

УДК 519.876.5+621.5+621.22

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПОЛОСТЕЙ С РАБОЧЕЙ СРЕДОЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРО- И ПНЕВМОСИСТЕМ

© 2014 Ю. М. Тимофеев, Е. М. Халатов

КБ «Арматура» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Ковров, Россия

Статья посвящена рассмотрению способов математического описания процессов в междроссельных камерах и ёмкостях с рабочей средой, которое используется при моделировании работы гидро- и пневмосистем.

Рассмотрен общий подход к разработке математических моделей гидро- и пневмосистем, а также приведены этапы составления моделей.

Представлена обобщённая математическая модель теплоизолированной полости переменного объёма. Приведён вывод общепринятых математических моделей указанной полости на основе обобщённой модели. Проанализированы допущения, принимаемые при существующих способах описания процессов в камерах и ёмкостях гидро- и пневмосистем. Показаны недостатки существующих способов описания.

Предложен подход к формированию математического описания, имеющего универсальный характер и более полно отражающего исследуемые процессы. Предлагаемый способ описания базируется на законах сохранения термодинамики тела переменной массы. Специальная запись термического и калорического уравнений в модели состояния делают её универсальной, не зависящей от вида рабочей среды. При составлении цифровых моделей полостей могут использоваться как различные уравнения состояния рабочих сред, так и табличные справочные данные.

В качестве примера представлены расчётные схемы и математические модели теплоизолированных полостей переменного и постоянного объёмов. Представлена цифровая модель и приведены результаты моделирования работы гидро- и пневмопривода, проведённого с использованием предлагаемого способа. Цифровая модель реализована в отечественном программном комплексе «Моделирование в технических устройствах».

*Междроссельная камера, ёмкость, моделирование, математическая модель, гидросистема, пневмосистема.*

Гидравлические и пневматические системы находят широкое применение в ракетно-космической, авиационной и в других областях техники. К подобным системам можно отнести системы газоснабжения ракетно-космических комплексов, гидро- и пневмосистемы ракет-носителей и самолётов.

При проектировании и отработке гидро- и пневмосистем в большинстве случаев применяется численный эксперимент на основе математической цифровой модели. Разработка математических моделей как гидро-, так и пневмосистем ведётся на основе единого подхода, суть которого можно отразить с помощью блок-схемы, представленной на рис. 1.

На первом этапе после анализа принципа действия системы проводится операция декомпозиции, заключающаяся в условном разбиении системы на взаимо-

связанные подсистемы различной физической природы. Среди указанных подсистем присутствуют:

- механическая, к которой относятся процессы движения рабочих органов системы и связанных с ними деталей;
- тепловая, к которой относятся процессы теплопередачи между рабочей средой, деталями системы и окружающей средой;
- гидродинамическая, к которой относятся процессы течения рабочих сред через каналы системы;
- электромагнитная, к которой относятся процессы преобразования электрической энергии в магнитную;
- гидравлическая или термодинамическая, к которой относятся процессы изменения параметров рабочих сред в междроссельных камерах или ёмкостях.

На втором этапе проводится формализация процессов, происходящих в каждой из подсистем. На заключительном этапе проводится композиция разработанных моделей подсистем с учётом их взаимосвязей. Результатом является математическая модель системы.

Остановимся более подробно на подсистеме, которая обозначена на рис. 1 как «Гидравлическая или термодинамическая». Двойное название подсистемы обусловлено тем, что в литературе оно обычно зависит от вида рабочей среды. Если рабочей средой является жидкость, то подсистема называется гидравлической, а если газ – термодинамической. Междроссельные камеры и ёмкости, процессы в которых описывает рассматриваемая подсистема, будем называть единым термином «полость», под которым будем понимать объём с рабочей средой, для которого характерны следующие особенности: объём образован и ограничен поверхностями деталей системы; объём полностью заполнен рабочей средой; скорость движения рабочей среды в объёме мала по сравнению со скоростью течения в подводящих и отводящих каналах; в каждой точке объёма термические и калорические параметры рабочей среды можно считать одинаковыми.

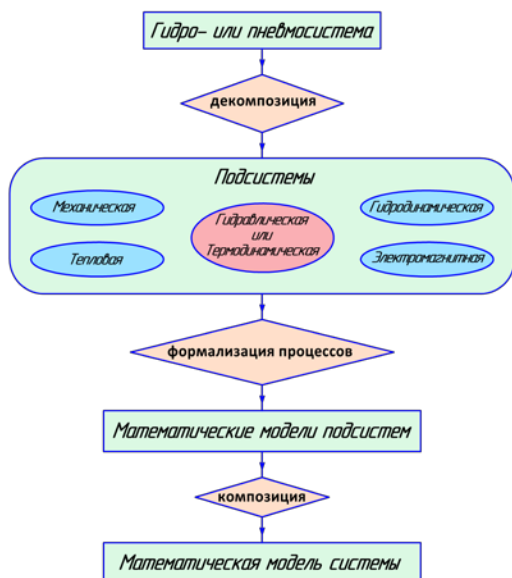


Рис. 1. Принцип построения математической модели гидро- или пневмосистемы

К полостям можно отнести: рабочие полости объёмных гидро- и пневмомашин (например, насосов, моторов, компрессоров); междроссельные камеры регулирующих и распределительных устройств (например, редукторов давления, регуляторов расхода, золотниковых распределителей, клапанов); рабочие полости гидро- и пневмоцилиндров; рабочие полости гидравлических и пневматических аккумуляторов; внутренние полости газовых баллонов.

Рассмотрим способы описания полостей с рабочей средой. В качестве примера возьмём рабочую полость гидро- или пневмопривода одностороннего действия, расчётная схема которого приведена на рис. 2. Для упрощения будем считать, что полость теплоизолирована и не обменивается теплотой с ограничивающими стенками. Управление приводом осуществляется путём изменения давления рабочей среды в полости. Рабочая среда поступает в полость через регулируемый дроссель с массовым расходом  $G_{вх}$  от источника с постоянными параметрами. Из полости рабочая среда через нерегулируемый дроссель уходит в дренаж с массовым расходом  $G_{вых}$ . Полость связана с одной механической подсистемой, представляющей собой поршень с рабочей площадью  $S$ , нагруженный позиционной (пружинной) и инерционной нагрузками. Состояние рабочей среды в полости полностью характеризуется тремя параметрами – абсолютным давлением  $p$ , термодинамической температурой  $T$  и объёмом полости  $W$ . Остальные параметры являются их функциями.

Согласно основам термодинамики тела переменной массы [1] для рабочей среды в рассматриваемой полости можно записать следующую систему дифференциально-алгебраических уравнений:

$$\frac{dU}{dt} = h_{ист} \cdot G_{вх} - h \cdot G_{вых} - p \cdot S \cdot V, \quad (1)$$

$$\frac{dM}{dt} = G_{вх} - G_{вых}, \quad (2)$$

$$\Phi_1(p, T, u) = 0, \tag{3}$$

$$\Phi_2(p, T, \rho) = 0, \tag{4}$$

где  $U, M$  – внутренняя энергия и масса рабочей среды в полости;  $t$  – время;  $h_{ист}$ ,  $h$  – удельная энтальпия рабочей среды в источнике и рабочей полости;  $G_{вх}$ ,  $G_{вых}$  – массовый расход рабочей среды из источника в рабочую полость и из рабочей полости в дренаж соответственно;  $p$  – абсолютное давление рабочей среды в полости;  $S$  – эффективная площадь поршня;  $V$  – скорость поршня;  $T$  – термодинамическая температура рабочей среды в полости;  $u$  – удельная внутренняя энергия ра-

бочей среды в полости;  $\rho$  – плотность рабочей среды в полости;  $\Phi_1, \Phi_2$  – функции.

Уравнения (1) и (2) отражают соответственно законы сохранения энергии и массы рабочей среды в полости. Уравнения (3), (4) являются соответственно калорическим и термическим уравнениями состояния.

Система уравнений (1) – (4) является обобщённой моделью рассматриваемой полости вне зависимости от вида рабочей среды. В настоящее время на практике стремятся провести преобразование системы уравнений таким образом, чтобы получить замкнутую систему из двух дифференциальных уравнений, записанных для какой-либо пары термических параметров ( $p, T; p, \rho; p, T$ ).

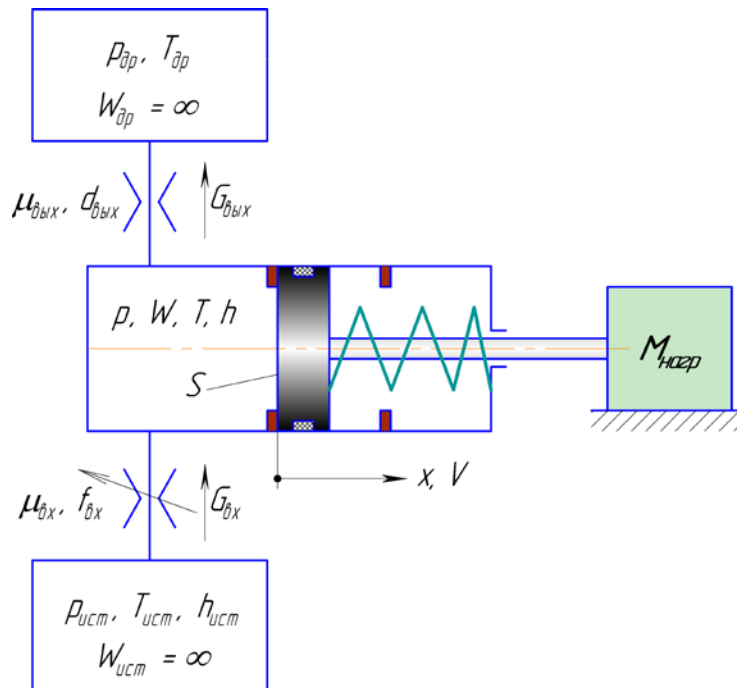


Рис. 2. Расчётная схема привода одностороннего действия:

$p_{ист}, p_{др}, p$  – абсолютное давление рабочей среды в источнике, в дренажной и рабочей полостях соответственно;  $T_{ист}, T_{др}, T$  – термодинамическая температура рабочей среды в источнике, в дренажной и рабочей полостях соответственно;  $h_{ист}, h$  – удельная энтальпия рабочей среды в источнике и рабочей полости;  $W_{ист}, W_{др}, W$  – объём, занимаемый рабочей средой в источнике, в дренажной и рабочей полостях соответственно;  $G_{вх}, G_{вых}$  – массовый расход рабочей среды из источника в рабочую полость и из рабочей полости в дренаж соответственно;  $\mu_{вх}, f_{вх}$  – коэффициент расхода и площадь проходного сечения регулируемого дросселя;  $\mu_{вых}, d_{вых}$  – коэффициент расхода и диаметр проходного сечения нерегулируемого дросселя;  $S$  – эффективная площадь поршня;  $x, V$  – перемещение и скорость поршня;  $M_{инер}$  – масса, характеризующая инерционную нагрузку

Для полости с жидкостью преобразование проводится на основе только двух уравнений – закона сохранения массы (2) и термического уравнения состояния (4), записанного в виде связи давления и плотности через модуль объёмной упругости [2, 3]. Модуль объёмной упругости при этом является функцией давления, температуры и вида процесса. Преобразование проводится в следующей последовательности:

– записывается дифференциальное уравнение для массы как функции объёма полости и плотности, а затем обе части уравнения делятся на приращение времени

$$dM/dt = \rho \cdot dW/dt + W \cdot d\rho/dt ; \quad (5)$$

– записывается уравнение состояния в форме

$$d\rho = \frac{\rho}{E} \cdot dp , \quad (6)$$

где  $E$  – модуль объёмной упругости;

– записывается зависимость, связывающая мгновенное изменение объёма с параметрами связанной механической подсистемы

$$dW/dt = S \cdot V ; \quad (7)$$

– зависимости (6), (7) подставляются в (5)

$$dM/dt = \rho \cdot S \cdot V + \rho \cdot \frac{W}{E} \cdot dp/dt ; \quad (8)$$

– приравниваются правые части уравнений (2) и (8), производится деление на плотность (которая в качестве допущения считается одинаковой как в источнике, так и в рабочей полости) и выводится дифференциальное уравнение для давления

$$dp/dt = \frac{E}{W} \cdot (Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}} - S \cdot V), \quad (9)$$

где  $Q_{\text{вх}}$ ,  $Q_{\text{вых}}$  – объёмный расход рабочей среды из источника в рабочую полость и из рабочей полости в дренаж соответственно.

Полученное указанным способом уравнение (9) является математической моделью полости с жидкостью.

Для полости с газом преобразование исходной системы уравнений проводится на основе выбранного термического уравнения состояния. При этом калорическое уравнение состояния выводится на основе термического. Преобразование проводится в следующей последовательности (рассмотрен случай идеального газа):

– записывается уравнение внутренней энергии как функции объёма полости и пары термических параметров, для которых требуется вывести дифференциальные уравнения (в данном случае выбраны давление и плотность)

$$U = u \cdot M = u \cdot \rho \cdot W = \frac{p}{\rho} \cdot \frac{1}{k-1} \cdot \rho \cdot W = \frac{p \cdot W}{k-1}, \quad (10)$$

где  $k$  – показатель адиабаты;

– полученное уравнение внутренней энергии переписывается в дифференциальной форме

$$dU = \frac{\partial U}{\partial \rho} \cdot d\rho + \frac{\partial U}{\partial p} \cdot dp + \frac{\partial U}{\partial W} \cdot dW = \frac{W}{k-1} \cdot d\rho + \frac{p}{k-1} \cdot dW ; \quad (11)$$

– правая часть уравнения (11) подставляется в уравнение закона сохранения энергии (1); полученное выражение преобразуется и записывается относительно изменения давления во времени

$$dp/dt = \frac{k-1}{W} \cdot \left[ h_{\text{вх}} \cdot G_{\text{вх}} - h \cdot G_{\text{вых}} - \frac{k}{k-1} \cdot p \cdot S \cdot V \right]; \quad (12)$$

– записывается уравнение массы как функции объёма полости и плотности в дифференциальной форме

$$dM = \frac{\partial M}{\partial W} \cdot dW + \frac{\partial M}{\partial \rho} \cdot d\rho = \rho \cdot dW + W \cdot d\rho; \quad (13)$$

– правая часть уравнения (13) подставляется в уравнение закона сохранения массы (2); полученное выражение преобразуется и записывается относительно изменения плотности во времени

$$d\rho/dt = \frac{1}{W} \cdot (G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}} - \rho \cdot S \cdot V). \quad (14)$$

Полученная указанным способом система уравнений (12), (14) является математической моделью полости с газом.

Рассмотренные способы математического описания полостей имеют следующие недостатки.

Для гидравлических систем отказ от уравнения сохранения энергии приводит к тому, что становится невозможным учитывать теплообменные процессы, а температуру рабочей среды приходится задавать и считать постоянной в процессе работы системы. Это может привести, например, к некорректному определению расхода рабочей среды через каналы ввиду фактического температурного изменения свойств рабочей среды. Кроме того, невозможность учёта теплообменных процессов и изменения температуры совместно с принятым способом учёта сжимаемости жидкости (через модуль упругости по выражению (6)) позволяет корректно рассчитывать только изотермические процессы в полости. Корректный расчёт адиабатных процессов требует учёта изменения температуры для правильного определения модуля упругости. Для других видов процессов в полости расчёт невозможен ввиду отсутствия в литературе данных о значениях модуля упругости для этих процессов.

Для пневматических систем существующий способ предполагает жёсткую привязку к принятому термическому уравнению состояния, каждое из которых справедливо только в определённом диапазоне давления и температуры. Немало-

важным является и тот факт, что провести требуемое преобразование исходной системы уравнений удаётся только для ограниченного ряда термических уравнений состояния, т.к. наиболее точные из них являются достаточно сложными.

Существующие способы описания полостей с рабочей средой как для гидро-, так и для пневмосистем были разработаны много лет назад и формировались с учётом уровня развития методов расчёта и возможностей вычислительной техники. Современный уровень развития методов расчёта, вычислительной техники и программного обеспечения позволяет не проводить сложных преобразований исходной системы уравнений и отказаться от допущений, ограничивающих область применения существующего подхода к анализу переходных процессов в гидро- и пневмосистемах.

Для описания полостей с рабочей средой предлагается использовать исходную систему уравнений, в которой калорическое и термическое уравнения состояния записываются в следующем виде:

$$u_{\text{расч}} - u(p, T) = 0, \quad (15)$$

$$\rho_{\text{расч}} - \rho(p, T) = 0. \quad (16)$$

Каждое из уравнений состояния (15), (16) записано как разность двух членов. Первый из них представляет собой расчётное значение удельной внутренней энергии  $u_{\text{расч}}$  или плотности  $\rho_{\text{расч}}$ , полученное при решении системы дифференциальных уравнений (1),(2). Второй член представляет собой зависимость, связывающую удельную внутреннюю энергию или плотность с абсолютным давлением и термодинамической температурой. Указанные зависимости могут быть заданы как аналитически, так и таблично, что позволяет использовать при расчёте как различные уравнения состояния, так и табличные справочные данные.

В соответствии с принятым способом разработан ряд математических и цифровых моделей для некоторых типов

полостей. Это полость переменного объёма с теплоизоляцией и без неё, полость постоянного объёма с теплоизоляцией и без неё, полость бесконечного объёма.

На рис. 3 приведена расчётная схема теплоизолированной полости переменного объёма.

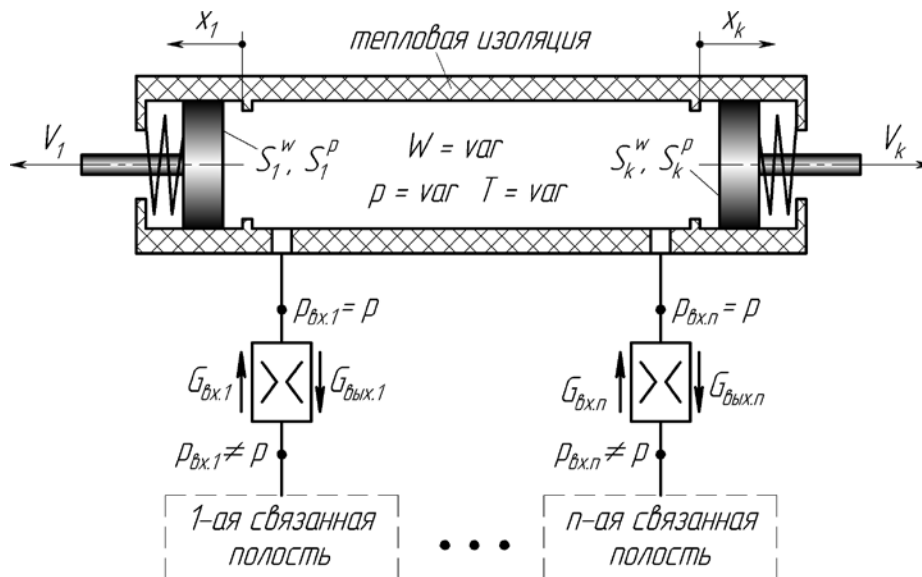


Рис. 3. Расчетная схема теплоизолированной полости переменного объёма

Её математическая модель имеет вид:

$$\frac{dU}{dt} = \Delta H_{\text{вх}} - \frac{U + p \cdot (W_0 + \Delta W)}{M} \cdot G_{\Sigma \text{вых}} - \Delta L, \quad (17)$$

$$\frac{dM}{dt} = G_{\Sigma \text{вх}} - G_{\Sigma \text{вых}}, \quad (18)$$

$$u - f_1(p, T) = 0, \quad (19)$$

$$\rho - f_2(p, T) = 0, \quad (20)$$

$$\Delta H_{\text{вх}} = \sum_n (G_{\text{вх},i} \cdot h_i), \quad \Delta W = \sum_k (S_j^w \cdot x_j),$$

$$\Delta L = p \cdot \sum_k (S_j^p \cdot V_j), \quad G_{\Sigma \text{вх}} = \sum_n G_{\text{вх},i},$$

$$G_{\Sigma \text{вых}} = \sum_n G_{\text{вых},i}, \quad u = U/M,$$

$$\rho = M/(W_0 + \Delta W), \quad h = u + p/\rho,$$

$$G_{\text{вх},i} = \begin{cases} |G_i|, & \text{если } p \neq p_{\text{вх},i} \\ 0, & \text{если } p = p_{\text{вх},i} \end{cases},$$

$$G_{\text{вых},i} = \begin{cases} |G_i|, & \text{если } p = p_{\text{вх},i} \\ 0, & \text{если } p \neq p_{\text{вх},i} \end{cases}.$$

Здесь  $U$  – внутренняя энергия рабочей среды в полости;  $t$  – время;  $\Delta H_{\text{вх}}$  – мгновенный суммарный приход энергии в полость;  $p$  – абсолютное давление рабочей среды в полости;  $W_0$  – объём полости при нулевых перемещениях связанных с ней механических подсистем;  $\Delta W$  – приращение объёма полости, обусловленное перемещением связанных механических подсистем;  $M$  – масса рабочей среды в полости;  $G_{\Sigma \text{вых}}$  – мгновенный суммарный отток массы рабочей среды из полости;  $\Delta L$  – мгновенное суммарное приращение работы рабочей среды по перемещению связанных механических подсистем;  $G_{\Sigma \text{вх}}$  – мгновенный суммарный приток массы рабочей среды в полость;  $u$  – удельная внутренняя энергия рабочей среды в полости;  $\rho$  – плотность рабочей среды в полости;  $f_1$  – функция, определяющая зависимость удельной внутренней энергии рабочей среды от его абсолютного давления и термодинамической температуры;  $f_2$  – функция, определяющая зависимость плотности рабочей среды от его абсолютного давления и термодинамической температуры;  $T$  – термодинамическая темпе-

ратура рабочей среды в полости;  $S_j^w$  – площадь, определяющая изменение объёма полости при перемещении  $j$ -й ( $j = 1, \dots, k$ ) связанной механической подсистемы;  $x_j$  – перемещение  $j$ -й связанной механической системы;  $S_j^p$  – площадь, определяющая силовое воздействие рабочей среды в полости на  $j$ -ю связанную механическую подсистему;  $V_j$  – скорость перемещения  $j$ -й механической подсистемы;  $G_{вх.i}$  – мгновенный приток массы рабочей среды в полость из  $i$ -й связанной полости ( $i = 1 \dots n$ );  $h_i$  – удельная энтальпия рабочей среды в  $i$ -й связанной полости;  $G_{вых.i}$  – мгновенный отток массы рабочей среды из полости в  $i$ -ю связанную полость;  $h$  – удельная энтальпия рабочей среды в полости;  $G_i$  – массовый расход рабочей среды через канал между рассматриваемой и  $i$ -й связанной полостями;  $p_{вх.i}$  – абсолютное давление рабочей среды

на входе в канал между рассматриваемой и  $i$ -ой связанной полостями (вход канала определяется направлением течения рабочей среды через него).

Уравнения (17) – (20) являются основными, а остальные уравнения – вспомогательными.

На рис. 4 приведена расчётная схема теплоизолированной полости постоянного объёма. В целом математическая модель полости данного типа аналогична математической модели (система (17) – (20) и вспомогательные уравнения) теплоизолированной полости переменного объёма. Однако из правой части уравнения (17) исключается член  $\Delta L$ , а из второго члена правой части этого же уравнения исключается параметр  $\Delta W$ . Кроме того, исключаются вспомогательные уравнения для расчёта  $\Delta L$  и  $\Delta W$ .

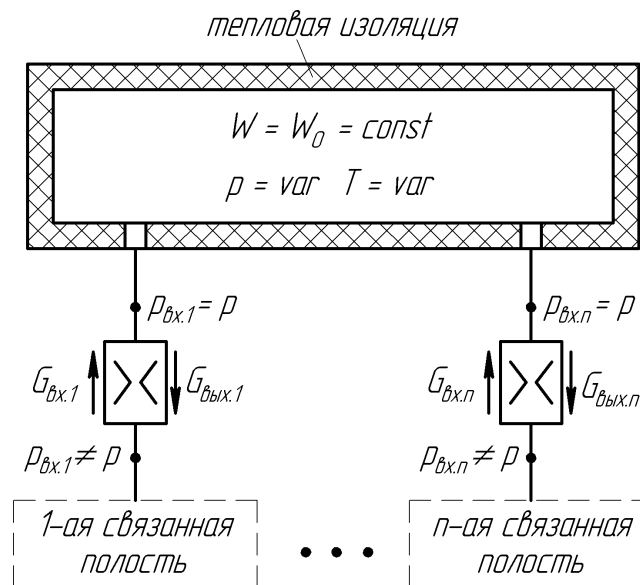


Рис. 4. Расчётная схема теплоизолированной полости постоянного объёма

Процессы в полостях переменного и постоянного объёма без теплоизоляции также описываются системой уравнений (17) – (20) и вспомогательными зависимостями (с учётом указанных выше особенностей), однако в правую часть уравнения (17) добавляется (со знаком «минус») дополнительный член, который представляет собой тепловой поток, передающийся

от рабочей среды к стенкам, ограничивающим полость.

Начальные условия для дифференциальных уравнений (17), (20) удобнее рассчитывать, чем задавать, т.к. обычно известны только начальные значения абсолютного давления и температуры рабочей среды в полости. Для расчёта начальных условий используются выражения:

$$M_n = \begin{cases} W_0 \cdot f_2(p_n, T_n), & \text{для полости постоянного объёма} \\ (W_0 + \Delta W_n) \cdot f_2(p_n, T_n), & \text{для полости переменного объёма} \end{cases}$$

$$U_n = f_1(p_n, T_n) \cdot M_n,$$

где  $U_n$  – начальная внутренняя энергия рабочей среды в полости;  $M_n$  – начальная масса рабочей среды в полости;  $p_n$ ,  $T_n$  – начальное абсолютное давление и температура рабочей среды в полости;  $\Delta W_n$  – приращение объёма полости, обусловленное начальным перемещением связанных механических систем.

На рис. 5 приведена расчётная схема полости бесконечного объёма, математическая модель которой состоит из уравнений (19), (20) и вспомогательного уравнения для расчёта удельной энтальпии  $h$  рабочей среды в полости. Данная модель предназначена для описания атмосферы, гидравлических баков, дренажных полостей и других объектов, в которых параметры рабочей среды можно считать постоянными во времени.

В качестве проверки работоспособности предлагаемого способа описания полостей при расчётах переходных процессов в гидро- и пневмосистемах была разработана цифровая модель и смоделирована работа привода, представленного на рис. 2, по перемещению инерционной нагрузки.

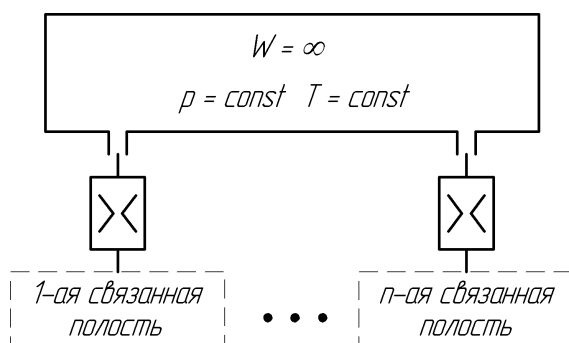


Рис. 5. Расчётная схема полости бесконечного объёма

В связи с тем, что рассматривался отвлечённый привод с неопределёнными геометрическими характеристиками и физическими свойствами деталей корпуса, то в качестве допущения было принято, что полость с рабочей средой теплоизолирована.

Цифровая модель привода, представленная на рис. 6, 7, была реализована в учебной версии отечественного программного комплекса «Моделирование в технических устройствах» (ПК «МВТУ»). Модель состоит из взаимосвязанных блоков: блок «Механика» отражает процессы в механической подсистеме, блоки «Полость» – процессы в гидравлической или термодинамической подсистеме, а блоки «Дроссель» – процессы в гидродинамической подсистеме.

В качестве расчётных вариантов рабочих сред были рассмотрены: газ, подчиняющийся уравнению состояния Редлиха–Квонга; газ, свойства которого описываются табличными зависимостями из стандартных справочных данных; вода; масло АМГ-10.

На рис. 8–10 приведены результаты моделирования в виде графиков переходных процессов в механической, гидравлической/термодинамической и гидродинамической подсистемах.

Таким образом, предлагаемый способ описания полостей с рабочей средой позволяет анализировать процессы в гидро- и пневмосистемах с использованием универсального математического описания, более полно отражающего исследуемые процессы.



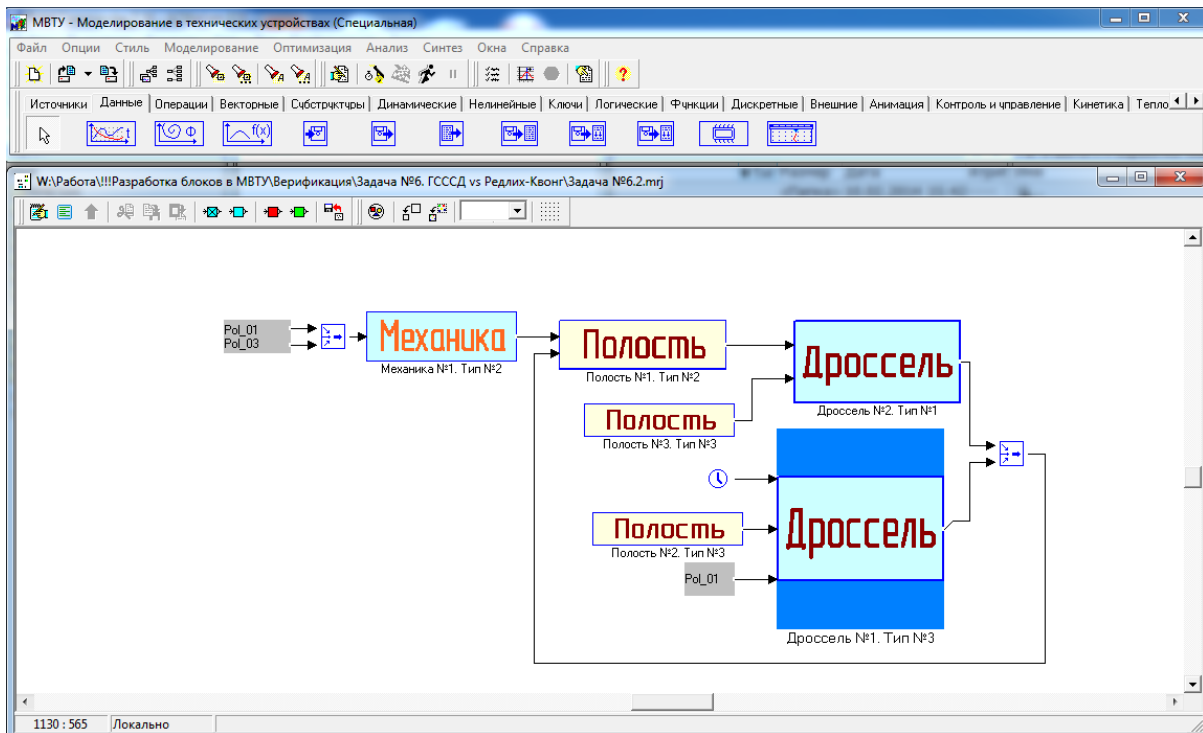
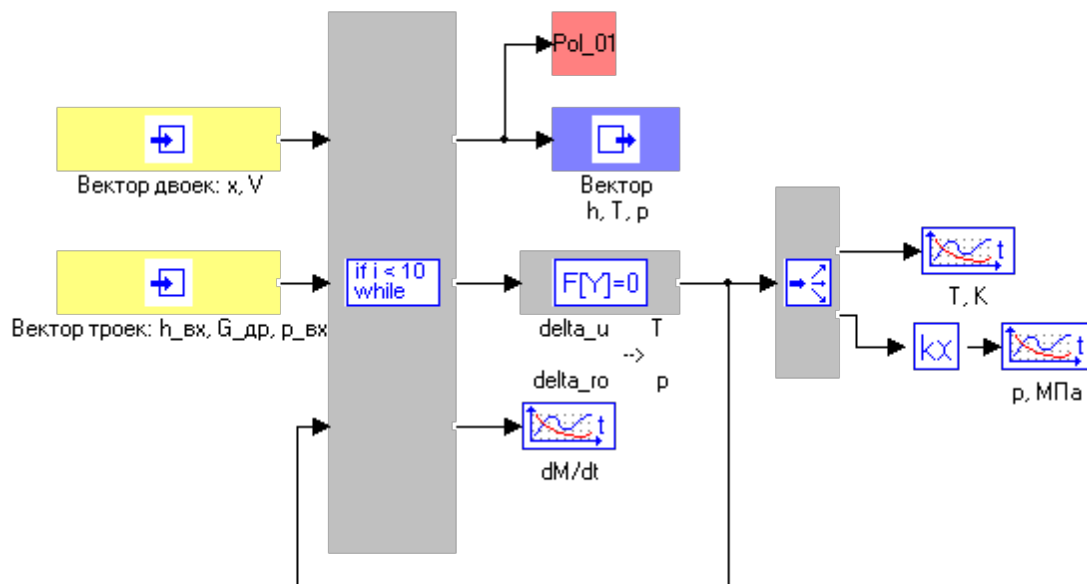


Рис. 6. Цифровая модель привода, реализованная в ПК «МВТУ»



a

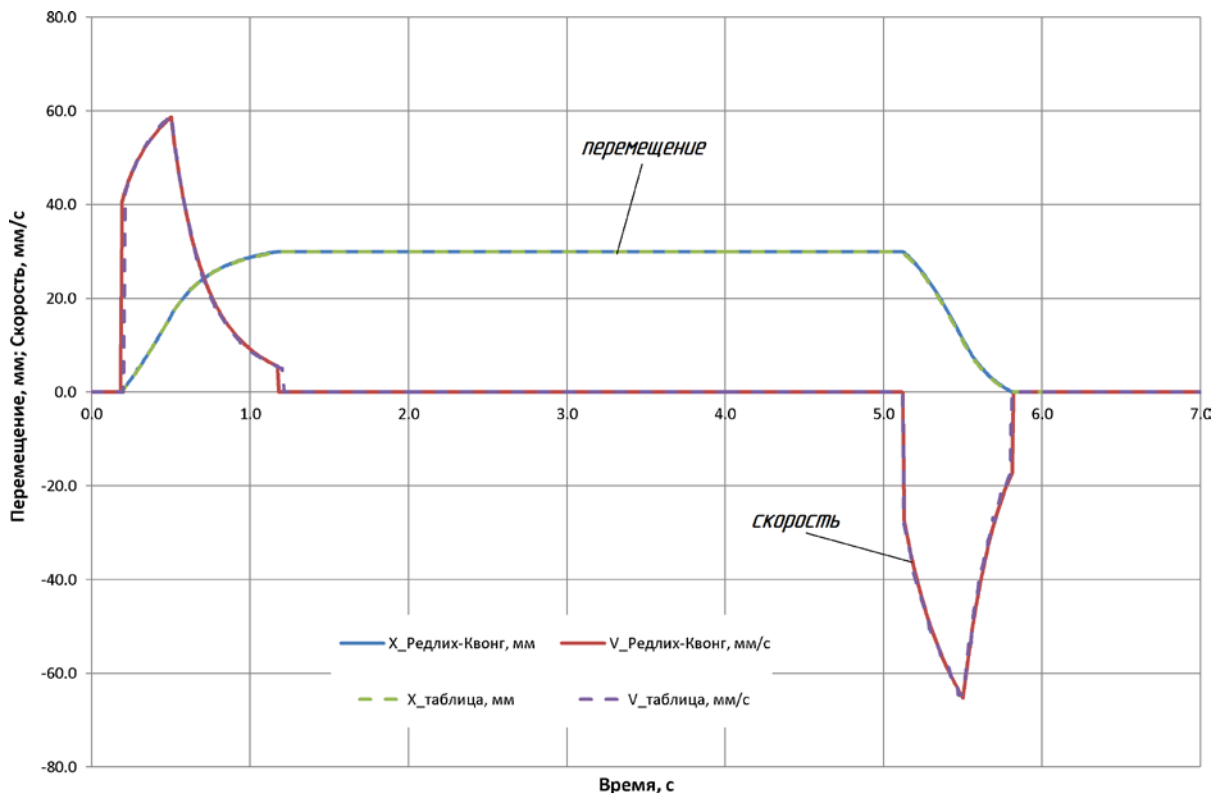
```

Язык программирования
1 | Видеть блок «Полость с газом»
2 | (Полость имеет два входа и один выход.
3 | Таблица с параметрами среды (температура)
4 | Вход:
5 | 1. Вектор  $V_{x,1}$ , содержащий двойки значений переменной  $Z$  и скорости  $V$ , м/с
6 | механической системы
7 | 2. Вектор  $V_{x,2}$ , содержащий тройки значений угловой скорости
8 | приращенно/уменьшенно газа  $\Delta$ , массового прироста/распада газа  $G$ , кг/с,
9 | давление на входе и выходе  $P_{вх}$ , Па.
10 | В случае, если газ течет из расширяющейся полости, то давление  $p_{вх}$  равно
11 | давлению в полости.
12 | Если газ течет в расширяющуюся полость, то давление  $p_{вх}$  равно давлению в
13 | полости, из которой происходит истечение.
14 | 3. Вектор  $V_{x,3}$ , содержащий значения температуры  $T$ ,  $P$  и давления  $p$ , Па газа
15 | в полости
16 | Выход:
17 | 1. Вектор  $V_{x,1}$ , содержащий значения плотности ускоренной энергии, Дж/кг,
18 | температуры  $T$ ,  $P$  и абсолютного давления  $p$ , Па газа в полости
19 | 2. Вектор  $V_{x,2}$ , содержащий значения удельной внутренней энергии  $del_{вн}$ , Дж/кг
20 | и значения плотности  $del_{вн}$ , кг/м3, необходимых для итерационного расчета
21 | температуры и давления газа в полости
22 | 3. Изменение массы газа в полости  $dM(t)$ , кг
23 | 4. Метр  $del_{вн}$ ,  $del_{вн}$ ,  $del_{вн}$ ,  $del_{вн}$ 
24 | (Объявление димензионных переменных и задание их начальных значений.)
25 | Начальные значения рассчитываются в окне «Язык программирования макроблока»
26 |  $del_{вн} = 0$ ,  $del_{вн} = 0$ 
27 | (Расчет начального вектора)
28 |  $T = T_{вх,1}$ 
29 |  $P = P_{вх,1}$ 
30 | (Расчет суммарного расхода массы газа из полости  $G_{вх}$ , кг/с)
31 |  $G_{вх} = 0$ 
32 | //Введение начального значения постоянного расхода газа из полости
33 | //необходимо для обеспечения стабильности расчета точек или
34 | //перехода полости
35 | for  $i = 1$ ,  $count(Bx_2)/3$  begin
36 | if  $(abs(Bx_2[i*3]-p)/p < 0.0005)$  then  $G_{вх} = G_{вх} + abs(Bx_2[i*3]-1)$ 
37 | end
38 | (Расчет суммарного мгновенного прироста массы  $G_{вх}$ , кг/с и энергии  $dE_{вн}$ , Вт
39 | газа в полости)
40 |  $dE_{вн} = 0$ 
41 |  $G_{вх} = 0$ 
42 | for  $i = 1$ ,  $count(Bx_2)/3$  begin
43 | if  $(abs(Bx_2[i*3]-p)/p > 0.0005)$  then begin
44 |  $dE_{вн} = dE_{вн} + Bx_2[i*3-2] * abs(Bx_2[i*3]-1)$  //Продукт инерции (затормозил)
45 |  $G_{вх} = G_{вх} + abs(Bx_2[i*3]-1)$  end
46 | end
47 | (Изменение массы)
48 |  $dM = G_{вх} - G_{вх}$ 
49 | (Расчет суммарного мгновенного изменения работы газа над механической
50 | системой  $dE_{вн}$ , Вт)
51 |  $dE_{вн} = 0$ 
52 | for  $i = 1$ ,  $count(Bx_1)/2$  begin
53 |  $dE_{вн} = dE_{вн} + Bx_1[i*2]$ 
54 | end
55 |  $E_{вн} = E_{вн} + dE_{вн}$ 

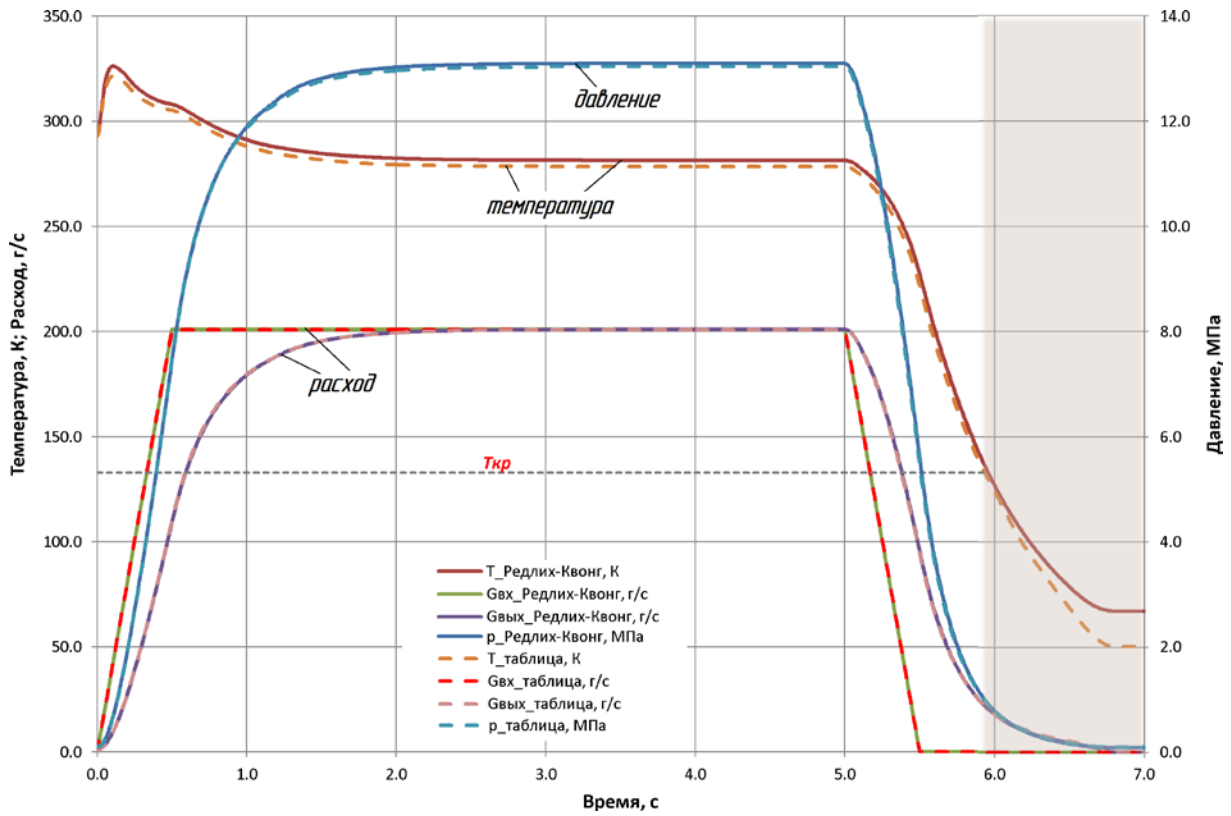
```

б

Рис. 7. Цифровая модель рабочей полости привода, реализованная в ПК «МВТУ»: а – блок-схема; б – текст блока «Язык программирования»

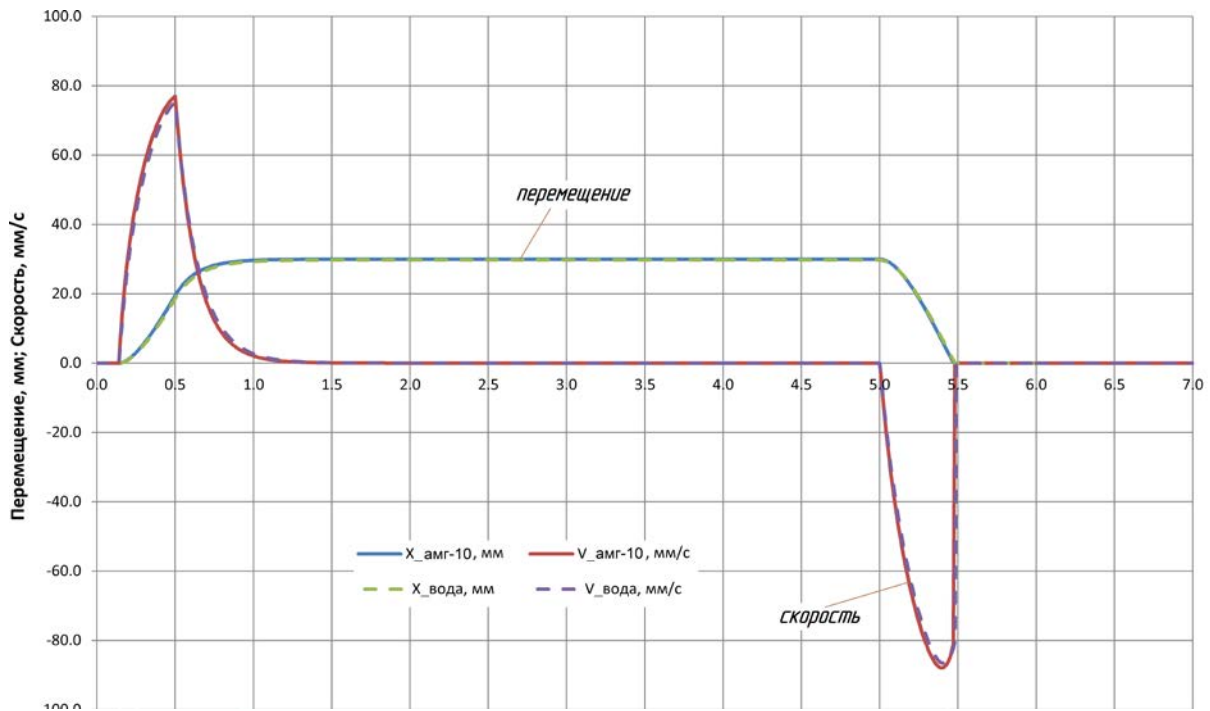


а

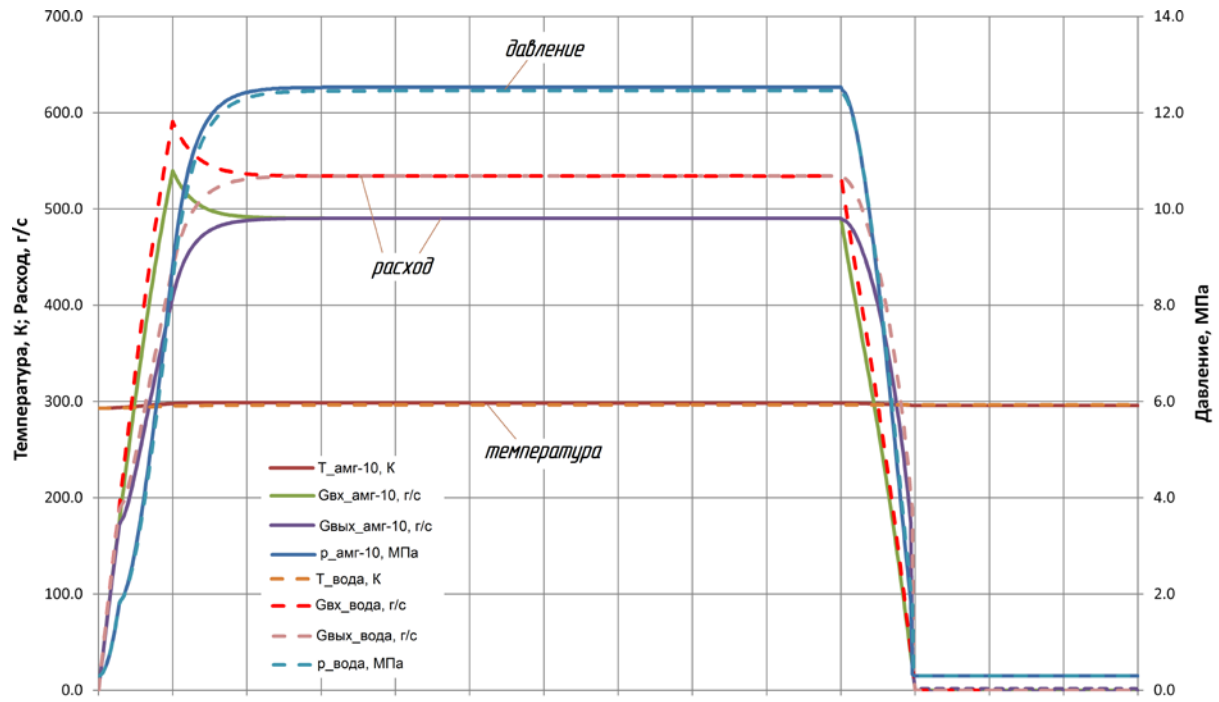


б

Рис. 8. Переходный процесс в механической (а) и термодинамической (б) подсистемах пневмопривода



а



б

Рис. 9. Переходный процесс в механической (а) и гидравлической (б) подсистемах гидропривода

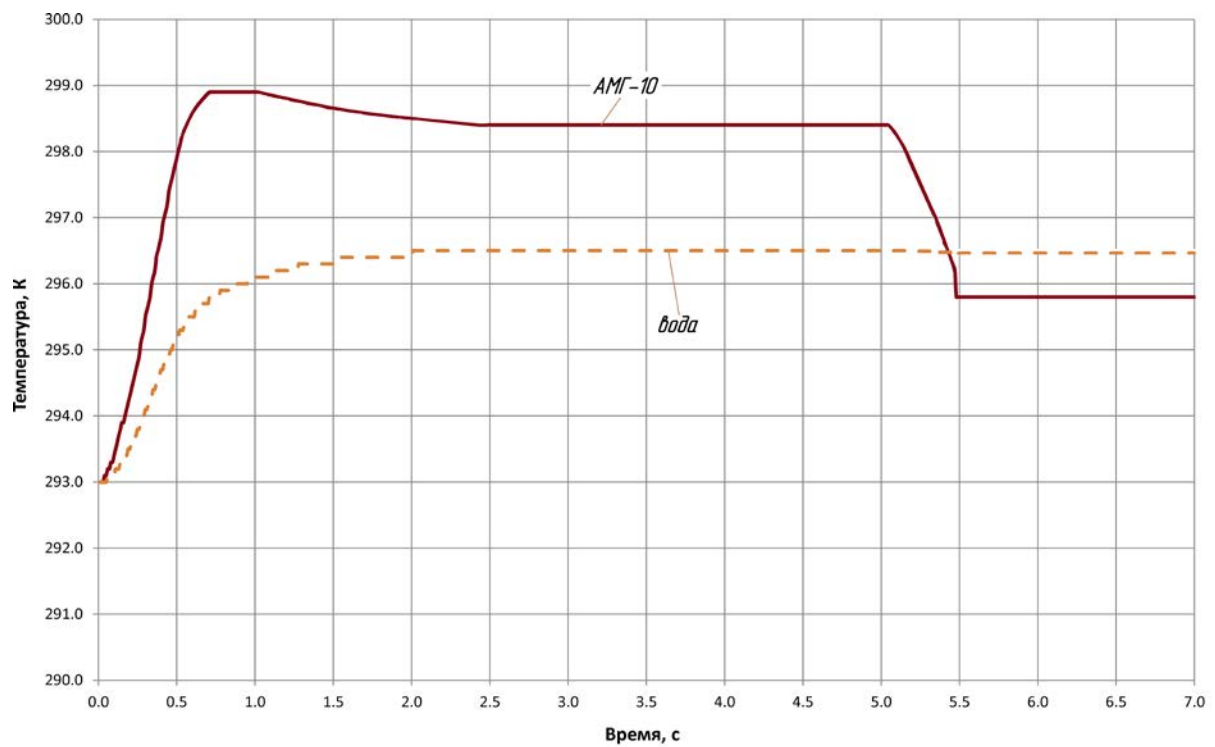


Рис.10. Переходный процесс в гидравлической подсистеме гидропривода

**Библиографический список**

1. Мамонтов М.А. Основы термодинамики тела переменной массы. Тула: Приокское книжное издательство, 1970. 87 с.
2. Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления. М.: Машиностроение, 1972. 376 с.
3. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М.: Машиностроение, 1982. 240 с.

**Информация об авторах**

**Тимофеев Юрий Михайлович**, инженер первой категории Расчетно-аналитического центра, КБ «Арматура» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Ковров. E-mail: [timasp@inbox.ru](mailto:timasp@inbox.ru). Область научных интересов: проектирование и расчёт пневмосистем и устройств газавтоматики ракетно-космических комплексов, гидро- и пневмосистем летательных аппаратов.

**Халатов Евгений Михайлович**, доктор технических наук, профессор, начальник Расчетно-аналитического центра, КБ «Арматура» – филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Ковров. E-mail: [kba@kc.ru](mailto:kba@kc.ru). Область научных интересов: проектирование и расчёт пневмосистем и агрегатов ракетно-космических комплексов.

**UNIVERSAL APPROACH TO THE DESCRIPTION OF WORKING MEDIUM CHAMBERS FOR SIMULATING HYDRAULIC AND PNEUMATIC SYSTEMS**

© 2014 Yu. M. Timofeyev, E. M. Khalatov

Design Bureau “Armatura” – branch of Khrunichiev Space Center,  
Kovrov, Russian Federation

The article is concerned with the consideration of methods of mathematical formulation of processes in interthrottle chambers and working medium reservoirs used to simulate the operation of hydraulic and pneumatic systems.

Consideration has been given to a general approach to the development of mathematical models of hydraulic and pneumatic systems; the stages of constructing models are also presented.

A generalized mathematical model of a heat-insulated chamber with variable volume is presented. The derivation of standard mathematical modules of the above chamber on the basis of the generalized model is given. The assumptions taken into consideration with the existing methods of describing the processes taking place in chambers and reservoirs of hydraulic and pneumatic systems are analyzed. The shortcomings of the existing methods are shown.

An approach to forming a mathematical formulation is proposed, which is universal in its nature and reflects the processes under consideration in full measure. The proposed description method is based on the laws of conservation of thermodynamics of a variable-mass body. A special record of thermal and caloric equations of the state model makes it universal and independent of the working medium type. When compiling the digital models of chambers, both equations of working medium state and tabulated reference data can be used.

Design diagrams and mathematical models of heat-insulated chambers with variable and constant volumes are presented as an example. A digital model is presented and the results of modeling the operation of hydraulic and pneumatic actuators performed with the use of the proposed method are given. The digital model is implemented in the training version of the Russian software package “Simulation in technical devices”.

*Interthrottle chamber, capacity, simulation, mathematical model, hydraulic system, pneumatic system.*

### References

1. Mamontov M.A. *Osnovy termodinamiki tela peremennoy massy* [Principles of thermodynamics of a variable-mass body]. Tula: Priokskoye Publ., 1970. 87 p.
2. Gamynin N.S. *Gidravlichesky privod sistem upravleniya* [Hydraulic drive of control systems]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1972. 376 p.
3. Popov D.N. *Nestatsionarnye gidromekhanicheskiye protsessy* [Unsteady-state hydromechanical processes]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1982. 240 p.

### About the authors

**Timofeyev Yury Michailovich**, 1 category engineer, Design and Analytic Center, Design Bureau “Armatura” – branch of Khrunichev Space Center, Kovrov. E-mail: [timasp@inbox.ru](mailto:timasp@inbox.ru). Area of Research: design and calculation of pneumatic systems and gas automatic equipment for space-rocket complexes, aircraft hydraulic and pneumatic systems.

**Khalatov Evgeny Mikhailovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Design and Analytic Center, Design Bureau “Armatura” – branch of Khrunichev Space Center, Kovrov. E-mail: [kba@kc.ru](mailto:kba@kc.ru). Area of Research: design and calculation of pneumatic systems and units of space-rocket complexes.