

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева  
Кафедра систем автоматического управления

Утверждено на заседании кафедры  
«Системы автоматического управления»  
«22» января 2020 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой



О.В.Горячев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
по проведению практических (семинарских) занятий  
по дисциплине (модулю)

«Основы прикладной тепломеханики»

основной профессиональной образовательной программы  
высшего образования – программы специалитета

по специальности

**24.05.06 Системы управления летательными аппаратами**

со специализацией

**Системы управления движением летательных аппаратов**

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 240506-01-20

Тула 2020 год

# Разработчик(и) методических указаний

Чуканов К.П., профессор, к.т.н., профессор  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

  
(подпись)

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по проведению практических занятий**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Основы прикладной тепломеханики»**

**1 Методические рекомендации к практическим и самостоятельным занятиям**

Для освоения дисциплин, объектом изучения которых являются устройства силовой газовой автоматики, целесообразно и эффективно использование особых заданий.

Подбор заданий направлен на получение навыков построения математических моделей и анализа рабочих процессов систем, содержащих газообразное рабочее тело (термодинамические подсистемы, как правило, переменной массы) и механическое звено (механические подсистемы), обменивающиеся энергией в процессе функционирования.

Задания имеют различную сложность (затраты времени студентов на выполнение заданий) и потому возможен подбор вариантов для аудиторной работы, контрольной работы (рубежный контроль, промежуточная аттестация), учебно-исследовательской работы студентов, самостоятельной работы студентов, включая индивидуальную.

Разный характер задач позволяет проанализировать какие этапы анализа и моделирования вызывают наибольшие затруднения у группы или отдельного студента и акцентировать внимание на этих этапах (например, построение математической модели, понимание особенностей функционирования – переход от функциональной или конструктивной схемы к расчётной).

При работе студентов над заданиями результат и ход выполнения воспринимается как итерационный процесс до получения, понимания и обоснования системы допущений и всего решения.

При необходимости банк заданий может быть дополнен преподавателем, исходя из собственного опыта и необходимости акцентирования внимания студентов на отдельных разделах.

В зависимости от опыта и интересов студента, специализации группы (подгруппы), научных интересов преподавателя можно рекомендовать в качестве научно-исследовательской работы студента задания по построению схемы (функциональной, конструктивной, расчётной) по предложенному образцу тепломеханической системы (газовая силовая система управления, рулевой привод, газовый регулятор,

пневмоклапан, промышленный пневмопривод и другие мехатронные модули движения).

## 2 Общие положения

Приведем, для удобства, основные зависимости термодинамики тела переменной массы - законы сохранения массы и энергии однородного равновесного газообразного тела – основы инженерных методик расчета тепломеханических систем.

Обобщенная расчетная схема тепломеханической системы представлена на рис. 1.

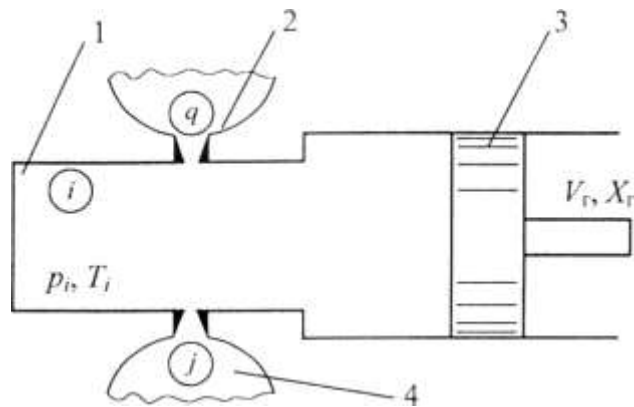


Рис. 1. Обобщенная расчетная схема

1 - рабочая полость -  $i$ ; 2 - сопряженная полость -  $q$ ;

3 - механическое звено (поршень) -  $r$ ; 4 - сопряженная полость -  $j$ .

В общем случае  $i$  - полость сообщается с  $(q+j)$  рабочими полостями, причем - из полости  $i$  происходит перетекание рабочего тела в  $j$  полости, а из  $q$  полостей - приход рабочего тела в полость  $i$ . Кроме того,  $i$ -ое рабочее тело граничит с  $r$ -поршней, обмениваясь с механическими подсистемами энергией. Через поверхность  $i$ -ого рабочего тела происходит теплообмен газа со стенками рабочей полости.

Состояние термодинамического тела в  $i$ -ом объеме -  $W_i$  в текущий момент времени -  $t$  характеризуется двумя независимыми переменными. Для определения значений этих переменных используются два закона сохранения: закон сохранения массы и закон сохранения энергии.

Изменение массы  $i$ -го рабочего тела обусловлено приходом вещества из полостей -  $q$  и расходом вещества в полости -  $j$ .

Уравнение, отражающее сохранение массы рабочего тела имеет вид:

$$dm_i = \sum_q G_{qi} dt - \sum_j G_{ij} dt$$

Изменение энергии  $i$ -го термодинамического тела –  $U_i$  обусловлено переносом ее с приходом (расходом) массы, механическим взаимодействием с поршнями, тепловым взаимодействием со средой.

Уравнение, отражающее сохранение энергии рабочего тела, имеет вид:

$$dU_i = \sum_q \Pi_{qi} G_{qi} dt - \sum_j \Pi_{ij} G_{ij} dt - \sum_r dL_{ir} - dQ_i$$

здесь

$m_i, U_i$  - масса, внутренняя энергия  $i$ -го рабочего тела;

$G_{qi}, \Pi_{qi}$  - секундный массовый приход, удельный приход энергии из полости  $q$  в полость  $i$ ; отметим - индекс (адрес)  $ii$  в этой схеме не используется;

$G_{ij}, \Pi_{ij}$  - секундный массовый расход, удельный расход энергии из полости  $i$  в полость  $j$ ;

$dQ_i$  - теплоотдача через стенки, окружающие  $i$ -ое рабочее тело;

$dL_{ir}$  - работа расширения (сжатия)  $i$ -го рабочего тела, обусловленная перемещением рабочей поверхности поршня  $r$ .

$$\sum_r dL_{ir} = p_i \sum_r S_{nr} dX_r = p_i \sum_r dW_i$$

$S_{nr} X_r$  - площадь, координата поршня  $r$ ;

$$W_i = W_{iH} \pm \sum_r S_{nr} X_r$$

$W_{iH}$  — начальный объем рабочего тела.

Разделив обе части уравнений (а) и (б) на  $dt$ , получим исходную систему уравнений, отражающих законы сохранения массы и энергии.

**Система уравнений, отражающая законы сохранения массы и энергии для обобщенной расчетной схемы.**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_i}{dt} = \sum_q G_{qi} - \sum_j G_{ij} \\ \frac{dU_i}{dt} = \sum_q \Pi_{qi} G_{qi} - \sum_j \Pi_{ij} G_{ij} - \sum_r \frac{dL_{ir}}{dt} - \frac{dQ_i}{dt} \end{array} \right.$$

Структура системы справедлива для любого уравнения состояния.

Вид уравнения состояния определит зависимости  $\Pi$ ,  $G$  от параметров рабочего тела.

Обратим внимание, что в выражении для закона сохранения энергии знак минус при слагаемом, представляющим работу, пишется всегда, при описании и расширения и сжатия рабочего тела. Объяснить это можно следующим образом: при расширении рабочего тела  $dW > 0$  и с учетом знака минус перед слагаемым внутренняя энергия рабочего тела в расчетах уменьшается, при сжатии рабочего тела  $dW < 0$  и с учетом знака минус внутренняя энергия рабочего тела в расчетах увеличивается.

Приведем функциональные уравнения, отражающие изменение состояния  $i$ -го термодинамического тела и разрешенные относительно производных  $dp/dt$  и  $dT/dt$ .

В случае, когда уравнением состояния является уравнение Клапейрона

$$p_i W_i = RT_i, \text{ или } p_i W_i = m_i RT_i$$

выражения для полной энергии -  $U_i$  и массы рабочего тела -  $m_i$ , имеют вид

$$U_i = m_i \frac{RT_i}{k-1}, \quad m_i = \frac{p_i}{RT_i} W_i$$

Дифференцируя по времени выражения для  $U_i$  и  $m_i$ , приравнявая правые части полученных выражений и правые части законов сохранения, после преобразований получим выражения законов сохранения массы и энергии через выбранные переменные  $p_i$  и  $T_i$ .

**Система уравнений, отражающая законы сохранения массы и энергии и разрешенная относительно производных  $dp/dt$  и  $dT/dt$ .**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_i}{dt} = \frac{k-1}{W_i} \left[ \sum_q \Pi_{qi} G_{qi} - \sum_j \Pi_{ij} G_{ij} - \frac{k}{k-1} p_i \frac{dW_i}{dt} - \frac{dQ_i}{dt} \right] \\ \frac{dT_i}{dt} = \frac{k-1}{W_i} \frac{T_i}{p_i} \left[ \sum_q \left( \Pi_{qi} - \frac{RT_i}{k-1} \right) G_{qi} - \sum_j \left( \Pi_{ij} - \frac{RT_i}{k-1} \right) G_{ij} - p_i \frac{dW_i}{dt} - \frac{dQ_i}{dt} \right] \end{array} \right.$$

Входящее в систему выражение для секундного расхода (прихода) газа, через выбранные переменные  $p, T$  имеет вид

$$G_{ij} = \mu_{ij} S_{ij} k_0 \frac{p_i}{\sqrt{RT_i}} Y_{ij}$$

где

$S_{ij}$ - площадь отверстия, сообщающего полости  $i$  и  $j$ ,

$\mu_{ij}$ - коэффициент расхода газа через сечение  $S_{ij}$ ,

$k_0$ - коэффициент

$$k_0 = \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$Y_{ij}$  - функция расхода

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq \frac{p_j}{p_i} \leq \beta_k \\ \frac{1}{k_0} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \sqrt{\left( \frac{p_j}{p_i} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_j}{p_i} \right)^{\frac{k+1}{k}}} & \text{при } \beta_k < \frac{p_j}{p_i} < 1 \\ 0 & \text{при } 1 \leq \frac{p_j}{p_i} \end{cases}$$

$$\beta_k = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Выражение для удельного расхода (прихода) энергии имеет вид:

$$\Pi_{ij} = \frac{kRT_i}{k-1}$$

**Приведем, также, справочно, функциональные уравнения, отражающие изменение состояния  $i$ -го термодинамического тела и разрешенные относительно производных  $dp/dt$  и  $d\rho/dt$ .**

Обобщенная расчетная схема тепломеханической системы (вариант 2) представлена на рис. В. 2.

В правой части выражений появилось новое слагаемое, вводящее в

рассмотрение величины  $G_{gi}$  и  $\Pi_{gi}$  - секундный массовый приход газа и удельный приход энергии от сгорания  $g$  - твердой компоненты (заряда), находящейся в рабочей полости. Прочие обозначения пояснялись раньше. Отметим, что слагаемое, учитывающее приход энергии и массы от сгорания пороха, можно было бы учесть и под знаком суммы  $\sum_q$ , присвоив в этом случае индексы "ii" (приход внутри полости).

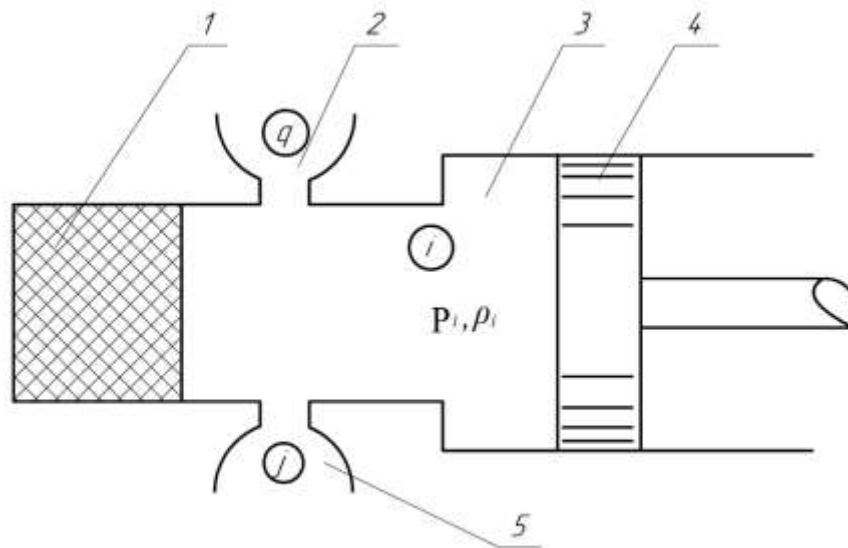


Рис. 2. Обобщенная расчетная схема тепломеханической системы (вариант 2): 1 - заряд твердого топлива; 2 - сопряженная  $q$  - полость; 3 - рабочая полость; 4 - поршень; 5 -сопряженная  $j$  - полость;.

Уравнения законов сохранения массы и энергии, отражающие изменение состояния  $i$ -го термодинамического тела и разрешенные относительно производных  $dp/dt$  и  $d\rho/dt$  имеют следующий вид.

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{1}{W_i} \left\{ \sum_q (k-1) \Pi_{qi} G_{qi} + \sum_g \left[ (k-1) \Pi_{gi} - \frac{p_i}{\delta} \right] G_{gi} - \sum_j (k-1) \Pi_{ij} G_{ij} - \right.$$



$$-kp_i \sum_r S_{\Pi r} V_r - (k-1) \frac{dQ_i}{dt} \Big\}$$

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{1}{W_i} \left\{ \sum_q G_{qi} + \sum_g \left( 1 - \frac{\rho_i}{\delta} \right) G_{gi} - \sum_j G_{ij} - \rho \sum_r S_{\Pi r} V_r \right\}$$

где выражение для удельного прихода (расхода) энергии из сопряженных полостей имеет вид:

$$\Pi_{ij} = \frac{k}{k-1} \frac{p_i}{\rho_i}$$

Выражение для секундного прихода (расхода) массы из полости  $-i$  в полость  $-j$  имеет вид:

$$G_{ij} = (\mu S)_{ij} k_0 \sqrt{p_i \rho_i} Y_{ij}$$

где

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 \\ \frac{1}{k_0} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \sqrt{\left(\frac{p_j}{p_i}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_j}{p_i}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \\ 0 \end{cases} \quad \left| \begin{array}{ll} \text{при} & 0 \leq \frac{p_j}{p_i} \leq \beta_k \\ \text{при} & \beta_k \leq \frac{p_j}{p_i} \leq 1 \\ \text{при} & 1 \leq \frac{p_j}{p_i} \end{array} \right|$$

$$k_0 = \sqrt{k \left( \frac{2}{k-1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$$\beta_k = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Поясним принятую систему индексации:

1. Величины  $p$ ,  $T$ ,  $\rho(w)$ ,  $U$ ,  $u$ ,  $m$  - принадлежат термодинамическому телу и обозначаются одинаковым с ним индексом.

2. Величины  $\Pi$ ,  $G$ ,  $\mu$ ,  $S$ ,  $F$ ,  $Y$  - имеют два адреса, описывающие направление перетекания рабочего тела в сопряженных полостях ("откуда - куда").

3. При отсутствии потерь в газоподводящем канале

$$\begin{aligned} G_{ij}^{расх} &= G_{ij}^{приход}, \\ \Pi_{ij}^{расх} &= \Pi_{ij}^{приход}, \end{aligned}$$

т.е. секундный массовый расход газа из полости "i" в полость "j" ( $G_{ij}^{расх}$ ) при отсутствии потерь в газоподводящем канале равен секундному приходу газа из полости "i" в полость "j" ( $G_{ij}^{приход}$ ). Аналогично, при таком допущении удельный расход энергии из полости "i" в полость "j" ( $\Pi_{ij}^{расх}$ ) будет равен удельному приходу энергии в полость "j" ( $\Pi_{ij}^{приход}$ ).

### 3 Примеры заданий

**Пример 1.** Задание. Для системы, представленной расчетной схемой на рис. 3, записать уравнения математической модели (в виде законов сохранения массы и энергии, уравнений движения). Пояснить возможные способы программного управления параметрами.

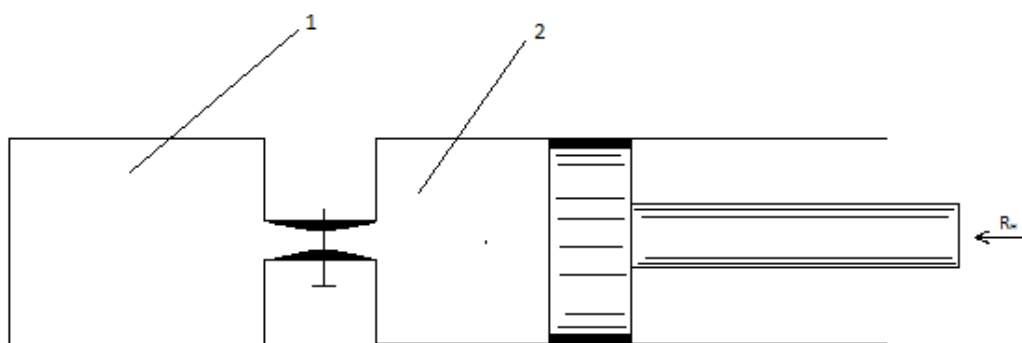


Рис. 3. Пневматический двигатель.

1 - источник рабочего тела; 2 - рабочая полость.

В момент времени  $t_n$  открывается отверстие -  $S_{12}$ , начинаются рабочие процессы. Под воздействием циклической нагрузки -  $R_n$  поршень совершает возвратно-поступательные движения, возможен режим  $p_2 > p_1$ .

Для представленной расчетной схемы независимые переменные: энергия и масса рабочего тела в первой полости -  $U_1$ ,  $m_1$  (или, соответственно, давление и температура рабочего тела в первой полости -  $p_1$ ,  $T_1$ ), энергия и масса

рабочего тела во второй полости –  $U_2$ ,  $m_2$  (или, соответственно, давление и температура рабочего тела во второй полости –  $p_2$ ,  $T_2$ ).

Представленная расчетная схема включает рабочее тело - 1 (переменной массы, постоянного объема), рабочее тело - 2 (переменной массы, переменного объема), механическое звено - поршень. Таким образом функционирование схемы характеризуется шестью независимыми координатами ( $p_1$ ,  $T_1$ ,  $p_2$ ,  $T_2$ ,  $V$ ,  $X$ ). Для определения значений этих переменных используем законы сохранения массы и энергии для рабочего тела - 1, законы сохранения массы и энергии рабочего тела - 2, уравнения движения поршня. Модель должна отражать особенности работы системы - изменение направления перетекания. Модель функционирования представлена системой шести нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_1}{dt} = -G_{12} + G_{21} \\ \frac{dU_1}{dt} = -P_{12}G_{12} + P_{21}G_{21} \\ \frac{dm_2}{dt} = G_{12} - G_{21} \\ \frac{dU_2}{dt} = P_{12}G_{12} - P_{21}G_{21} - p_2 \frac{dW_2}{dt} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{M} [p_2 S_{II} - p_2 S'_{II} - R_H] \\ \frac{dX}{dt} = V \end{array} \right.$$

Начальные условия:

$t=t_n$ ,  $p_1=p_{1n}$ ,  $p_2=p_{2n}$ ,  $T_{1n}=T_{2n}$ ,  $X=X_n$ ,  $V=0$ ;  $p_{1n}>p_{2n}$ ;  $p_c$  - давление среды.

Комментарии:

- в правой части уравнений законов сохранения есть слагаемые, учитывающие приход и расход массы, приход и расход энергии в полости 1 и 2. В зависимости от направления перетекания будет работать одно из двух, логика переключения реализуется функцией  $Y_{12}$  и  $Y_{21}$ , принимающей три значения, в зависимости от отношения давлений в полостях;

- теплообмен рабочего тела в полостях не учитывается.

- величиной утечек из полости 2 в окружающую среду пренебрегаем.

**Пример 2. Задание:** Для пневматического двигателя двухстороннего действия, представленного расчетной схемой на рис. 4,

записать уравнения математической модели (в виде законов сохранения массы и энергии, уравнений движения) для всех положений распределителя.

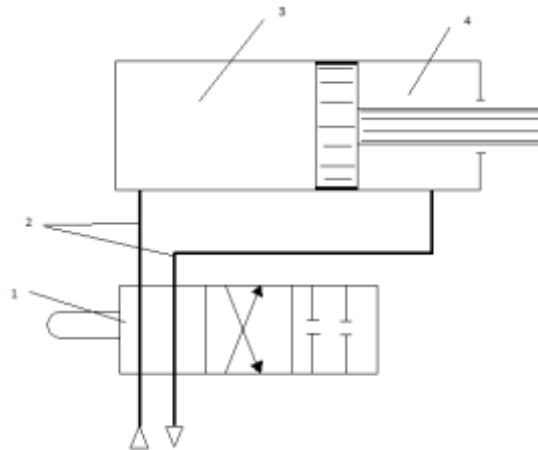


Рис. 4. Пневматический двигатель двустороннего действия.

1 - четырехлинейный трехпозиционный распределитель;  
2 - пневмолинии; 3,4 - рабочие полости

Функционирование системы характеризуется шестью переменными -  $p_3$ ,  $T_3$ ,  $p_4$ ,  $T_4$ ,  $V$ ,  $X$ . Для определения значений этих переменных используем законы сохранения массы и энергии для рабочих тел 3 и 4, уравнения движения поршня с учетом положения распределителя.

Математическая модель функционирования для первого режима (первого положения распределителя - см. рис.) представлена системой дифференциальных уравнений шестого порядка.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_3}{dt} = G_{H3} \\ \frac{dU_3}{dt} = \Pi_{H3} G_{H3} - p_3 \frac{dW_3}{dt} \\ \frac{dm_4}{dt} = -G_{4a} \\ \frac{dU_4}{dt} = -\Pi_{4a} G_{4a} - p_4 \frac{dW_4}{dt} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{M} [p_3 S_{\Pi} - p_4 S'_{\Pi} - R_H] \\ \frac{dX}{dt} = V \end{array} \right.$$

Где:

$G_{из}$  ,  $\Pi_{из}$  - секундный массовый приход газа из источника в рабочую полость 3, удельный приход энергии из источника в рабочую полость 3;

$G_{4а}$  ,  $\Pi_{4а}$  - секундный массовый расход газа, удельный расход энергии из полости 4 в атмосферу;

$M$ - приведенная масса;  $R_H$ - приведенная нагрузка.

Математические модели для второго и третьего положения распределителя (второй и третий режим):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_3}{dt} = -G_{3a} \\ \frac{dU_3}{dt} = -\Pi_{3a}G_{3a} - p_3 \frac{dW_3}{dt} \\ \frac{dm_4}{dt} = G_{H4} \\ \frac{dU_4}{dt} = \Pi_{H4}G_{H4} - p_4 \frac{dW_4}{dt} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{M} [p_3 S_{II} - p_4 S'_{II} - R_H] \\ \frac{dX}{dt} = V \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_3}{dt} = 0 \\ \frac{dU_3}{dt} = -p_3 \frac{dW_3}{dt} \\ \frac{dm_4}{dt} = 0 \\ \frac{dU_4}{dt} = -p_4 \frac{dW_4}{dt} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{M} [p_3 S_{II} - p_4 S'_{II} - R_H] \\ \frac{dX}{dt} = V \end{array} \right.$$

Целесообразно три модели свести в одну, учитывая логику работы распределителя

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_3}{dt} = aG_{из} - bG_{3a} \\ \frac{dU_3}{dt} = a\Pi_{из}G_{из} - b\Pi_{3a}G_{3a} - p_3 \frac{dW_3}{dt} \\ \frac{dm_4}{dt} = -aG_{4a} + bG_{H4} \\ \frac{dU_4}{dt} = -a\Pi_{4a}G_{4a} + b\Pi_{H4}G_{H4} - p_4 \frac{dW_4}{dt} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{M} [p_3 S_{II} - p_4 S'_{II} - R_H] \\ \frac{dX}{dt} = V \end{array} \right.$$

Значения логических коэффициентов а и b представлены в таблице.

Режим	Значение	
	$a$	$b$
Режим «1»	1	0
Режим «2»	0	1
Режим «3»	0	0

### Пример 3.

Задание:

- Пояснить принцип работы системы - генератор порохового газа с предохранительным устройством (рис. 5).
- Записать уравнения математической модели (в виде законов сохранения массы и энергии, уравнений движения).
- Пояснить возможные способы программного управления параметрами.

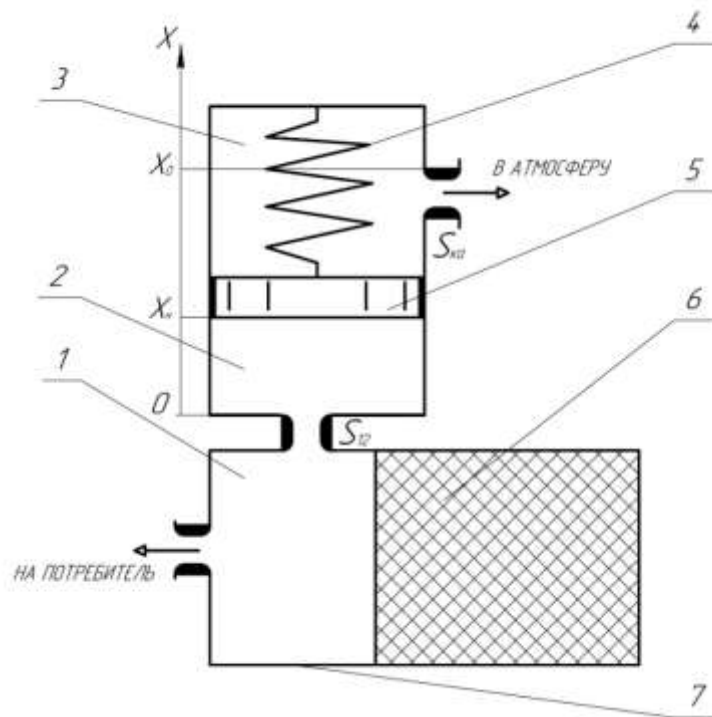


Рис. 5. Генератор газа с предохранительным устройством:  
1,2,3 - рабочие полости; 4 - пружина клапана; 5- клапан;  
6 - пороховой заряд; 7 - генератор газа

Продукты сгорания заряда из полости - 1 подаются на потребитель и заполняют полость - 2. В рабочем (расчетном) режиме сила давления газов -  $p_2$  и усилие пружины - 4 удерживают клапан - 5 около положения -  $X_n$ , в случае

повышения давления выше расчетного клапан перемещается на координату  $X > X_0$ , открывая сброс порохового газа из полости - 2 в атмосферу через отверстие -  $S_{ка}$ .

Функционирование системы характеризуется восемью переменными  $p_1, T_1, p_2, T_2, p_3, T_3, V, X$ . Для определения значений переменных используем законы сохранения массы и энергии для рабочих тел 1,2,3, уравнения движения клапана, с учетом положения клапана  $X < X_0$  и  $X > X_0$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_1}{dt} = G_{11} - G_{12} - G_{1n} \\ \frac{dU_1}{dt} = \Pi_{11}G_{11} - \Pi_{12}G_{12} - \Pi_{1n}G_{1n} - \frac{dQ_1}{dt} \\ \frac{dm_2}{dt} = G_{12} - aG_{2a} \\ \frac{dU_2}{dt} = \Pi_{12}G_{12} - a\Pi_{2a}G_{2a} - p_2 \frac{dW_2}{dt} - \frac{dQ_2}{dt} \\ \frac{dm_3}{dt} = -bG_{3a} \\ \frac{dU_3}{dt} = -b\Pi_{3a}G_{3a} - p_3 \frac{dW_3}{dt} - \frac{dQ_3}{dt} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{M}[(p_2 - p_3)S_{кл} - \eta X] \\ \frac{dX}{dt} = V \end{array} \right.$$

В модели приняты обозначения:

$G_{11}, \Pi_{11}$  - секундный приход газа, удельный приход энергии от сгорания пороха;

$dQ_1, dQ_2, dQ_3$  - теплотери рабочего тела;

$S_{кл}$  - площадь клапана;

$\eta$  - жесткость пружины клапана.

При построении модели принято, что отверстие  $S_{кл}$  открывается полностью и мгновенно при  $X = X_0$ .

Значение коэффициентов  $a$  и  $b$  в зависимости от координаты клапана представлены в таблице.

Координата	$a$	$b$
$X < X_0$	0	1
$X \geq X_0$	1	0

Комментарии. Другие варианты модели могут быть построены с учетом размеров клапана и сбросового отверстия; при неучете динамики клапана.

**Пример 4. Задание:** восстановить расчетную схему по виду представленной математической модели.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_1}{dt} = 0 \\ \frac{dU_1}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} - \frac{dL_1}{dt} \\ \frac{dm_2}{dt} = 0 \\ \frac{dU_2}{dt} = -\frac{dL_2}{dt} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{M}(p_1 - p_2)S \\ \frac{dX}{dt} = V \end{array} \right.$$

Порядок и структура модели показывают, что расчетная схема включает рабочее тело 1 (постоянной массы с подводом тепла и контактом с поршнем), рабочее тело 2 (постоянной массы, с контактом с поршнем) и один поршень, контактирующий с рабочими телами 1 и 2.

Графически расчетную схему можно представить в следующем виде, см. рис. 6.

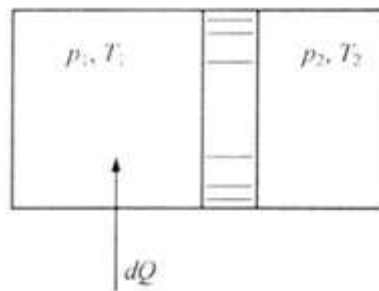


Рис.6. Восстановленная расчетная схема.