

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	4
ПРЕДИСЛОВИЕ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	7
1. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АГРЕГАТАХ ПГС .....	9
1.1. Расчет расхода газа через клапан .....	9
1.2. Основные уравнения термодинамики газа переменной массы .....	13
1.3. Истечение газа из емкости через отверстие постоянной площади.....	15
1.4. Наполнение емкости постоянного объема от аккумулятора давления ....	17
1.5. Наполнение газом полости переменного объема от аккумулятора давления.....	20
1.6. Процесс наддува подушки через газовый редуктор давления .....	28
1.7. Процессы в газопроводах.....	31
2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПНЕВМОАГРЕГАТАХ .....	35
2.1. Основы теории исследования динамики объектов .....	35
2.2. Динамика обратных и предохранительных клапанов.....	38
2.3. Динамические процессы при срабатывании запорного клапана с пневмоприводом.....	45
2.4. Динамика срабатывания электроклапана .....	49
2.5. Динамика газового редуктора давления .....	53
3. ДИНАМИКА АГРЕГАТОВ ЖРД .....	63
3.1. Характеристика ПГС ЖРД.....	63
3.2. Динамика гидромагистралей .....	69
3.3. Динамика регулятора кажущейся скорости .....	72
3.4. Динамика регулятора соотношения компонентов .....	81
3.5. Динамика регулятора давления .....	96
3.6. Динамика шнекоцентробежного насоса .....	103
3.7. Динамика камеры сгорания .....	110
4. ДИНАМИКА ПОДСИСТЕМ ПГС .....	115
4.1. Динамика газобаллонной системы наддува с редуктором давления .....	115
4.2. Динамика РКС с выходным трубопроводом .....	122
4.3. Динамика РСК с входным трубопроводом .....	126
4.4. Динамика регулятора давления с входным и выходным трубопроводами .....	135
4.5. Динамика шнекоцентробежного насоса с входным трубопроводом .....	143
4.6. Динамика камеры сгорания с напорным трубопроводом .....	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	149
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	239

## **СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

ПГС – пневмогидравлическая система;  
АД – аккумулятор давления;  
РКС – регулятор кажущейся скорости;  
РСК – регулятор соотношения компонентов;  
РД – регулятор давления;  
ЛА – летательный аппарат;  
РН – ракета-носитель;  
РБ – разгонный блок;  
КА – космический аппарат;  
ТНА – турбонасосный агрегат;  
ЖРД – жидкостный ракетный двигатель;  
СУ – система управления;  
СН – система наддува;  
СООБ – система опорожнения баков;  
ЗСК – заправочно-сливной клапан;  
ДПК – дренажно-предохранительный клапан;  
РК – разделительный клапан;  
ПК – предохранительный клапан;  
ОК – обратный клапан;  
ЭПК – электропневмоклапан;  
ГК – главный топливный клапан;  
РШ – расходная шайба;  
ЗК – запорный клапан;  
ЭК – электроклапан;  
ЭГК – электрогидроклапан;  
ЖГГ – жидкостный газогенератор;  
ТБ – топливный бак

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга, являющаяся учебным пособием, посвящена анализу динамических процессов в агрегатах пневмогидравлических систем (ПГС) ракет с ЖРД и разработке методов их расчета. Опираясь на известные труды Н. М. Беляева, Б. Ф. Гликмана, К. С. Колесникова, В. Н. Челомея и др., авторы данного учебного пособия показывают на отдельных примерах определение параметров газа переменной массы и разрабатывают методику для расчета динамических характеристик элементов ПГС. Особое внимание уделяется выводу уравнений динамики автоматических регуляторов параметров газа и жидкости, линеаризации этих уравнений, переводу линейных уравнений в область изображений по Лапласу, представлению алгебраических уравнений в матричном виде, определению передаточных функций и построению частотных характеристик в области низких частот. Показано влияние инерции и трения жидкости в каналах управления регуляторов и в магистралях на частотные характеристики.

Книга состоит из четырех глав и приложения. В первой главе приведены основные расчетные зависимости для определения параметров газа при наполнении и опорожнении емкостей на основе теории термодинамики газа переменной массы. Авторами с помощью аппроксимирующих функций получены коэффициентные формулы для определения параметров газа при наполнении полости переменного объема для различных термодинамических моделей. Результаты расчетов сравниваются с численными решениями исходных дифференциальных уравнений. Здесь же представлены пример расчета системы наддува с газовым редуктором и термодинамические модели газопроводов.

Вторая глава содержит краткое изложение теории исследования динамики объектов, которая показана на примерах построения частотных характеристик обратного и предохранительного клапанов. В этой главе рассматриваются процессы при срабатывании запорного клапана с пневмоприводом и электроклапана. Представлены динамические модели газовых редукторов прямого и обратного действия, для которых построены частотные характеристики.

В третьей главе дана характеристика пневмогидравлическим системам ЖРД. Динамические модели гидромагистралей для низких частот рассматриваются как системы с сосредоточенными параметрами. Следует отметить внимание авторов к созданию динамических моделей агрегатов автоматики ЖРД – регулятора кажущейся скорости (РКС), регулятора соотношения компонентов (РСК) топлива, регулятора давления (РД). Показано влияние различных факторов на частотные характеристики этих агрегатов. Рассматриваются динамические модели шнекоцентробежного насоса и камеры сгорания ЖРД.

Динамика подсистем ПГС исследуется в четвертой главе. Выводится система уравнений динамики газобаллонной системы наддува с газовым редуктором давления, численное решение дифференциальных уравнений приводится в

виде графиков. На основе линеаризованных уравнений получены передаточные функции и соответствующие частотные характеристики для различных объемов газовой подушки. Рассматриваются динамика систем, состоящих из автоматических регуляторов и гидравлических магистралей, шнекоцентробежного насоса и входного трубопровода, камеры сгорания и напорного трубопровода.

При проведении вычислений применен компьютерный вычислительный комплекс Maple. Использованные при вычислениях программы приведены в Приложении.

По нашему мнению, полезность пособия для обучения студентов специальности 160400.65 несомненна.

Доктор технических наук,  
профессор кафедры «Теоретическая механика»  
МГТУ им. Н. Э. Баумана

А. А. Пожалостин

## ВВЕДЕНИЕ

Летательный аппарат (ЛА) (ракета-носитель – РН, разгонный блок – РБ, космический аппарат – КА) с жидкостным ракетным двигателем (ЖРД) представляет собой сложный технический комплекс, содержащий в своем составе пневматическую и гидравлическую системы (ПГС), работающие в автоматическом режиме. В состав ПГС входят топливные баки, аккумуляторы давления, трубопроводы, клапаны различного назначения, регуляторы расхода и давления, генераторы газа, пиротехнические устройства, датчики измерения параметров, турбонасосный агрегат (ТНА), камеры сгорания ракетного двигателя и т. д. Структура ПГС зависит от назначения летательного аппарата, характеристик компонентов топлива, программы полета, массы полезной нагрузки. Работающим телом в ПГС являются газы, жидкости, продукты сгорания или разложения в газогенераторах.

Математическое описание физических процессов в агрегатах и элементах ПГС основано на фундаментальных уравнениях механики жидкости и газа. При этом учитываются переменность массы газа, взаимодействие пневматических и гидравлических элементов, движение рабочей среды по трубопроводам, каналам, дросселирующим устройствам, сжимаемость среды, колебания давлений, расходов, составных частей регулирующих органов. Уравнения процессов в ПГС, как правило, нелинейные.

Условно ПГС можно разделить на систему подачи компонентов топлива с заданными параметрами на вход насосов ТНА и пневмогидравлическую систему собственно ракетного двигателя с его агрегатами управления и регулирования. ПГС двигателя отличается большой сложностью, так как она работает на двух жидких компонентах топлива, подаваемых в основную камеру сгорания двигателя и в камеру сгорания газогенератора ТНА (или газогенераторов) при определенных давлениях и соотношениях. Агрегаты и элементы ПГС связаны между собой большим числом связей: гидравлических и пневматических, часть из которых является перекрестными.

Функционирование ПГС обеспечивается системой управления (СУ) летательного аппарата с системами автоматического регулирования в контурах управления исполнительными органами, которыми являются агрегаты и элементы ПГС. В ПГС ракет с ЖРД можно выделить следующие основные контуры управления и регулирования:

- систему регулирования наддува топливных баков (СН);
- систему управления и регулирования кажущейся скорости (РКС);
- систему регулирования соотношения компонентов топлива (РСК);
- систему регулирования одновременным опорожнением баков (СООБ).

Наличие регуляторов и замкнутых контуров регулирования требует исследования процессов, происходящих в агрегатах и элементах ПГС, построения

математических моделей этих процессов, определения динамических характеристик, постоянных времени, собственных частот колебаний объектов. При анализе динамики определяющим является диапазон частот действия управляющих и возмущающих сигналов, поступающих в объект. Так, для диапазона относительно низких частот (до 50 Гц) агрегаты, узлы и процессы в ПГС для многих задач динамики можно рассматривать как элементы с сосредоточенными параметрами, т. е. описывать процессы достаточно точно обычновенными дифференциальными уравнениями. С другой стороны, многие агрегаты в ПГС являются фильтрами для более высоких частот.

Исследование динамических характеристик агрегатов ПГС производится на основе преобразований по Лапласу линейных и линеаризованных дифференциальных уравнений, получения требуемых передаточных функций и построения амплитудных частотных характеристик (АЧХ), фазовых частотных характеристик (ФЧХ) и амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ). Частотные характеристики показывают, как агрегат или система реагирует на гармоническое воздействие малой амплитуды различной частоты. Используя зависимости частотных характеристик от конструктивных параметров агрегатов, можно изменять эти характеристики, сдвигать собственные частоты в ту или другую сторону и тем самым разносить собственные частоты агрегатов в ПГС, производить коррекцию годографов (АФЧХ) передаточных функций как отдельных агрегатов, так и систем. Все эти изменения направлены на обеспечение устойчивости работы ПГС.

Для исследования процессов, происходящих в ПГС, построения частотных характеристик использован вычислительный комплекс Maple.

# 1. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АГРЕГАТАХ ПГС

## 1.1. РАСЧЕТ РАСХОДА ГАЗА ЧЕРЕЗ КЛАПАН

В состав ПГС входят разные по назначению и устройству агрегаты автоматики, обеспечивающие управление и регулирование параметров рабочих процессов в подсистемах по командам СУ. Широкое применение в ракетно-космической технике нашли агрегаты пневмоавтоматики. Рабочим телом в них служат сжатые газы (азот, воздух, кислород и др.), поступающие из баллонов высокого давления – аккумуляторов давления (АД). Конструктивно агрегаты пневмоавтоматики представляют собой клапаны – устройства, открывающие или закрывающие проход газа или жидкости в трубопровод, на котором они установлены [1].

1. Редукторы давления газа (редукционные клапаны) – устройства, автоматически пропускающие газ из полости высокого давления в полость более низкого с поддержанием постоянства давления в одной из полостей.

2. Пневматические клапаны, у которых исполнительный механизм срабатывает под действием давления управляющего газа. Это заправочно-сливные клапаны (ЗСК), предназначенные для заправки компонентами топлива баков ЛА и слива из них, дренажно-предохранительные клапаны (ДПК), служащие для постоянного сообщения полостей топливных баков с атмосферой во время заправки, режима дренажа, разделительные клапаны (РК), используемые в топливных системах для перекрытия или открытия топливных магистралей в момент подачи соответствующей команды (отсечные клапаны).

3. Автоматические клапаны, срабатывающие под действием сил давления газа в линии, на которой они установлены. К ним относятся предохранительные (ПК), дренажно-предохранительные (ДПК) клапаны в режиме предохранения от превышения давления, предназначенные для частичного выпуска газа при превышении давления сверхустановленного, обратные клапаны (ОК), применяемые для предотвращения обратного потока газа.

4. Электропневмоклапаны (ЭПК), у которых исполнительный механизм управляется электромагнитом, входящим в состав клапана, а срабатывание происходит под действием давления газа в магистрали, на которой он установлен.

Все эти клапаны являются агрегатами многоразового действия.

К клапанам одноразового действия относятся агрегаты пироавтоматики, которые управляются продуктами сгорания (пороховыми газами): пироклапаны, пиromембранны и отсечные главные топливные клапаны (ГК).

Подвод управляющего газа от АД к исполнительным механизмам клапанов производится при помощи трубопроводов, как правило, малого диаметра и большой протяженности. Для регулирования расхода газа на них устанавливают расходные шайбы (РШ), дроссели, жиклеры.

Массовый секундный расход газа через РШ или проходную площадь клапана определяется в зависимости от скорости течения газа. При этом считается, что характер течения газа турбулентный, а термодинамический процесс – адиабатный, так как скорость течения велика, а размеры проходной площади малы и теплообмен между газом и стенками проходной площади практически не происходит.

Используя уравнение Бернулли для данных условий и учитывая, что скорость газа на входе в проходную площадь клапана или РШ мала, т. е.  $\vartheta_1 = 0$ , имеем

$$\frac{\vartheta_2^2}{2} - \frac{k}{k-1} \left( \frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) = -\varepsilon \frac{\vartheta_2^2}{2}, \quad (1.1)$$

где  $\vartheta_2$  – скорость газа на выходе из проходной площади;  $p_1$ ,  $\rho_1$  и  $p_2$ ,  $\rho_2$  – соответственно давление и плотность газа до и после проходной площади;  $\varepsilon$  – коэффициент местного сопротивления. Из уравнения (1.1) получаем

$$\vartheta_2 = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left( \frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} \right)}.$$

Изменение состояния газа в адиабатном процессе описывается выражением

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

Уравнение состояния идеального газа, принимаемое в расчетах, имеет вид

$$p = \rho RT,$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура, К.

Массовый секундный расход газа через площадь  $f$  равен:

$$G = \rho_2 V_2 f.$$

Подставляя значения  $\rho_2$  и  $\vartheta_2$ , получим

$$G = \mu f p_1 \frac{a_k}{\sqrt{RT_1}}, \quad (1.2)$$

где

$$a_k = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]},$$

$\mu = 1 / \sqrt{1 + \epsilon}$  – коэффициент расхода.

Расчет газа по выражению (1.2) имеет силу при условии, что скорость потока газа в проходной площади  $f$  меньше местной скорости звука. При достижении скорости потока газа местной скорости звука в газе, называемой критической, происходит «запирание» потока. Для получения скорости потока газа больше, чем критическая, необходимы специальные устройства или средства, например сопла типа Лаваля, подвод тепла и т. д. Массовый расход газа при критической скорости течения становится постоянным, которому соответствует критическое отношение давлений:

$$\bar{p}_{kp} = \left. \frac{p_2}{p_1} \right|_{kp} .$$

Формула для расчета расхода газа для закритических течений получается из (1.2) при подстановке в него значения  $\bar{p}_{kp}$ . Для нахождения  $\bar{p}_{kp}$  необходимо продифференцировать выражение, стоящее в квадратных скобках по отношению  $\bar{p} = \frac{P_2}{P_1}$ , и приравнять результат нулю. Получим

$$\frac{2}{k} \bar{p}^{\frac{2-k}{k}} - \frac{k+1}{k} \bar{p}^{\frac{1}{k}} = 0.$$

Решая это уравнение относительно  $\bar{p}$ , получим критическое отношение давлений:

$$\bar{p}_{kp} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

при котором расход газа достигает максимального значения. Для двухатомного газа, у которого  $k = 1,4$ ,  $\bar{p}_{kp} = 0,528$ .

Формула для массового расхода газа при его закритическом течении ( $(\bar{p}_{kp} \leq 0,528)$  получается подстановкой в (1.2) значения  $\bar{p}_{kp}$ :

$$G = \mu f p_1 \frac{1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} . \quad (1.3)$$

Зависимости (1.2) и (1.3) называются формулами Сен-Венана – Ванцеля.

Теоретическое значение критического отношения давлений  $\bar{P}_{kp} = 0,528$ , при котором наступает наибольший расход газа (воздуха), соответствует в основном только соплам типа Лаваля. Для других форм каналов, отверстий и щелей критический режим течения устанавливается при отношениях давлений, не совпадающих с теоретическими данными, так как величина  $\bar{P}_{kp}$  определяется формой отверстия, через которое течет газ.

Многочисленные экспериментальные исследования [2] показывают, что в применяемых конструкциях клапанов, жиклеров и РШ критическое отношение  $\bar{P}_{kp}$  находится в пределах 0,035–0,5. При тех перепадах давлений, которые возникают в ПГС ЛА, как правило, расчет расхода газа производится по зависимости (1.3), по которой расход газа не зависит от противодавления  $p_2$ .

Отличие реального течения газа от идеального через клапан или РШ в выражениях (1.2) и (1.3) учитывается коэффициентом расхода  $\mu$ . Коэффициент расхода зависит от многих параметров: от высоты подъема тарели над седлом, формы седла, шероховатости, конструкции тарели и т. д. Обычно принимают  $\mu = 1/\sqrt{\varepsilon}$  [2].

Для приближенных расчетов при простейших формах клапанов коэффициент сопротивления  $\varepsilon$  можно определить по зависимости [2]

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \frac{b - 0,1d_c}{d_c} + \frac{\varepsilon_3}{\left(\frac{h}{d_c}\right)^2},$$

где  $b = 0,5(d_t - d_c)$  – перекрытие клапана;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – постоянные коэффициенты;  $h$  – высота подъема тарели над седлом;  $d_c$  – диаметр седла;  $d_t$  – диаметр тарели. Постоянные коэффициенты определяются в зависимости от вида тарели клапана по таблице 1.1 [2].

Таблица 1.1

**Значения коэффициентов  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$**

Тип тарели клапана	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$
Плоская тарель	2,5	19	0,166
Конус	1,05	0	0,079
Плоская тарель с фаской	0,38	0	0,0472
Шаровой клапан	0,96	0	0,0472

Коэффициент расхода для круглого отверстия РШ находится в пределах  $\mu = 0,6–0,85$ . Существенное влияние на этот коэффициент оказывает форма кромок отверстия: фаски, скругления и т. п.

## 1.2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ ГАЗА ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ

При работе пневмосистем ПГС происходит постоянный тепло- и массообмен между газом и агрегатами, который приводит к изменению энергии газа в полостях исполнительных органов, аккумуляторах давления, трубопроводах, подушках наддува топливных баков.

Вывод системы уравнений термодинамических процессов в емкости с переменным количеством газа подробно рассмотрен в [1, 3].

При исследовании процессов с переменной массой газа существенное значение имеет зависимость, представляющая собой изменение состояния переменной массы газа:

$$\frac{dp}{d\rho} = F(t),$$

где  $F(t)$  – некоторая функция времени  $t$ .

Из этого выражения видно, что время  $t$  является дополнительным параметром, а давление и плотность – функциями времени:  $p = p(t)$ ,  $\rho = \rho(t)$ . Если известны значения  $p(t)$  и  $\rho(t)$  в емкости, то температуру газа  $T(t)$  можно определить из уравнения состояния  $p = \rho RT$ .

В качестве примера рассмотрим процесс наддува топливного бака газом, параметры которого известны. Уравнение баланса энергии газа в свободном объеме бака в дифференциальной форме будет иметь вид

$$i_o G_o dt + i_u G_u dt + (dQ_c + dQ_{ж} + dQ_x) = dU + pdV + i_k G_k dt + i_d G_d dt,$$

откуда получим

$$\frac{dU}{dt} = i_o G_o + i_u G_u + \frac{dQ_c}{dt} + \frac{dQ_{ж}}{dt} + \frac{dG_x}{dt} - i_k G_k - i_d G_d - p \frac{dV}{dt}, \quad (1.4)$$

где  $dU$  – изменение удельной внутренней энергии газа;  $dQ_c$ ,  $dQ_{ж}$  – потери тепла в результате теплообмена со стенками бака и поверхностью жидкости;  $dQ_x$  – тепловой эффект от химических реакций и физико-химических превращений на границе раздела;  $i_o G_o dt$  – поступление энергии с газом наддува;  $i_k G_k dt$  – отвод энергии, связанный с конденсацией паров жидкости;  $i_u G_u dt$  – поступление энергии с испаряющейся массой жидкости;  $i_d G_d dt$  – отвод энергии с массой газа через дренажный клапан;  $i_o$ ,  $i_u$ ,  $i_k$ ,  $i_d$  – соответствующие энтальпии;  $G_o$ ,  $G_u$ ,  $G_k$ ,  $G_d$  – соответствующие массовые расходы газа;  $pdV$  – работа газа при изменении объема газовой подушки.

Если при массообмене изменяется состав газа, то показатель адиабаты является функцией времени  $k = k(t)$ . Дифференцируя по времени выражение для внутренней энергии  $U = \frac{pV}{k-1}$ , находим

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{k-1} \left( p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} - \frac{pV}{k-1} \frac{dk}{dt} \right).$$

Подставляя это выражение в уравнение (1.4), получим выражение для скорости изменения давления газа в объеме:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \\ &= \frac{k-1}{V} \left( \frac{dQ_c}{dt} + \frac{dQ_{\mathcal{K}}}{dt} + \frac{dQ_x}{dt} + i_o G_o + i_u G_u - i_k G_k - i_d G_d - \frac{k}{k-1} p \frac{dV}{dt} + p \frac{V}{(k-1)^2} \frac{dk}{dt} \right). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Для изменения массы газа в свободном объеме за время  $dt$  можно записать

$$dM = G_o dt + G_u dt - G_d dt - G_k dt,$$

откуда получаем выражение для скорости изменения массы газа:

$$\frac{dM}{dt} = G_o + G_u - G_d - G_k. \quad (1.6)$$

Учитывая, что  $\rho = \frac{M}{V}$ , выражение для скорости изменения плотности примет вид

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V} \left( G_o + G_u - G_d - G_k - \rho \frac{dV}{dt} \right). \quad (1.7)$$

Разделив (1.5) на (1.7), получим уравнение состояния переменной массы газа:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{d\rho} &= (k-1) \times \\ &\times \frac{\left[ \frac{dQ_c}{dt} + \frac{dQ_{\mathcal{K}}}{dt} + \frac{dQ_x}{dt} + i_o G_o + i_u G_u - i_k G_k - i_d G_d - \frac{k}{k-1} p \frac{dV}{dt} + p \frac{V}{(k-1)^2} \frac{dk}{dt} \right]}{G_o + G_u - G_k - G_d - \rho \frac{dV}{dt}}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Система уравнений (1.5)–(1.8) совместно с уравнением состояния является исходной для расчета параметров газа переменной массы в емкости.

### 1.3. ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗА ИЗ ЕМКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛОЩАДИ

Рассмотрим истечение газа из емкости постоянного объема (АД) (рис. 1.1) для случая, когда перепад давления между АД и средой, в которую истекает газ, сверхкритический.

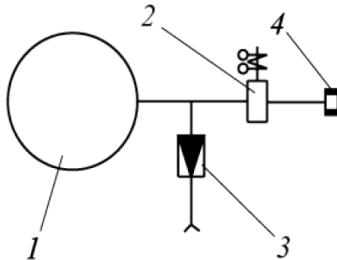


Рис. 1.1. Расчетная схема:  
1 – АД; 2 – ЭПК; 3 – ОК; 4 – РШ.

При использовании уравнений (1.5)–(1.8) необходимо учесть, что:

- объем АД  $V_a$  постоянный, т. е.  $dV_a/dt = 0$ ;
- газ однородный и его состав не изменяется, т. е.  $dk/dt = 0$ ;
- приток газа в АД равен нулю.

Изменение параметров газа в АД при истечении описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_a}{dt} &= \frac{k-1}{V_a} \left( \frac{dQ_a}{dt} - i_a G_a \right) \\ \frac{dp_a}{d\rho_a} &= -\frac{k-1}{G_a} \left( \frac{dQ_a}{dt} - i_a G_a \right) \\ \frac{d\rho_a}{dt} &= -\frac{1}{V_a} G_a \\ T_a &= \frac{p_a}{R\rho_a} \end{aligned} \right\}. \quad (1.9)$$

Выражения для энталпии и текущего расхода имеют вид:

$$i_a = \frac{k}{k-1} RT_a, \quad G_a = \mu f m \frac{p_a}{\sqrt{T_a}},$$

где

$$m = \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}.$$

Сложность решения системы (1.9) заключается в определении теплового потока  $\frac{dQ_a}{dt}$ . При определенных допущениях, приведенных в [1, 3, 4], получены уравнения изменения параметров газа для двух предельных случаев.

Для адиабатного процесса истечения газа из АД:

$$\begin{aligned} p_a &= p_{a0} (1 + Bt)^{-\frac{2k}{k-1}}, \quad \rho_a = \rho_{a0} (1 + Bt)^{-\frac{2}{k-1}}, \\ T_a &= T_{a0} (1 + Bt)^{-2}, \quad G_a = G_{a0} (1 + Bt)^{-\frac{k+1}{k-1}}, \end{aligned} \quad (1.10)$$

где  $B = \frac{(k-1)\mu f m R \sqrt{T_{a0}}}{2V_a}$ ;  $p_{a0}, \rho_{a0}, T_{a0}, G_{a0}$  – начальные значения параметров.

Для изотермического процесса истечения газа из АД ( $T_a = T_{a0}$ )

$$\frac{p_a}{p_{a0}} = \frac{\rho_a}{\rho_{a0}} = \frac{G_a}{G_{a0}} = \exp\left(-\frac{t}{\tau_a}\right), \quad (1.11)$$

где  $\tau_a = \frac{k-1}{2B}$  – постоянная времени АД.

На рисунке 1.2 представлены графики изменения параметров газа в АД для двух предельных случаев процесса – адиабатного и изотермического. Расчеты были проведены при начальных параметрах:

$$k = 1,4; \quad p_{a0} = 30 \text{ МПа}; \quad R = 296,8 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{К)}; \quad T_{a0} = 290 \text{ К}; \quad V_a = 0,08 \text{ м}^3.$$

Расчеты показывают, что изменение параметров газа в АД зависит от принятой модели процесса. При адиабатном процессе в АД теплообмена с окружающей средой не происходит, что приводит к понижению температуры газа при дросселировании и, следовательно, снижению давления в АД. График изменения давления при адиабатном процессе расположен ниже графика изменения давления при изотермическом процессе в АД. Расход газа из АД при изотермическом процессе больше расхода газа адиабатного процесса.

Плотность газа при истечении из АД падает быстрее при изотермическом процессе по сравнению с адиабатным.

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)