

УДК 519.876.5+621.5+621.22

Моделирование междроссельных камер и емкостей гидро- и пневмосистем

Тимофеев Ю.М., специалист

*Россия, 601900, Владимирская обл., г. Ковров, КГТА им В.А. Дегтярёва,
кафедра «Гидропневмоавтоматика и гидропривод»*

Научный руководитель: Халатов Е.М., д.т.н., профессор

*Россия, 601900, Владимирская обл., г. Ковров, КГТА им В.А. Дегтярёва
kba@kc.ru*

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

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 ведется на основе единого подхода, суть которого можно отразить с помощью блок-схемы, представленной на рисунке 1.

На первом этапе после анализа принципа действия системы проводится операция декомпозиции, заключающаяся в условном разбиении системы на взаимосвязанные 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 емкостях.

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

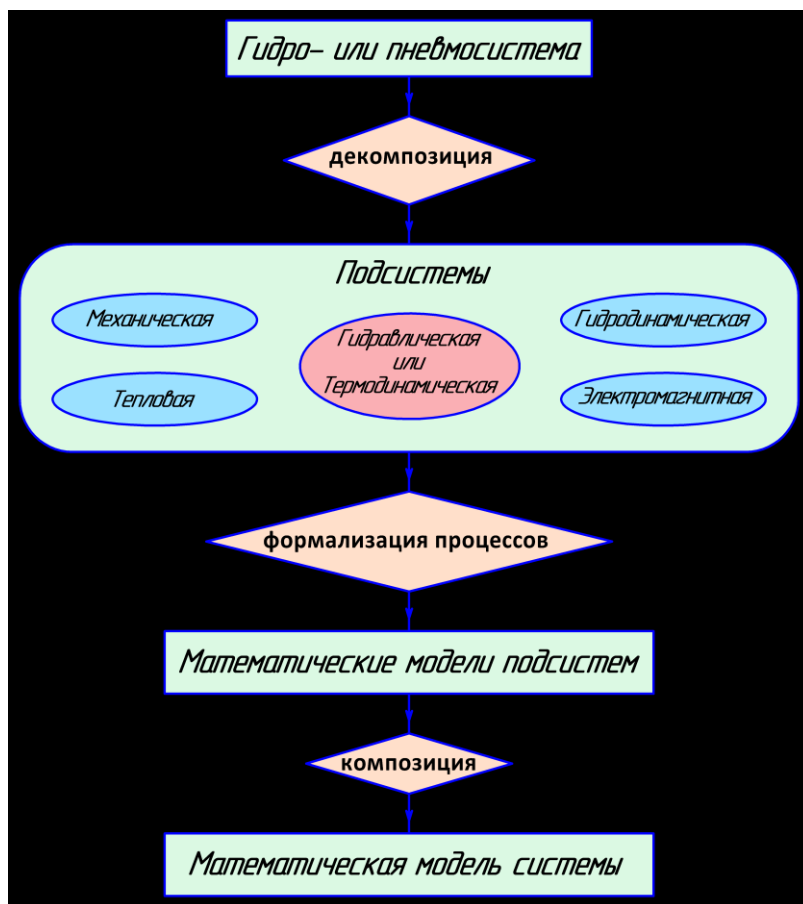


Рис. 1. Принцип построения математической модели гидро- или пневмосистемы

Остановимся более подробно на подсистеме, которая обозначена на рисунке 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 емкости, процессы в которых описывает рассматриваемая подсистема, будем называть единым термином «полость», под которой будем понимать объем с рабочей средой, для которого характерны следующие особенности: объем образован и ограничен поверхностями деталей системы; скорость движения рабочей среды в объеме мала по сравнению со скоростью течения в подводящих и отводящих каналах; в каждой точке объема термические и калорические параметры рабочей среды можно считать одинаковыми.

К полостям можно отнести: рабочие полости объемных 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 возьмем рабочую полость гидро- или пневмопривода одностороннего действия, расчетная схема которого приведена на рисунке 2. Для упрощения будем считать, что полость теплоизолирована и не обменивается теплотой с ограничивающими стенками. Управление приводом осуществляется путем изменения давления рабочей среды в полости. Рабочая среда поступает в полость через регулируемый дроссель с массовым расходом $G_{\text{вх}}$ от источника с постоянными параметрами. Из полости рабочая среда через нерегулируемый дроссель уходит в дренаж с массовым расходом $G_{\text{вых}}$. Полость связана с одной механической подсистемой, представляющей собой поршень с рабочей площадью S , нагруженный позиционной (пружиной) и инерционной нагрузками. Состояние рабочей среды в полости полностью характеризуется тремя параметрами – абсолютным давлением p , термодинамической температурой T и объемом 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:

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

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

$$\Phi_1(p, T, u) = 0, \quad (3)$$

$$\Phi_2(p, T, \rho) = 0, \quad (4)$$

где U , M – внутренняя энергия и масса рабочей среды в полости; t – время; $h_{\text{ист}}$, h – удельная энтальпия рабочей среды в источнике и рабочей полости; $G_{\text{вх}}$, $G_{\text{вых}}$ – 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 рабочей среды в полости; ρ – плотность рабочей среды в полости; Φ_1 , Φ_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 обобщенной 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 , ρ ; ρ , T).

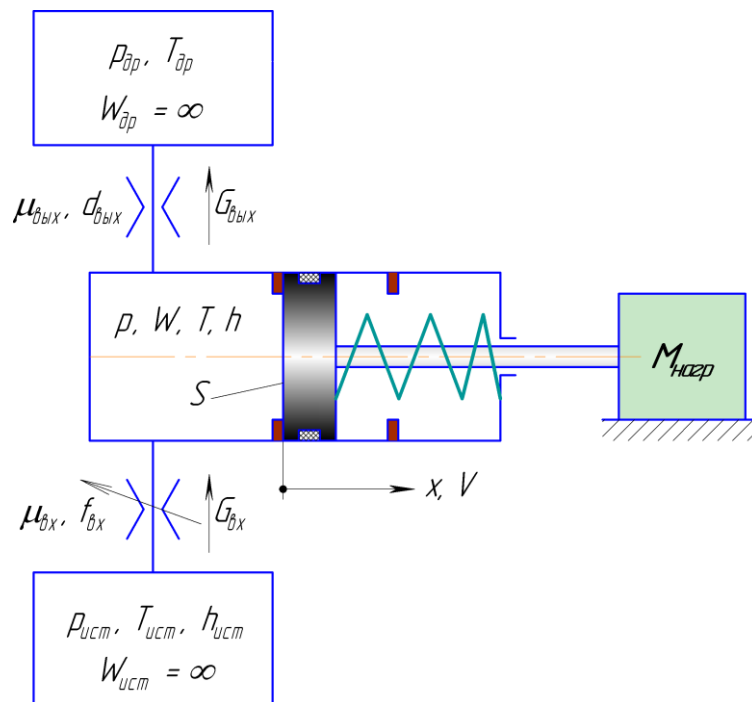


Рис. 2. Расчетная схема привода одностороннего действия:

$p_{ист}$, $p_{др}$, 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 – объем, 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; $M_{нагр}$ – 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 объемной упругости [2, 3]. Модуль объемной упругости при этом является функцией давления, температуры и вида процесса. Преобразование проводится в следующей последовательности:

- записывается дифференциальное уравнение для массы как функции объема 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 объемной упругости;

- записывается зависимость, связывающая мгновенное изменение объема 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 $Q_{\text{вх}}$, $Q_{\text{вых}}$ – объемный 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 объема 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

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

- 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 объема 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 учета теплообменных процессов и изменения температуры совместно с принятым способом учета сжимаемости жидкости (через модуль упругости по выражению (6)) позволяет корректно рассчитывать только изотермические процессы в полости. Корректный расчет адиабатных процессов требует учета изменения температуры для правильного определения модуля упругости. Для других видов процессов в полости расчет невозможен в виду отсутствия в литературе данных о значениях модуля упругости для этих процессов.

Для пневматических систем существующий способ предполагает жесткую привязку к принятому термическому уравнению состояния, каждое из которых справедливо только в определенном диапазоне давления и температуры. Немаловажным также является тот факт, что провести требуемое преобразование исходной системы уравнений удастся 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 учетом уровня развития методов расчета и возможностей вычислительной техники. Современный уровень развития методов расчета, 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 записывать 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 расчетное 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 расчете 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 бесконечного объема, полость постоянного объема с теплоизоляцией, полость постоянного объема без теплоизоляции, полость переменного объема с теплоизоляцией, полость переменного объема без теплоизоляции. В качестве примера на рисунке 3 приведена расчетная схема теплоизолированной полости переменного объема, математическая модель которой имеет вид:

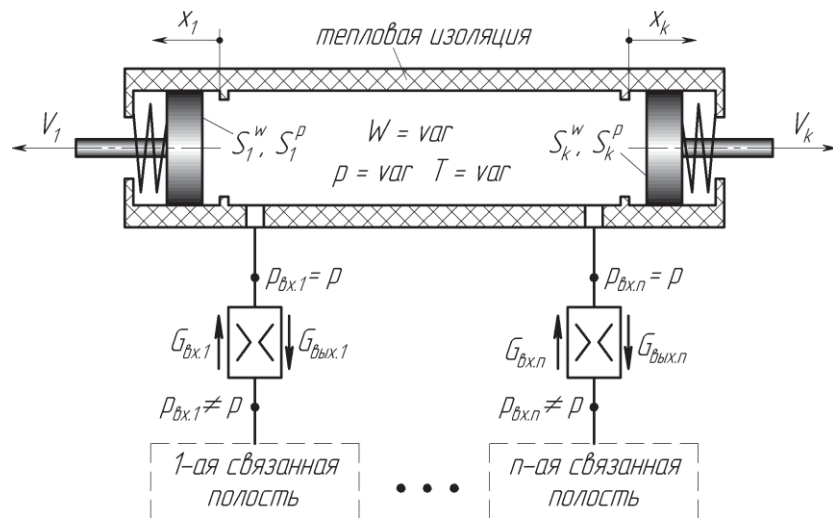


Рис. 3. Расчетная схема теплоизолированной полости переменного объема

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

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

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

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

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

$$G_{\Sigma \text{вых}} = \sum_n G_{\text{вых},i}, \quad u = U/M, \quad \rho = M/(W_0 + \Delta W), \quad h = u + p/\rho,$$

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

где 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 – объем полости, при нулевых перемещениях связанных с ней механических подсистем; ΔW – приращение объема полости, обусловленное перемещением связанных механических подсистем; M – масса рабочей среды в полости; $G_{\Sigma\text{вых}}$ – мгновенный суммарный отток массы рабочей среды из полости; ΔL – 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; ρ – 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 температура рабочей среды в полости; S_j^w – площадь, определяющая изменение объема полости при перемещении j -ой ($j = 1 \dots k$) связанной механической подсистемы; x_j – перемещение j -ой связанной механической системы; S_j^p – площадь, определяющая силовое воздействие рабочей среды в полости на j -ую связанную механическую подсистему; V_j – скорость перемещения j -ой механической подсистемы; $G_{\text{вх},i}$ – мгновенный приток массы рабочей среды в полость из i -ой связанной полости ($i = 1 \dots n$); h_i – удельная энтальпия рабочей среды в i -ой связанной полости; $G_{\text{вых},i}$ – мгновенный отток массы рабочей среды из полости в i -ую связанную полость, h – удельная энтальпия рабочей среды в полости; G_i – массовый расход рабочей среды через канал между рассматриваемой и i -ой связанной полостями; $p_{\text{вх},i}$ – 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 – вспомогательными.

В качестве проверки работоспособности предлагаемого способа описания полостей при расчетах переходных процессов в гидро- и пневмосистемах была разработана цифровая модель и смоделирована работа привода, представленного на рисунке 2, по перемещению инерционной нагрузки. В связи с тем, что рассматривался отвлеченный привод, с неопределенными геометрическими характеристиками и физическими свойствами деталей корпуса, в качестве допущения было принято, что полость с рабочей средой теплоизолирована.

Цифровая модель привода, представленная на рисунках 4, 5, 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.

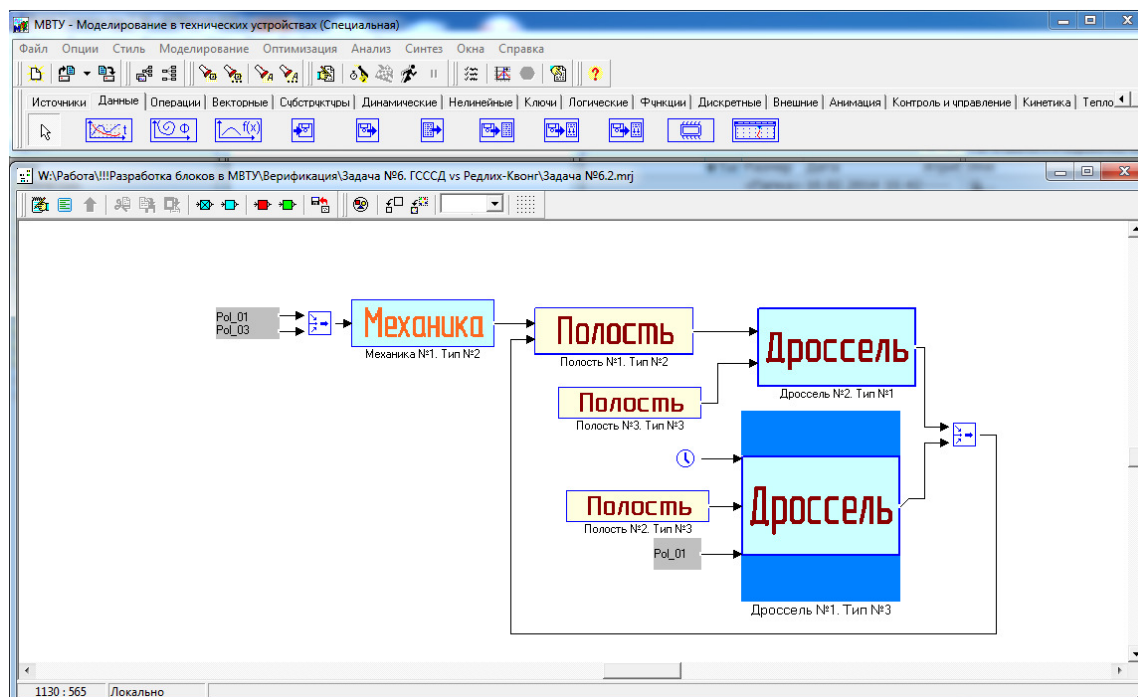


Рис. 4. Цифровая модель привода, реализованная в ПК «МВТУ»

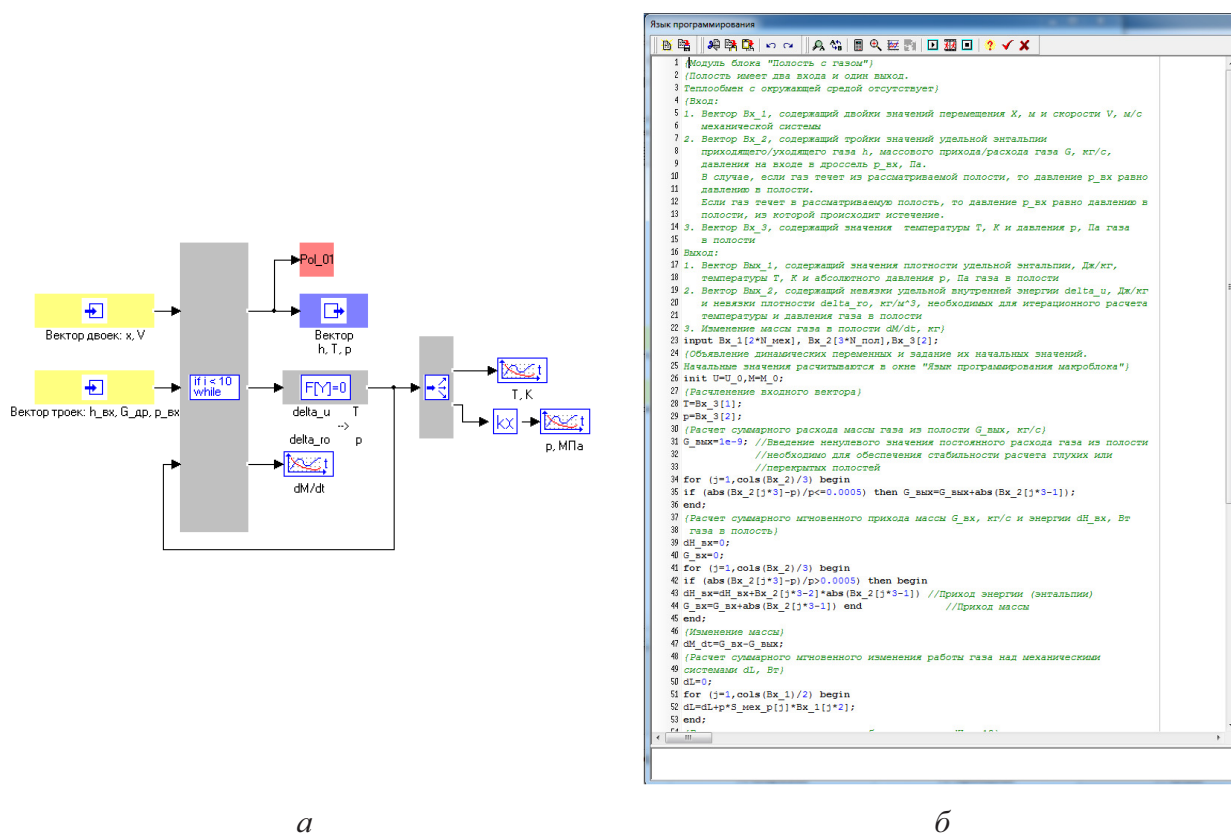


Рис. 5. Цифровая модель рабочей полости привода, реализованная в ПК «МВТУ»:

а – блок-схема; б – текст блока «Язык программирования»

В качестве расчетных 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 рисунках 6-10 приведены результаты моделирования в виде графиков переходных процессов в механической, гидравлической/термодинамической и гидродинамической подсистемах.

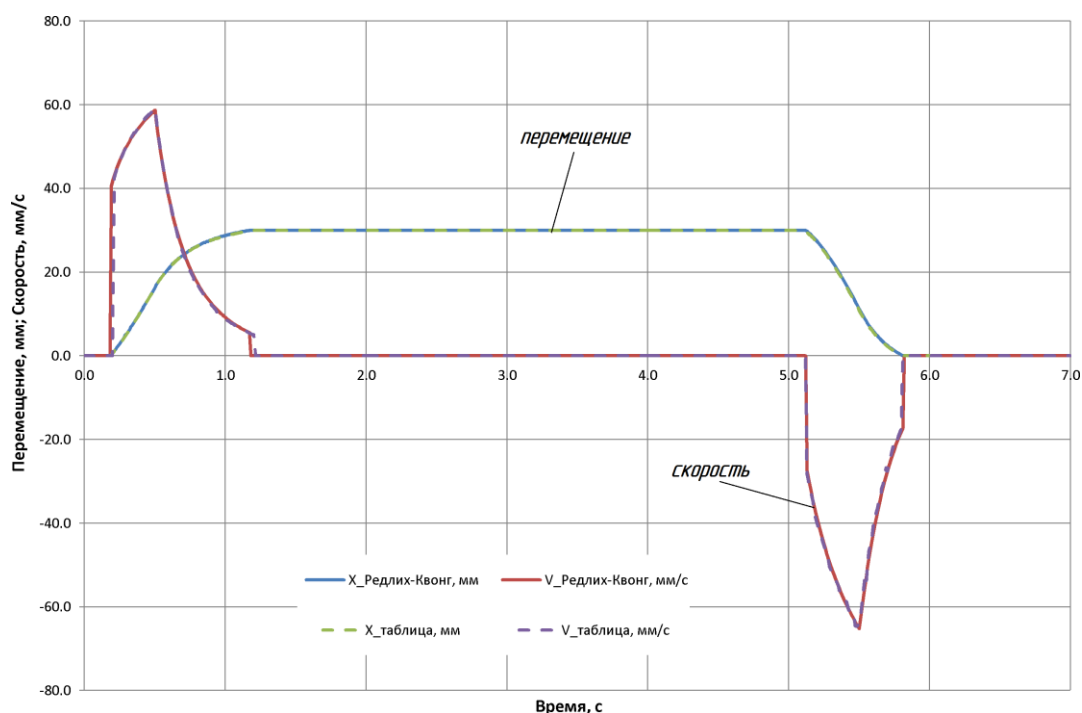


Рис. 6. Переходный процесс в механической подсистеме пневмопривода

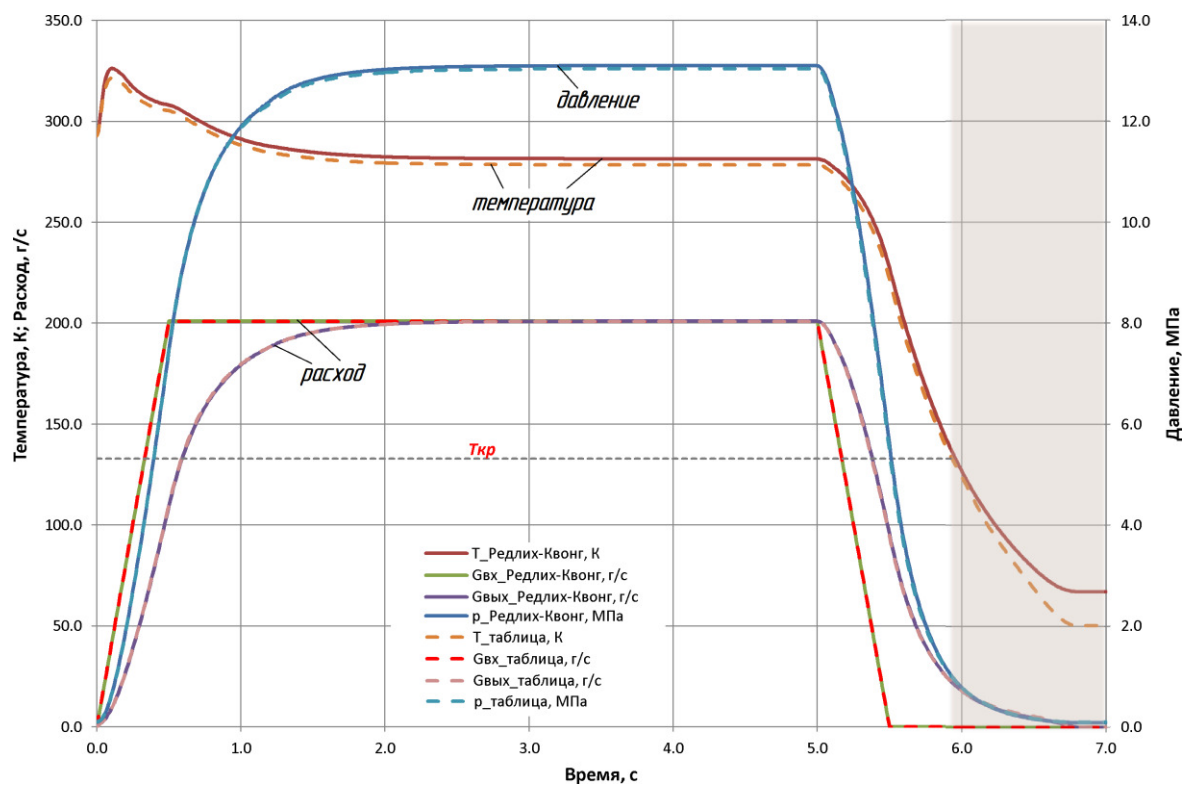


Рис. 7. Переходный процесс в термодинамической подсистеме пневмопривода

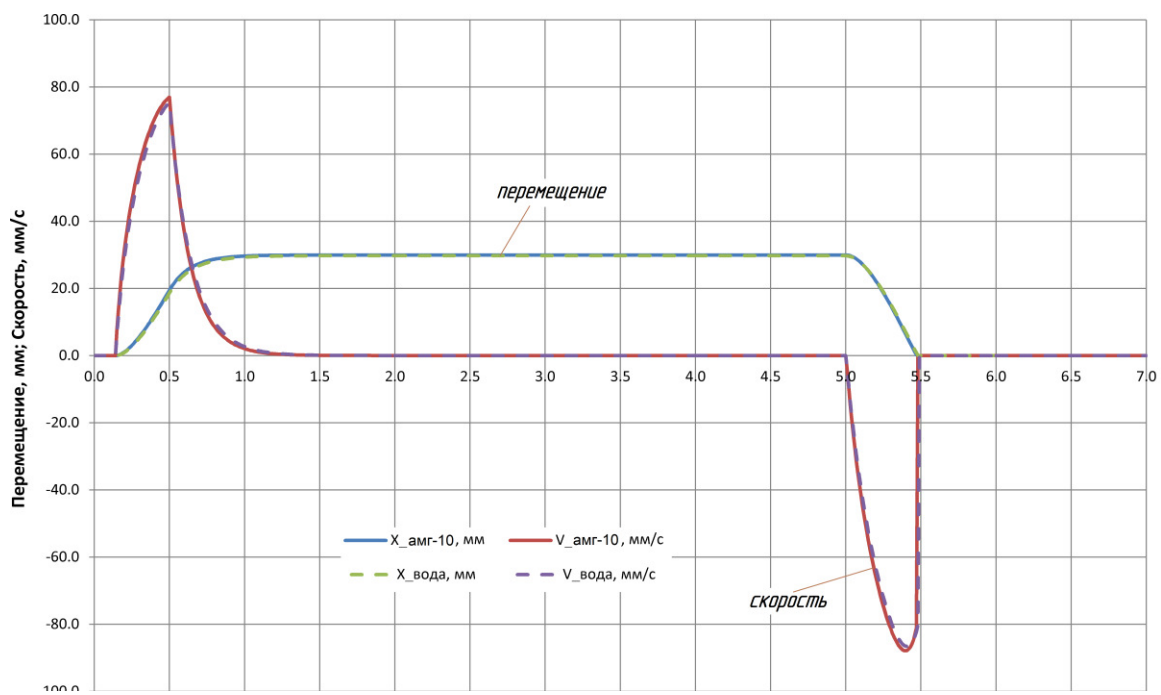


Рис. 8. Переходный процесс в механической подсистеме гидропривода

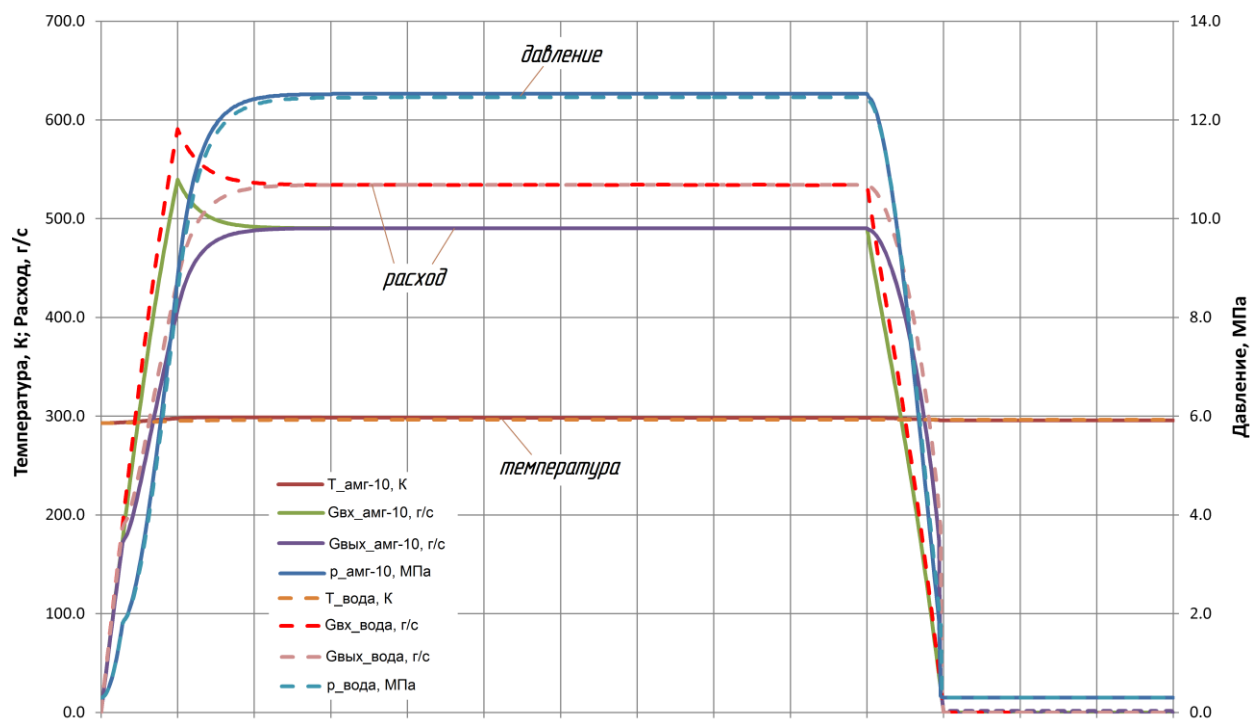


Рис. 9. Переходный процесс в гидравлической подсистеме гидропривода. Давления, расходы, температуры

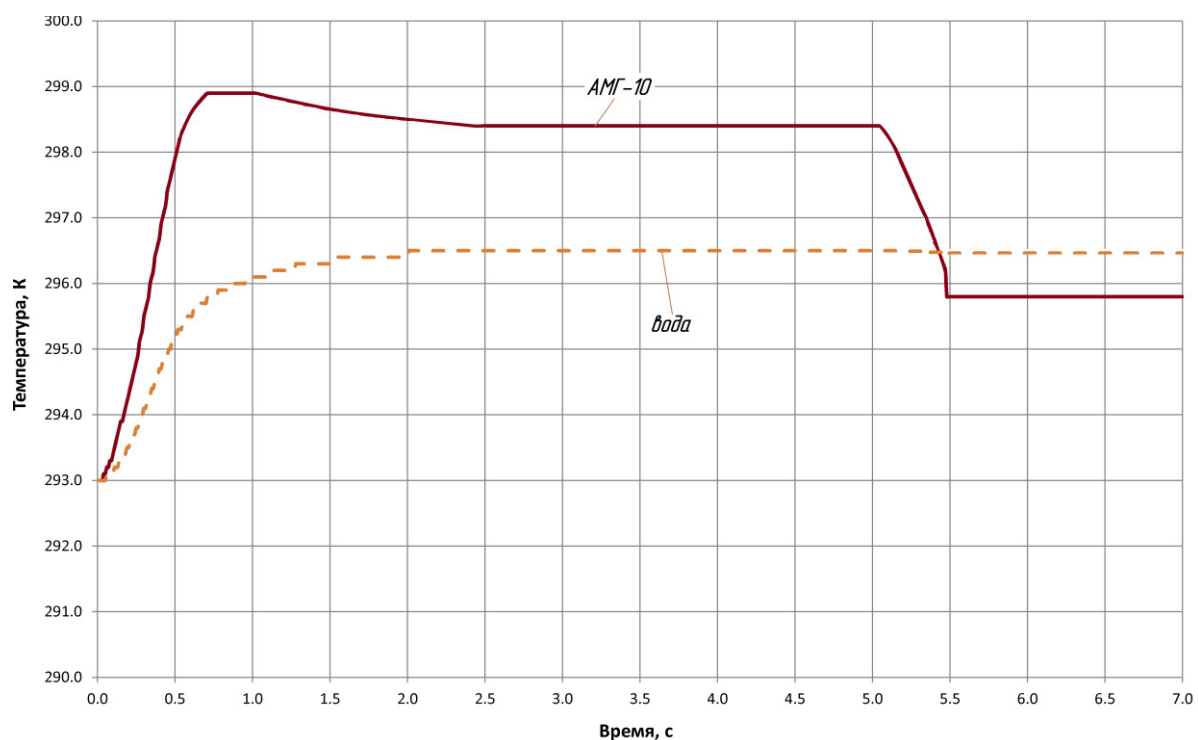


Рис.10. Переходный процесс в гидравлической подсистеме гидропривода. Температуры

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.

Список литературы

1. Мамонтов М.А. Основы термодинамики тела переменной массы. Тула: Приокское книжное издательство, 1970. 87 с.
2. Попов Д.Н., Ермаков С.А., Лобода И.Н., Фомичев В.М., Шумилов И.С. Инженерные исследования гидроприводов летательных аппаратов. Москва: «Машиностроение», 1978. 142 с.
3. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М.: Машиностроение, 1982. 240 с.