчета показывают, что до скорости основного потока примерно 2 м/с критический радиус парогазового пузырька определяется скоростью его всплытия и не зависит от скорости основного потока.

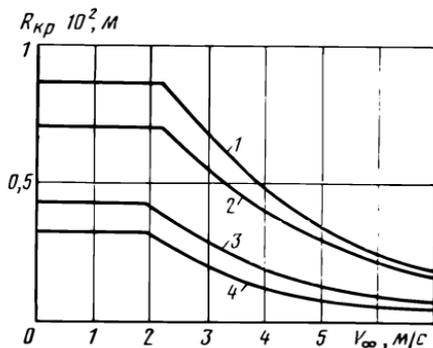


Рис. 5.7. Графики изменения критического радиуса пузырька в турбулентном потоке:

1 — воды при  $p=10^5$  Па; 2 — воды при  $p=3 \cdot 10^5$  Па; 3 — несимметричного диметилгидразина при  $p=3 \cdot 10^6$  Па; 4 — азотного тетраксида при  $p=3 \cdot 10^5$  Па

Однако при больших скоростях  $R_{кр}$  определяется действием на него турбулентных пульсаций. При этом вследствие более высокого значения коэффициента поверхностного натяжения у воды, чем у азотного тетраоксида и несимметричного диметилгидразина, пузырьки воздуха в ней оказываются более устойчивыми к разрушению. Из-за повышенной плотности парогазовой фазы в азотном тетраоксиде значение  $R_{кр}$  у нее меньше, чем у несимметричного диметилгидразина.

Возникновение в системе питания двухфазного газо-жидкостного потока оказывает определенное влияние на коэффициенты потерь на трение и давления  $\Delta p_{тр}$  в трубопроводе. Физическая сторона этого явления заключается в увеличении скорости потока из-за выделения свободного газа и, следовательно, в возрастании  $\Delta p_{тр}$ . При скольжении фаз дополнительные потери возникают также из-за обтекания жидкостью пузырьков газа. Большинство авторов учитывают это увеличением значения коэффициента потерь на трение двухфазного потока  $\lambda_c^*$ . Однако проведенные исследования показывают, что в системах питания ДУ с точностью до 10% можно пренебречь скольжением фаз.

В. И. Петровым предложены следующие выражения для определения  $\lambda_c$  и  $\Delta p_{тр}$  в системе питания ЖРД через коэффициент потерь на трение  $\lambda$  и потерь давления  $\Delta p_{тр.ж}$  при течении чистой жидкости, а также через относительную объемную концентрацию газа  $\varphi_r$ :

$$\lambda_c = \lambda [1 + \varphi_r / (1 - \varphi_r)];$$

$$\Delta p_{гр} = \Delta p_{тр.ж} [1 + \varphi_r / (1 - \varphi_r)]^2.$$

Имеются также экспериментальные данные, указывающие на зависимость  $\lambda_c$  от  $\varphi_r$ , числа  $We$  и приведенной плотности смеси. Так, при исследовании течения пароводяной смеси получена зависимость

$$\lambda_c = 0,017 We / Re^{0,5}, \quad (5.55)$$

где  $We$ ,  $Re$  — числа Вебера и Рейнольдса, полученные по скорости смеси.

Зависимость (5.55) может быть объяснена возникновением пузырьков на поверхности трубопровода и увеличением относительной шероховатости его поверхности. При этом эквивалентная песочная шероховатость в случае плотного размещения полусфер на поверхности трубопровода может даже превышать геометрическую, построенную по радиусу полусферы. Если преобразовать известную формулу Коулбрука и Уайта для коэффициента потерь на трение с учетом полученного выражения для критического радиуса пузырька на стенке, то можно получить уравнение, определяющее влияние поверхностного натяжения  $\sigma$  и числа  $Re$  потока на  $Re$  в следующем виде:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_c}} = 1,74 - 2 \lg \left( \frac{0,48\sigma}{\lambda_c \rho_{ж} v_{ж}^2 d} - \frac{18,7}{Re \sqrt{\lambda_c}} \right). \quad (5.56)$$

Анализ уравнения (5.56) показывает, что если в гидравлическом трубопроводе происходит выделение газовой фазы и увеличение размеров пузырьков на поверхности, то зависимость коэффициента трения от числа  $Re$  становится более ярко выраженной, чем при течении однофазной жидкости. При неизменном поверхностном натяжении уменьшение числа  $Re$  приводит как бы к увеличению относительной шероховатости. На рис. 5.8 приведены зависимости коэффициента потерь на трение для различных относительных шероховатостей  $k_s$  поверхности трубопровода и различных характеристик рабочих жидкостей.

Относительная условная шероховатость для двух различных рабочих жидкостей с условными шероховатостями  $k_{s1}$  и  $k_{s2}$  определяется исходя из соотношения

$$\frac{k_{s1}}{k_{s2}} = \frac{\sigma_1 \rho_2 v_2^2}{\sigma_2 \rho_1 v_1^2} = \frac{Re_2^2 v_2^2 \sigma_1 \rho_2}{Re_1^2 v_1^2 \sigma_1 \rho_1}. \quad (5.57)$$

Отсюда следует, что, например, при одинаковых числах  $Re$  потока, несмотря на меньшее значение коэффициента поверхностного натяжения у азотного тетраксида  $\sigma_1$ , чем у воды  $\sigma_2$ , условная шероховатость  $k_{s1}$  у него вследствие влияния вязкости и плотности оказывается более чем в пять раз выше, чем у воды, а это приводит к большим значениям коэффициента потерь на трение.

Для стационарного потока, когда к тому же можно пренебречь потерями давления на ускорение вследствие фазовых превращений, потери давления в трубопроводе можно рассчитать по зависимости

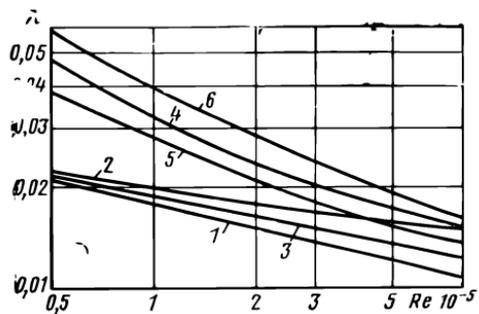
$$\Delta p_{тр} = \lambda_c \frac{l}{d} \frac{\rho_c v_c^2}{2}. \quad (5.58)$$

С учетом уравнения неразрывности

$$\rho_r v_r + \rho_{ж} v_{ж} = \rho_c v_c$$

Рис. 5.8. Графики изменения коэффициента потерь на трение:

1 — рассчитанный по формуле Блаузиуса  $\lambda = 0,3164/Re^{1/4}$ ; 2 — для труб из аустенитной стали с параметром шероховатости  $Ra = 1,25$  мкм; 3, 4, 5 — рассчитанный по формуле (5.56) соответственно для тянутых труб с параметром шероховатости  $Ra = 0,16$  мкм, для воды с  $\sigma = 72 \cdot 10^{-3}$  Н/м и для воды с  $\sigma = 36 \cdot 10^{-3}$  Н/м; 6 — для азотного тетраксида с  $\sigma = 26 \cdot 10^{-3}$  Н/м



и зависимости для плотности смеси

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{г}} \varphi_{\text{г}} + \rho_{\text{ж}} (1 - \varphi_{\text{г}})$$

выражение (5.58) может быть приведено к виду

$$\Delta p_{\text{тр}} \approx \lambda_c \frac{l}{d} \frac{\rho_{\text{ж}}^2}{\rho_{\text{ж}} (1 - \varphi) + \rho_{\text{г}} \varphi_{\text{г}}} v_{\text{ж}}^2.$$

Для условий течения в трубопроводах системы питания (при  $\rho_{\text{г}} \ll \rho_{\text{ж}}$  и  $\varphi_{\text{г}} \ll 1$ )

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda_c \frac{l}{2d} \frac{\rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}}^2}{1 - \varphi_{\text{г}}}. \quad (5.59)$$

Аналогичным образом рассчитываются по гомогенной теории и потери давления на местных сопротивлениях:

$$\Delta p_{\text{мест}} = \zeta_c \frac{\rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}}^2}{2(1 - \varphi_{\text{г}})}. \quad (5.60)$$

Экспериментальные данные показывают, что при этом коэффициент гидравлического сопротивления двухфазного потока может намного превышать коэффициент гидравлического сопротивления при течении однофазного потока. Это связано со взаимодействием фаз, относительным их движением при существенных изменениях условий течения в местных сопротивлениях на значительном протяжении трубопровода за ними. В соответствии с экспериментальными исследованиями С. И. Мочана коэффициент гидравлического сопротивления выхода двухфазного потока из трубопровода  $\zeta_{\text{вых с}} = 1,2$ . При входе потока в трубопровод возмущающее влияние входных потерь сказывается на значительном по длине входном участке (60...100 диаметров трубопровода). Коэффициент гидравлических потерь при повороте двухфазного потока в шесть...семь раз выше, чем при однофазном потоке, если за поворотом оказывается вертикальный или наклонный участок, в то время как при горизонтальном участке после поворота коэффициенты потерь на местные сопротивления однофазного и двухфазного потоков оказываются равными.

В случаях расчета гидросистемы ДУ при значениях  $\varphi_{\text{г}} < 0,1$  величину  $\lambda_c$  можно принимать такой же, как и при течении однофазной жидкости, т. е. считать, что  $\lambda = \lambda_c$ .

**Взаимодействие фаз при конечных значениях концентрации.** Ранее были рассмотрены условия механического взаимодействия, а также массо- и теплообмена единичного пузырька и окружающей его жидкости. С ростом концентрации газа усиливается взаимодействие отдельных пузырьков, что требует внесения определенных поправок в полученные зависимости. Эти поправки, очевидно, зависят от объемной концентрации дисперсной фа-

зы, наличия пульсаций давления и скорости, столкновений, дроблений и т. п.

Сведения о взаимодействии частиц в вязком потоке, их взаимном влиянии, распределении центров частиц и других особенностях основаны на схематизации процесса течения и анализе экспериментальных данных. Экспериментальные данные по измерению вязкости суспензий для различных жидкостей и материалов твердых частиц имеют существенный разброс и граница применимости полученных выражений находится в пределах  $\varphi_r = 0,02 \dots 0,1$ .

Увеличение концентрации дисперсной фазы приводит к необходимости учета влияния соседних частиц и зависит от характера распределения частиц в потоке и особенностей его осреднения. Подробный анализ приближенных моделей осреднения, применяемых в механике дисперсных смесей, содержит монография Р. И. Нигматулина. В приближении ячеечной модели вычисления эффективной динамической вязкости смеси  $\mu$  для ограниченных, но конечных значений относительной концентрации газа приводят к выражению для монодисперсной смеси

$$\mu = \mu_{ж} \left[ 1 + \frac{5\mu_* + 2 - 21/(5\varphi_r^{1,5}) - \frac{4}{5}(\mu_* - 1)\varphi_r^{7/3}}{2(\mu_* + 1) - 7\mu_*\varphi_r^{5/3} + 5(\mu_* - 2)\varphi_r^{7/3}} \varphi_r \right],$$

где  $\mu_*$  — отношение вязкости дисперсной и несущей фаз.

Последнее выражение при  $\varphi_r \rightarrow 0$  переходит в формулу Тейлора  $\mu = \mu_{ж}(1 + \varphi_r)$  для  $\mu_* = 0$  и Энштейна

$$\mu = \mu_{ж} \left( 1 + \frac{5}{2} \varphi_r \right) \text{ для } \mu_* \rightarrow \infty.$$

Сила сопротивления пробной частицы в монодисперсном потоке при стесненном обтекании увеличивается по сравнению с единичной частицей.

При условии, что возмущение потока от единичной сферы приложено в центре сферы и пропорционально скорости невозмущенного потока жидкости при отсутствии частиц и возмущению жидкости, обусловленному влиянием всех остальных частиц, выражение для силы сопротивления единичной сферы для безынерционного течения имеет вид

$$f_{\mu} = \lambda(\varphi_r) f_{\mu 0},$$

где  $\lambda(\varphi_r)$  — поправочный коэффициент, учитывающий влияние возмущения от соседних частиц;  $f_{\mu 0}$  — сила сопротивления единичной сферы. Для указанных условий при  $\varphi_r < 2/3$  поправочный коэффициент

$$\lambda(\varphi_r) = \frac{4 + 3\varphi_r + 3\sqrt{8\varphi_r - 3\varphi_r^2}}{(2 - 3\varphi_r)^2}. \quad (5.61)$$

Результаты экспериментальных исследований для различных жидкостей и сферических частиц показали допустимость применения зависимости (5.61) лишь при равномерном распределении частиц в потоке, без образования скоплений и цепочек. При хаотичном распределении частиц поправочный коэффициент значительно снижается, так как обеспечиваются лучшие условия механического взаимодействия (меньший коэффициент сопротивления) дисперсной и несущей фаз.

При увеличении относительной скорости течения ( $Re > 1$ ) задача определения влияния конечных объемных концентраций фаз потока на процессы взаимодействия еще более усложняется. В этом случае сила сопротивления пробной частицы может быть представлена в виде

$$f_{\mu} = c_{\mu}(Re, \varphi_r) \pi R^2 \rho_{ж} v_{г.ж}^2 / 2,$$

где  $c_{\mu}(Re, \varphi_r)$  — коэффициент сопротивления, являющийся функцией не только числа  $Re$ , но и относительной объемной концентрации;  $v_{г.ж}$  — относительная скорость газа и жидкости.

На основании обработки экспериментальных данных получена формула

$$c_{\mu}(Re, \varphi_r) \approx (1 - \varphi_r)^{-2,7} c_{\mu*}(Re), \quad (5.62)$$

где  $c_{\mu*}$  — коэффициент сопротивления без учета объемных концентраций.

Для широкого диапазона изменения  $Re$  ( $2 < Re < 500$ ) коэффициент сопротивления может быть выражен зависимостью  $c_{\mu} = 18,5/Re^{0,67}$ . Увеличение силы сопротивления при увеличении конечного значения относительной объемной концентрации может быть учтено с помощью выражения

$$c_{\mu}(Re, \varphi_r) = c_{\mu}(Re) \left( \frac{1 - \varphi_r}{1 - 1,16\varphi_r^{2/3}} \right). \quad (5.63)$$

Изменение условий обтекания единичной сферы при конечных значениях относительной концентрации изменяет поле скоростей потока и условия протекания тепло- и массообменных процессов. Однако при больших числах  $Re$  диффузионный пограничный слой составляет малую долю радиуса газового пузырька, что позволяет использовать для решения известное уравнение конвективной диффузии, а влияние объемных концентраций фаз потока учесть в компонентах скоростей.

Выражение для массового потока газа вследствие конвективной диффузии в газовый пузырек при стесненном обтекании пузырька монодисперсным потоком имеет вид

$$\frac{dm_r}{dt} = 5,72 (DR^3 v_1)^{1/2} (c_{\infty} - c_0). \quad (5.64)$$

Модифицированная скорость  $v_1$  на экваторе газового пузырька для зависимости (5.64) определяется выражением

$$v_1 = \frac{1}{2} \vartheta(\varphi_r) v_{r.ж},$$

$$\text{где } \vartheta(\varphi_r) = \frac{1 + \xi}{1 + 1/3};$$

$$\xi^3 + 3\xi^2 - \frac{2}{2 - 3\varphi} \xi - \frac{18}{2 - 3\varphi_r} = 0.$$

Переход к безразмерному критерию  $Sh$  позволяет получить выражения, аналогичные выражениям для одиночных частиц, с поправочными коэффициентами для газовых пузырьков

$$Sh = c Re^{1/2}; \quad c = 0,462 \vartheta(\varphi_r)^{1/2}. \quad (5.65)$$

При  $\varphi \rightarrow 0$ ,  $\psi(\varphi_r) \rightarrow 1$ ,  $\vartheta(\varphi_r) \rightarrow 1$  зависимости (5.65) приводятся к известным выражениям для одиночной твердой сферы и одиночного газового пузырька.

Массо- и теплообмен для стесненного течения при  $Re > 1$  характеризуется меньшим влиянием числа  $Re$ , чем для одиночной частицы. Это позволяет распространить полученные выражения для  $Re < 1$  в сторону больших чисел  $Re$ , вплоть до  $Re \approx 100$ , что подтверждается экспериментальными данными для  $\varphi_r < 0,7$ .

### 5.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО ПОТОКА ТОПЛИВА

Скорость распространения малых возмущений в двухфазном потоке. При исследовании неустановившегося течения в трубопроводах системы питания и математическом моделировании происходящих в этом течении процессов в качестве замыкающей систему уравнений неразрывности и движения используют обычно уравнение состояния, т. е. уравнение, описывающее законы деформации среды под действием возникающих при течении возмущений. С указанным законом неразрывно связаны точность описания динамических процессов, определения частот колебаний и границ устойчивости всей системы.

Задача определения скорости распространения волны возмущения в трубопроводах системы питания сводится к определению зависимости, связывающей изменение плотности среды с изменением давления. Особенностью течения насыщенного газом топлива в трубопроводах системы питания является, как уже отмечалось, то обстоятельство, что двухфазный поток возникает в короткий промежуток времени — при понижениях давления, связанных с переходными режимами в процессе запуска, при низкочастотных колебаниях давления. На стационарном режиме работы уровень давления в системе питания, как правило, выбира-

ют так, чтобы избежать возникновения отрицательных для ЖРД кавитационных явлений, нарушения сплошности потока. При динамических процессах создаются условия для перехода от течения однофазной «капельной» жидкости к течению двухфазного газожидкостного потока. Степень завершенности происходящих при этом переходе процессов оказывает существенное влияние на скорость распространения возмущений в потоке.

С учетом зависимости между относительными объемной  $\varphi_r$  и массовой  $\varepsilon_r$  концентрациями газа

$$\varphi_r = \frac{\varepsilon_r \rho_{ж}}{\varepsilon_r \rho_{ж} + (1 - \varepsilon_r) \rho_r \gamma}, \quad (5.66)$$

где  $\gamma = v_r/v_{ж}$  — отношение скорости газа к скорости жидкости (скольжение), выражение для плотности среды может быть представлено в виде

$$\rho = \frac{\rho_r \rho_{ж} [\varepsilon_r + \gamma(1 - \varepsilon_r)]}{\varepsilon_r \rho_{ж} + (1 - \varepsilon_r) \rho_r \gamma}. \quad (5.67)$$

Дифференцирование выражения (5.67) позволяет получить зависимость для скорости распространения возмущения  $a_\infty$  в неограниченном объеме двухфазной среды:

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_\infty^2} = \frac{d\rho}{d\rho} = \frac{1}{[\varepsilon_r \rho_{ж} + (1 - \varepsilon_r) \rho_r \gamma]^2} & \left\{ [\varepsilon_r + \gamma(1 - \varepsilon_r)] \left[ \varepsilon_r \rho_{ж}^2 \frac{d\rho_r}{d\rho} + \right. \right. \\ & \left. \left. + (1 - \varepsilon_r) \gamma \rho_r^2 \frac{d\rho_{ж}}{d\rho} \right] + \varepsilon_r (1 - \varepsilon_r) \rho_r \rho_{ж} (\rho_{ж} - \rho_r) \frac{d\gamma}{d\rho} - \right. \\ & \left. - \gamma \rho_r \rho_{ж} (\rho_{ж} - \rho_r) \frac{d\varepsilon}{d\rho} \right\}. \quad (5.68) \end{aligned}$$

Перейдя к объемным концентрациям, с учетом, что  $\frac{d\rho_r}{d\rho} =$

$= \frac{1}{a_{\infty r}^2}$ , а  $\frac{d\rho_{ж}}{d\rho} = \frac{1}{a_{\infty ж}^2}$ , где  $a_{\infty ж}$ ,  $a_{\infty r}$  — скорости распространения возмущений в неограниченных объемах жидкости и газа, получим уравнение (5.68) в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_\infty^2} = & \left[ \varphi_r^2 + \varphi_r (1 - \varphi_r) \frac{\rho_{ж}}{\rho_r} \right] \frac{1}{a_{\infty r}^2} + \left[ \varphi_r (1 - \varphi_r) \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} + (1 - \varphi_r)^2 \right] \frac{1}{a_{\infty ж}^2} + \\ & + \frac{\varphi_r (1 - \varphi_r) \rho_{ж} - \rho_r}{\gamma} \frac{d\gamma}{d\rho} - \frac{[\rho_{ж} (1 - \varphi_r) + \varphi_r \rho_r \gamma]^2}{\rho_r \gamma} \frac{d\varepsilon_r}{d\rho} + \\ & + \frac{[\rho_r \varphi_r + \rho_{ж} (1 - \varphi_r)] d}{E \delta}, \quad (5.69) \end{aligned}$$

где  $E$  — модуль объемной упругости металла трубопровода.

Если предположить отсутствие фазового перехода в волне возмущения  $\left( \frac{d\varepsilon_r}{d\rho} = 0 \right)$ , завершенность между фазами обмена

количества движения  $\left(\frac{d\gamma}{dp} = 0\right)$ , равенство давления в жидкости и газе, а также учесть, что  $\rho_g \ll \rho_{ж}$ , то из зависимости (5.69) можно получить известное выражение для изотермической скорости распространения малых возмущений

$$a_{\infty \text{изот}} = \frac{a_{\infty \text{ж}}}{\sqrt{(1 - \varphi_g)^2 + \varphi_g (1 - \varphi_g) \rho_{ж} a_{\infty \text{ж}}^2 / \rho_g}} \quad (5.70)$$

Если изменение плотности газа в волне происходит по адиабатическому закону, т. е. не успевает произойти теплообмен между фазами, то адиабатная скорость распространения малых возмущений

$$a_{\infty \text{ад}} = \frac{a_{\infty \text{ж}}}{\sqrt{(1 - \varphi_g)^2 - \frac{\varphi_g (1 - \varphi_g) \rho_{ж} a_{\infty \text{ж}}^2}{k p}}}, \quad (5.71)$$

где  $k$  — показатель адиабаты процесса.

На рис. 5.9 приведены результаты расчета по формулам (5.70) и (5.71) зависимости изотермической и адиабатной скоростей распространения малых возмущений от относительной объемной концентрации газа для воздушно-водяной смеси. На рисунке 5.9 приведены экспериментальные данные И. Ж. Кэмпбелла и А. С. Питчера. Скорость распространения возмущения в двухфазном потоке оказывается значительно ниже, чем в каждой из фаз в отдельности. Наличие в потоке воды при нормальных условиях газовой фазы с относительной объемной концентрацией 10% снижает скорость распространения возмущения до 118 м/с, т. е. до значения, примерно в 3 раза меньшего, чем в газовой фазе, и более, чем в 10 раз меньшего, чем в жидкости. Скорость распространения возмущения в сплошных средах определяется соотношением упругих и инерционных свойств среды. В двухфазных газожидкостных средах сжимаемость среды почти целиком определяется сжимаемостью газа, а инерционные свойства вследствие преобладающего влияния на плотность смеси жидкости определяются жидкостью.

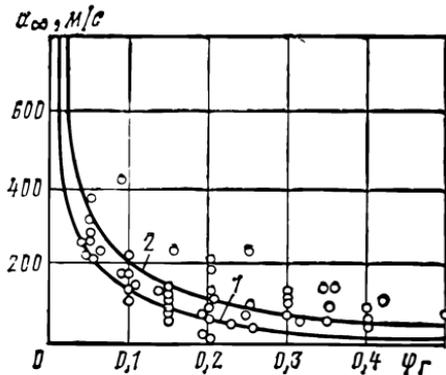


Рис. 5.9. Графики изменения скорости распространения малых возмущений в воздушно-водяном потоке ( $p = 0,98 \times 10^5$  Па): 1 — изотермической; 2 — адиабатной;  $\circ$  — экспериментальные точки

Указанная особенность двухфазной газожидкостной среды и является причиной снижения скорости распространения малых возмущений в газожидкостных средах по сравнению с этой величиной в каждой из фаз в отдельности. Степень этого снижения, в первую очередь, зависит от относительной объемной концентрации газа и уровня давления в потоке. С увеличением давления в потоке при неизменной концентрации растворенного в жидкости газа скорость распространения возмущений увеличивается как за счет сокращения относительной объемной концентрации газа, так и вследствие увеличения его плотности.

Анализ выражения (5.69) для скорости распространения малых возмущений показывает, что указанная величина может зависеть от особенностей протекания процессов обмена количеством движения, теплотой и массой между фазами; возникновения при колебаниях давления радиального движения поверхности газовых пузырьков и связанного с этим движения излучения акустических волн в жидкости; влияния на эти процессы поверхностного натяжения, характеристик топлива и растворенного газа. Протекание указанных процессов зависит от степени дисперсности газа в смеси, структуры потока, характеристик возникающего возмущения (его амплитуды, длины волны и знака). Применительно к условиям течения насыщенного газом топлива в трубопроводах системы питания проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

При решении задачи определения параметров в трубопроводах системы питания при запуске двигателя, сопровождающемся возникновением в системе питания резких понижений давления и гидроударов, скорость распространения возмущения может быть определена исходя из следующих допущений. Процесс теплообмена между фазами в волне возмущения не успевает завершиться, и изменение плотности газа близко к адиабатному. С протеканием процесса теплообмена, как уже отмечалось, неразрывно связан также процесс обмена массой пара.

Многочисленные экспериментальные данные по исследованию пароводяных потоков показывают, что в диапазоне частот 200...10 000 Гц за время распространения звуковой волны фазовый переход произойти не успевает, что подтверждает также и незавершенность теплообмена при таких возмущениях. С учетом того что процесс газобыделения протекает значительно медленнее процесса парообразования, допустимым также является пренебрежение им для определения скорости распространения малых возмущений [условие  $\frac{d\sigma}{d\rho} = 0$  для решения уравнения (5.69)].

При резких возмущениях особое значение приобретает обмен количеством движения между фазами. При подходе фронта потока к шнеку в фазе гидроудара происходит торможение потока и вследствие большего снижения скорости газа уменьшение

скольжения  $\gamma = v_r/v_{ж}$ , что увеличивает относительную объемную концентрацию газа и снижает скорость распространения малых возмущений. При понижении давления и разгоне потока в процессе заполнения полостей двигателя при запуске происходит обратная картина. Анализ экспериментальных данных показал, что степень увеличения скорости распространения возмущения вследствие увеличения скольжения является линейной функцией относительной объемной концентрации газа. Для условий проведенных экспериментальных исследований полученная зависимость имеет вид

$$a_{\infty}/a_{\infty \text{ изот}} = 1,035 + 1,671\varphi.$$

При низкочастотных колебаниях давления ( $f \leq 50$  Гц) в трубопроводах системы питания теплообмен и парообразование успевают завершиться полностью, что позволяет применить для анализа изотермической скорости распространения малых возмущений формулу (5.70). При этом парциальное давление пара может быть принято равным давлению насыщенного пара  $p_s$  при температуре жидкости, т. е. парциальное давление газа в выражении (5.70) определяется зависимостью  $p_r = p - p_s + 2\sigma/R$ .

Приведенные результаты справедливы, когда частота звуковой волны достаточно мала, чтобы можно было принять равными значения давлений в газопаровой и жидкой фазах. При больших частотах расширение и сжатие среды происходит при радиальном движении вблизи каждого пузырька, что приводит к зависимости скорости распространения от частоты возмущения. При изменении радиуса пузырька могут также возникнуть диссипативные эффекты вследствие процесса теплообмена между пузырьком и окружающей его жидкостью, а также неоднородности температуры газа по объему пузырька. Диссипативные эффекты вследствие процесса теплообмена оказываются существенными при частотах и средних радиусах пузырьков, определяемых неравенством

$$2 < 2R \sqrt{\frac{b}{2\pi\chi_r}} < 12,$$

где  $\chi_r$  — температуропроводность газа.

Влияние вязкости и сжимаемости жидкости при радиальном движении поверхности сказывается при частотах, близких к собственной частоте колебаний пузырьков

$$f = \frac{2\pi}{R} \left( \frac{3\rho}{\rho_{ж}} + \frac{4\sigma}{R\rho_{ж}} \right)^{1/2}.$$

Выражение (5.69) при отсутствии газа ( $\varphi_r = 0$ ) переходит в известную формулу Жуковского для скорости распространения малых возмущений в жидкости с учетом упругости питающего трубопровода:

$$a_{\text{ж}} = \frac{a_{\infty\text{ж}}}{\sqrt{1 + Kd/(E\delta)}}, \quad (5.72)$$

где  $K$  — объемный модуль упругости жидкости.

Однако проведенные экспериментальные исследования показали, что при работе системы питания на насыщенных газом жидкостях скорость распространения малых возмущений оказывается ниже рассчитанной по формуле (5.72) даже в том случае, когда уровень давления в системе при распространении возмущения оказывается выше значения, соответствующего равновесной концентрации. При этом деаэрирование рабочего тела при выдержке системы под вакуумом обеспечивает получение близких к рассчитанным по формуле (5.72) экспериментальных значений скорости распространения малых возмущений, что позволяет исключить влияние инерции стенок и эллипсности сечения трубопровода. Особенно заметным было снижение скорости распространения малых возмущений при испытаниях систем питания с относительно небольшими диаметрами питающих трубопроводов (около 20 мм). Причиной отмеченного снижения скорости распространения малых возмущений является наличие кавитационных «зародышей» в виде микрополостей газа, образованных на поверхности трубопровода силами поверхностного натяжения жидкости при заправке системы питания.

При заполнении системы питания топливом поверхностное натяжение несмачивающей жидкости обеспечивает запираение и существование газа в микропоре вследствие разности давлений в жидкости и в газе на величину, равную  $2\sigma/r$ , где  $r$  — радиус кривизны мениска;  $\sigma$  — поверхностное натяжение. При хранении системы питания до запуска под действием разности концентраций, равной  $2\sigma\kappa/r$ , где  $\kappa$  — коэффициент растворимости Генри, возникает процесс молекулярной диффузии газа из жидкости в полость, который будет продолжаться до тех пор, пока будет существовать кривизна поверхности раздела. Максимальное значение массы газа, находящегося в микропоре, составит величину  $c_{\infty}W_0/(\kappa BT)$ , где  $c_{\infty}$  — концентрация растворенного в жидкости газа;  $W_0$  — начальный объем газа в единичной микропоре;  $B$  — газовая постоянная;  $T$  — температура жидкости.

При повышении давления в системе питания перед запуском изменение объема газа  $W_r$ , находящегося в микропоре, может быть определено при условии изотермического изменения газовой фазы по формуле

$$W_r = W_0 c_{\infty} / (\kappa p_r). \quad (5.73)$$

Наличие механизма стабилизации постоянных газовых включений на поверхности трубопровода подтверждается визуальными наблюдениями и результатами экспериментов по измерению скорости распространения малых возмущений. При равномерном распределении микропор по поверхности трубопровода от-

носительная объемная концентрация газа, находящегося на участке трубопровода диаметром  $d$  и длиной  $\Delta X$ , с учетом формулы (5.73)

$$\varphi_0 = \frac{4\pi n \Delta X}{\pi d^2 \Delta X} W_0 \frac{c_\infty}{\alpha_f \rho_f} = \frac{k_f c_\infty}{d \alpha_f \rho_f}, \quad (5.74)$$

где  $n$  — число микропор на единице поверхности трубопровода;  $k_f$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий объем газа, приходящийся на единицу поверхности и имеющий размерность длины.

По экспериментальным значениям скорости распространения малых возмущений была получена зависимость относительной объемной концентрации газа в трубопроводах системы питания от диаметра трубопровода питания, известная в литературе под наименованием «начальной пустотности трубопровода».

На рис. 5.10 приведен график изменения начальной относительной объемной концентрации  $\varphi_0 \alpha_f \rho_f / c_\infty$  газа в трубопроводе, полученный при испытаниях систем питания с различными внутренними диаметрами трубопроводов (12...180 мм) на воде и азотном тетраоксиде, насыщенном воздухом и азотом до максимальных значений равновесных концентраций (до 0,8 кг/м<sup>3</sup>). Полученные экспериментальные значения достаточно хорошо аппроксимируются зависимостью (5.74) при значении  $k_f = 10^{-5}$  м.

**Модель кинетики фазовых превращений, полная система уравнений.** Рассмотренные основные характеристики двухфазного потока в значительной степени определяются относительной концентрацией газа в потоке. Процесс образования двухфазного газожидкостного потока из потока однофазной капельной жидкости, насыщенной газом, в условиях течения по трубопроводам системы питания носит релаксационный характер. При этом на время установления равновесной концентрации газа существенное влияние оказывает волновой характер изменения давления в трубопроводах, из-за которого требуется учет кинетики процессов выделения и растворения газа.

В соответствии с принятой физической моделью образования двухфазного газожидкостного потока как процесса диффузии газа в микропоры трубопровода, образованные силами поверхностного натяжения жидкости при заправке системы питания, роста вытесненных в поток с поверхности

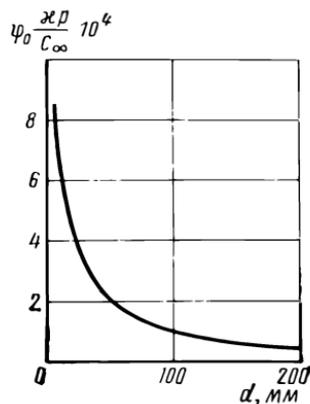


Рис. 5.10. График зависимости начальной относительной объемной концентрации газа в трубопроводе от его диаметра

трубопровода динамическим напором газовых пузырьков до размеров, определяемых из условия дробления турбулентными пульсациями, выражение для скорости изменения массы газа в единице объема смеси  $I$  (скорости фазового перехода) может быть представлено в виде

$$I = \frac{1}{F\Delta X} \frac{d}{dt} (z m_r + z_* m_{*r}), \quad (5.75)$$

где  $z$ ,  $m_r$  — число пузырьков и масса газа в единичном пузырьке на поверхности трубопровода длиной  $\Delta x$  и площадью сечения  $F$ ;  $z_*$ ,  $m_{*r}$  — число пузырьков и масса единичного пузырька в выделенном объеме трубопровода  $F\Delta x$ . Первый член в скобках выражения (5.75) учитывает массу газа, находящегося на поверхности выделенного участка трубопровода, а второй характеризует массу газа, находящегося в потоке. Распределение числа активных микропор можно считать равновероятным для всех точек поверхности. Это позволяет принять для определения числа пузырьков, находящихся на выделенном участке, выражение

$$z = \frac{k_I \pi d}{R_d^2} \Delta x, \quad (5.76)$$

где  $R_d$  — предельный размер пузырька;  $k_I$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий долю поверхности трубопровода, занятую растущими пузырьками газа.

Число пузырьков, отнесенное к выделенному объему, определяется

$$z/(F\Delta X) = k_T/(R_d^2 d),$$

где  $k_T \approx 4k_I$  — коэффициент, определенный по результатам визуальных наблюдений и соизмеримый с единицей.

Число пузырьков газа, находящихся в потоке на  $i$ -м участке трубопровода, и их размер в общем случае зависят от процесса их развития с момента отрыва от поверхности трубопровода на участке  $n$ , предшествующем  $i$ -му выделенному участку. В общем случае это число определяется соотношением

$$I_i = \frac{k_T}{R_d^2 d} \frac{d m_{r,i}}{dt} + \frac{1}{F\Delta x} \sum_{n=1}^i \frac{d}{dt} (z_n m_{r,n}). \quad (5.77)$$

Решение уравнения (5.77) для неустановившегося потока, а тем более для волновых процессов в трубопроводах системы питания не представляется возможным. Упрощение этого выражения, позволяющее его решить, может быть достигнуто с помощью применяемой обычно при исследованиях дисперсных потоков замены реального полидисперсного потока эквивалентным монодисперсным, в котором все пузырьки имеют одинаковый ра-

диус  $R_*$ , а изменение площади межфазной поверхности происходит из-за изменения числа пузырьков. В этом случае

$$z_* = \frac{F \Delta x}{\frac{4}{3} \pi R_*^3 \rho_r} \left( \bar{\rho}_r - \frac{z m_r}{F \Delta x} \right); \quad (5.78)$$

$$\frac{dz_*}{dt} = \frac{z_*}{m_*} \frac{dm_*}{dt}, \quad (5.79)$$

где  $\bar{\rho}_r$  — парциальная плотность газа (масса газа в единице объема смеси).

С учетом полученных соотношений выражение для скорости фазового перехода, связанного с выделением растворенного в жидкости газа или его растворением, может быть получено из уравнения (5.75) при переходе к пределам:

$$I = \frac{k_T}{R_d^2 d} \frac{dm_r}{dt} + \frac{1}{\frac{4}{3} \pi R_*^3 \rho_r} \left( \bar{\rho}_r - \frac{k_T}{R_d^2 d} m_r \right) \frac{dm_*}{dt}. \quad (5.80)$$

Для уравнения (5.80) приращение массы газа  $dm_r$  и масса газа  $m_r$  в пузырьке, находящемся на поверхности трубопровода, определяются по зависимости (5.47) до момента, когда радиус полусферического пузырька не достигнет предельного значения, определяемого выражением (5.46), т. е. в процессе интегрирования проверяется условие

$$R = \left( \frac{m}{\frac{4}{3} \pi \rho_r} \right)^{1/3} \leq R_d,$$

при нарушении которого со следующего шага интегрирования принимается  $R = R_0$ .

Концентрация растворенного в жидкости газа определяется с учетом массы выделившегося газа по формуле

$$c_\infty = c_{\infty 0} - \rho_r \varphi_r / (1 - \varphi_r), \quad (5.81)$$

где  $c_{\infty 0}$  — начальное значение концентрации растворенного в топливе газа, определяемое условиями эксплуатации.

Эквивалентный радиус пузырька для дисперсного турбулентного потока может быть определен с учетом нормально-логарифмического закона распределения по формуле

$$R_* = \sqrt{R_{\min} R_{\max}}.$$

Минимальный радиус в потоке связан с предельным значением радиуса пузырька на стенке очевидным выражением

$$R_{\min} = 2^{1/3} R_d.$$

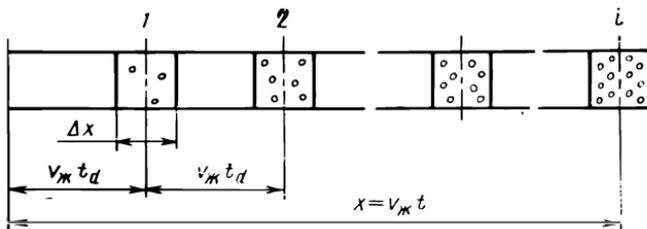


Рис. 5.11. Схема кинетики газовыделения

С учетом выражения (5.76) получаем

$$R_{\text{мин}} \approx 0,5 \frac{\sigma}{\rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}}^2 \lambda_{\text{с}}}.$$

Предельный размер пузырька в турбулентном потоке ( $R_{\text{max}}$ ) определяется выражением (5.54). Приращение массы газа в пузырьке, находящемся в потоке, в широком диапазоне изменения чисел  $Re$  (до 100) с учетом стесненности потока определяется относительной скоростью и согласно выражению (5.64) может быть представлено так:

$$\frac{dm_*}{dt} = 5,72 D^{1/2} R_*^{2/3} (c_{\infty} - c_0) [0,5 v_{\text{г.ж}} \delta(\varphi_{\text{г}})]^{1/2}. \quad (5.82)$$

Для расчета относительной объемной концентрации газа при установившемся режиме течения топлива в трубопроводе системы питания возможно некоторое упрощение уравнения кинетики фазовых переходов (5.80) путем введения времени  $t_d$  увеличения радиуса пузырьков (рис. 5.11) на участке поверхности трубопровода  $\Delta x$  до  $R_d$  и допущения, что за время  $t = x/v_{\text{ж}}$  пребывания жидкости в трубопроводе длиной  $x$  число участков  $n = t/t_d$ , а  $z_* = z R_d^3 / (2 R_*^3)$ , где  $n = 1, 2, \dots$ . С учетом выражения (4.107) получим

$$\Delta \varphi_{\text{г}} = \frac{2}{3} \pi \frac{k_{\text{г}} R_d}{d} \frac{t}{t_d} \left[ 1 + \frac{3}{4\pi R_*^3 \rho_{\text{г}}} \frac{dm_*}{dt} (t - t_d) \right]. \quad (5.83)$$

Выражение для времени увеличения газового пузырька на поверхности трубопровода может быть получено при условии постоянства давления интегрированием зависимости (5.47):

$$t_d \approx \frac{10 \sigma^2 \rho_{\text{г}} v^{0,47}}{v_{\text{ж}}^{4,8} \lambda^2 D^{2/3} (c_{\infty} - c_0) \rho_{\text{ж}}^2}.$$

Для стационарного потока относительную скорость газового пузырька можно получить из уравнения движения (5.33) при пренебрежении радиальным движением:

$$v_{\text{г.ж}} = \left[ \frac{4 R_{\text{ж}}}{3 c_{\mu}} \left( \lambda \frac{v_{\text{ж}}^2}{d} - 2g \right) \right]^{1/2},$$

Здесь  $c_{\mu}$  определяется режимом обтекания.

Выражение кинетики газовыделения (5.83) представляет собой экспоненциальную зависимость относительной объемной концентрации  $\varphi_r$  от времени пребывания жидкости в трубопроводе  $t$ . Из этого выражения следует, что скорость газовыделения зависит от начального значения объемной концентрации, которое и определяет начальную площадь поверхности массообмена. Анализ уравнения кинетики газовыделения позволяет оценить влияние на процесс газовыделения основных конструктивных элементов системы питания, режимных и эксплуатационных факторов, а также характеристик топлива и насыщенного газа.

На рис. 5.12 приведены результаты расчета степени равновесности процесса, т. е. отношения текущего значения относительной объемной концентрации к равновесной концентрации  $\varphi_r$  газа в стационарном потоке для различных условий течения. Как и во всяком релаксационном процессе, относительная объемная концентрация в процессе газовыделения зависит от возмущения, которое для этого процесса определяется уровнем давления в потоке и его снижением ниже равновесного, определяемого концентрацией растворенного в жидкости газа. Равновесная относительная объемная концентрация газа может быть получена из зависимости Генри

$$\varphi_{r,p} = (c_{\infty} - p_{r,x}) / (c_{\infty} - p_{r,x} + p_r).$$

Кроме степени пересыщения  $(c_{\infty} - p_{r,x}) / p_r$  на скорость газовыделения существенное влияние оказывает абсолютная величина диаметра трубопровода, характеризующая собой отношение объема трубопровода к площади его поверхности, а следовательно, и число «зародышей» газа в единице объема. С увеличением диаметра трубопровода (кривые 1 и 2 на рис. 5.12, а) скорость газообразования уменьшается. Увеличение скорости тече-

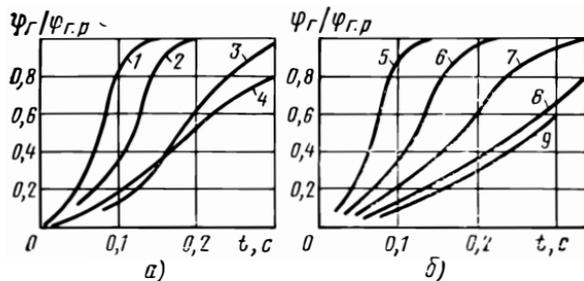


Рис. 5.12. Графики влияния абсолютного диаметра трубопровода, скорости течения жидкости, степени пересыщения жидкости (а) и термодинамических характеристик топлива (б) на степень равновесности процесса:

1 —  $\Delta c/p_r = 2$ ,  $d = 0,07$  м,  $v_{ж} = 5$  м/с; 2 —  $\Delta c/p_r = 2$ ,  $d = 0,14$  м,  $v_{ж} = 5$  м/с; 3 —  $\Delta c/p_r = 2$ ,  $d = 0,07$  м,  $v_{ж} = 2,6$  м/с; 4 —  $\Delta c/p_r = 0,2$ ,  $d = 0,07$  м,  $v_{ж} = 5$  м/с; 5 —  $D = 5 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с,  $\sigma = 0,026$  Н/м,  $v = 0,31 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho_{ж} = 1400$  кг/м<sup>3</sup>; 6 —  $D = 2 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с,  $\sigma = 0,026$  Н/м,  $v = 0,31 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho_{ж} = 1400$  кг/м<sup>3</sup>; 7 —  $D = 2 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с,  $\sigma = 0,072$  Н/м,  $v = 0,31 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho_{ж} = 1400$  кг/м<sup>3</sup>; 8 —  $D = 2 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho_{ж} = 0,072$  Н/м,  $v = 1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho_{ж} = 1400$  кг/м<sup>3</sup>; 9 —  $D = 2 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с,  $\sigma = 0,72$  Н/м,  $v = 1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho_{ж} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>

ния уменьшает время пребывания топлива на участке пониженного давления, однако значительно интенсифицирует массообмен и увеличивает число растущих пузырьков на поверхности, что при заданном расходе топлива приводит к небольшому увеличению относительной концентрации газа при одной и той же длине участка трубопровода питания при работе на насыщенном газом топливе в сторону больших значений. С увеличением диаметра трубопровода  $d$  происходит уменьшение  $\varphi_r$  как непосредственно из-за увеличения  $d$ , так и вследствие снижения скорости течения.

Изменение осевых перегрузок при полете может различным образом сказаться на процессе газовыделения вследствие различного влияния на относительную скорость газа. При больших гидравлических потерях давления по длине вертикального трубопровода системы питания увеличение осевой перегрузки может привести к увеличению скорости газовыделения, т. е. при прочих равных условиях влияние осевого ускорения будет зависеть от абсолютного значения разности  $\lambda v_{ж}^2/d - 2g$ . Следует при этом отметить, что положительное значение относительной скорости газа ( $v_r > v_{ж}$ ) при одинаковой массовой концентрации соответствует меньшей относительной объемной концентрации газа.

Влияние температуры топлива сказывается на процессе газовыделения через степень пересыщения потока  $(c_{\infty} - p_{ж})/\rho_r$ . При одинаковом давлении в потоке парциальное давление газа в пузырьке и его плотность с ростом температуры снижаются, что приводит к увеличению степени пересыщения и газосодержания. Однако на указанный процесс, особенно при больших концентрациях, будут оказывать влияние такие термодинамические характеристики, как теплота испарения  $H$ , теплоемкость жидкости  $C_{ж}$  и газовая постоянная пара.

Вследствие испарения жидкости, сопровождающегося увеличением размеров газовых пузырьков, происходит снижение температуры жидкости  $T_{ж}$  на величину

$$T_{\infty ж} - T_{ж} = \frac{\varphi_r}{1 - \varphi_r} \frac{H \rho_r}{c_{ж} \rho_{ж}},$$

где  $T_{\infty ж}$  — начальная температура жидкости.

Влияние других термодинамических характеристик топлива и насыщающего газа проявляется следующим образом. Увеличение поверхностного натяжения и снижение плотности жидкости приводит к увеличению размеров газовых пузырьков как на поверхности трубопровода, так и в потоке, что уменьшает число пузырьков в единице объема и, следовательно, площадь поверхности массообмена. Увеличение кинематической вязкости снижает массообмен пузырька, находящегося на поверхности трубопровода, с потоком жидкости вследствие уменьшения градиента

концентрации и увеличения размеров диффузионного слоя у стенки.

Термодинамические характеристики жидкости могут существенно изменить протекание процесса газовой выделения в потоке. Сравнение процесса десорбции газа в азотном тетраоксиде и воде при одинаковом пересыщении потока (соответственно кривые 6 и 9 на рис. 5.12, б) показывает, что вследствие больших значений поверхностного натяжения, вязкости и малой плотности интенсивность образования двухфазного потока в воде намного слабее, чем в азотном тетраоксиде. Это обстоятельство следует иметь в виду при модельных гидравлических проливках системы питания.

Из термодинамических характеристик газа, растворенного в жидкости, наиболее сильное влияние на скорость изменения относительной объемной концентрации оказывает растворимость газа и универсальная газовая постоянная, изменяющие при прочих равных условиях ( $c_\infty$  и  $p_r$ ) степень пересыщения потока. Увеличение газовой постоянной, снижающее плотность газа, приводит к некоторому незначительному увеличению среднего радиуса пузырька в потоке и уменьшению площади его поверхности и интенсивности массообмена, однако обратное влияние, сказывающееся на степени пересыщения, значительно сильнее.

На рис. 5.13 приведены результаты расчета относительной объемной концентрации при снижении давления в потоке по уровню, соответствующему равновесной концентрации. Результаты показывают, что учет неравновесности процесса газовой выделения снижает относительную объемную концентрацию, которая при реальных временах пребывания топлива в условиях пониженного давления (0,1...0,2 с) составляет лишь 20...30% равновесного значения.

В соответствии с изложенными выше допущениями и упрощениями математическая модель одномерного неустановившегося движения дисперсной гомогенной газожидкостной смеси в гидравлической системе питания ДУ строится на основе уравнений сохранения массы и количества движения, записанных для каждой составляющей потока, а также уравнений тепло-массообмена на границе раздела фаз. В итоге для трубопровода постоянной площади сечения имеем

$$\frac{\partial \bar{p}_ж}{\partial t} + \frac{\partial \bar{p}_ж v_ж}{\partial x} = -I; \quad (5.84)$$

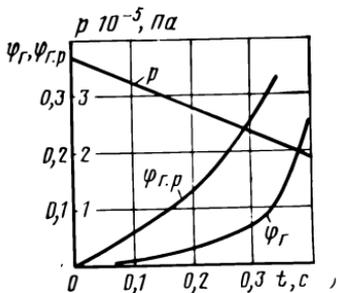


Рис. 5.13. Графики влияния неравновесности процесса на изменение объемной концентрации

$$\frac{\partial \bar{\rho}_r}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho}_r}{\partial x} v_r = I; \quad (5.85)$$

$$\frac{1}{a^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho}_{*k} v_{*k} + \bar{\rho}_r v_r) = 0; \quad (5.86)$$

$$\frac{\partial v_{*k}}{\partial t} + v_{*k} \frac{\partial v_{*k}}{\partial x} = \frac{1}{\rho_{*k}} \left\{ \bar{\rho}_{*k} g - (1 - \varphi_r) \left[ \frac{\partial p}{\partial x} + \lambda_c \frac{\rho_{*k} v_{*k}^2}{2d} + I (v_r - v_{*k}) \right] \right\}; \quad (5.87)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial x} = \frac{1}{\rho_r} \left\{ \bar{\rho}_r g - \varphi \left[ \lambda_c \frac{\rho_{*k} v_{*k}^2}{2d} + I (v_r - v_{*k}) \right] \right\}; \quad (5.88)$$

$$I = \frac{k_T}{R_d^2} \frac{dm_r}{dt} + \frac{1}{\frac{4}{3} \pi R_*^3 \rho_r} \left( \bar{\rho}_r - \frac{k_T}{R_d^2 d} m_r \right) \frac{dm_{*r}}{dt}; \quad (5.89)$$

$$4\pi R \lambda_r (T_{*k} - T) Nu + (c_{pr} T - c_{vr} T - H_r) \frac{d(m_{*r} + m_r)}{dt} + (c_{pn} T - c_{vn} T - H_n) \frac{dm_n}{dt} = (m_r c_{vr} + m_{*r} c_{vr} + m_n c_{vn}) \frac{dT}{dt}; \quad (5.90)$$

$$\frac{dm_r}{dt} = 0,072 (c_\infty - c_0) R_d \frac{D^{0,66} v_{*k}^{0,8} d^{0,8}}{v^{0,47}}; \quad (5.91)$$

$$\frac{dm_{*r}}{dt} = 5,72 (c_\infty - c_0) R_*^{1,5} D^{0,5} [0,5 v_{r,*k} \vartheta(\varphi_r)]^{0,5}; \quad (5.92)$$

$$\frac{dm_n}{dt} = \frac{\alpha (p_s - p_n)}{\sqrt{2\pi B_r T_s}} 4\pi R_*^2; \quad (5.93)$$

$$\frac{\partial v_{r,*k}}{\partial t} = 2 \frac{\partial v_{*k}}{\partial t} + \lambda_c \frac{v_{*k}^2}{d} - \frac{3}{4} c_\mu \frac{v_{r,*k}^2}{R_*} - 2g; \quad (5.94)$$

$$a = \frac{a_{\infty k}}{\sqrt{(1 - \varphi_r)^2 + \frac{\varphi_r (1 - \varphi_r) \rho_{*k} a_{\infty k}^2}{k p} + \frac{K}{E} \frac{d}{\delta}}}; \quad (5.95)$$

$$\varphi_r = \frac{\varepsilon_r \rho_{*k}}{\varepsilon_r \rho_{*k} + (1 - \varepsilon_r) \rho_r v_r / v_{*k}}; \quad (5.96)$$

$$\varepsilon_r = (m_r + m_{*r}) / (m_r + m_{*r} + m_n); \quad (5.97)$$

$$c_\infty = c_0 - \rho_r \frac{\varphi_r}{1 - \varphi_r}; \quad c_0 = \alpha p_r; \quad (5.98)$$

$$p_r = p \frac{(m_{*r} + m_r) B_r}{(m_{*r} + m_r) B_r + m_n B_n}; \quad (5.99)$$

$$\rho_n = \rho \frac{m_n B_n}{(m_{*r} + m_r) B_r + m_n B_n}, \quad (5.100)$$

$$\rho_r = \rho_r / (B_r T); \quad \rho_n = \rho_n / (B_n T); \quad \bar{\rho}_r = \rho_r \varphi_r; \quad \bar{\rho}_j = \rho_j (1 - \varphi_r);$$

$$R_d = 0,5\sigma / (\lambda_c \rho_j v_{j2}^2);$$

$$R_* = \sqrt{R_{\min} R_{\max}}; \quad R_{\min} = \frac{0,5\sigma}{\lambda_c \rho_j v_{r,j}^2};$$

$$R_{\max} = \frac{0,53\sigma^{0,6} d^{0,4}}{v_{r,j}^{1,2} \rho_r^{0,2} \rho_j^{0,4} \lambda_c^{0,6}}.$$

Решение системы уравнений (5.84), ..., (5.94) при определенных краевых условиях дает картину протекания переходных процессов в трубопроводах системы питания ДУ. В основном эта математическая модель используется при исследовании характеристик, определяющих запуск ДУ, параметры процессов массообмена которой и особенно неравновесность этих процессов могут оказывать весьма существенное влияние на входные давления, гидроудары и понижения давлений, время заполнения коммуникаций двигателя, собственные частоты колебаний системы питания и т. д.

При этом начальные условия определяют конкретные значения параметров и их взаимосвязь до начала процесса:

$$t=0; \quad f=f(x).$$

Здесь под заданной функцией  $f(x)$  подразумевается совокупность параметров:  $\rho, v, v_r, \rho_r, \rho_r$  и т. д. Граничные условия определяют, как правило, энергетическое и силовое взаимодействие движущегося потока с агрегатами и системами на концах гидравлических трактов. Так, для системы питания, изображенной на рис. 5.14, в месте стыка бака с трубопроводом питания в случае предположения неизменности бакового давления  $\rho_6$  и отсутствия там свободных пузырьков газа граничные условия могут быть записаны в следующем виде:

$$x=0; \quad t > 0;$$

$$\rho = \rho_6 + \rho_j g h - \frac{1 + \xi}{2} \rho_j v_j^2 - \rho_j \frac{\partial v_j}{\partial t}; \quad (5.101)$$

$$\rho_n = \rho_r = 0; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial v_j}{\partial x} = 0; \quad \varphi_r = 0,$$

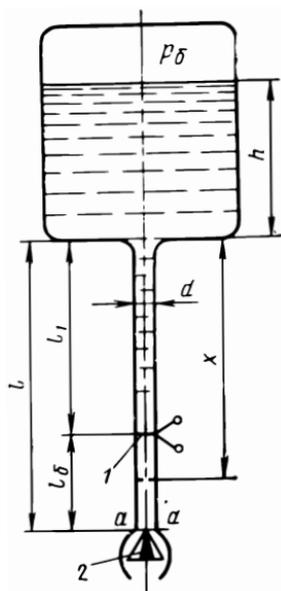


Рис. 5.14. Схема системы питания:  
1 — пусковой клапан, 2 — насос

где  $\xi$  — коэффициент потерь давления на входе в расходный трубопровод.

При движении свободного фронта жидкости от пускового клапана до агрегатов двигателя (насоса, камеры сгорания, дроссельной шайбы) в простейшем случае граничное условие можно записать в виде

$$x = l_1; t > 0; p = p_n = p_r = p_s; \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad (5.102)$$

а после контакта фронта жидкости с местным сопротивлением в случае пренебрежения расходом газа и принятия квазистационарного условия течения в агрегате — в виде

$$x = l; t > t_{\text{зап}};$$

$$v_{\text{ж}} = \frac{\mu_{\text{ж}} F_{\text{ж}}}{F} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p - p_1)}, \quad (5.103)$$

где  $t_{\text{зап}}$  — время заполнения участка трубопровода от пускового клапана до местного сопротивления;  $\mu_{\text{ж}}$ ,  $F_{\text{ж}}$  — коэффициент расхода и площадь проходного сечения местного сопротивления;  $F$  — площадь проходного сечения трубопровода;  $p_1$  — давление за местным сопротивлением.

В случае необходимости учета фазовых превращений при течении через местное сопротивление граничные условия существенно усложняются и принимают вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{p}_{\text{ж}}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{p}_{\text{ж}}}{\partial x} v_{\text{ж}} &= I; \\ \frac{\partial \bar{p}_{\text{г}}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{p}_{\text{г}}}{\partial x} v_{\text{г}} &= -I; \\ \frac{\partial p}{\partial t} + a^2 \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho}_{\text{ж}} v_{\text{ж}} + \bar{\rho}_{\text{г}} v_{\text{г}}) &= 0; \end{aligned} \quad (5.104)$$

$$v_{\text{ж}} = \frac{\mu_{\text{ж}} F_{\text{ж}}}{F} \sqrt{\frac{2}{\rho_{\text{ж}}} (p - p_1)};$$

$$T = T_0.$$

Причем уравнения (5.104) используются совместно с зависимостями (5.89), (5.91), ..., (5.100), определяющими параметры межфазовых взаимодействий. Система уравнений (5.84), ..., (5.94), описывающая движение двухфазной среды, представляет собой систему квазилинейных уравнений в частных производных, явное представление решений которых в виде рядов или интегралов, даже при однородных краевых условиях, практически невозможно. Одним из наиболее распространенных методов интегрирования систем уравнений такого типа является метод ха-

рактических, заключающийся в сведении дифференциальных уравнений в частных производных к эквивалентной системе обыкновенных дифференциальных уравнений, решаемых разностным методом. Однако сложность машинной логики при реализации метода характеристик на ЭВМ, особенно когда число направлений характеристик велико, и невозможность его применения при отсутствии характеристических многообразий, когда режим движения среды в трубопроводе установившийся, являются серьезным препятствием его применения для решения системы уравнений (5.84), ..., (5.94).

В последнее время для получения приближенного решения дифференциальных уравнений широко применяются методы конечных разностей или методы сеток, которые весьма универсальны и позволяют вычислять решение с заданной степенью точности.

Существо метода конечных разностей состоит в том, что в рассматриваемой области плоскости  $x, t$  вместо непрерывной среды, состояние которой описывается функциями непрерывного аргумента, вводится ее разностный аналог. При применении метода конечных разностей область непрерывного изменения аргументов  $x$  и  $t$  заменяется дискретным множеством точек, являющимся областью определения функций дискретного аргумента. Такое множество называется разностной сеткой с координатами  $x = i\Delta x, t = j\Delta t$ , где шаги сетки  $\Delta x$  и  $\Delta t$  являются малыми положительными приращениями переменных  $x$  и  $t$ , а  $i = 1, 2, \dots, N, j = 0, 1, 2, \dots, N = l/\Delta x, l$  — длина трубопровода. Соответственно вместо функций непрерывных аргументов  $f(x, t)$  рассматриваются функции дискретных аргументов, определенные в узлах сетки  $(i\Delta x, j\Delta t)$  и называемые сеточными функциями.

Основные конечно-разностные формулы для частных производных, как правило, получают разложением в ряды Тейлора. Полученные в результате разложения и преобразований конечно-разностные уравнения совместно с уравнениями краевых условий дают возможность с помощью ЭВМ проводить расчеты неустановившихся процессов течения газонасыщенной жидкости.

Проверка адекватности разработанных физической и математической моделей реальным процессам в системах питания осуществляется путем сравнения результатов расчетов с данными, полученными на экспериментальной установке для проверки моделей. При этом в расчетную схему, естественно, закладывались исходные параметры моделей. Была проведена целая серия расчетов по оценке влияния растворенного газа на параметры движущейся жидкости.

Результаты расчета изменения давления  $p$ , скорости смеси  $v$  и скорости распространения малых возмущений  $a$  приведены на рис. 5.15, ..., 5.17 для трех случаев течения. Первый случай на рис. 5.15 соответствует неравновесному движению двухфаз-

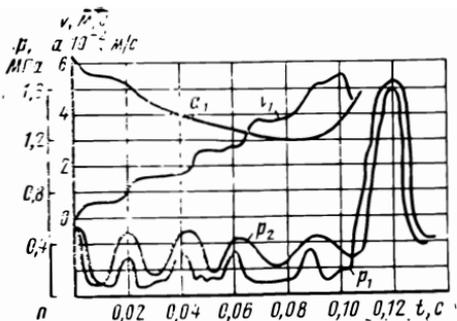


Рис. 5.15. Графики изменения параметров двухфазной среды при заполнении трубопровода с учетом неравновесности процесса массообмена  $c_\infty = 0,5 \text{ кг/м}^3$ ,  $t = 15^\circ\text{C}$

В начальный момент  $t=0$  открывается пусковой клапан, отделяющий газовую среду в трубопроводе  $l_6$  (см. рис. 5.14) от жидкости, находящейся под суммарным давлением в баке  $p_6 = 0,51 \text{ МПа}$ , и жидкая среда приходит в движение с последующим гидроударом в момент подхода к насосу в сечении  $a-a$  (момент  $t=0,10 \dots 0,12 \text{ с}$ ).

Анализ результатов, приведенных на рис. 5.15, ..., 5.17, показывает, что насыщение жидкости газом несколько уменьшает время заполнения трубопровода и скорость жидкости в момент подхода фронта к насосу (сечение  $a-a$ , см. рис. 5.14), что при-

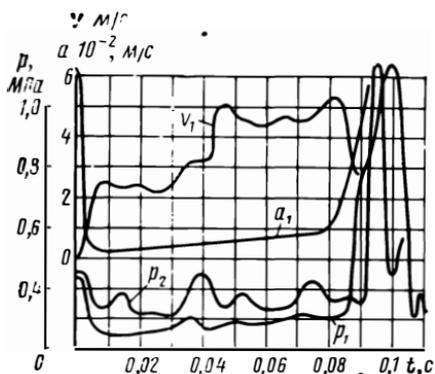


Рис. 5.16. Графики изменения параметров двухфазной среды при заполнении трубопровода и равновесном процессе массообмена ( $c_\infty = 0,5 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho = 1,4 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^3$ ,  $t = 15^\circ\text{C}$ )

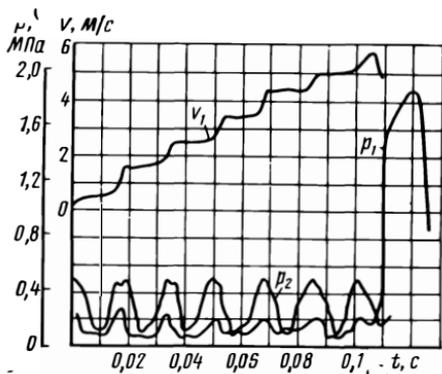


Рис. 5.17. Графики изменения параметров при нестационарном течении однофазной среды ( $c_\infty = 0$ ,  $a = 630 \text{ м/с}$ ,  $l_1 = 5 \text{ м}$ ,  $l_6 = 0,3 \text{ м}$ )

водит к снижению давления при гидроударе и увеличению времени его формирования. При этом, чем сильнее насыщена газом жидкость, тем меньше среднее по длине трубопровода значение скорости распространения малых возмущений к моменту заполнения трубопровода жидкостью.

При проведении экспериментальных работ были поставлены следующие задачи:

1. Подтвердить адекватность математической модели реальным физическим процессам течения газонасыщенной жидкости.

2. Показать, что нестационарные процессы в системах питания с насыщенным газом жидкостями создают условия для выделения растворенного газа и образования газожидкостных потоков.

3. Показать степень влияния свободного газа в потоке на динамические характеристики систем питания.

Экспериментальная установка (рис. 5.18) представляла собой систему питания ЖРД с вертикальным расположением трубопровода питания 19, который заканчивался мембранным пусковым клапаном 25 и трубопроводом 28 с дроссельной шайбой 29, имитирующими заполняемые объемы и гидравлическое сопротивление трактов двигателя. Подача жидкости в систему осуществлялась из емкости 17. Подготовливалась рабочая жидкость (деаэрировалась, насыщалась) в отдельной емкости 38.

Для насыщения жидкости газом методом барботаж использовался установленный внутри емкости 38 коллектор 39, через отверстия в котором при открытии вентиля 41 в заправленную жидкость подавался газ. Заданное давление насыщения в емко-

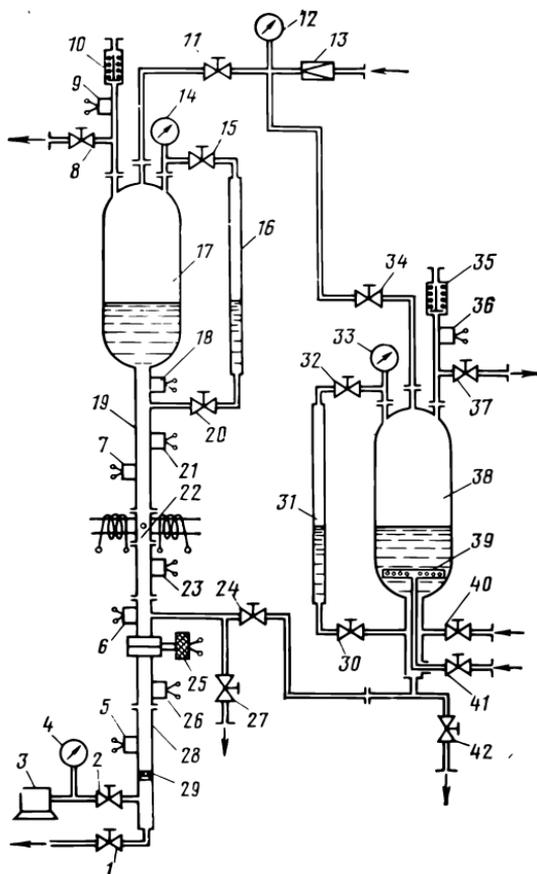


Рис. 5.18. Экспериментальная установка для проверки адекватности математической модели реальному процессу

сти 38 поддерживалось или настройкой предохранительного клапана 35, или регулированием расхода газа с помощью дренажного вентиля 37. Контроль давления производился с помощью манометра 33 и первичного преобразователя 36. Отбор проб жидкости для контроля уровня насыщения осуществлялся через вентиль 42. Емкости 17 и 38 имели объемы по 0,2 м<sup>3</sup>.

Заправка емкости 38 проводилась через запорный вентиль 40. Обычная доза заправки (1/3 емкости) контролировалась уровнемерами 16 и 31, подключенными с помощью вентиля 15, 20, 30, 32. Деаэрация такого объема водопроводной воды занимала около 6 ч, такое же время уходило на насыщение в диапазоне давлений (2...10)10<sup>5</sup> Па. Вообще же стендовые системы позволили обеспечить рабочее давление в системах до 15×10<sup>5</sup> Па.

После подготовки жидкость из емкости 38 передавливалась в емкость 17 и заполнялся трубопровод питания 19. В случае заправки деарированной жидкости сначала на емкости 17 открывался дренажный вентиль 8 и при закрытом вентиле 11 с помощью редуктора 13 через вентиль 34 производился наддув емкости 38 до давления (0,7 ... 1,2)10<sup>5</sup> Па. Затем открывался вентиль 24 и заполнялся трубопровод питания 19 и емкость 17. По заполнении системы вентили 8, 34, 24 закрывались, а вентиль 11 открывался.

В случае заправки в систему насыщенной жидкости емкость 17 с помощью редуктора 13 через вентиль 11 наддувалась до давления, на (0,3 ... 0,5)10<sup>5</sup> Па превышающего давление насыщения. Затем вентиль 11 закрывался и через вентиль 34 производился наддув емкости 38 до давления, превышающего на (0,7... 1,2)10<sup>5</sup> Па давление в емкости 17. Заполнение трубопровода питания 19 и емкости 17 осуществлялось при открытии вентиля 24 и поддержании в емкостях 17 и 38 указанных давлений. Наддув емкости 17 до рабочего давления осуществлялся также с помощью редуктора 13 через вентиль 11. Контроль давления производился манометрами 14, 12. Давление насыщения в емкости поддерживалось настройкой предохранительного клапана 10.

Процедура проведения эксперимента на установке следующая. Подавались команды на включение измерительной аппаратуры и подрыв пиропатрона открытия пускового клапана 25. Время открытия клапана 25 составляло 0,005...0,01 с. Начиналось неустановившееся движение жидкости в трубопроводе 19 и заполнение трубопровода 28 до дроссельной шайбы 29. Стендовые системы позволяли перед началом эксперимента обеспечить в трубопроводе 28 разряжение до 10<sup>-7</sup> Па. Продолжительность эксперимента и регистрация параметров определялась временем заполнения жидкостью трубопровода 28 и затуханием колебаний давления в трубопроводе питания, вызванных гидродударом о дроссельную шайбу 29. Обычно это время не превышало 1 с. Изменение давлений в системе при нестационарных про-

цессах фиксировалось малоинерционными первичными преобразователями давления 5, 6, 7, 9, 18, 21, 23, 26 с регистрацией на шлейфовых осциллографах. Изменение скорости потока на среднем участке системы фиксировалось малоинерционным расходомером 22 индуктивного типа. После окончания эксперимента жидкость сливалась из системы через вентили 1, 27, а трубопроводы просушивались горячим воздухом.

Для обеспечения разрежения в трубопроводе 28 перед испытанием к нему подсоединялся резервуар объемом 0,05 м<sup>3</sup>, который предварительно вакуумировался вакуум-насосом 3 через вентиль 2. Контроль разрежения производился мановакууметром 4.

Эксперименты на установке начинались с определения так называемой опорной скорости звука трубопровода, т. е. скорости распределения упругих возмущений при отсутствии в трубопроводе свободных газовых включений. Для этого производилась предварительная деаэрация рабочей жидкости и вакуумирование трубопровода питания до пускового клапана с целью очистки микропор стенок трубопровода от газа. Вакуумирование трубопровода осуществлялось вакуум-насосами до уровня не ниже  $1 \cdot 10^2$  Па. Трубопровод питания заправлялся деаэрированной жидкостью под вакуумом. После этого для получения большей гарантии отсутствия свободного газа в жидкости и микропорах трубопровод в течение 2...3 ч выдерживался под максимально возможным давлением. Указанная процедура подготовки трубопровода к работе, хотя и весьма трудоемка, но достаточно эффективна.

Затем проводился собственно эксперимент. В емкости 17 устанавливалось заданное рабочее давление, вакуумировалось пространство за пусковым клапаном и подавалась команда на его открытие. Система изменений регистрировала колебания давления в различных точках трубопровода питания при заполнении жидкостью имитатора двигателя и гидравлическом ударе о дроссельную шайбу.

Скорость звука  $a$  в трубопроводе питания определялась по задержкам показаний малоинерционных первичных преобразователей давления, установленных в различных фиксированных точках системы, при прохождении волны разрежения, вызванной открытием пускового клапана, через эти точки ( $a = \Delta L / \Delta t$ , где  $\Delta L$  — расстояние между первичными преобразователями;  $\Delta t$  — задержка в показаниях первичных преобразователей), а также по частоте акустических колебаний давления ( $a = 2l / T$ , где  $l$  — длина трубопровода питания от емкости до пускового клапана;  $T = 1/f$  — период колебаний давления;  $f$  — частота акустических колебаний).

Проведенные эксперименты дают опорные скорости распространения малых возмущений в трубопроводах питания (в мет-

Таблица 5

Способ получения данных	Трубопровод из алюминиевого сплава АМг6, $d=0,05$ м, $\delta=0,003$ м		Трубопровод из стали 12Х18Н9Т, $d=0,012$ м, $\delta=0,003$ м	
	Вода	Этиловый спирт	Вода	Этиловый спирт
Расчетный	1100	1040	1440	1160
Экспериментальный	1050	1000	1380	1100

Примечание. В табл. 5  $d$  — диаметр трубопровода и  $\delta$  — толщина его стенки.

рах в секунду), весьма близкие к значениям, определенным по известной формуле Жуковского (табл. 5).

Следующий цикл экспериментов проводился при заправке систем питания без их предварительного вакуумирования. Заполнение системы производилось жидкостями, насыщенными до равновесных концентраций в диапазоне давлений  $(2...10)10^5$  Па. Насыщение жидкости осуществлялось в отдельной емкости, затем при давлении в установке несколько большем, чем давление насыщения, производилось передавливание жидкости в систему питания и бак. При этом в микротрещинах стенок трубопроводов, заправляемых жидкостью, запирался определенный объем газа. Системы питания выдерживались при давлении хранения, близком к давлению насыщения в течение нескольких часов.

Далее проводились эксперименты, при обработке результатов которых рассматривались два момента: изменение скорости распространения малых возмущений и других параметров системы при изменении степени насыщения жидкости, выдержки после насыщения и рабочего давления в период, когда уровень давления в трубопроводах не падает ниже давления насыщения, и изменение этих же параметров при падении уровня давления ниже давления насыщения.

Одновременно производилась расчетная оценка характеристик неустановившегося движения по описанной ранее математической модели, причем в качестве исходных данных использовались параметры экспериментальной установки. Экспериментальные данные и результаты расчета постоянно сравнивались между собой.

Обработка результатов эксперимента показала, что при заправке системы питания насыщенной газом жидкостью скорость распространения переднего фронта волны разрежения, образовавшегося при открытии пускового клапана, оказывается ниже расчетной, хотя жидкость в системе все время находится под давлением, превышающим давление насыщения. Полученные результаты подтверждают высказанное ранее предположение о том, что при нахождении жидкости в системе питания под дав-

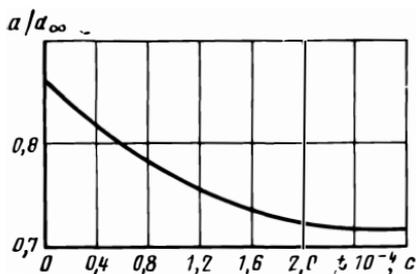


Рис. 5.19. График изменения относительной скорости распространения малых возмущений в системе (вода — азот) под давлением хранения при изменении времени выдержки

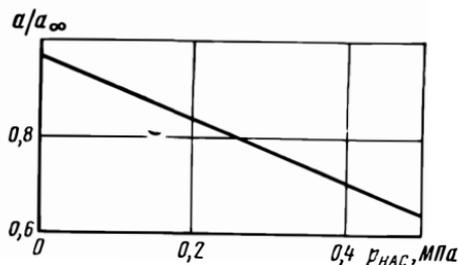


Рис. 5.20. График изменения относительной скорости распространения малых возмущений при изменении давления насыщения  $p_{нас}$  в системе (вода — азот)

лением хранения диффузионный поток массы газа из жидкости в газовые объемы микропор стенок трубопроводов приводит к увеличению этих газовых объемов. Причем эти объемы увеличиваются до тех пор, пока не устанавливается равновесие концентраций газа, растворенного в основной массе жидкости и на границах поверхности раздела газ — жидкость.

При проведении испытаний было установлено также влияние на скорость распространения малых возмущений времени выдержки заправленной системы под давлением хранения (рис. 5.19). Получена также экспериментальная зависимость скорости распространения малых возмущений от давления насыщения, определяющего концентрацию растворенного в воде воздуха (рис. 5.20).

При экспериментах рассматривался процесс неустановившегося движения при заполнении жидкостью трубопровода между пусковым клапаном и дроссельной шайбой, имитирующей гидравлическое сопротивление насоса или двигателя. При испытаниях на ненасыщенной рабочей жидкости колебания давления весьма устойчивы и имеют постоянный период  $T$  и малый декремент затухания. Нижний предел колебаний может достигать значений давления перед фронтом двигающейся жидкости, верхний — давления в баке.

При работе на насыщенной жидкости (этиловый спирт — углекислый газ) волновые процессы протекали с большим декрементом затухания, период колебаний имел тенденцию к увеличению. Эти особенности связаны с тем, что в периоды, когда жидкость находится под давлением, меньшим, чем давление насыщения, в трубопроводах создаются условия для выделения растворенного в жидкости газа. Смена фаз давления в пузырьках газа приводит к дополнительным потерям энергии в потоке, а при прохождении волн давления происходит частичное раст-

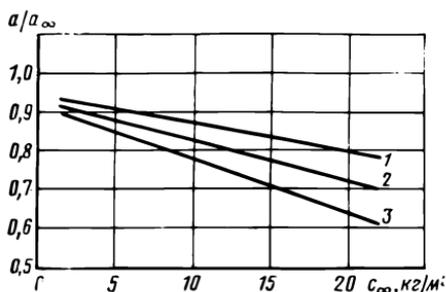


Рис. 5.21. Зависимость относительной скорости распространения малых возмущений от концентрации растворенного газа (этиловый спирт — углекислый газ):

1 —  $p_0 = 10 \cdot 10^5$  Па; 2 —  $p_0 = 8 \cdot 10^5$  Па; 3 —  $p_0 = 4 \cdot 10^5$  Па

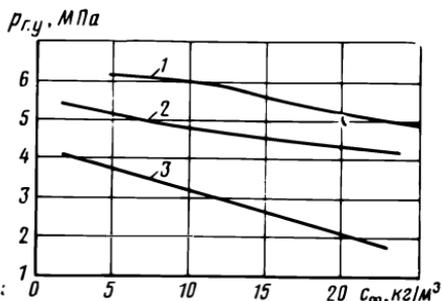


Рис. 5.22. Зависимость давления  $p_{г.у}$  при гидроударе от концентрации растворенного газа (этиловый спирт — углекислый газ);

1 —  $p_0 = 10 \cdot 10^5$  Па; 2 —  $p_0 = 8 \cdot 10^5$  Па; 3 —  $p_0 = 4 \cdot 10^5$  Па

ворение выделившегося газа. Но в соответствии с изложенной ранее физической моделью процесса из-за уменьшения площади поверхности пузырьков при сжатии растворение идет менее интенсивно. Это способствует накоплению газа в системе, что и приводит к увеличению периода акустических колебаний  $T$  и, следовательно, к уменьшению скорости звука. Постепенное увеличение периода  $T$  от цикла к циклу колебаний свидетельствует также о неравновесном характере газовыделения. Влияние концентрации растворенного в жидкости газа  $c_{\infty}$  на скорость распространения малых возмущений иллюстрирует рис. 5.21.

Процесс заполнения оканчивается гидравлическим ударом о дроссельную шайбу и вызванными им колебаниями давления в системе питания.

При заполнении вакуумированных трубопроводов сначала происходит интенсивный процесс испарения и газовыделения в заполняемую полость, а затем сжатие и вытеснение движущимся потоком через дроссельную шайбу накопившегося в трубопроводе газа. По этой причине время заполнения вакуумированных трубопроводов мало отличается от времени заполнения трубопроводов, находящихся перед открытием пускового клапана под атмосферным давлением.

Давление при гидроударах о дроссельную шайбу в случае течения газожидкостной смеси меньше давления при гидроударах при работе на ненасыщенной жидкости (рис. 5.22). Причем эта разница определяется во многом абсолютным значением давления при гидроударе. При небольших давлениях при гидроударе,  $(20 \dots 25) 10^5$  Па, она достигает 25%, а при больших  $(50 \dots 70) 10^5$  Па, — 10%. Распространение гидроудара по трубопроводу с газожидкостным потоком происходит с значительно боль-

шим декрементом затухания, чем у потока ненасыщенной жидкости (рис. 5.23). На рис. 5.24 приведены графики изменения параметров нестационарных процессов, протекающих в газонасыщенной жидкости, построенные по экспериментальным и расчетным данным.

Обобщенный анализ полученных результатов довольно хорошо подтверждает адекватность разработанных физической и математической моделей. Однако в подобных случаях почти всегда встает вопрос о допустимых границах надежного применения математической модели. В рассматриваемой ситуации построение математической модели возможно для системы питания ДУ с дисперсной структурой двухфазного потока, длинами трубопроводов до 30 м, диапазоном рабочих давлений  $10 \dots 2 \cdot 10^2$  МПа, концентрациями растворенного газа до  $50 \text{ кг/м}^3$  и скоростями течения до  $15 \text{ м/с}$ .

**Упрощенная модель течения газожидкостной смеси в системах питания.** Анализ описанных ранее исследований показывает, что при решении некоторых задач неустановившегося движения двухфазной смеси, например определений давления при гидроударах, формулы (5.84), ..., (5.94) могут быть существенно

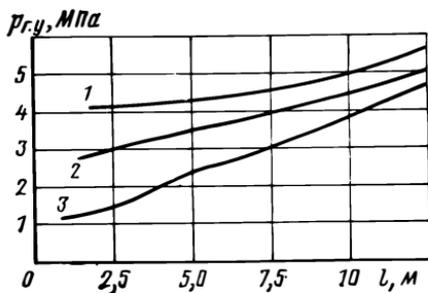


Рис. 5.23. Графики изменения давления при гидроударе по длине трубопровода питания:

1 —  $p_г = 10 \cdot 10^5$  Па; 2 —  $p_г = 8 \cdot 10^5$  Па; 3 —  $p_г = 4 \cdot 10^5$  Па

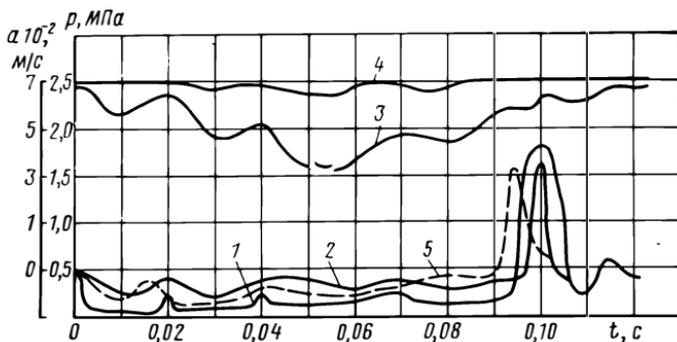


Рис. 5.24. Графики изменения параметров нестационарных процессов, протекающих при заполнении системы питания (этиловый спирт — воздух) с учетом фазовых переходов ( $c_\infty = 0,5 \text{ кг/м}^3$ ,  $t = 15^\circ\text{C}$ ):

1, 2 — давление соответственно перед пусковым клапаном и в середине гидравлической линии; 3, 4 — скорость звука соответственно в сечении перед пусковым клапаном и в середине трубопровода; 5 — давление в середине трубопровода; —, — — расчетные и экспериментальные значения.

упрощены. Это позволяет на этапе проектирования оценить характеристики систем питания без большого ущерба для точности и без привлечения сложного математического аппарата.

В основе упрощения формул лежат следующие предпосылки. Из графиков изменения давлений в системах питания на участке от пускового клапана до агрегата с сосредоточенным местным сопротивлением (насоса, дроссельной шайбы) следует, что течение газожидкостного потока характеризуется интенсивным затуханием волновых процессов. Обычно к моменту подхода фронта жидкости к местному сопротивлению колебания давления в системе практически отсутствуют, а распределение давления по длине трубопровода определяется только гидравлическим и инерционным сопротивлением. Исходя из этого предполагается, что двухфазность потока проявляется в основном в области, прилегающей к фронту движущейся жидкости, где  $p < p_{\text{нас}}$ , и для описания движения потока допустимо пренебрежение распределенностью параметров по длине трубопровода. Тогда уравнение движения и полученное из него выражение для скорости подхода  $v$  к местному сопротивлению (см. рис. 5.14) могут быть записаны в виде

$$\rho p \frac{dv}{dt} = p_0 + \rho g(h+x) - p_1 - (1+\xi) \frac{\rho v^2}{2}; \quad (5.105)$$

$$v = \sqrt{\frac{2[p_0 + \rho g(h+l) - p_1]}{(1+\xi)\rho} \left[ 1 - \left( \frac{l_1}{l_1+l_0} \right)^{1+\xi} \right]}, \quad (5.106)$$

где  $\xi$  — приведенный коэффициент гидравлических потерь;  $\rho = (1-\varphi_r)\rho_{\text{ж}}$  — плотность смеси.

Давление в произвольном сечении  $x$  гидравлической линии в процессе заполнения определяется при этом зависимостью

$$p = p_1 - \rho g(l-x) + (1+\xi_1) \frac{\rho V^2}{2} + (l-x) \frac{dv}{dt}, \quad (5.107)$$

где  $\xi_1$  — приведенный коэффициент гидравлических потерь на участке  $(l-x)$ .

Максимальное давление при гидроударе о местное сопротивление выражается соотношением

$$p_{r,y} = \rho a(v - v_m) + p_1, \quad (5.108)$$

где  $v_m$  — скорость истечения через местное сопротивление;  $p_1$  — установившееся значение давления перед местным сопротивлением. Значение  $v_m$  определяется из условия квазистационарного течения потока через местное сопротивление при перепаде  $p_{r,y} - p_1$ :

$$v_m = \frac{\mu_{\text{ж}} F_{\text{ж}}}{F} \sqrt{\frac{2(p_{r,y} - p_1)}{\rho}}, \quad (5.109)$$

где  $\mu_{ж}$ ,  $F_{ж}$  — коэффициент расхода и эффективная площадь проходного сечения местного сопротивления;  $F$  — площадь проходного сечения трубопровода.

Процесс газовыделения в системе считается равновесным и относительная объемная газовая концентрация в произвольном сечении трубопровода определяется:

при  $p < c_{\infty}/\kappa$  формулой

$$\varphi_r(x) = \frac{c_{\infty} - (p - p_s) \kappa}{c_{\infty} - (p - p_s) \kappa - \rho_r} + \varphi_0; \quad (5.110)$$

при  $p \gg c_{\infty}/\kappa$  формулой

$$\varphi_r(x) = \varphi_0 = \frac{k_f c_{\infty}}{dx(p - p_s)}, \quad (5.111)$$

где  $\rho_r = (p - p_s)/B_r T_0$ ;  $k_f = 10^{-3}$ .

Тогда

$$\varphi_r = \frac{1}{l} \int_0^l \varphi_r(x) dx. \quad (5.112)$$

На основании обработки экспериментальных данных принимается, что уменьшение давления при гидроударе в трубопроводе происходит по закону, близкому к линейному, т. е.

$$\Delta p_{г.у}(x) = \frac{P_{г.у} - p_l}{l} x + p_l. \quad (5.113)$$

Принимается изотермический закон изменения параметров газа при изменении давления в потоке. Вследствие этого при распространении гидроудара допустим пересчет:

$$\varphi_r(x)_{г.у} = \varphi_r(x) \frac{p}{\Delta p_{г.у}(x)}. \quad (5.114)$$

Индексом «г.у» обозначены параметры процессов, протекающих при гидроударе.

Скорость распространения малых возмущений с учетом объемной концентрации газа в потоке определяется выражениями

$$a(x) = \frac{a_{\infty}}{\sqrt{\left[1 - \varphi_r(x)\right]^2 + \frac{K \varphi_r(x) [1 - \varphi_r(x)]}{(p - p_s)} + \frac{Kd}{E_{ж} \delta}}}; \quad (5.115)$$

$$a = \frac{1}{l} \int_0^l a(x) dx.$$

При принятых допущениях оценку давления при гидроударе целесообразно вести следующим образом.

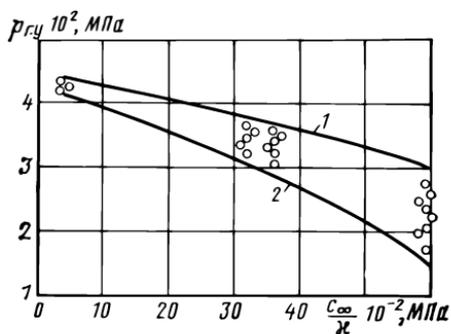


Рис. 5.25. Графики изменения давления при гидроударе при изменении относительной концентрации жидкости:

1 — полная математическая модель; 2 — упрощенная математическая модель;  $\circ$  — экспериментальные данные

Используя зависимости (5.107), (5.110), ..., (5.115), задаваясь различными значениями  $p_{г.у}$ , при известных исходных параметрах системы питания строят график  $a=f(p_{г.у})$ . Далее по формулам (5.106), (5.108), (5.109), задаваясь различными значениями  $a$ , строят график  $p_{г.у}=f(a)$ . Точка пересечения полученных графиков дает максимальное значение давлений при гидроударе в системе, работающей на газожидкостной смеси. На рис. 5.25 приведены полная и упрощенная математические модели для системы питания с начальными параметрами:  $l=10$  м;  $l_6=1$  м;  $d=0,012$  м;  $\delta=0,002$  м;  $p_6=0,6$  МПа;  $p_1=10^3$  Па — и экспериментальные данные при различных начальных значениях концентрации. Рабочая жидкость — водопроводная вода. Заниженные значения давления при гидроударе, получаемые при упрощенной модели, еще раз свидетельствуют о том, что в реальных системах питания преобладает течение с неравномерными процессами массообмена.

# 6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ПГС ДУ

---

### 6.1. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

**Выбор объема измерений.** Система измерений параметров при стендовых испытаниях. Объем измерений определяется, в первую очередь, назначением объекта отработки, целями и задачами испытаний, этапом лабораторно-стендовой отработки, а также составом стендового оборудования, включающим системы управления и контроля.

В соответствии с поставленными задачами объект испытаний оснащается определенным числом источников информации — первичными преобразователями, позволяющими получить необходимую информацию о его реакции на внутренние и внешние воздействующие факторы, воспроизводимые при испытаниях. Для обеспечения качества отработки в целом при выборе объема измерений обычно руководствуются следующими принципами распределения информации по иерархическим уровням создания ДУ (агрегат, система, стендовое изделие):

максимальной автономности обрабатываемых подсистем и элементов для получения наиболее полной информации об их внутренних физических процессах при функционировании;

максимального уплотнения информации при движении вверх по иерархической структуре (так как цели «нижних» по иерархии подсистем взаимосвязаны с целями «верхних» подсистем только через функции промежуточных в иерархии подсистем, должна иметь место зависимость «нижних» подсистем от «верхних»);

оценки факторов наибольшего влияния должны в пределах каждого уровня определяться с одинаковой погрешностью, а при движении вниз по иерархической структуре точность оценок влияния должна возрастать.

При этом в ходе определения объема измерений необходимо выплнять следующие условия при назначении контролируемых параметров:

1. Получаемая при контроле информация должна быть достаточной для осуществления предусмотренных технологией испытаний и контроля операций.

2. В качестве определяющих параметров на конкретном этапе отработки, а также на конкретном режиме испытаний це-

лесообразно принимать показатели, существенно влияющие на эксплуатационные характеристики элемента, подсистемы или стенового изделия в целом (в зависимости от того, где работает объект испытаний), имеющие из-за своих физических свойств или по технологическим причинам достаточно большую вероятность отклонения за допустимые пределы.

3. Контролем должны быть охвачены параметры, комплексно характеризующие:

качество изготовления и настройки объекта испытаний и достаточно чувствительные к недопустимым отклонениям;

качество обрабатываемой конструкторской документации.

4. Контроль выбранных параметров должен быть технически возможен.

Особое значение придается получению точной и достоверной информации о физических процессах, протекающих в объектах испытаний при их функционировании. Поэтому зачастую (особенно при исследовательских испытаниях — на этапе физического моделирования) для регистрации изменения одного параметра целесообразно использовать источники информации, основанные на различных физических принципах. Наиболее эффективно использовать три источника информации, что позволяет при регистрации изменения параметра применять семантическое правило «два из трех».

При автономной обработке элементов ПГС на I уровне каждый агрегат подвергается последовательно и комплексно всем воздействиям, которым он будет подвергаться при эксплуатации. При этом часто воспроизведение, а следовательно, регистрация воздействующих факторов, а также реакция на них объекта испытаний производятся на различных стендах и с помощью различной регистрирующей аппаратуры, имеющих в общем случае неидентичную структуру, что существенно влияет на адекватность и стабильность полученных результатов.

Если положить, что:

$N_1$  — число элементов ПГС, подвергаемых автономной обработке;

$k_1$  — минимально возможное число образцов каждого наименования;

$n_1$  — минимально возможное число регистрируемых параметров каждого испытываемого элемента ПГС на конкретном стенде;

$m_1$  — минимально возможное число регистрируемых параметров стенового оборудования;

$M_1$  — число видов испытаний, равное числу стендов (каждый вид испытаний проводится на отдельном стенде);

$l_1$  — минимально возможная кратность нагружений, то можно получить нижнюю оценку объема измерений  $\theta_1$  при автономной обработке элементов ПГС:

$$\theta_1 > M_1 N_1 (n_1 \cup m_1) k_1 l_1. \quad (6.1)$$

Здесь и далее индексы «I», «II», «III» соответствуют уровню отработки изделия.

Аналогично рассуждая, можно записать нижнюю оценку объема измерений при автономной отработке подсистем и систем, входящих в ПГС ДУ.

Принимая во внимание, что при испытаниях II и III уровня отработки стоимость объекта испытаний резко возрастает и, как правило, объект испытаний поставляется на отработку в единственном числе, то в этом случае можно положить  $k_{II} = k_{III} = 1$ . При этом под каждый объект испытания зачастую готовится свой стенд, на котором проводится отработка объекта испытания с кратностью нагружения  $l_{II}$  и  $l_{III}$  соответственно. В ходе проведения испытаний II и III уровня очень часто проводится корректировка программы испытаний, что вызывает необходимость доработки либо просто переработки объекта испытаний и стенда с кратностью не менее  $f_{II}$  и  $f_{III}$  соответственно. Поэтому согласно приведенным соображениям нижней оценкой объема измерений II уровня иерархии отработки будет

$$\theta > N_{II} (n_{II} \cup m_{II}) l_{II} f_{II}. \quad (6.2)$$

Нижнюю оценку объема измерений при комплексных испытаниях ПГС ДУ можно получить исходя из необходимости проведения «холодных», «горячих» и «огневых» испытаний.

Тогда

$$\theta > \bigcup_{i=1}^3 N_{IIIi} (n_{IIIi} \cup m_{IIIi}) l_{IIIi} f_{IIIi}. \quad (6.3)$$

где  $1 \leq i \leq 3$  ( $i=1$  — «холодные» испытания,  $i=2$  — «горячие» испытания,  $i=3$  — «огневые» испытания).

Нижнюю оценку измерений при исследовательских испытаниях выбирают из следующих соображений. Исследовательские испытания проводятся, как правило, на уникальных стендах, позволяющих воспроизводить разнородные специфические условия различных режимов нагружений. При этом от режима к режиму сильно колеблется число регистрируемых параметров как объекта испытаний, так и стендового оборудования, а также число экспериментов. Поэтому, принимая, что

$N_{IV}$  — число исследуемых объектов;

$M_{IV}$  — число стендов, на которых проходит весь цикл исследовательских испытаний;

$j = \{1, 2, \dots, l\}$  — минимально возможное число режимов, реализуемых на каждом из уникальных стендов, можно получить нижнюю оценку объема измерений исследовательских испытаний:

$$\theta_{IV} > \sum_{j=1}^l \bigcup_{i=1}^{M_{IV}} [(n_{IVi} \cup m_{IVi}) f_{IVi}]_j. \quad (6.4)$$

Исходя из приведенных ранее соображений можно получить нижнюю оценку объема измерений, связанную с обработкой ПГС ДУ.

Учитывая выражения (5,1), ..., (5.4), получаем

$$\theta > \bigcup_{q=1}^{IV} \theta_q, \quad \forall q, \quad I \leq q \leq IV, \quad (6.5)$$

где  $q$  — уровень обработки.

Указанные оценки проводятся при планировании процесса обработки на этапе рабочего проектирования, при разработке комплексной программы экспериментальной обработки ДУ.

Полученная оценка объемов измерений, хотя и носит качественный характер, но все же позволяет выбирать структуру и тип информационно-измерительных систем (ИИС) для различных уровней иерархии технологического процесса лабораторно-стендовой отработки ПГС ДУ.

ИИС, используемые при обработке ПГС ДУ, вообще говоря, можно разделить на два больших класса:

ИИС, обеспечивающие регистрацию и обработку медленноменяющихся физических процессов;

ИИС, обеспечивающие регистрацию и обработку быстропротекающих физических процессов.

К медленноменяющимся относят обычно физические процессы, частота изменения параметров которых не превышает 3 Гц.

ИИС для медленноменяющихся процессов на различных этапах обработки во время испытаний работают как системы контроля и регистрации, а после испытаний — как системы технического диагностирования.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что ИИС строятся, как правило, для работы либо в автоматизированном, либо в неавтоматизированном режимах. На начальных этапах обработки из-за неотработанности объектов испытаний автоматизированные ИИС широкого применения пока не нашли.

Структурная схема типовой неавтоматизированной ИИС, применяемой на II и III уровне технологического процесса обработки, представлена на рис. 6.1.

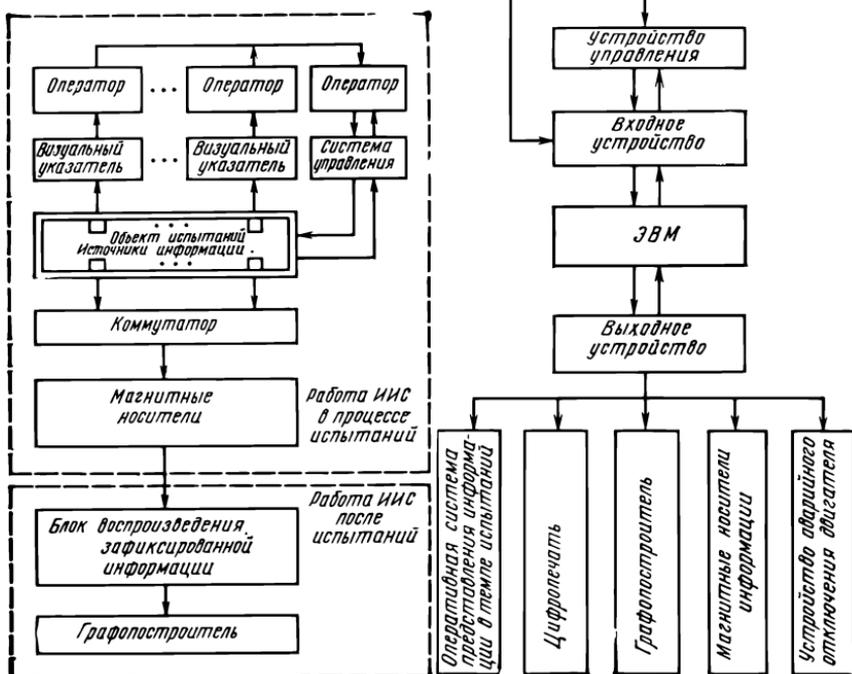
При работе с неавтоматизированной ИИС данные о состоянии объекта испытаний оператор получает непосредственно с визуальных указателей, которые отображают изменение значений регистрируемых источниками информации параметров физических процессов, протекающих в ПГС ДУ. Если состояние объекта признано неработоспособным, оператор через систему управления прекращает испытания. В данном режиме ИИС работает как система оперативного контроля. В реальном масштабе времени, наряду с оперативным контролем состояния объекта, рассматриваемая ИИС запоминает (регистрирует через коммутатор) на магнитных носителях весь выходной поток информации о протекающих во время испытаний процессах. Регистрация и

запоминание осуществляются для оперативного и полного анализа результатов испытаний с целью определения истинного состояния ПГС ДУ после испытаний. Вывод информации с магнитных носителей производится через блок воспроизведения зафиксированной информации на графопостроитель.

К недостаткам такой ИИС можно отнести необходимость большого числа высококвалифицированных операторов для обеспечения визуального контроля. Результаты визуального контроля существенно зависят от субъективных факторов, проявляющихся при регистрации, обработке и оперативном анализе, что влияет на достоверность оценки состояния. Количественная оценка технического состояния ПГС ДУ, т. е. процесс диагностирования, осуществляется после проведения испытания либо путем ручной обработки и анализа результатов испытаний, либо при использовании универсальных ЭВМ.

Рис. 6.1. Структурная схема неавтоматизированной ИИС, применяемой при медленноменяющихся процессах

Рис. 6.2. Структурная схема автоматизированной ИИС, применяемой при медленноменяющихся процессах



К ИИС, свободным от указанных недостатков, относятся автоматизированные ИИС. Структурная схема типовой ИИС, применяемой на II и III уровнях технологического процесса обработки, представлена на рис. 6.2.

В начале испытаний устройство управления выдает команду коммутатору на опрос источников информации объекта испытаний и стенда. Электрические сигналы с источников информации поступают через коммутатор и входное устройство в ЭВМ, где информация с определяющих источников информации подвергается предварительной обработке, а остальная заносится на магнитный носитель через выходное устройство без обработки. Значение определяющих параметров при испытании выводится в оперативную систему представления информации в темпе испытаний. Во время испытаний ИИС работает как система контроля, причем при аварийных ситуациях устройство аварийного отключения двигателя прекращает испытания. После проведения испытаний информация о значениях определяющих параметров, полученная с источников информации, подвергается вторичной обработке и через цифрочет выдается экспресс-анализ по

результатам испытаний, в котором оценивается состояние ПГС ДУ и указывается возможность проведения последующих испытаний. Затем вся информация, зафиксированная на магнитном носителе, воспроизводится и подвергается предварительной и вторичной обработке, после чего на цифрочети и графопостроителе выводятся таблицы и графики, которые входят в отчет по результатам испытаний. ИИС для регистрации и обработки медленноприменяющихся процессов других уровней иерархии технологического процесса обработки строятся аналогично.

ИИС для регистрации и обработки быстроменяющихся физических процессов, фиксируемых при испытаниях на различных этапах обработки, так же делятся на автоматизированные и неавтоматизированные.

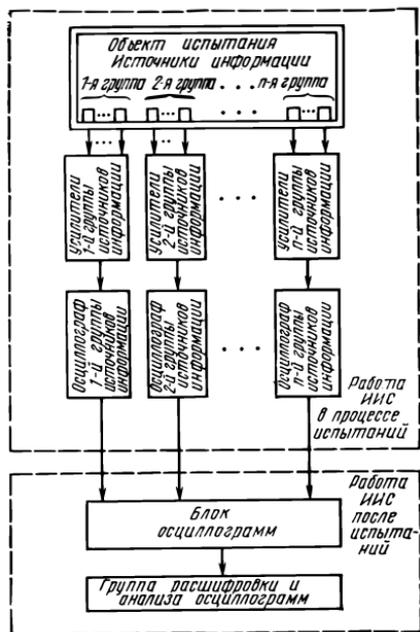


Рис. 6.3. Структурная схема неавтоматизированной ИИС для быстроменяющихся процессов

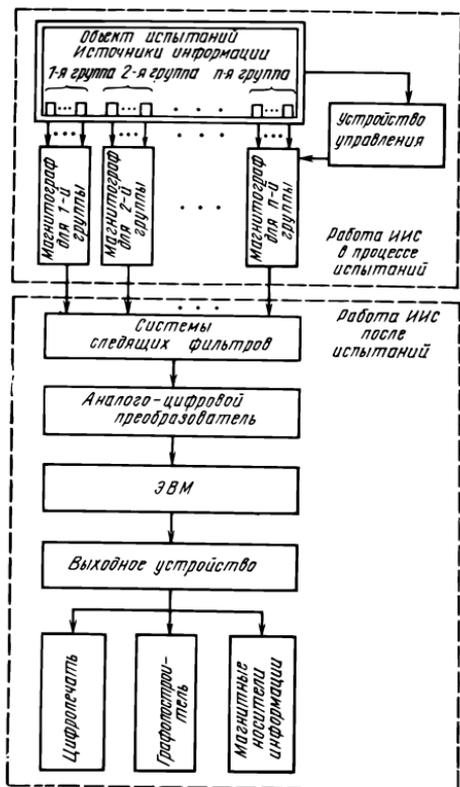


Рис. 6.4. Структурная схема автоматизированной ИИС для быстроменяющихся процессов с обработкой информации после испытаний

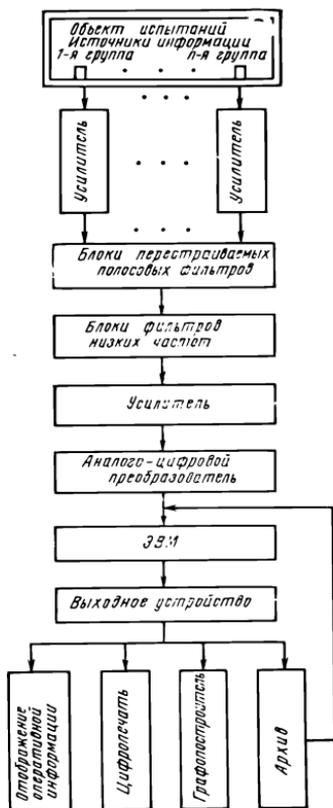


Рис. 6.5. Структурная схема автоматизированной ИИС для быстроменяющихся процессов с частичной обработкой информации в течение испытания

Структурная схема типовой неавтоматизированной ИИС для быстроменяющихся процессов, применяемая на всех уровнях технологического процесса отработки, представлена на рис. 6.3.

При работе с неавтоматизированной ИИС информация о быстроменяющихся процессах в виде электрических сигналов с источников информации, объединенных в группы (1, ..., n-я) на объекте испытания, через усилители фиксируется осциллографами или другими регистраторами. Данная ИИС во время испытаний работает как регистратор. После испытаний, получив осциллограммы с зафиксированными физическими процессами с блока осциллограмм, группа расшифровки производит обработку осциллограмм и затем производит оперативный и полный анализ экспериментов.

Автоматизированные ИИС для быстроменяющихся процессов имеют различные структурные схемы. Наиболее типичные приведены на рис. 6.4 и рис. 6.5. Они отличаются друг от друга тем, что одна из них (рис. 6.4) предназначена для обработки информации после испытаний, а вторая (рис. 6.5) позволяет часть информации обрабатывать в реальном масштабе времени и отображать ее на средствах индикации.

Устройство управления (см. рис. 6.4) выдает команду на запуск магнитографов, которые в ходе испытания записывают электрические сигналы с источников информации, установленных на объекте испытания. После испытаний информация воспроизводится и считывается с магнитографов последовательно через систему следящих фильтров и аналого-цифровой преобразователь в ЭВМ, где производится предварительная и вторичная обработка параметров быстроменяющихся процессов. Затем информация через выходное устройство заносится на магнитные носители или представляется в виде таблиц на цифropечати и в виде графиков на графопроекторе.

Процесс обработки информации в ИИС, схема которой приведена на рис. 6.5, аналогичен. Разница состоит лишь в том, что информация непосредственно снимается с источников информации, затем усиливается на усилителях и после фильтрации и согласования в блоке перестраиваемых полосовых фильтров, блоке низких частот и усилителе через аналого-цифровой преобразователь направляется в ЭВМ, где вся информация через выходное устройство необработанной сбрасывается в архив на магнитный носитель, а определяющая ее часть обрабатывается в реальном времени и выводится на средства отображения оперативной информации.

Рассмотренные структурные схемы ИИС, а также принцип их работы позволяют сделать вывод, что они решают примерно один и тот же круг задач, к которым можно отнести:

- регистрацию необработанных сигналов, фиксируемых физических параметров в процессе испытаний;

- обеспечение контроля в процессе испытаний состояния как стендового оборудования, так и собственно объекта испытаний;

- предварительную обработку и выдачу протокола с результатами испытаний (составленного путем обработки сигналов определяющих параметров) в послесеансном режиме и т. д.

При автономных испытаниях элементов ПГС ввиду многообразия воспроизводимых воздействующих факторов, а следовательно и задействования значительного числа стендов и стендового оборудования, ИИС строятся применительно к конкретному стенду либо, если позволяют условия, — к группе стендов. При этом следует отметить, что последовательность воспроизведения воздействующих факторов, а также сами имитируемые факторы, кратность и повторяемость испытаний в основном определяют характеристику задействованной ИИС.

Далее более подробно рассматриваются процессы регистрации, обработки и анализа результатов испытаний.

**Регистрация, обработка и анализ результатов испытаний.** Как показано в предыдущем разделе, в ИИС входят источники информации, которые иногда называются первичными преобразователями. Источники информации могут быть представлены в виде модуля. На вход модуля поступает исследуемая величина, а на его выходе выдается электрический сигнал. Иными словами, источник информации воспринимает изменение физической величины и готовит ее в виде электрического сигнала для дальнейшей обработки.

Источники информации можно разбить на две группы: прямого преобразования, в которых происходит реальное преобразование исследуемой величины в электрический сигнал, и косвенного преобразования, состоящие из устройств прямого преобразования и некоторого сравнивающего или «решающего устройства», которое преобразует показания первого в электрический сигнал, однозначно связанный с исследуемой величиной.

В результате взаимодействия источника информации с объектом испытания происходит изменение состояния первичного преобразователя. Существует несколько различных типов взаимодействий:

- механическое (силовое, сжатие — растяжение);
- электрическое;
- магнитное;
- электромагнитное (излучение);
- гравитационное;
- тепловое.

С каждым типом взаимодействия связана определенная группа первичных преобразователей, преобразующих соответствующую физическую величину в одну из электрических, чаще всего в электрическое напряжение.

Первичные преобразователи принято группировать и объединять их сигналы по уровню выходного напряжения и полному сопротивлению для передачи по общему каналу.

В зависимости от характера изменения измеряемого параметра частота выборки — опроса может быть низкой и высокой. Так, при исследовании процессов, физические величины которых меняются довольно медленно, делается несколько выборок в секунду или одна выборка в несколько секунд. При измерении пульсаций давления, давлений при гидроударах и т. п. может потребоваться от сотен до нескольких тысяч выборок в секунду для получения сведений об амплитуде, частоте и фазе давления.

Физические параметры, преобразованные в электрические сигналы, дискретизируются, квантуются, кодируются и передаются в ЭВМ, где подвергаются предварительной обработке. Для перевода напряжения в измеряемую физическую величину использу-

ются результаты масштабирования по каждому первичному преобразователю. Существует два метода масштабирования:

1. Индивидуальная градуировка каждого первичного преобразователя и построение градуировочных кривых.

2. Подача на входы измерительных каналов напряжений, имитирующих выходные сигналы первичных преобразователей, сравнение полученных выходных сигналов ИИС с известными входными сигналами — калибровка информационных каналов.

Частота опроса каждого источника информации не должна загромаждать ИИС. Излишне высокая частота опроса может привести к получению большего объема данных, чем это требуется для анализа. Информацию можно «сжать» с помощью регистратора, работающего на пониженной скорости, или методом выборки, при котором из большого числа записанных данных отбирается только та, которая соответствует характерным точкам процесса. Для сокращения числа данных для анализа применяется «сглаживание» информации. При этом, например, усреднение большого числа выборок не только уменьшает число данных, которые необходимо анализировать, но и повышает их точность. При регистрации параметров физических процессов, протекающих в ПГС ДУ, различают два вида временной дискретизации: мгновенную и интервальную.

Мгновенной дискретизацией называется процесс, при котором берутся относительно короткие выборки сигнала для последующего восстановления первоначальной его формы. При этом получается последовательность импульсов, модулированных по амплитуде.

Интервальная дискретизация, называемая также кадровой, представляет собой процесс выборки сигнала в течение значительного промежутка времени.

Мгновенная дискретизация находит весьма широкое применение в ИИС для обработки медленноменяющихся процессов. Для точного восстановления сигнала при мгновенной дискретизации требуется более двух выборок на один период колебаний.

Интервальная дискретизация шире используется в ИИС для обработки быстроменяющихся процессов.

Рассматриваемые здесь общие проблемы обработки результатов испытаний ПГС ДУ включают в себя и вопросы программно-математического обеспечения.

После того как электрический сигнал от источника информации после калибровки и оцифровки попал через аналого-цифровой преобразователь в ЭВМ в виде кода, для дальнейшей работы нужно убедиться в достоверности этого сигнала. Это имеет смысл проводить, если ИИС работает в режиме автоматизированной системы контроля, т. е. подготавливается кадр для отображения значений, определяющих параметры ПГС ДУ на средствах индикации данных, и данный процесс охватывает всего лишь 15...20% всего объема поступивших сигналов и если на эта-

пе предварительной обработки необходимо весь необработанный поток сигналов «сбросить» на магнитный носитель для послесесанной обработки.

Роль оценки достоверности резко повышается, если информация о состоянии ПГС ДУ индуцируется в реальном масштабе времени.

Применение автоматизированных устройств в качестве измерительной и контрольной аппаратуры невозможно без учета влияния на результат измерения погрешностей ИИС. Пренебрежение этими погрешностями может привести к ошибочным результатам испытаний. Известно, что различают ошибки двух родов. Ошибки первого рода имеют место, если исправная система принята за неисправную. Ошибки второго рода — наоборот, если неисправная система принята за исправную.

Вероятности ошибок первого и второго рода зависят от контрольной и измерительной аппаратуры, а также от оператора, определяющего техническое состояние объекта испытания. Естественно, что для ПГС ДУ наиболее опасной является ошибка второго рода, так как ее появление может привести к утрате информации при испытаниях. Появление же ошибки первого рода может привести к излишним затратам времени и средств на поиск несуществующих дефектов в объекте или стенде.

Данные ошибки можно довести до любого порядка малости.

Действительно, примем, что  $A$  — событие, заключающееся в том, что система работоспособна;  $\bar{A}$  — событие, заключающееся в том, что система неработоспособна.

Тогда

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1, \quad (6.6)$$

где  $P$  — вероятность события.

Обозначим через  $A'$  — событие, заключающееся в том, что система в результате определения технического состояния была принята за работоспособную, а через  $\bar{A}'$  — событие, заключающееся в том, что система в результате определения технического состояния была принята за неработоспособную.

Очевидно, что

$$P(A') + P(\bar{A}') = 1. \quad (6.7)$$

Рассмотрим вероятность произведения двух событий  $A$  и  $\bar{A}'$

$$P(A\bar{A}') = P(A)P(\bar{A}'/A) = P(\bar{A}')P(A/\bar{A}'). \quad (6.8)$$

Откуда

$$P(A/\bar{A}') = \frac{P(A)P(\bar{A}'/A)}{P(\bar{A}')}, \quad (6.9)$$

где  $P(A/\bar{A}')$  — вероятность риска принять работоспособную систему за неработоспособную, т. е. вероятность работоспособности

системы при условии, что в результате контроля она принята за неработоспособную.

Нам известно, что вероятность ошибки первого рода:

$$P(\bar{A}'/A) = \alpha, \quad (6.10)$$

а вероятность ошибки второго рода

$$P(A'/\bar{A}) = \beta, \quad (6.11)$$

откуда

$$P(A'/A) = 1 - \alpha \quad (6.12)$$

и

$$P(\bar{A}'/\bar{A}) = 1 - \beta. \quad (6.13)$$

Нетрудно показать, что

$$P(A/\bar{A}') = \frac{P(A) \alpha}{P(A) \alpha + [1 - P(A)] (1 - \beta)}. \quad (6.14)$$

Аналогично

$$P(\bar{A}/A') = \frac{[1 - P(A)] \beta}{P(A) (1 - \alpha) + [1 - P(A)] \beta}. \quad (6.15)$$

Произведя преобразования и приняв, что  $P(A) \gg \beta$ ;  $P(A) \gg P(A) \alpha$ ;  $P(A) \gg P(A) \beta$ , получим приближенные выражения

$$P(A/\bar{A}') = \frac{P(A) \alpha}{1 - P(A)} \quad (6.16)$$

и

$$P(\bar{A}/A') = \frac{[1 - P(A)] \beta}{P(A)}. \quad (6.17)$$

Очевидно, что

$$P(A/\bar{A}') \gg P(\bar{A}/A'). \quad (6.18)$$

Таким образом, вероятности  $P(A/\bar{A}')$  и  $P(\bar{A}/A')$  зависят как от  $\alpha$  и  $\beta$ , так и от вероятностных характеристик самого объекта испытаний, т. е. от  $P(A)$ .

По выражениям (6.16) и (6.17) можно определить достоверность результатов контроля, под которой понимается мера доверия к оценке технического состояния объекта испытаний. Если в результате контроля система была принята за неработоспособную, то достоверность этого результата, т. е. вероятность, того что система на самом деле неработоспособна, равна

$$P(\bar{A}/\bar{A}') = 1 - P(A/\bar{A}') = 1 - \frac{P(A) \alpha}{1 - P(A)} = \frac{1 - P(A)(1 + \alpha)}{1 - P(A)}. \quad (6.19)$$

Аналогично, если в результате контроля система была принята за работоспособную, то достоверность этого результата, т. е. вероятность, того что объект испытаний на самом деле работоспособен, равна:

$$P(\bar{A}/A') = \frac{P(A)(1 + \beta) - \beta}{P(A)} \quad (6.20)$$

В основном при высоком значении  $P(A)$  вероятность риска принять неработоспособную систему за работоспособную в условиях отработки является величиной достаточно малой.

Действительно, положим  $P(A) = 0,9$  и  $\alpha = \beta = 0,01$ .

Тогда

$$P(\bar{A}/A') = \frac{0,9(1 + 0,01) - 0,01}{0,9} \approx 0,999.$$

Однако в случае необходимости существуют пути дальнейшего уменьшения  $P(\bar{A}/A')$ , например проведение операций повторного контроля. В этом случае вероятность риска принять неработоспособную систему за работоспособную, если объект испытаний в результате контроля два раза подряд был принят за работоспособный, составляет

$$P(\bar{A}/A'') = \frac{P(\bar{A})P(A''/\bar{A})}{P(A'')} \quad (6.21)$$

где  $A''$  — событие, заключающееся в том, что объект испытаний в результате двухкратного контроля был принят за работоспособный.

Нетрудно показать, что

$$P(A''/\bar{A}) = \beta^2 \quad (6.22)$$

и

$$P(A''/A) = (1 - \alpha)^2. \quad (6.23)$$

Откуда

$$P(\bar{A}/A'') \approx \frac{[1 - P(A)]\beta^2}{P(A)}. \quad (6.24)$$

Если подставить принятые ранее значения  $P(A)$  и  $\beta$  в выражение (6.24), то получим

$$P(\bar{A}/A'') \approx 0,000011,$$

т. е. вероятность  $P(\bar{A}/A'')$  уменьшилась приблизительно на шесть порядков.

Таким образом, одним из путей повышения достоверности регистрируемых параметров в ИИС является применение в алгоритмах предварительной обработки семантических правил «2 из 3», «4 из 5» и т. д.

Значительное место на всех уровнях технологического процесса обработки занимают операции анализа результатов испытаний.

Анализ результатов испытаний является достаточно сложной и трудоемкой задачей. Трудоемкость анализа связана со сложностью процессов, протекающих в объекте испытания при имитации воздействующих факторов, с большими потоками информации, сложностью математической модели процессов, необходимостью фильтрации шумов в ИИС и учета влияния стендовых систем на объект испытаний.

Весь технологический процесс анализа результатов испытаний на всех уровнях обработки разбивается на два этапа: этап оперативного анализа и этап полного анализа результатов испытаний.

В задачи оперативного анализа результатов испытаний объекта исследования, будь то агрегат или ПГС ДУ, входят:

определение технического состояния объекта испытаний и возможности перехода к следующему виду нагружения;

выявление дефектов конструкции и производственных дефектов, влияющих на работоспособность объекта исследования в процессе испытаний;

выявление необходимости повторения данного вида нагружения;

оценка работы ИИС для определения качества полученной в ходе испытаний информации.

Оперативный анализ результатов испытаний проводится, как правило, по определяющим параметрам объекта испытаний с привлечением, если это необходимо, минимального числа дополнительных параметров. К оперативному анализу привлекаются, как правило, ведущие конструкторы объекта испытаний и ведущие специалисты по испытаниям. Оперативный анализ сводится обычно к просмотру графического материала и протоколов испытаний для выявления аномальных отклонений в показаниях.

В настоящее время часто для сокращения времени обработки вопросы определения технического состояния объекта не решаются. Они решаются системами технического диагностирования, работающими в реальном масштабе времени. Внедрение автоматизации в процесс оперативного анализа исключает ошибки, связанные с субъективизмом специалистов, повышает качество испытаний.

Полная обработка информации, полученной в ходе испытаний, проводится обычно специализированной службой анализа, включающей как специалистов в области ПГС ДУ, так и специалистов по ИИС. Обработка информации производится с помощью вычислительных машин. Объем обрабатываемой информации регламентируется техническим заданием на испытания при едином методическом подходе для всех видов и уровней ис-

пытаний, а результаты систематизируются для последующей статистической обработки.

В зависимости от задач объем обработки, а следовательно и анализ, может существенно различаться. Примерный перечень задач полной обработки и анализа для комплексных испытаний ПГС ДУ включает:

определение временных характеристик запуска и выключения;

определение основных характеристик ПГС ДУ;

определение характеристик переходных процессов в ПГС ДУ (частоты колебаний, декрементов затухания, скорости звука);  
получение таблиц и графиков изменения основных характеристик систем по времени, сравнение их с расчетными значениями;

оценку соответствия настроечных агрегатов ПГС ДУ заданным значениям;

определение (аппроксимацию) законов изменения параметров ПГС ДУ;

определение влияния внешних факторов на работу ПГС ДУ;  
подготовку результатов обработки для дальнейшего статистического и информационного анализа;

анализ работы источников информации, установленных на объекте испытания.

**Современные методы диагностирования состояния систем при отработке.** Применение методов и средств диагностирования при отработке ПГС ДУ позволяет повысить качество процесса испытаний, а также существенно сократить время цикла эксперимента и анализа его результатов.

Применение систем технического диагностирования дает наиболее существенный эффект при комплексных испытаниях ПГС ДУ. Отечественный и зарубежный опыт показывает, что задачи контроля и диагностирования наиболее успешно решаются ИИС, выполненными на базе однопроцессорных мини-ЭВМ.

Это объясняется относительной простотой их эксплуатации, надежностью и невысокой стоимостью. Поэтому рассматриваемые методы диагностирования ориентированы на вычислительную технику указанного типа. Физические методы диагностирования, такие как акустические, вибрационные, голографические и т. д., при комплексных испытаниях ПГС ДУ широкого применения пока не получили.

Существуют два основных подхода к решению задачи диагностирования — вероятностный и детерминистский. Одним из вероятностных методов функционального диагностирования, наиболее часто применяемым, является эвристический метод. Специалисты, использующие данный метод диагностирования, определяют место дефекта интуитивно, оперируя данными неавтоматизированных ИИС (см. рис. 6.1), это приводит к существенной потере времени на распознавание, поиск и локализацию

№ по пор.	Наименование дефекта	Признак дефекта (значение параметра)	Правила поиска дефекта	Устранение дефекта	Примечание
•	... Не прошла команда	... НЭПК=0	... Прозвонить блок подачи сигнала в систему управления на открытие ЭПК	... Заменить неисправный блок	... Дефект системы управления по неоткрытию ЭПК наддува
•	... Регулятор давления не обеспечивает заданного давления	... НР= =4,5 МПа > >3,7 МПа	... Закреть пусковой ЭПК	... Заменить редуктор давления	... Прорыв мембраны редуктора давления
•	...	...	...	...	...

Примечание. В табл. 6 НЭПК и НР — условные обозначения параметров. ЭПК — электропневмоклапан.

дефектов. Основным документом, которым руководствуются при этом специалисты, является инструкция поиска и парирования дефектов, фрагмент которой приведен в табл. 6.

Эвристическому методу диагностирования присущи такие недостатки, как трудность учета всех возможных дефектов и установления однозначной связи между дефектами и их признаками, отсутствие информации о дополнительных параметрах (уточняющих место дефекта), а также сложность установления четкой последовательности контроля значений параметров в процессе испытания.

На этапе обработки широко применяются детерминистские методы диагностирования, такие как методы, основанные на разделении классов состояний в пространстве признаков, на теории чувствительности; метод потенциальных функций; метрические методы диагностирования; графоаналитические методы; причинно-следственные методы.

Наиболее часто применяются методы диагностирования, основанные на принципе назначения границ. До комплексных испытаний по результатам расчетов и автономных испытаний становится известна область допустимых значений параметров. Процесс диагностирования состоит в обнаружении принадлежности (или непринадлежности) значений определяющих параметров допустимой области. Данный принцип реализуется практически во всех перечисленных методах, за исключением методов диагностирования на основе теории чувствительности.

При использовании методов диагностирования, основанных на разделении классов состояний, представленных в многомерном пространстве, состояние ПГС ДУ описывается многомерными векторами. Эффективность этих методов может существенно снижаться из-за большого объема пространства состояний, а также при попадании распознаваемого вектора на границу различных состояний из-за уменьшения возможности идентификации векторов состояний.

Можно сократить число рассматриваемых параметров, если существует функциональная связь между входными и выходными сигналами исследуемого процесса. В этом случае состояние объекта исследования можно описать системой дифференциальных уравнений. Идентификация состояния ПГС при этом сводится к отыскиванию коэффициентов дифференциальных уравнений по любому из известных методов их решений. Однако указанный путь определения технического состояния исследуемого объекта из-за значительного числа вычислительных операций для задач диагностирования, ни по достоверности его результатов, ни по объему оперативной памяти ЭВМ.

Минимум вычислительных операций над значениями параметров в процессе выполнения диагностических процедур обеспечивают графоаналитические, а также причинно-следственные методы диагностирования. Решение задачи диагностирования этими методами сводится к последовательному контролю каждого параметра и в зависимости от того, больше или меньше значение этого параметра допустимого значения, принимается решение, какой следующий параметр рассматривать. Если рассмотрены все параметры, то осуществляется идентификация состояния изделия. К достоинствам указанных методов можно отнести простоту и наглядность операций по диагностированию. Их удобно применять для поиска дефектов после проведения испытаний на основе результатов, записанных в процессе испытаний на магнитные носители (см. рис. 6.2). Структура системы технического диагностирования (СТД) тесно связана с ее математической моделью, которая должна с достаточной степенью достоверности описывать состояние объекта испытаний, и алгоритмом диагностирования.

Следует отметить, что эффективность автоматизации процессов контроля и диагностирования зависит от достоверности получаемых результатов, экономичности вычислительной процедуры, помехозащищенности и устойчивости используемых алгоритмов к изменению отдельных ситуаций при возможных состояниях ПГС ДУ. Все перечисленные факторы необходимо учитывать как при выборе модели состояния объекта испытания, так и при разработке алгоритма диагностирования.

Алгоритмы диагностирования строятся на основе моделей состояния ПГС ДУ и методов диагностирования. Под алгоритмом

диагностирования понимается совокупность последовательных действий.

Рассмотрим алгоритмы, которые ориентированы на табличные модели состояния ПГС ДУ, так как они наиболее часто используются для задач диагностирования в реальном масштабе времени. Такие алгоритмы должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать максимальное быстродействие процесса диагностирования;

- занимать минимальную область оперативной памяти ЭВМ, входящей в контур СТД;

- обеспечивать необходимую достоверность результата диагностирования состояния;

- обеспечивать необходимую глубину диагностирования ПГС ДУ.

По принципу реализации последовательных действий получения и обработки необходимой информации о состоянии объекта алгоритмы можно разделить на безусловные и условные. Безусловным алгоритмом диагностирования называют в случае, если он реализует последовательность обрабатываемой информации, которая не зависит от фактического технического состояния.

Безусловные алгоритмы можно классифицировать по характеру их остановки, что, по существу, определяет способ реализации алгоритма. Если выдача результатов диагностирования предусмотрена лишь после опроса и обработки сигналов, поступивших со всех источников информации, то такой алгоритм является алгоритмом с безусловной остановкой. Если же фактическое состояние объекта испытания определяется алгоритмом с требуемой глубиной диагностирования прежде, чем будет реализована последовательность опроса и обработки сигналов, поступивших со всех источников информации, то безусловные алгоритмы диагностирования, которые имеют возможность выдачи результатов диагностирования после опроса и обработки сигналов, поступивших с отдельного источника информации либо с группы этих источников, называются алгоритмами с условной остановкой.

Ввиду необходимости рассмотрения всех определяющих параметров, входящих в вектор состояния, далее рассмотрим лишь безусловные алгоритмы.

Алгоритм диагностирования строится на основе выполнения решающих правил, реализующих перечисленные методы диагностирования, ориентированные на табличные модели. Так, в методах диагностирования, основанных на разделении классов состояний в пространстве признаков, алгоритм может быть построен по следующему правилу.

Пусть вектор в многомерном пространстве признаков (параметров)

$$\vec{Z} = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}, \quad (6.25)$$

где  $z$  — координата вектора.

Пусть в пространстве признаков (параметров) содержатся точки, принадлежащие  $n$  различным диагнозам состояний  $S_1, \dots, S_n$ .

Тогда дискриминантными функциями для этих состояний называют скалярные функции  $f_i(\vec{Z})$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), удовлетворяющие условию

$$f_i(\vec{Z}) > f_j(\vec{Z}) \quad (6.26)$$

при  $\vec{Z} \in S_i; j=1, 2, \dots, n; i \neq j$ .

Таким образом, функция  $f_i(\vec{Z})$  принимает для точек, характеризующих состояние  $S_i$ , наибольшее значение. Если состояния  $S_i$  и  $S_j$  в пространстве признаков имеют общую границу, то уравнение разделяющей поверхности будет

$$f_i(\vec{Z}) - f_j(\vec{Z}) = 0. \quad (6.27)$$

Алгоритмы, реализующие метод потенциальных функций, могут быть построены следующим образом. Если ввести расстояние  $\rho$  между произвольной точкой  $Z$  пространства признаков и некоторой характерной точкой  $Z_i$ , характеризующей состояние  $S_i$ ,

$$\rho(Z, Z_i) = |Z - Z_i|, \quad (6.28)$$

то следует считать, что дискриминантная функция  $f_i(Z)$  должна быть убывающей функцией этого расстояния:

$$f(Z) = f_i(\rho). \quad (6.29)$$

Так как  $\rho$  зависит от  $Z$  и  $Z_i$ , то можно записать

$$f_i(Z) = k(Z, Z_i), \quad (6.30)$$

где  $k(Z, Z_i)$  — потенциальная функция  $Z$ , в которую входит  $Z_i$  как параметр. Точка  $Z$  в многомерном пространстве признаков описывает состояние объекта диагностирования.

Метод потенциальных функций развит для разделения на два состояния: работоспособное и неработоспособное, т. е. для задач контроля. Разделяющая функция

$$f(Z) = f_1(Z) - f_2(Z) = k(Z, Z_1) - k(Z, Z_2) \quad (6.31)$$

Решающим правилом, по которому строится алгоритм диагностирования, при этом будет

$$f(Z) > 0, \text{ если } Z \in S_1, \quad (6.32)$$

$$f(Z) < 0, \text{ если } Z \in S_2$$

Алгоритмы, реализующие метрические методы диагностирования, строятся по решающему правилу

$$\rho_n(Z, E) = |Z - E| = \left[ \sum_{j=1}^v (z_j - e_j)^n \right]^{1/n}, \quad (6.33)$$

где  $\rho_n(Z, E)$  — расстояние между точками  $Z$  и  $E$  в пространстве признаков;  $l$  — координата эталонного вектора.

При  $\eta = 1$  расстояние определяется по Хеммингу, при  $\eta = 2$  берется евклидово расстояние, ..., при  $\eta = \infty$  берется расстояние по наибольшему отклонению по какой-либо из координат, т. е. при  $\eta \rightarrow \infty$

$$\rho_\infty = \max_{1 \leq j \leq v} |Z_j - E_j|.$$

Тогда, если

$$\rho_i = \min(Z, E_i), \text{ то } Z \in S_i. \quad (6.34)$$

Это значит, что если в пространстве признаков используется диагностическая мера расстояния  $\rho$  и предъявлен для идентификации вектор  $\vec{Z}$ , то для отнесения этого вектора к одному из состояний определяются расстояния  $\rho$  до эталонных векторов  $\vec{E}_1, \dots, \vec{E}_n$ . Вектор  $\vec{Z}$  относят к состоянию  $S_i$ , если мера расстояния между векторами  $\vec{Z}$  и  $\vec{E}_i$  минимальна.

Если пространство признаков неоднородно и неизотропно, т. е. единицы измерения различных координат вектора различны (например  $z_1$  — давление,  $z_i$  — температура и т. д.), то к правилу (6.34) добавляется ограничение

$$\delta_{ij}^{(1)} < \vec{Z}_j - \vec{E}_j < \delta_{ij}^{(2)}, \quad (6.35)$$

где  $\delta_{ij}^{(1)}, \delta_{ij}^{(2)}$  — границы области принятия решения для идентификации состояния  $S_i$  и координаты  $z_j$ .

Условие (6.35) определяет  $v$ -мерный параллелепипед, внутри которого должна находиться точка  $Z$  для принятия решения  $Z \in S_i$ .

Если точка  $Z$  выходит из области, определяемой правилом (6.35), то происходит отказ от распознавания, что нежелательно. Поэтому эта область принимается такой, чтобы она с некоторым запасом включала все векторы обучающей последовательности, принадлежащие состоянию.

Примером указанного алгоритма диагностирования, составленного для ИИС, схема которой приведена на рис. 6.2, может быть алгоритм работы ИИС в режиме STD в реальном масштабе времени (рис. 6.6).

После проведения подготовительных работ и ввода исходных данных по проводимому эксперименту запускается управляющее

устройство (часы времени испытаний) (рис. 6.2), а также дается команда системе управления стенда на отработку циклограммы работы ПГС ДУ. ИИС посредством кодового коммутатора производит опрос значений параметров, фиксируемых источниками информации, и запись в оперативно-запоминающее устройство ЭВМ с учетом времени опроса. Часть параметров, значения которых предназначены для отображения оперативной системой представления информации, подвергаются предварительной обработке, которая заключается в проверке регистрируемых значений на достоверность и на существенность, а также в переводе кодовых значений в оцифрованную физическую величину. Все эти операции производит ЭВМ ИИС.

После предварительной обработки полученные значения определяющих параметров, которые приняты для формирования вектора текущего состояния объекта, подвергаются вторичной обработке по алгоритму, реализующему решающее правило (6.34) с ограничением (6.35). В результате происходит диагностирование состояния объекта испытаний, результаты диагностирования, наряду с входным потоком отсчетов, выводятся на магнитный носитель. Если подошло время отображения информации оперативной системой представления информации, то производится выбор существенно изменившихся параметров и их оцифровка. Затем производится формирование таблиц и вывод их на дисплей. Если испытания продолжаются, то вся процедура алгоритма ИИС повторяется в режиме STD комплексных испытаний.

Рассмотренные ИИС занимают значительное место в технологическом процессе испытаний. Их работа должна быть теснейшим образом увязана с автоматизированными системами управления испытаниями.

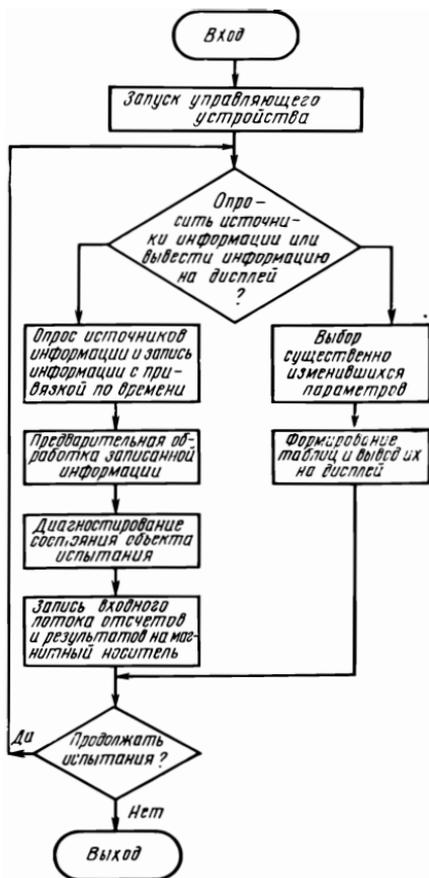


Рис. 6.6. Структурная схема алгоритма работы ИИС в реальном масштабе времени

**Оценка погрешности информационно-измерительного тракта ИИС.** При использовании ИИС на базе ЭВМ в задачах обработки или диагностирования возникает проблема оценки их погрешности. К числу важнейших метрологических характеристик рассматриваемых ИИС относятся показатели точности измерений. Погрешности измерения выходных параметров включают в себя, кроме инструментальных погрешностей и погрешностей математической обработки, погрешности, обусловленные методикой измерений. При определенной методике измерений методические погрешности зависят от изменения во времени физических величин, значения которых определяются прямыми измерениями. В настоящее время определение погрешности ИИС базируется на раздельном определении составляющих ее систематических и случайных погрешностей.

Систематические погрешности ИИС, неизменяющиеся при повторных измерениях, выявляются путем многократного измерения одной и той же физической величины, ее воспроизведения и регистрации и последующего сравнения полученных результатов с результатами, полученными на образцовых измерителях. Например, при аттестации ИИС, измеряющей давления в газовых либо в топливных магистралях, нагружение первичных преобразователей производится совместно с образцовыми манометрами заданного диапазона. После получения зарегистрированных значений путем сравнения производится определение систематической погрешности.

Наряду со систематическими погрешностями, при работе ИИС во время испытаний имеют место случайные погрешности. Эти погрешности связаны с нестабильностью напряжения, с электрическими наводками, с работой преобразователей, измерительных сигналов, регистрирующих устройств, первичных преобразователей, влиянием работающих стендовых систем и т. д.

Случайные погрешности определяются на основе обработки некоторых статистических данных. В этом случае результаты измерений можно рассматривать как случайные события. Если предположить, что случайные результаты измерений распределены по нормальному закону, то можно использовать для определения случайной погрешности ИИС формулы и положения теории вероятностей и математической статистики.

Понятно, что погрешности измерений фактически определяются суммой множества малых независимых друг от друга элементарных отклонений. Сумма элементарных случайностей подчиняется нормальному закону

$$f(X) = \frac{1}{D \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2D^2}}, \quad (6.36)$$

где  $f(X)$  — плотность вероятности распределения случайной величины  $X$ ;  $\mu$  — ее среднее значение;  $D$  — дисперсия случайной величины.

Во многих руководствах по определению случайных погрешностей ИИС придерживаются следующих условий:

1. Если получено значение случайной величины, отличающейся от среднего более чем на  $3\sigma$  ( $\sigma$  — среднеквадратичная погрешность), то результат не может быть объяснен случайными факторами, а связан либо с систематическими погрешностями, либо с грубыми сбоями ИИС.

2. Среднеквадратичную погрешность можно оценить по формуле

$$\sigma \approx (X_{\max} - \bar{X})/3, \quad (6.37)$$

где  $X_{\max}$  — максимальное значение случайной величины  $X$ ;

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i = \mu. \quad (6.38)$$

Обычно

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2, \quad (6.39)$$

где  $N$  — конечное число измерений.

Среднеквадратичную погрешность измерений величины  $Y = \psi(X_1, \dots, X_n)$  можно также определить из приближенного соотношения

$$\sigma_Y \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \psi_i}{\partial X_i} \sigma_{X_i} \right)^2}. \quad (6.40)$$

Следует отметить, что экспериментатор ограничен числом испытаний и поэтому объем выборки влияет на достоверность результатов.

Пусть значения некоторой случайной величины  $X$  (измеряемый параметр  $X$ , например давление в газовой подушке бака) распределены по нормальному закону. Рассмотрим, какова вероятность  $P$  при малом числе наблюдений  $n$  получить значение

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \text{ отличающееся от средней плотности вероятности } \mu \text{ генеральной совокупности на величину, превышающую}$$

среднеквадратичное отклонение  $S_{\bar{X}}$ , вычисленное по формуле

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}. \quad (6.41)$$

Доверительная вероятность  $\varphi(k, n)$ , вероятность нахождения случайной величины  $\bar{X}$  в доверительном интервале  $\mu \pm kS_{\bar{X}}$ , вычисляется по формуле

$$\varphi(k, n) = \frac{\Gamma(n/2)}{\sqrt{\pi(n-1)} \cdot \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \int_{-k}^k \left(1 + \frac{u^2}{n-1}\right)^{-n/2} du, \quad (6.42)$$

где  $\Gamma(n/2)$  — гамма-функция;  $u$  — число инверсий.

Подсчитанные значения интеграла в уравнении (6.42) обычно сводят в таблицу, которая описывает распределение Стьюдента.

Сравнение вероятностей для нормального распределения и распределения Стьюдента показывает, что при объеме выборки  $n \rightarrow 20$  различие нормального распределения и распределение Стьюдента незначительны.

Оценка процесса на существенность сводится к обнаружению и выделению его нестационарной составляющей, так как реальные телеметрируемые процессы всегда в той или иной степени нестационарны как по среднему значению составляющей, так и по ее дисперсии. Поэтому после исключения недостоверных данных желательнее разделить наблюдаемую реализацию  $y(t)$  на стационарную  $x(t)$ , аддитивную  $f(t)$  и мультипликативную  $g(t)$  составляющие, т. е. можно написать  $y(t) = x(t)g(t) + f(t)$ . Проверить стационарность измеряемых данных, а следовательно и сжать информацию, можно параметрическими и непараметрическими методами теории статистических решений.

Сравнить основную гипотезу  $H$  о стационарности процесса относительно среднего  $m_x$  со сложной альтернативой  $\bar{H}$  о его нестационарности можно с помощью распределения Стьюдента для функции

$$t = \frac{\bar{X} - X}{D_x} \sqrt{N},$$

если процесс нормален и дисперсия  $D_x^2$  известна.

Аналогично стационарность процесса относительно дисперсии ( $D_x^2 = \text{const}$ ) можно проверить с помощью распределения  $\chi^2$  для относительной оценки дисперсии  $D_x^2/D_x$ .

Здесь в обоих случаях нужно иметь априорную информацию о среднем значении составляющей и ее дисперсии, которой мы зачастую не располагаем.

Существуют достаточно много методов оценки стационарности процесса.

Например, при отличии распределения процесса от нормального удобнее воспользоваться для проверки стационарности и по среднему значению составляющей, и по дисперсии критерием, который представляет собой случайную величину, образованную

суммой чисел инверсий членов неупорядоченного статистического ряда, составленного из независимых ординат случайного процесса  $x_i(t)$ .

Если  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ ) — каждый предыдущий член статистического ряда, а  $x_j$  ( $j=i+1, i+2, \dots, n$ ) — последующие его члены, то сумма чисел инверсий

$$\tau = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n u(x_i, x_j), \quad (6.43)$$

$$\text{где } u(x_i, x_j) = \begin{cases} 1 & \text{при } x_i > x_j, \\ 0 & \text{при } x_i \leq x_j \end{cases}$$

имеет биномиальное распределение, не зависящее от характера распределения  $x(t)$ . При объемах выборки  $n > 10$  распределение (6.43) мало отличается от нормального с параметрами

$$E(\tau) = (n-1);$$

$$D(\tau) = (2n^3 + 3n^2 - 5n)/72, \quad (6.44)$$

где  $E(\tau)$  — математическое ожидание  $\tau$ ;  $D(\tau)$  — дисперсия  $\tau$ .

Здесь в качестве решающего правила используют неравенство

$$\tau_{1-\alpha/2} < \tau \leq \tau_{\alpha/2}, \quad (6.45)$$

где  $\alpha$  — ошибки первого рода.

Гипотеза о стационарности принимается, если неравенство (6.45) выполняется, и наоборот.

## 6.2. СТЕНДОВАЯ ОТРАБОТКА

**Общие сведения.** Практическая реализация изложенных в предыдущих разделах организационно-методических принципов и технических мероприятий по обеспечению отработки ПГС ДУ осуществляется в процессе стендовых испытаний агрегатов, механизмов, систем, изделий.

Исходными организационно-техническими документами для проведения испытаний являются комплексная программа экспериментальной отработки, план поставки объектов испытаний, технические задания на испытания, программы испытаний, методики определения параметров образцов по результатам испытаний, графики проведения работ.

В зависимости от видов нагружений испытания проводят на соответствующих экспериментальных установках или стендах. При этом для всех структурных уровней отработки имеется единый технологический план эксперимента:

1. Проверка готовности экспериментальной установки к испытаниям, в том числе систем измерения и управления. Сюда вхо-

дят операции по подготовке рабочих тел, градуировке преобразующей аппаратуры; контрольные проверки регистрирующей аппаратуры или ИИС, проверки готовности средств управления экспериментом в части обеспечения заданной циклограммы прохождения команд; проверки работоспособности стендовых систем, средств связи и систем, обеспечивающих безопасность при проведении испытаний; инструктаж персонала, участвующего в эксперименте.

2. Входной контроль объекта испытаний и предшествующие эксперименту предварительные испытания, включающие, например, проверку на функционирование некоторых элементов объекта, проверку на герметичность, прозвонку электро- и пиропечей.

3. Установка объекта испытаний на стенд или его монтаж в экспериментальной установке. Стыковка коммуникаций стенда с магистральями и узлами объекта. Иногда часть операций входного контроля и некоторые предварительные испытания проводятся после установки объекта испытаний на стенде.

4. Стыковка объекта испытаний с системами измерений и управления.

5. Комплексные проверки систем объекта испытания.

6. Заправка при необходимости объекта испытаний рабочими телами — жидкостями, сжатыми газами.

7. Проведение операций, обеспечивающих исходное состояние объекта испытаний, стенда, экспериментальной установки перед испытаниями (подача напряжения, прогрев аппаратуры, введение исходных данных в систему управления и ИИС, создание заданных давлений, температур и других начальных условий эксперимента).

8. Включение регистрирующей аппаратуры и реализация режимов испытаний.

9. Внешний осмотр объекта после испытаний.

10. Обработка и анализ результатов испытаний, принятие решения о дальнейшем проведении испытаний.

11. Освобождение объекта от остатков рабочих тел, отсоединение от стендовых систем, снятие с экспериментальной установки.

12. Если это предусмотрено технической документацией, передача объекта на следующий этап испытаний; продувка, нейтрализация, просушка объекта; дефектация опытного образца с оформлением соответствующих документов.

13. Выпуск отчетов и заключений по результатам испытаний и дефектации.

Рассмотрим подробнее некоторые элементы испытаний.

**Автономные испытания.** Автономные испытания агрегатов, механизмов и узлов ПГС ДУ проводятся обычно в рамках исследовательского, отработочного или контрольного этапов отработки.

Объем и порядок испытаний определяются соответствующими

техническими документами на основе анализа функционального назначения объекта испытания, требований к его параметрам и характеристикам, условий эксплуатации, сборки, хранения, подготовки к работе и использования в штатном ПГС ДУ с учетом нештатных и аварийных ситуаций, которые могут возникнуть на любом этапе эксплуатации. При определении объема и порядка испытаний учитываются также конструктивные особенности объекта испытаний, степень новизны конструкции, применение унифицированных элементов, а также требования к показателям надежности.

В соответствии с заданными программой, видами нагружений и режимами агрегаты проходят испытания по приведенному ранее технологическому плану на различных экспериментальных установках. При этом намечается тенденция проведения испытаний на предельных режимах при совмещении воздействующих факторов; испытаний на функционирование в условиях воздействия тепловых нагрузок и имитации космического пространства; вибронгружений одновременно по трем осям с функционированием объекта испытаний и т. п.

Для проведения испытаний используются, как правило, стационарные установки промышленного типа: вакуумные и климатические камеры, вибростенды и ударные стенды, пневматические и гидравлические стенды, обеспечивающие заданные параметры рабочих тел, боксы с натурными компонентами, тепловые вакуумные установки и т. д.

В качестве примера рассмотрим типовую схему стенда для контрольных испытаний предохранительных клапанов (рис. 6.7). Целью испытаний является проверка и подтверждение работоспособности предохранительных клапанов (ПК). При этом на стенде определяются следующие характеристики ПК:

давление начала открытия ПК;

пропускная способность ПК в зависимости от давления в баке;

давление закрытия ПК.

Указанные характеристики ПК существенно зависят от объема газовой подушки бака, расходов газа на наддув и гидравлических характеристик дренажных магистралей, т. е. темпа нарастания и сброса давления в системах. Стенд представляет собой градуированную емкость 1, свободный газовый объем которой может регулироваться путем заправки ее жидкостью через вентиль 27. Уровень жидкости контролируется через мерное стекло 28. Объект испытаний 2 соединен с емкостью 1 через переходник 17. К ПК подсоединяется дренажная магистраль 6, имитирующая гидравлическое сопротивление штатной системы дренажа. Заданные параметры газа обеспечиваются стендовой рампой 26. Расход рабочего тела регулируется ЭПК 9 и 18, игольчатым краном 21, жиклером 13 и контролируется первичными преобразователями, термopарами и манометрами.

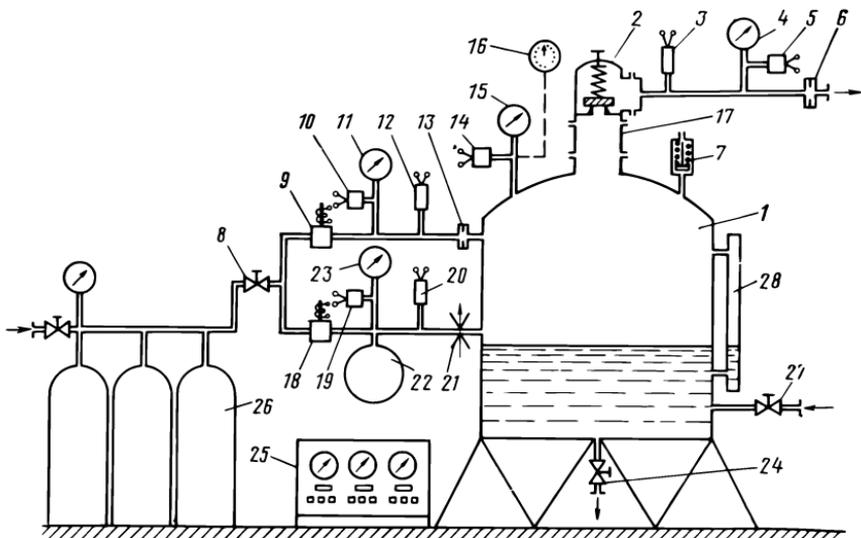


Рис. 6.7. Схема' стенда для контрольных испытаний ПК:

1 — испытательная емкость, моделирующая рабочую емкость; 2 — объект испытания; 3, 12, 20 — термопары; 4, 11, 15, 23 — манометры; 5, 10, 14, 19 — первичные преобразователи; 6 — дренажная магистраль с дроссельной шайбой; 7 — ПК испытательной емкости; 8 — входной вентиль; 9 — электропневмоклапан (ЭПК); 13 — продувочный жиклер; 16 — секундомер; 17 — технологический переходник; 18 — ЭПК магистрали проверки настройки; 21 — игольчатый кран; 22 — ресивер; 24 — вентиль дренажа испытательной емкости; 25 — пульт управления и регистрации параметров; 26 — рампа сжатого азота; 27 — заправочный водяной вентиль; 28 — мерное стекло

Давление начала открытия и закрытия ПК определяются по показаниям манометров, установленных на емкости 1 и дренажной магистрали 6. Управление испытаниями осуществляется с пульты 25.

**Испытания систем.** Испытания систем проводятся, как правило, после окончания автономной отработки агрегатов, комплектующих эти системы. Основные цели испытаний систем изложены в разд. 3.

При испытании систем, наряду с серийным промышленным оборудованием (электрогидравлическими возбудителями колебаний, пневматическими камерами и т. п.), используются специальные стенды. Наиболее сложными из них являются стенды для определения динамических характеристик систем подачи.

На таких стендах решаются следующие задачи:

определение давлений при гидроударах и характер распространения гидроударов по магистралям при имитации запуска и выключения двигателей;

оценка амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ) систем питания;

определение влияния упругих характеристик элементов систем питания на их динамические и частотные характеристики;

определение эффективности демпфирующих устройств и их влияния на динамические характеристики системы в зависимости от места установки.

Следует отметить, что экспериментальное определение динамических характеристик систем питания является одной из самых сложных проблем обработки ПГС ДУ.

Во-первых, как уже указывалось выше, АФЧХ системы определяет целый комплекс факторов. Это податливость гидравлических линий и днища бака, упругие свойства системы подвески трубопроводов и двигателей к двигательному отсеку, упругость различного рода компенсаторов и сильфонов, гидравлические и упругоинерционные характеристики демпферов и устройств на границах системы: на стыке с баком и на входе в насосы ЖРД.

Во-вторых, для возбуждения колебаний системы в условиях стенда и для последующей обработки результатов испытаний с помощью математических моделей процессов желательно иметь генератор синусоидальных колебаний давлений во всем спектре исследуемых частот. Причем этот генератор колебаний (пульсатор) не должен по возможности нарушать гидродинамику трубопроводов питания, т. е. вызывать дополнительную кавитацию или выделение растворенного в жидкости газа.

Естественно, что одновременное выполнение или воспроизведение всех этих условий в рамках одного стенда не представляется возможным. Поэтому решение проблемы снятия АФЧХ распадается на ряд локальных задач экспериментального определения отдельных характеристик систем питания с обобщением результатов посредством математической модели всего процесса.

На рис. 6.8, 6.9 представлены схемы двух стендов для определения АФЧХ систем питания. Первый из них представляет штатную систему питания 1 (см. рис. 6.8) с рабочей стендовой емкостью 10, обеспечивающей штатные расход и давление. На конце системы питания расположен эжектор 2 с подачей активной жидкости от стендовых систем. Эжектор моделирует граничные условия стыка системы питания с двигателем. Возбуждение колебаний осуществляется пульсатором 4. Стенд позволяет менять расположение демпфера 5 в системе питания, а также осуществлять заправку системы жидкостью с различной концентрацией растворенного газа. Как видно из схемы, на стенде не моделируются упругие свойства подвески системы питания к двигательному отсеку. Граничные условия стенда и штатного изделия неадекватны.

Тем не менее на таких стендах решается целый ряд практических задач по оценке влияния демпфера и места его установки на АФЧХ системы, влияния насыщения газом жидкости на динамические параметры системы и эжектора, а также влияния на эти параметры самого эжектора при различных условиях его

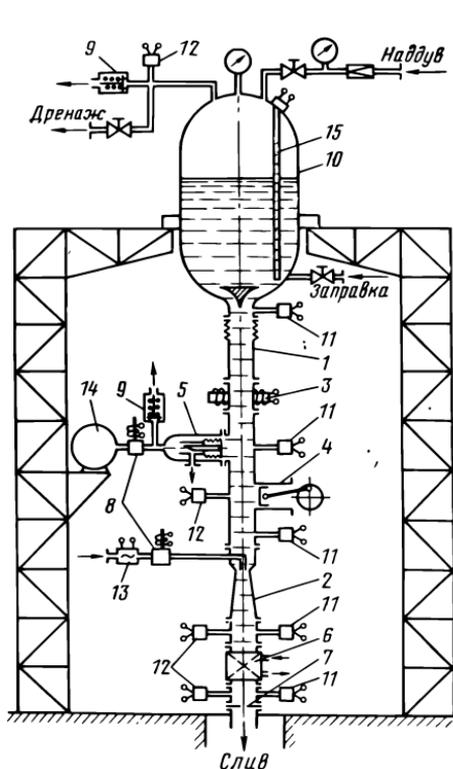


Рис. 6.8. Схема стенда для исследования динамических характеристик систем питания:

1 — система питания; 2 — эжектор; 3 — малоинерционный расходомер; 4 — пульсатор; 5 — демпфер; 6 — отсечной ЭПК; 7 — дроссельная шайба; 8 — ЭПК; 9 — ПК; 10 — емкость; 11 — первичный преобразователь пульсации; 12 — первичный преобразователь давления; 13 — расходомер; 14 — шар — баллон запитки газовой полости; 15 — первичный преобразователь

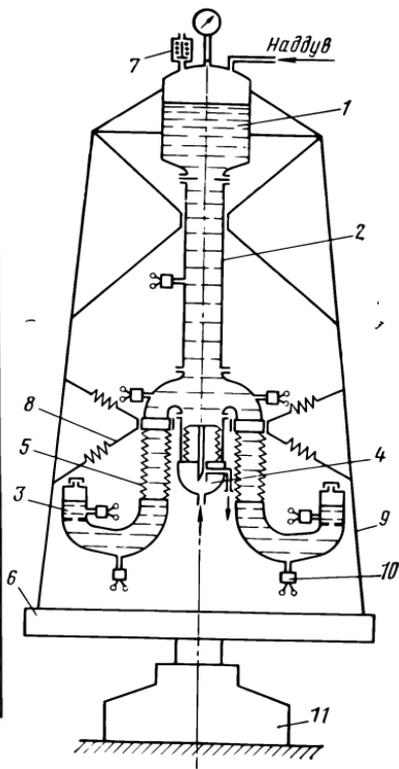


Рис. 6.9. Схема стенда для снятия АФЧХ систем питания:

1 — имитатор топливного бака; 2 — система питания; 3 — имитатор входного импеданса; 4 — демпфер; 5 — сифонный компенсатор; 6 — стол электрогидравлического возбудителя (ЭГВ); 7 — ПК; 8 — имитатор штатной подвески системы питания к ДУ; 9 — ферма крепления топливной системы на столе ЭГВ; 10 — первичный преобразователь пульсации; 11 — ЭГВ

работы. На этом стенде также проводятся испытания демпфера на стойкость к гидроударам.

В стенде для снятия АФЧХ систем питания, схема которого приведена на рис. 6.9, штатная система и ее подвеска к двигателю отсеку крепятся на ферме 9, которая, в свою очередь, устанавливается на стол электрогидравлического возбудителя (ЭГВ) колебаний 6. Гидравлическая система непроточная. Имитаторы 1 и 3 представляют собой соответственно входной и выходной импедансы жидкостных трактов. Хотя граничные условия системы неадекватны штатным, испытания на таких стендах позволяют производить оценку влияния характеристик демпфера на

изменение амплитуд колебаний в различных сечениях трубопроводов при изменении частоты, снимать динамические характеристики демпфера при различных режимах работы, определять перегрузки и коэффициенты усиления в характерных точках системы питания и подвески.

Обе рассмотренные схемы допускают проведение испытаний с частотами до 60 Гц.

**Комплексные испытания ПГС ДУ.** Заключительным этапом стендовой отработки ПГС ДУ являются комплексные испытания. Для испытаний изготавливаются в основном в соответствии со штатной технической документацией несколько ДУ. Отличия могут состоять в введении дополнительных средств измерений, обеспечивающих максимум информации при экспериментах, и в установке на разъемах некоторых агрегатов одноразового действия, позволяющих проведение повторных испытаний.

Проведение комплексных испытаний возможно в несколько подэтапов. Это обусловлено использованием на некоторых стендовых изделиях имитаторов штатных компонентов или предварительным воздействием на ДУ факторами, воспроизводящими, например, условия выведения ДУ космического аппарата на орбиту или условия длительного хранения ДУ носителя в заправленном состоянии в утяжеленных климатических условиях.

Применение на одном из подэтапов комплексных испытаний имитаторов компонентов топлива допускается в основном в случае высокой токсичности натуральных компонентов. Это позволяет в безопасных условиях лаборатории провести большой объем экспериментов по проверке работоспособности и взаимодействия ПГС, а на заключительном подэтапе на натуральных компонентах только подтвердить основные характеристики ДУ.

В случае такого разбиения этапа комплексных испытаний во время экспериментов на стендовом изделии решаются следующие основные задачи:

определение временных характеристик заполнения магистралей питания при открытии пусковых клапанов и наддуве топливных баков;

определение давлений при гидроударах, понижений давлений, а также характера их распространения по топливным магистралям при включении и выключении агрегатов автоматики ДУ;

оценка взаимного влияния двигателей при одновременном и одновременном срабатывании агрегатов автоматики ДУ;

оценка динамических характеристик систем питания: собственных частот колебаний, декрементов затухания, скоростей распространения малых возмущений;

определение гидравлических характеристик систем питания по расходам и давлениям на входе в двигатели;

определение рассогласования уровней жидкости и давлений в топливных баках при наддуве и выработке жидкости;

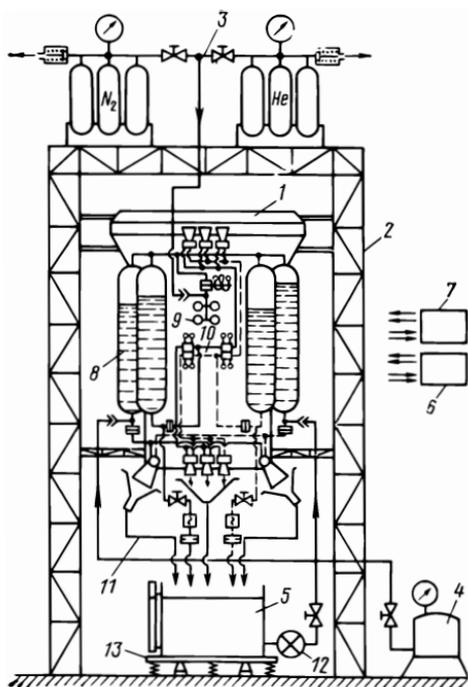


Рис. 6.10. Схема стенда для испытаний ПГС ДУ на имитаторах топлива:

1 — объект испытания; 2 — силовая рама; 3 — емкость с рабочим газом; 4 — вакуумный насос; 5 — емкость с рабочей жидкостью; 6 — система измерений; 7 — система управления; 8 — топливные баки; 9 — аккумулятор сжатого газа; 10 — система подачи топлива; 11 — система слива рабочей жидкости; 12 — насос для заправки рабочей жидкости; 13 — весы

комплекс стендовых систем: силовую раму для установки объекта испытания, хранилища рабочих жидкостей и газов, емкости для слива отработавших компонентов, коммуникации для подачи рабочих тел к объекту испытания, систему вакуумирования магистралей и систему насыщения компонентов газами, системы энергоснабжения, управления испытаниями и ИИС, а также системы пожаротушения, дегазации, нейтрализации, дожигания остатков топлива и т. д.

На рис. 6.10 представлена схема стенда для испытаний ПГС ДУ на имитаторах топлива. Объект испытания 1 установлен в силовой раме 2 и состыкован с емкостями с рабочими жидкостями 5 и газом 3. Заправка топливных баков 8 осуществляется из емкости 5 насосом 12. В эту же емкость может сливаться рабочая жидкость (вода, спирт) при выработке ее из баков объекта испытания. Так как наддув баков обеспечивает аккумулятор сжатого

определение характеристик систем наддува на всех возможных режимах, в том числе диапазонов изменения рабочих давлений в баках при предстартовом наддуве, при выработке топлива, включении и выключении системы наддува, а также расходов газа на наддув, числа включений агрегатов автоматики системы наддува за время полного опорожнения баков;

определение динамических характеристик системы дренажа в части обеспечения рабочего диапазона изменения давления в баках при ее совместном функционировании с системой наддува в расходном и безрасходном режимах работы систем питания;

определение достаточности запасов газа в аккумуляторах давления для функционирования системы наддува.

Стенды для испытаний ДУ представляют собой весьма сложные сооружения, включающие целый

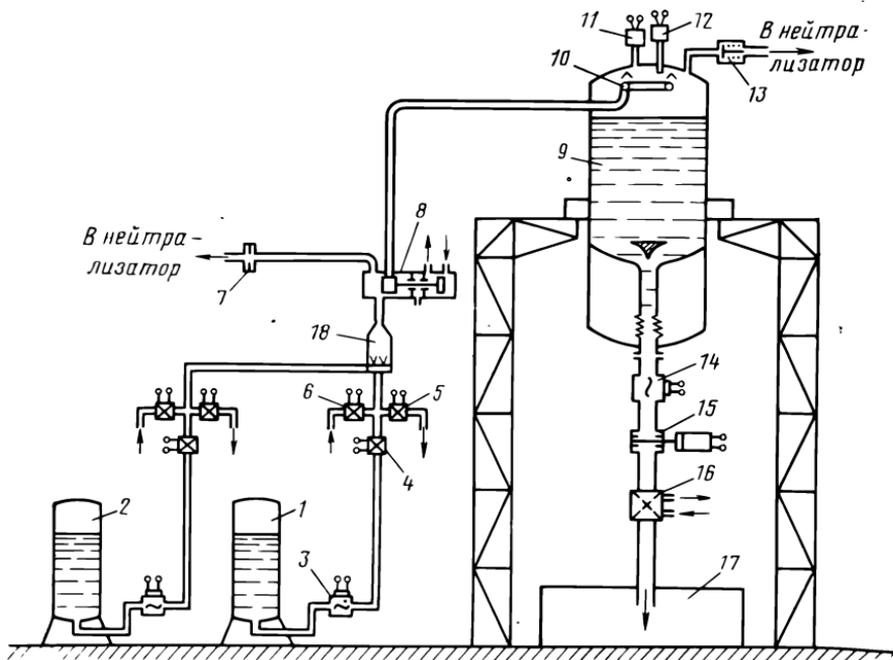


Рис. 6.11. Схема стенда для обработки газогенераторного наддува:

1 — бак окислителя; 2 — бак горючего; 3, 14 — расходомеры; 4 — пусковой клапан; 5 — дренажный клапан; 6 — клапан продувки; 7 — дроссельная шайба магистрали перепуска газа; 8 — клапан перепуска; 9 — испытываемый бак; 10 — распылитель; 11 — первичный преобразователь температуры; 12 — первичный преобразователь температуры; 13 — ПК; 15 — управляемый дроссель; 16 — пневмоклапан; 17 — сливная емкость; 18 — газогенератор

газа 9, то на подобном стенде можно осуществлять почти полную отработку ПГС ДУ. Штатные расходы жидкости обеспечиваются при этом перенастройкой гидравлических сопротивлений входных магистралей двигателей или установкой вместо них штатных клапанных механизмов без камер сгорания с дополнительными дроссельными шайбами. Перенастройка баковых давлений для обеспечения требуемых динамических характеристик систем питания осуществляется в соответствии с критериальными соотношениями, полученными в разд. 4 и 5. Самая сложная технологическая проблема при таких испытаниях — обеспечение полной заправки сложных штатных систем подачи 10 топлива, так как нахождение в них малейших объемов свободного газа может привести к искажению результатов испытаний. Для решения этой проблемы перед заправкой разветвленные системы питания вакуумируются насосами 4, а трубопроводы заполняются деаэрированной жидкостью.

Если для наддува топливных баков при работе двигателей используются продукты газогенерации компонентов топлива; то

для обработки систем и параметров газогенераторного наддува, как правило, создается специальный стенд (рис. 6.11), представляющий собой запрограммированную штатными компонентами ДУ, двигатели на которой имитируются клапанами с регуляторами расхода.

При испытаниях такого стенда, наряду с указанными выше вопросами, решаются следующие задачи:

в соответствии с потребным диапазоном изменения давления в баке с заданными расходами топлива подбирают и определяют параметры газогенераторного наддува: расход, температуру и т. д.;

определяют подогрев поверхностного слоя компонента и прогрев конструкции бака при подаче в него газогенераторного газа.

Газогенератор работает на натуральных компонентах топлива, но от стендовых систем питания. После запуска газогенератора получения требуемых значений параметров газа с помощью клапана перепуска производится его подача в бак. Расход топлива меняется в соответствии с циклограммой проведения испытаний.

### 6.3. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

**Общие сведения.** Натурные испытания являются завершающим этапом обработки опытных образцов ПГС ДУ.

Главные цели летных испытаний: проверка и подтверждение соответствия технических характеристик и параметров ПГС ДУ техническому заданию в условиях эксплуатации; получение опытных данных для оценки показателей надежности; проверка и отработка эксплуатационной документации.

Основное условие для их начала — завершение всего объема наземной отработки изделия и его составных частей.

В настоящее время существует устойчивая тенденция сокращения объема летных испытаний и переноса центра тяжести отработки на испытания в наземных условиях. Считается, что в полете должны отрабатываться лишь комплексные проблемы, решение которых невозможно в рамках наземно-стендовых испытаний. Основными аргументами в пользу такой точки зрения являются экономические, экологические и технические соображения. Действительно, при огромных затратах на организацию и проведение натурных испытаний они зачастую оказываются менее информативными, чем наземные эксперименты из-за ограниченного числа измерительных средств и радиотелеметрических каналов. Применение высокотоксичных компонентов топлива при неблагоприятном исходе натурных испытаний может вызвать негативные экологические последствия.

Для иллюстрации сказанного можно указать, что на программы экспериментальной отработки комплекса «Сатурн — Аполлон» было израсходовано 16 млрд. дол. из общей суммы затрат 24 млрд. долл. Причем в последующих проектах доля затрат на

исследовательские и экспериментальные работы еще больше возросла. Интенсивная наземная отработка агрегатов, механизмов, систем и блоков, широкое использование установок, обеспечивающих имитацию реальных условий эксплуатации, позволили существенно сократить объем дорогостоящих летных испытаний. Так, для системы «Сатурн-5» оказалось возможным ограничить летные испытания двумя пусками, хотя вначале запланировано пять.

При подготовке и проведении натурных испытаний ПГС ДУ решаются следующие задачи:

- проверяется готовность наземного оборудования и контрольно-проверочной аппаратуры к совместной работе с испытываемым объектом;

- проверяется достаточность и эффективность предпусковых испытаний и проверок ПГС ДУ, а также их технология;

- получают опытные данные по работоспособности и характеристикам штатных систем заправки изделия компонентами топлива и сжатыми газами;

- проверяется работоспособность и последовательность функционирования, а также оцениваются характеристики ПГС в заданном диапазоне рабочих условий;

- проверяется взаимодействие ПГС со сложными бортовыми и наземными системами;

- проверяется характер влияния на работоспособность ПГС ДУ внешних факторов, обусловленных условиями полета;

- отрабатываются системы, испытания которых в наземных условиях невозможны;

- оцениваются фактические остатки компонентов топлива и сжатых газов в бортовых системах после выполнения программы полета.

Технологический план подготовки и проведения натурных испытаний ПГС ДУ несколько шире плана проведения наземных стендовых испытаний.

Подготовка к натурным испытаниям начинается с отработки на конструкторско-технологических изделиях, макетах или аналогах наземного оборудования, бортовых систем и контрольно-проверочной аппаратуры с использованием штатной эксплуатационной документации. При этом проверяется готовность пневмоиспытательного, заправочного и пускового оборудования, отрабатывается технология проведения штатных операций.

После прибытия изделия на испытания и входного контроля ПГС ДУ проверяется в монтажно-испытательном корпусе (МИК). Сначала проводятся автономные испытания по проверке функционирования отдельных агрегатов, механизмов и систем, проверка герметичности отдельных агрегатов и стыков. Затем проверяется герметичность ПГС ДУ в целом, в масштабах блока или ступени. После проведения автономных и комплексных испытаний систем управления, электроработавтоматики и те-

леметрического контроля, а также заключительных операций космический аппарат транспортируется на стартовую площадку.

Установленный на стартовой площадке и подключенный к электрическим, пневматическим и гидравлическим коммуникациям наземного комплекса космический аппарат снова проходит большой объем автономных и комплексных проверок, после завершения которых производится его заправка компонентами топлива и сжатыми газами.

Затем проводятся предпусковые операции, которые могут включать в себя и кратковременный запуск ДУ, после чего космический аппарат при необходимости дозаправляется и осуществляется его запуск. В процессе предстартовой подготовки и пуска показания первичных преобразователей регистрируются наземными средствами измерений или системой телеметрического контроля.

**Испытания ПГС ДУ в МИКе.** Перед испытаниями проверяется испытательное оборудование, комплектность эксплуатационной документации и инструкций, соответствие стандартам состава, влажности, температуры давления, применяемых сжатых газов (воздуха, азота, гелия и т. д.). Масс-спектрометрические теческаты настраиваются на контрольные течи с тем, чтобы их чувствительность по потоку контрольного газа (например, гелия) позволяла определить негерметичность объекта испытания, меньшую допустимой. Испытательное оборудование подключается к борту космического аппарата, источникам напряжения и сжатых газов. Автономным проверкам подвергаются мембранные узлы, электро-, пневмо- и пироклапаны, участки трубопроводов, сигнализаторы давления и т. п. Обычно испытательное оборудование изготавливается в виде пневмопульта и электрощитков. Схемы такого оборудования и его стыковки с бортом космического аппарата показаны на рис. 6.12. В состав пневмопульта 2 входит система коллекторов 5, запорных вентилях и редукторов 6, обеспечивающих подачу газа нужных параметров к объекту испытания. Контроль давления газа осуществляется манометрами 15. Фильтры 4, установленные на входе в пневмопульт, предохраняют штатные коммуникации от попадания грязи и инородных частиц. С помощью электрощитка 3 проверяется функционирование электроагрегатов и электроцепей, а также контролируется срабатывание сигнализаторов, клапанов или других электрических устройств посредством высвечивания специальных сигнальных транспарантов.

Применение пневмопульта и электрощитков существенно повышает качество проверки систем, так как позволяет собрать перед испытаниями единую схему проверок и без ее перемонтажа реализовать весь технологический цикл.

При испытаниях в МИКе автономным проверкам на функционирование и герметичность подвергаются следующие агрегаты ПГС ДУ: заправочно-сливные, предохранительные, дренаж-

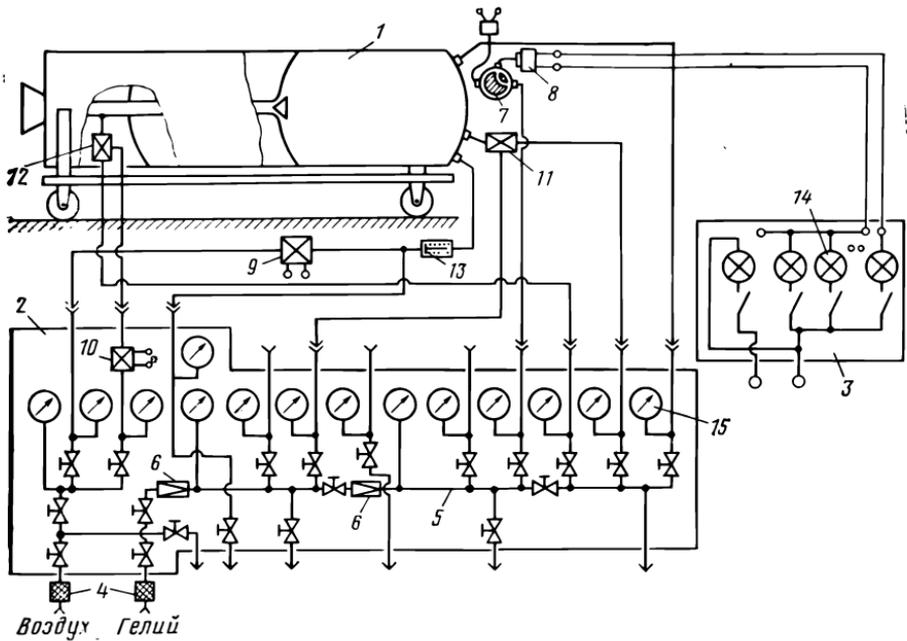


Рис. 6.12. Схема оборудования для испытания ПГС ДУ на герметичность и функционирование:

1 — ДУ; 2 — пневмоульти; 3 — электрощиток; 4 — газовый фильтр; 5 — коллектор; 6 — редуктор; 7 — клапан-тройник; 8 — сигнализатор давления; 9, 10 — электромагнитные клапаны; 11 — дренажно-предохранительный клапан; 12 — заправочно-сливной клапан; 13 — обратный клапан; 14 — контрольная лампочка; 15 — манометр

но-предохранительные, электропневматические, электрические и магнитоимпульсные клапаны и сигнализаторы давления. На целостность электрических цепей и герметичность проходят испытания мембранные и пироклапаны. На функционирование проверяются системы опорожнения баков, первичные преобразователи системы контроля уровня топлива, давления и т. д.

После автономных испытаний ПГС ДУ поочередно или в сборе проводятся комплексные проверки отдельных ее систем. Одним из этапов этих проверок являются испытания на герметичность. Для этого используются те же пневмоульти, с помощью которых производится наддув систем до давлений, находящихся в пределах 0,6...0,8 рабочих значений.

Существует несколько методов проверок на герметичность.

Агрегаты, участки магистралей небольшого объема можно проверять на герметичность по спаду или увеличению давления. В испытуемый объем подается сжатый газ до заданного давления, после чего подача прекращается. Через определенный промежуток времени по манометру определяется понижение давления, которое сравнивается с расчетным или среднеопытным

значением. При этом выдержка времени должна быть тем больше, чем больше разница температур испытуемого объекта и окружающей среды. Негерметичность оценивается как среднее из трех результатов последовательно выполняемых измерений. Часто при проверках агрегатов негерметичность оценивают по натеканию газа в полость за уплотнительным элементом, например клапаном.

Для поиска места негерметичности (швов, стыков, трещин) в качестве предварительного часто используют метод обмыливания — покрытия мыльной эмульсией проверяемых поверхностей. Места негерметичности обнаруживают по наличию мыльных пузырей. Чувствительность этого метода оценивается негерметичностью свыше 2 л·мкм рт. ст./с.

Для измерения негерметичностей посадочных мест клапанов и заглушек, т. е. порядка мм<sup>3</sup>/с, применяются ротаметры или градуированные перевернутые вниз горлом мензурки, опущенные в кювету с жидкостью, куда под мензурку подведен патрубком от испытуемой полости. Изменения объема газа под мензуркой и время проверки позволяют сделать вывод о степени негерметичности объекта.

Наиболее точный и широко распространенный метод поиска негерметичности — метод щупа с использованием масс-спектрометрических течейскаателей. При его применении испытуемый объект — бак, система, магистраль наддуваются контрольным газом (гелием или воздушно-гелиевой смесью). Для равномерного распределения гелия по всему объему дается выдержка от 10 мин до нескольких часов в зависимости от объема и конфигурации объекта испытания или осуществляется предварительное вакуумирование полости. После выдержки производится поиск негерметичности путем перемещения щупа — натекаателя течейскаателя вдоль соединений и швов объекта. Если поток гелия через блок измерения течейскаателя превышает уровень заданной настройки, включается система звуковой или световой сигнализации. Чувствительность прибора позволяет определять течи порядка  $10^{-4}$  ...  $10^{-5}$  л·мкм рт. ст./с.

Для оценки суммарной негерметичности ПГС ДУ, баков, отсеков космического аппарата применяется метод испытаний в вакуумной камере (рис. 6.13). Объект испытаний помещается в специальную герметичную камеру, где с помощью насоса создается вакуум. В объект испытаний через дренажные и заправочные горловины накачивается гелий или гелиево-газовая смесь.

При негерметичности объекта испытаний гелий проникает в полость вакуумной камеры и улавливается подключенным к ней течейскаателем.

Проверки ПГС ДУ на стартовой площадке. После успешного завершения проверок в МИКе ПГС ДУ в собранном виде устанавливается на стартовый стол и подключается к наземным электро-, пневмо-, гидравлическим кабелям и магистралям. Пос-

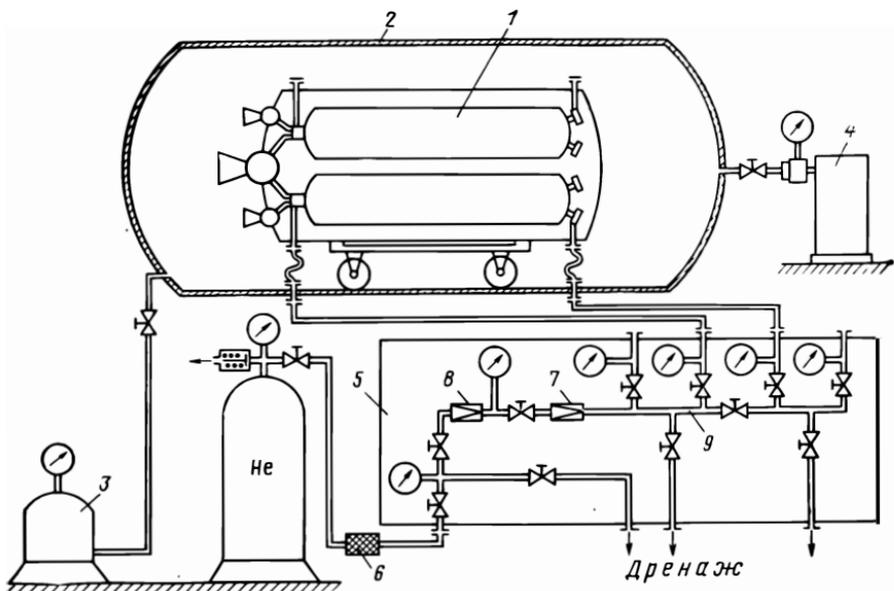


Рис. 6.13. Схема испытания ДУ на герметичность в вакуумной камере:  
 1 — ДУ; 2 — вакуумная камера; 3 — вакуумный насос; 4 — гелиевый течеискатель; 5 — пневмопульт; 6 — газовый фильтр; 7, 8 — редукторы; 9 — коллектор

ле стыковки с системами наземно-стартового комплекса ряд агрегатов и систем снова проходят автономные проверки на функционирование и герметичность.

Заключительным этапом подготовки космического аппарата к старту являются комплексные проверки ПГС ДУ с системой электроавтоматики, управления и с наземной аппаратурой. Комплексные испытания проводятся по полной программе с имитацией всего цикла заправки, наддува, предстартовой подготовки и полета, с подачей команд по штатной циклограмме и моделированием нештатных ситуаций. При этом магистрали и баки ДУ подвергаются воздействию рабочих давлений. Последовательность подачи и прохождения команд, а также параметры регистрируются системой телеметрического контроля. Реализация программ комплексных испытаний и контроль их выполнения обычно осуществляются с помощью ЭВМ.

При положительных результатах комплексных испытаний ПГС ДУ допускается к заправке компонентами топлива и сжатыми газами. После заправки осуществляется пуск космического аппарата.

Иногда при первых пусках космических кораблей в качестве объекта испытаний используются ДУ только первого блока, а вместо второго и других блоков устанавливаются массовые макеты. При этом наращивание штатных блоков идет по мере успешного завершения испытаний блоков стартовой ступени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Г. И. Ракеты многократного использования. М.: Воениздат, 1975. 347 с.
2. Беляев Н. М. Расчет пневмогидравлических систем ракет. М.: Машиностроение, 1983, 246 с.
3. Беляев Н. М. Реактивные системы управления космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 229 с.
4. Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 262 с.
5. Венгерский Э. В., Морозов В. А., Усов Г. Л. Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических установок. М.: Машиностроение, 1982. 127 с.
6. Волков Л. И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. М.: Высшая школа, 1981. 254 с.
7. Высокооборотные лопастные насосы/ Под ред. Б. В. Овсянникова. М.: Машиностроение, 1975. 335 с.
8. Григорьев В. А., Павлов Ю. М., Аметистов Е. В. Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977. 289 с.
9. Дейли Дж., Харлеман Д. Механика жидкости. М.: Энергия, 1981. 421 с.
10. Динамика насосных систем. Сборник научных трудов. Киев. Наукова думка, 1980. 171 с.
11. Испытания жидкостных ракетных двигателей/ А. Е. Жуковский, В. С. Кондрусев, В. Я. Левин, В. В. Оporочков, М.: Машиностроение, 1981. 255 с.
12. Капур К., Ландерсон Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 1980. 343 с.
13. Кафаров В. В. Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1972. 656 с.
14. Колесников К. С. Динамика ракет. М.: Машиностроение, 1980. 387 с.
15. Кузмичев Д. А., Радкевич И. Н., Смирнова А. Д. Автоматизация экспериментальных исследований. М.: Наука, 1983. 391 с.
16. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Новосибирск, Наука, 1970. 657 с.
17. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. 341 с.
18. Лихачев В. Я., Васин А. С., Гликман Б. Ф. Техническая диагностика пневмогидравлических систем ЖРД. М.: Машиностроение, 1983. 204 с.
19. Ломакин А. А. Центробежные и осевые насосы. М.: Машиностроение, 1966. 363 с.
20. Луарсабов К. А., Пронь Л. В., Сердюк А. В. Летные испытания жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1977. 187 с.
21. Маликов В. Г., Сырицин Т. А., Трофимов Э. В. Наземное оборудование ракет. М.: Воениздат, 1978. 232 с.
22. Мамаев В. А., Одишерия Г. З. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах. М.: Недра, 1969. 207 с.
23. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды/ Под ред. Г. И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 376 с.

24. **Морозов К. В.** Ракеты-носители космических аппаратов: М.: Машиностроение, 1975. 249 с.
25. **Машкис А. Д.** Гидромеханика невесомости. М.: Наука, 1976. 683 с.
26. **Нусинов М. Д.** Воздействие и моделирование космического вакуума. М.: Машиностроение, 1982. 175 с.
27. **Общие требования к программам обеспечения надежности промышленных изделий.** Методика. М.: Изд-во Стандартов, 1973. 89 с.
28. **Паушкин Я. М.** Жидкие и твердые химические ракетные топлива. М.: Наука, 1978. 272 с.
29. **Петров В. И., Чебаевский В. Ф.** Кавитация в высокооборотных лопастных насосах. М.: Машиностроение, 1982. 239 с.
30. **Пневмогидравлические системы двигательных установок с ЖРД/** А. Д. Полухин, Н. Н. Миркин, В. М. Орещенко, Г. Л. Усов. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
31. **Попов Д. Н.** Нестационарные гидромеханические процессы. М.: Машиностроение, 1982, 239 с.
32. **Ринг Э.** Двигательные установки ракет на жидком топливе. М.: Мир, 1966. 404 с.
33. **Сертификация.** Принципы и практика. М.: Изд-во стандартов, 1983. 72 с.
34. **Страхов А. Ф.** Автоматизированные измерительные комплексы. М.: Атомиздат, 1982. 343 с.
35. **Феодосьев В. И.** Основы техники ракетного полета. М.: Наука, 1981. 494 с.
36. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 691 с.
37. **Шибанов Г. П.** Распознавание в системах автоконтроля. М.: Машиностроение. 1973. 358 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>1. ПГС питания ДУ с ЖРД . . . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Состав, основные определения, классификация, особенности устройства . . . . .	5
1.2. Топливные системы, заборные устройства, устройства заправки . . . . .	15
1.3. Системы наддува и дренажа . . . . .	27
1.4. Агрегаты ПГС . . . . .	32
1.5. Измерение уровней топлива в баках . . . . .	47
1.6. Жидкие ракетные топлива . . . . .	50
<b>2. Факторы, воздействующие на ПГС ДУ в процессе эксплуатации ракет-носителей космических аппаратов . . . . .</b>	<b>59</b>
2.1. Условия окружающей среды . . . . .	59
2.2. Факторы космического пространства и процессы, протекающие под их воздействием . . . . .	61
2.3. Механические воздействия . . . . .	67
<b>3. Основные принципы отработки ПГС ДУ . . . . .</b>	<b>82</b>
3.1. Отработка как элемент комплексной системы управления качеством . . . . .	82
3.2. Организационно-методические принципы отработки . . . . .	89
3.3. Основы планирования отработки. Нормы испытаний и показатели надежности . . . . .	98
<b>4. Основы физического моделирования процессов в ПГС ДУ . . . . .</b>	<b>110</b>
4.1. Основные уравнения и критериальные соотношения . . . . .	110
4.2. Условия моделирования процессов в гидравлических системах . . . . .	140
<b>5. Основы математического моделирования процессов в ПГС ДУ . . . . .</b>	<b>147</b>
5.1. Массообменные и гидродинамические процессы при движении газонасыщенного топлива . . . . .	147
5.2. Структура газонасыщенного потока . . . . .	164
5.3. Моделирование движения газонасыщенного потока топлива . . . . .	179
<b>6. Экспериментальная отработка ПГС ДУ . . . . .</b>	<b>207</b>
6.1. Информационное обеспечение . . . . .	207
6.2. Стендовая отработка . . . . .	231
6.3. Натурные испытания . . . . .	240
Список литературы . . . . .	246

