

На правах рукописи

**УДК 621.5**

Атамасов Никита Владимирович

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА  
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АГРЕГАТАХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ РЕАЛЬНОГО ГАЗА**

Специальность 05.04.06 – Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре вакуумной и компрессорной техники в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (национальном исследовательском университете)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

|                        |                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Научный руководитель:  | доктор технических наук, профессор<br>МГТУ им. Н.Э. Баумана<br><b>Чернышев Андрей Владимирович</b>                                                                                                                                                         |
| Официальные оппоненты: | доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Криогенная техника института холода и биотехнологий университета ИТМО<br><b>Прилуцкий Игорь Кирович</b>                                                                                              |
| Ведущее предприятие:   | кандидат технических наук, инженер-конструктор 1 кат. АО ОКБ «ГИДРО-ПРЕСС»<br><b>Крутиков Алексей Александрович</b><br>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) |

Защита диссертации состоится «20» марта 2019 г. в 14-30 час. на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Ваш отзыв на автореферат в 2 экз., заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, д.5, стр.1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.16  
кандидат технических наук, доцент

М. А. Колосов

## Общая характеристика работы

### Актуальность исследования

В современном мире агрегаты пневматических систем (АПС) широко применяются во многих отраслях промышленности – атомной, нефтегазовой, лёгком и тяжелом машиностроении, автомобилестроении и ракетно-космической отрасли. Технические и эксплуатационные характеристики АПС напрямую связаны с используемым в работе агрегата рабочим телом, параметры которого изменяются в широких интервалах температуры и давления. Наряду с конструкторскими расчетами, актуальна задача исследования динамических процессов (процессов изменения во времени параметров состояния рабочего тела в полостях АПС), т.к. именно динамический расчет позволяет проанализировать работу агрегата в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Существующие и применяемые в подавляющем большинстве случаев методы расчета динамических процессов в АПС основываются на допущении об идеальности газа (использовании уравнения состояния Менделеева-Клапейрона), отсутствии теплообмена и постоянности температуры рабочего тела, что приводит к погрешности в расчетах от 10 до 40 % [Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин]. Кроме этого, на точность расчетов динамических процессов АПС значительное влияние оказывает выбор коэффициентов расхода  $\mu$ , теплоотдачи  $\alpha$  и сжимаемости  $Z$ . Неверный выбор этих коэффициентов может вносить погрешность в результаты расчета до 40 % [Дмитриев В.Н. Основы пневмоавтоматики]. Безусловно, для уже известных процессов и типовых изделий эти коэффициенты определены довольно точно, но их использование при разработке инновационных устройств крайне неоднозначно. Существуют такие АПС, для которых значения давлений рабочего тела в полостях могут отличаться на порядок (давление на входе – 30 МПа, а на выходе – 1 МПа), что делает невозможным использование для динамических расчетов допущения об идеальности газа для всего агрегата в целом.

Таким образом, существует необходимость учитывать свойства реального газа, отказываясь от поправочных коэффициентов и допущения об идеальности газа. Наиболее точный метод учёта свойств реального газа на настоящий момент основывается на использовании уравнения состояния (УС) рабочего тела с вириальными коэффициентами. Однако применение этого метода затруднительно и зачастую нерационально, поскольку вириальные коэффициенты представляют собой большой массив табличных данных, зависящих от типа газа и его температуры.

На начало XX века было известно более 100 УС реального газа, но в современных исследованиях упоминаются и применяются на практике не более 10. При этом отсутствуют численные критерии и рекомендации по выбору УС, описывающего параметры реального газа в динамическом процессе, поэтому, основываясь на качественной оценке применимости УС, данной различными авторами, были выбраны следующие УС рабочего тела  $f(p, v, T)$  для проведения исследования:

$$pv = RT$$

Менделеева-Клапейрона

|                                                                             |                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| $p(v - b) = RT$                                                             | Дюпре-Абея                              |
| $\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$                                | Ван-дер-Ваальса                         |
| $p e^{\frac{a}{vRT}}(v - b) = RT$                                           | Дитеричи                                |
| $\left(p + \frac{a}{\sqrt{T}v(v + b)}\right)(v - b) = RT$                   | Редлиха-Квонга                          |
| $Pv = ZRT$                                                                  | УС, учитывающее фактора сжимаемости $Z$ |
| $P = \frac{RT}{v^2} \left(1 - \frac{c}{T^3v}\right)(v + B) - \frac{A}{v^2}$ | Битти-Бриджмана                         |

Вне зависимости от используемого в расчетах УС рабочего тела на сегодняшний день принято описывать рабочие процессы в АПС в приближении сосредоточенных или распределенных термодинамических параметров состояния. Поскольку получаемые при построении математических моделей (ММ) АПС системы уравнений в большинстве случаев не имеют аналитического решения, то необходимо использовать численные методы исследования. ММ АПС в приближении сосредоточенных параметров различаются математическим описанием, методом решения систем дифференциальных уравнений, уровнем упрощения объекта. Такие модели разрабатываются как в специализированном программном обеспечении, типа AmeSim, так и в расчетных программах на различных языках программирования высокого уровня – C++, Delphi, Java, Python и т.д. Численное решение ММ АПС в приближении распределённых параметров разрабатывается в специализированном прикладном программном обеспечении. К особенностям этого подхода можно отнести закрытость программного кода, что не позволяет однозначно сказать, какой математический аппарат был использован для решения задачи.

Экспериментальные исследования в рассматриваемой предметной области проводятся в первую очередь для проверки изделий (АПС), а также для построения, уточнения и верификации разработанных математических моделей (ММ).

Обзор состояния исследуемой предметной области показал:

- существует необходимость учёта реальных свойств газа при проведении расчетов динамических процессов АПС;
- отсутствие общепринятого подхода по учёту свойств реального газа при построении математических моделей динамических процессов в АПС;
- отсутствие каких-либо численных критериев по выбору УС для моделирования динамических процессов в АПС.

Объектом исследования являются агрегаты пневматических систем.

Предметом исследования являются рабочие процессы, протекающие в агрегатах пневматических систем и определяющие технические и эксплуатационные характеристики.

Целью работы является:

Разработка математической модели и метода расчета динамических процессов в агрегатах пневматических систем с учетом свойств реального газа.

#### Задачи исследования:

1. Разработка ММ рабочих процессов в АПС на основе УС Менделеева-Клапейрона (Идеального газа); Дюпре-Абея; Ван-дер-Ваальса; Оригинала уравнения Редлиха-Квонга; Дитеричи; УС с коэффициентом сжимаемости  $Z$ ; Битти-Бриджмена и получение рекомендаций по критериям применения этих моделей.
2. Разработка метода расчета динамических процессов в агрегатах пневматических систем с учётом свойств реального газа и проведение вычислительного эксперимента. Анализ полученных результатов.
3. Разработка экспериментального стенда и методики проведения исследования динамических процессов в АПС. Проведение экспериментальных исследований.
4. Сопоставление результатов расчетно-теоретических и экспериментальных исследований динамических процессов в АПС. Верификация математической модели динамических процессов в агрегатах пневматических систем.
5. Реализация разработанного метода расчета и математической модели динамических процессов агрегатов пневматических систем на этапе проектирования, совершенствования или исследования агрегата пневматических систем. Внедрение результатов диссертации.

#### Научная новизна

1. Впервые в приложении к АПС разработан метод расчета динамических процессов, учитывающий свойства реального газа, отличающийся возможностью использования различных уравнений состояния рабочего тела в процессе расчета и выбором для расчета наиболее подходящего по точности результата уравнения состояния рабочего тела.
2. Впервые предложены критерии по выбору уравнений состояния рабочего тела для расчета динамических процессов в АПС на основе безразмерных критериев (безразмерных давлений  $P_6 \leq 7$ , безразмерных температур  $2.03 \leq T_6 \leq 2.29$  и чисел Маха  $M \leq 1$ ). Полученные рекомендации подтверждены результатами проведенных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований.
3. Созданы математическая модель и метод расчета динамических процессов в АПС, позволяющие повысить точность исследования рабочих процессов подобных агрегатов (при сопоставлении результатов расчета с экспериментальными данными отклонения по значениям давления не превышали 12%, а по температуре – 14%).

#### Практическая ценность

1. Математическая модель, разработанный метод расчета и предложенные критерии выбора уравнений состояния могут использоваться с целью решения задач создания новых и совершенствования действующих машин, аппаратов.
2. Математические модели и разработанные метод и программы расчета использованы на предприятии ПАО РКК «Энергия», г. Королев, в Инжиниринговом дивизионе ГК «НЕОЛАНТ», г. Москва и внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва.

3. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета математической модели динамических процессов в агрегатах пневматических систем с учётом свойств реального газа» № 2018616191.

Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается применением сертифицированных средств измерения при проведении экспериментальных исследований и проверкой эксперимента на воспроизводимость. Достоверность результатов расчетно-теоретических исследований подтверждена результатами собственных экспериментальных исследований и результатами испытаний, приведенными в научно-технической литературе.

#### Положения, выносимые на защиту

Математическая модель и метод расчета динамических процессов в агрегатах пневматических систем с учётом свойств реального газа. Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований рабочих процессов в АПС.

#### Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

1. VI Петербургский международный газовый форум (Санкт-Петербург, 2016);
2. Практическая конференция по вопросам реализации научных разработок (Москва, 2016);
3. Десятая Всероссийская молодёжная научно-техническая конференция «МОЛОДЁЖЬ. ТЕХНИКА. КОСМОС», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (Санкт-Петербург, 2018);
4. III Межотраслевой информационно-технологический форум «МНОГОМЕРНАЯ РОССИЯ» (Москва, 2018).

Личный вклад автора заключается в разработке метода расчета и математической модели рабочих процессов в АПС с учётом свойств реального газа, проведении расчетно-теоретических исследований рабочих процессов в АПС, разработке методики проведения эксперимента и проведении экспериментальных исследований динамических процессов в АПС, разработке программ расчета динамических процессов в АПС.

#### Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 10 научных работ, из них 4 работы в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, общим объемом 1.93 п. л.

#### Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 106 страницах текста, включая 35 иллюстраций и 9 таблиц. Библиография насчитывает 136 наименований.

## Содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследуемого вопроса, сформулирована научная проблема, определены объект и предмет исследования.

В первой главе приведены общие сведения о состоянии вопроса исследования динамических процессов в агрегатах пневматических систем. Рассмотрены методы расчета динамических процессов в АПС и существующие подходы к построению математических моделей этих процессов. Обозначены проблемы, возникающие при построении математических моделей динамических процессов в АПС, связанные с учётом свойств рабочего тела как реального газа. Показано, что расчет динамических процессов в агрегатах пневматических систем на основании допущений об идеальности газа вносит существенную (до 40-50%) ошибку в результаты этого расчета. Такая ошибка приводит к значительному снижению точности и достоверности результатов расчетно-теоретических исследований или обесценивает их. Кроме того, эта ошибка влияет на определяющие параметры АПС – надёжность и безопасность эксплуатации.

Существующие методы расчета и математические модели динамических процессов в АПС не позволяют в полном объёме дать описание динамических процессов в АПС в широком диапазоне рабочих давлений и однозначно определить рациональный способ описания поведения реального газа при работе АПС. Проанализированы существующие УС рабочего тела и выбраны УС для проведения исследования: Менделеева-Клапейрона (Идеального газа); Дюпре-Абея; Ван-дер-Ваальса; Оригинал уравнения Редлиха-Квонга; Дитеричи; УС, учитывающее фактор сжимаемости; Битти-Бриджмена.

В конце первой главы сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели динамических процессов в АПС и метода их исследования. Для построения расчетной схемы АПС применяется подход, при котором АПС представляется как совокупность взаимодействующих типовых элементов – проточных полостей, представляющих собой открытые термодинамические системы (ОТС), связанные через условные дроссели и взаимодействующие между собой и окружающей средой (ОС), и механических систем, математические модели которых описываются уравнениями на основе второго закона Ньютона (Рисунок 1).

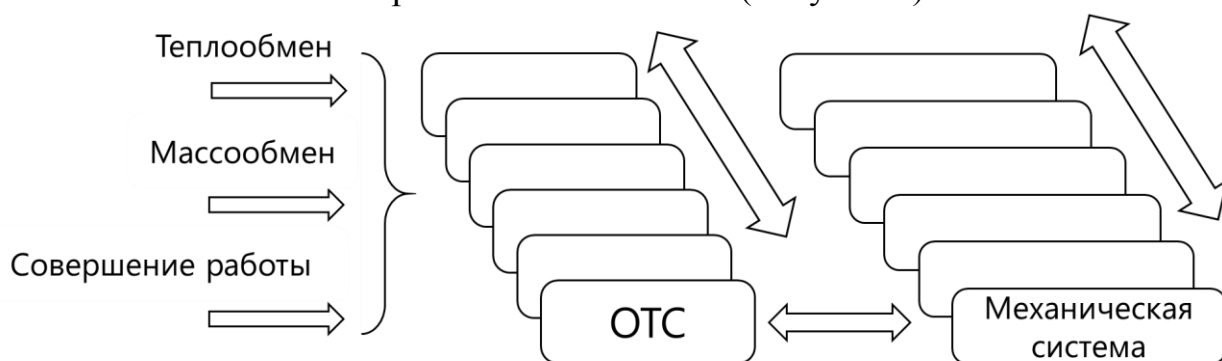


Рисунок 1. АПС как совокупность взаимодействующих типовых элементов: проточных полостей и механических систем.

Целесообразной задачей является построение и обработка математической модели динамических процессов на наиболее типовом элементе АПС – полости переменного объёма, находящейся под полным комплексом внешних воздействий и представляющей собой открытую термодинамическую систему, расчетная схема которой представлена на рисунке 2.

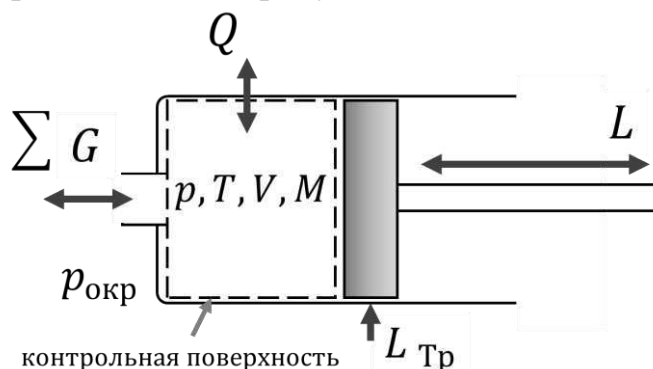


Рисунок 2. Расчетная схема типового элемента АПС – полости переменного объёма. ( $G$  – массообмен между ОТС и ОС,  $Q$  – тепловое взаимодействие между ОТС и ОС,  $L$  – работа термдеформации ОТС,  $L_{тр}$  – работа трения)

При построении математической модели проточной полости переменного объёма приняты следующие основные допущения:

- изменение кинетической и потенциальной энергии рабочего тела мало по сравнению с внутренней энергией (можно пренебречь при преобразовании уравнения баланса энергии);
- параметры рабочего тела в пределах полости не зависят от координаты и изменяются только во времени (сосредоточенные параметры);
- рабочее тело – газ, фазовые переходы в рабочем теле не учитываются;
- изменение состояния рабочего тела квазистатическое;
- параметры рабочего тела связаны уравнением состояния;
- коэффициент расхода  $\mu$  равен 1.

Начальные условия: давление, температура и объём полости в начальный момент времени  $t_0$ , значения скоростей изменения давления, температуры и внутренней энергии ( $dP/dt$ ;  $dT/dt$ ;  $du/dt$ ) в начальный момент времени  $t_0$ .

Граничные условия: давление и температура окружающей среды ( $p_{окр}$ ;  $T_{окр}$ ), геометрические параметры и температура исследуемого АПС ( $V$ ;  $f_{экв}$ ;  $T_{стенки}$ ), параметры рабочего тела ( $p_{кр}$ ;  $T_{кр}$ ;  $v_{кр}$ ;  $k$ ).

Основные расчетные зависимости математической модели построены на основании закона сохранения энергии ОТС, уравнения для внутренней энергии рабочего тела, уравнения расхода для описания массообмена между ОТС и ОС. Выходными параметрами являются скорости изменения давления и температуры. Для каждого уравнения состояния рабочего тела получены зависимости для определения внутренней энергии  $u$  и значения частных производных  $\left(\frac{\partial u}{\partial \rho}\right)_p$ ,  $\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_\rho$ ,  $\left(\frac{\partial u}{\partial \rho}\right)_T$ ,  $\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_\rho$ . Параметры состояния рабочего тела описываются



выбранными для исследования УС. Внутренняя энергия рабочего тела определяется по аналитической зависимости, полученной для каждого исследуемого УС:

$$u = \begin{cases} \frac{RT}{k-1}, \\ \frac{RT}{k-1}, \\ \frac{RT}{k-1} - a\rho, \\ \frac{RT}{k-1} + 1,5 \frac{a}{b\sqrt{T}} \ln\left(\frac{v}{v_0} \frac{v_0 + b}{v + b}\right), \\ \frac{RT}{k-1} - \frac{a}{b} e^{-a/bRT} \left\{ Ei\left(\frac{a}{bRT}\right) - Ei\left(\frac{a}{bRT} \left[1 - \frac{b}{v}\right]\right) \right\}, \\ \frac{RT}{k-1} + \frac{1.567 \cdot RT^2 \cdot \ln(v)}{(0.4273 \cdot T + 1)^2}, \\ \frac{RT}{k-1} + \ln(v) \cdot R(1 - T) - \left(\frac{b}{2v^2} - \frac{1}{v}\right) B_0 RT + \frac{1}{v} \left(A_0 + B_0 R - \frac{A_0 a + B_0 R b}{2v}\right) + \\ + \frac{(3vB_0 c + 6v^2 c - 2B_0 b c)R}{6T^2 v^3} + \frac{(6v^2 + 3vB_0 - 2B_0 b)Rc}{3T^3 v^3}. \end{cases}$$

Из дифференциального уравнения первого закона термодинамики для ОТС получена зависимость для определения скорости изменения внутренней энергии:

$$du/dt = \frac{1}{\rho v} \left( \frac{dQ}{dt} - p \frac{dv}{dt} + (i_{\text{пр}} - u)G_{\text{пр}} - (i_y + u)G_y \right).$$

Изменение плотности рабочего тела зависит от изменения объема полости и суммарного расхода:

$$d\rho/dt = \frac{1}{v} \left( \sum G - \rho \frac{dv}{dt} \right).$$

Представляя внутреннюю энергию рабочего тела в форме полного дифференциала от двух параметров состояния рабочего тела (плотности  $\rho$  и давления  $p$  или плотности  $\rho$  и температуры  $T$ ) получены зависимости, описывающие динамические процессы в полости – скорость изменения давления  $p$  и скорость изменения температуры  $T$ .

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\left[ \frac{du}{dt} - \left( \frac{\partial u}{\partial \rho} \right)_p \frac{d\rho}{dt} \right]}{\left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_\rho} \quad \frac{dT}{dt} = \frac{\left[ \frac{du}{dt} - \left( \frac{\partial u}{\partial \rho} \right)_T \frac{d\rho}{dt} \right]}{\left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_\rho}$$

Скорость газа в уравнении расхода ( $G = \mu f_{\text{экв}} \omega \rho$ ) определяется в зависимости от режима течения газа и равна местной скорости звука для критического режима течения ( $\omega_{\text{зв}} = \sqrt{-v^2 \left[ \frac{dp}{dv} \right]}$ ), а для докритического режима течения скорость газа определяется по зависимости, справедливость применения которой для каждого исследуемого УС обоснована в работе [Рязанов А.А. Краны шаровые для пневмогидравлических систем. Основы проектирования]:

$$\omega_{\text{газа}} = \sqrt{\frac{2K_u}{K_u-1} p v \left[ 1 - \left( \frac{p_{\text{окр}}}{p} \right)^{\frac{K_u-1}{K_u}} \right]}.$$

Теплообмен и изменение объёма полости учитываются в уравнениях  $\frac{dQ}{dt} = f(a_1; a_2; \dots a_n)$  и  $\frac{dV}{dt} = f(b_1; b_2; \dots b_n)$ . Параметры  $a_i$  и  $b_i$  и вид функций, описывающих теплообмен и изменение объёма полости, зависят от конкретного объекта исследования.

Условия окончания счета: прекращение процесса в полостях АПС или истечение заданного времени процесса  $t_{\text{расч}}$ .

Метод расчета системы уравнений математической модели, алгоритм которого представлен на рисунке 3, заключается в последовательном определении входных параметров исследуемого АПС, начальных и граничных условий, скорости газа и местной скорости звука, режима течения, расхода рабочего тела во всех каналах АПС, теплообмена, скоростей изменения температуры и давления и выходных параметров исследуемого АПС во времени. Для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) выбран метод Эйлера.

Для верификации построенной математической модели и метода её расчета использованы опубликованные результаты экспериментальных исследований Калифорнийского Политехнического Университета (КПУ) [США, 2007] для наиболее простого элемента АПС – полости постоянного объёма, из которой происходит истечение газа в ОС через отверстие диаметром  $d$  (1; 2.1; 2.7 мм) при начальном давлении  $p$  790 кПа.

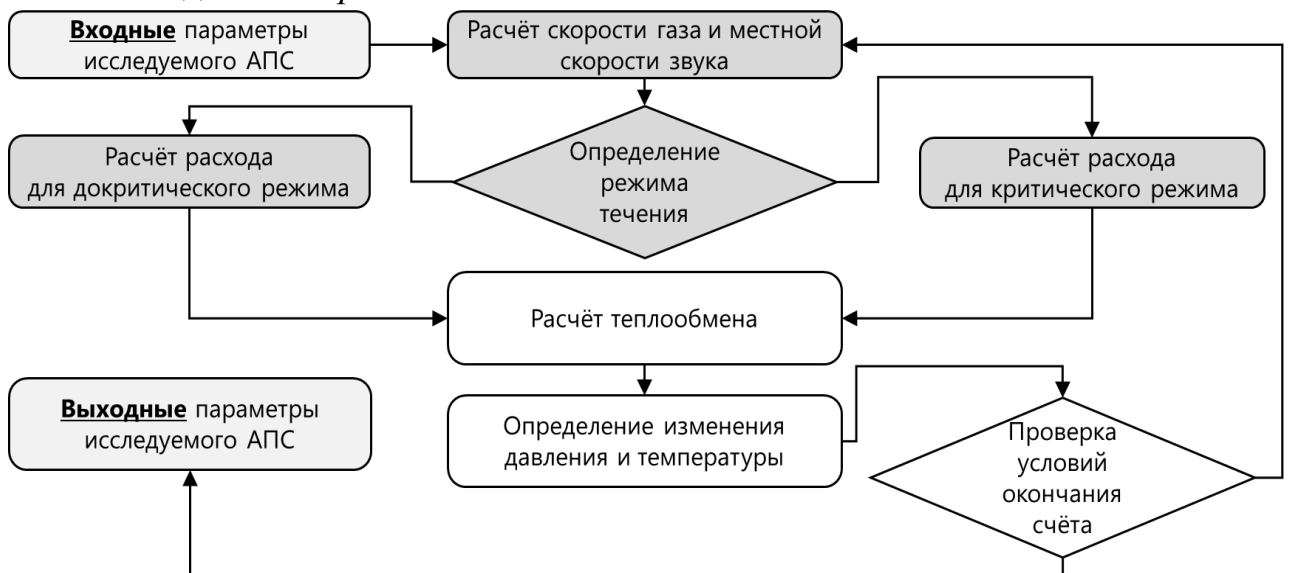


Рисунок 3. Алгоритм расчета по математической модели рабочих процессов АПС.

Для проведения численного эксперимента разработана программа на языке G в среде разработки LabView фирмы National Instruments. По полученным в программе табличным значениям давления и температуры выполнена оценка отклонения расчетных значений от экспериментальных значений. Дополнительно выполнена проверка корректности получаемых отклонений путём сопоставления результатов расчета по различным УС рабочего тела в разработанной программе

расчета с результатами расчета в программном комплексе AmeSim, в котором доступно использование УС Менделеева-Клапейрона, Ван-дер-Ваальса и Редлиха-Квонга. Как видно из данных, приведенных на рисунке 4, значения минимальных и максимальных отклонений по давлению по каждому из УС имеют сопоставимые значения и отличаются не более чем на 2%.

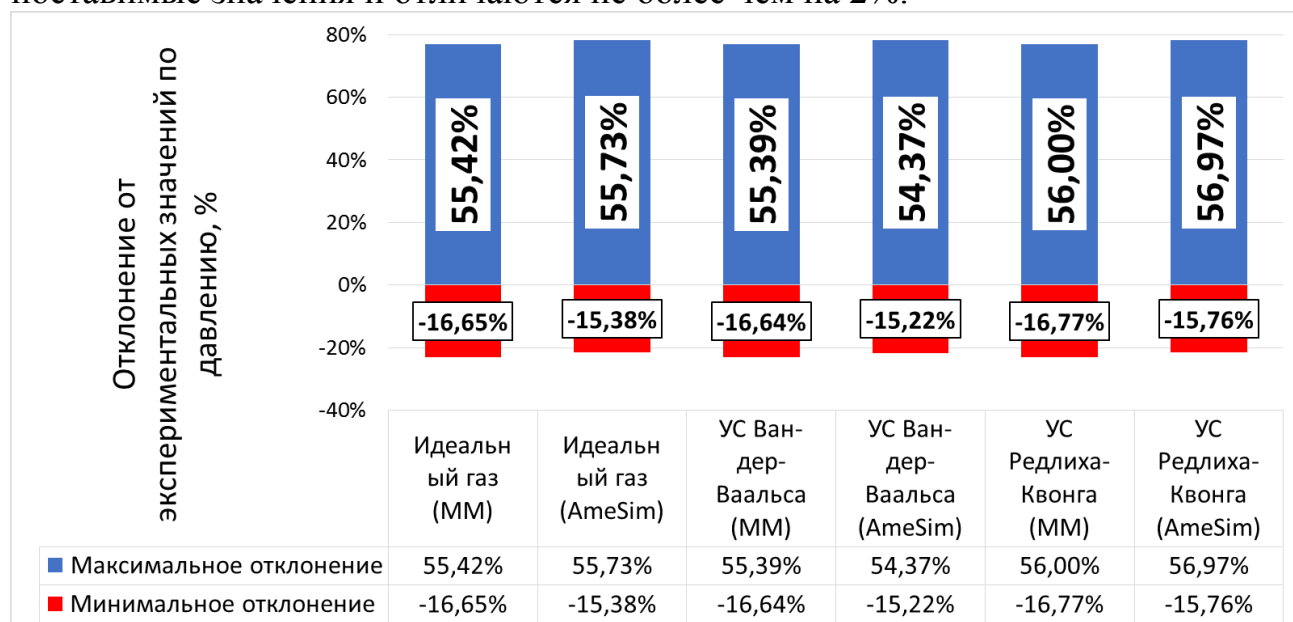


Рисунок 4. Верхний и нижний пределы отклонений по значениям давления при расчетах по различным математическим моделям от экспериментальных значений КПУ (Пример для диаметра отверстия, через которое происходит истечение, равного 2.1 мм).

По разработанной математической модели проводятся расчетно-теоретические исследования для выбора наиболее подходящего по точности расчета УС рабочего тела. На рисунке 5 приведен пример отклонений от экспериментальных значений  $\delta_o$  для расчета по отдельным, наиболее точным УС рабочего тела для диаметра 2.1 мм.

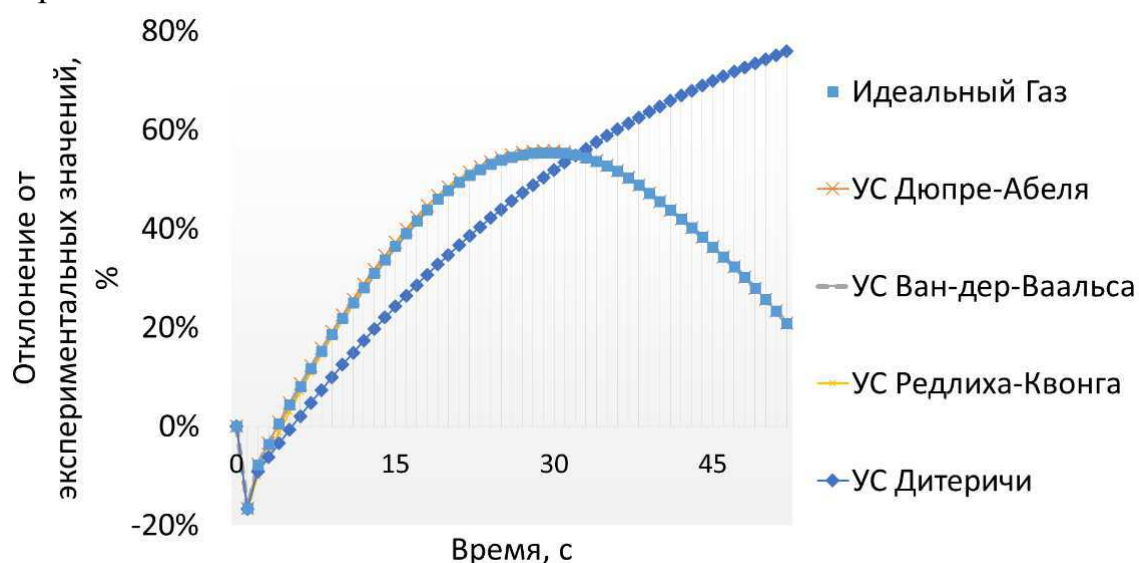


Рисунок 5. Отклонения  $\delta_o$  расчетных значений давления от экспериментальных значений КПУ для диаметра 2.1 мм.

По результатам расчетно-теоретических исследований сделан вывод, что ни одно из УС рабочего тела в отдельности не позволяет получить отклонения  $\delta_o$  менее 20%. На основании этого вывода формулируется обратная задача математического моделирования, которая заключается в обоснованном выборе комбинации математических моделей динамических процессов в АПС.

Метод расчета рабочих процессов агрегатов пневматических систем с использованием параметров реальных газов состоит из двух этапов – решения обратной и прямой задач математического моделирования. Этап решения обратной задачи включает в себя расчет выходного параметра  $X$  ( $p$  или  $T$ ) для каждого УС и выбор значения выходного параметра с минимальным отклонением от экспериментального значения параметра для использования в расчете. При этом фиксируется индекс  $i$  (выбранное УС) математической модели, наиболее подходящей для данного шага расчета. Полученный массив данных анализируется и формируются критерии применения УС рабочего тела с учётом свойств реального газа. Прямая задача заключается в расчете рабочих процессов в АПС по математической модели с учётом критериев, полученных на этапе решения обратной задачи.

В результате решения обратной задачи, включающей все выбранные для исследования УС рабочего тела, с использованием результатов экспериментальных исследований КПУ сформированы критерии выбора УС рабочего тела с учётом свойств реального газа (Таблица 1).

Таблица 1.

Рекомендации по выбору УС для расчетов по давлению и температуре для диапазона 100..790 кПа, полученные на основе исследований КПУ.

| Расчет         | $d$ , мм  | Диапазон давлений $p$ , кПа | Рекомендуемое уравнение состояния рабочего тела |
|----------------|-----------|-----------------------------|-------------------------------------------------|
| По давлению    | 1         | 100..790                    | Редлиха-Квонга                                  |
|                | 2.1       | 100..200                    | Дюпре-Абея                                      |
|                | 2.1       | 200..500                    | Редлиха-Квонга                                  |
|                | 2.1       | 500..790                    | Редлиха-Квонга                                  |
|                | 2.7       | 100..550                    | Дитеричи                                        |
|                | 2.7       | 550..790                    | Редлиха-Квонга                                  |
| По температуре | 1;2.1;2.7 | 100..220                    | Дитеричи                                        |
|                |           | 220..790                    | Редлиха-Квонга                                  |

При решении прямой задачи математического моделирования отклонение  $\delta_o$  по давлению составило менее 10%, а по температуре – менее 12%. На рисунке 6 приведены кривая изменения давления и значения отклонений по давлению и температуре для диаметра отверстия, через которое происходит истечение, 2.1 мм.

В конце второй главы сформулирована задача по переходу к безразмерным критериям определения подходящих для расчета динамических процессов в АПС уравнений рабочего тела и обоснована необходимость проведения экспериментальных исследований для высоких давлений (до 30 МПа) для формирования более общих критериев выбора.

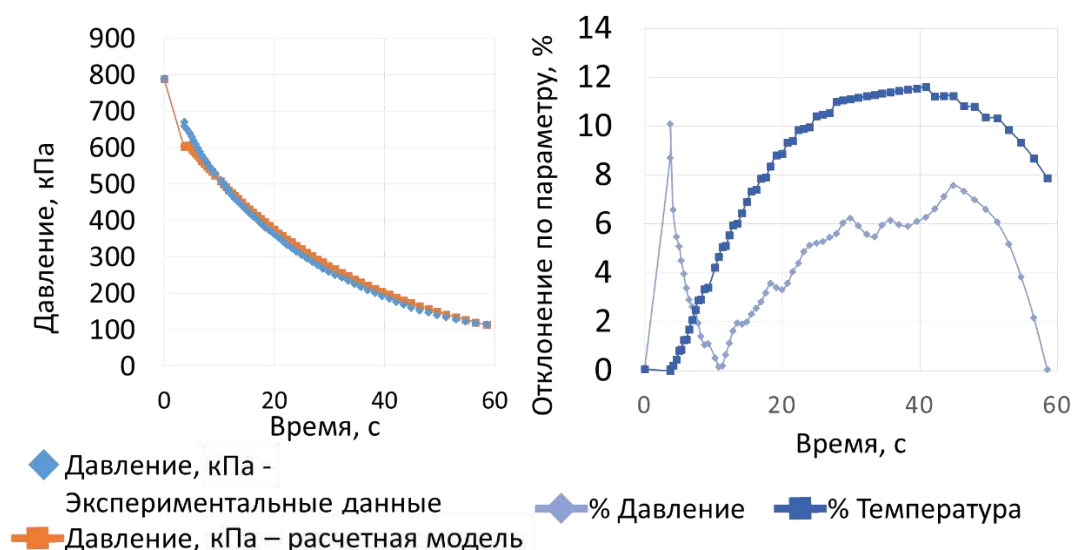


Рисунок 6. Изменение давления (слева) и отклонения  $\delta_o$  по давлению и температуре (справа) для диаметра 2.1 мм.

Третья глава посвящена проведению расчетно-теоретических и экспериментальных исследований динамических процессов в АПС с учетом свойств реального газа.

Метод расчета динамических процессов в АПС, представленный в Главе 2, дополняется введением безразмерных критериев. Аналогичный подход описан в работе исследователей Ольборгского университета [Дания, 2010].

$$P_6 = \frac{P}{P_{кр}} \quad T_6 = \frac{T}{T_{кр}} \quad M = \frac{\omega_{газа}}{\omega_{зв}}$$

Для проведения исследования по уточненной методике математического моделирования динамических процессов в АПС проводятся экспериментальные исследования. Разработанные экспериментальные стенды позволяют проводить исследования процессов истечения из полости постоянного объема в ОС и процессов истечения из полости одного объема в полость другого объема. Экспериментальные исследования проведены в ПАО «РКК «Энергия». Схемы стендов представлены на рисунке 7. Экспериментальные исследования проводились для газов азот и воздух при различных диаметрах дроссельной шайбы ДРН2. Ряд значений диаметров дроссельной шайбы составляет: 0.8 мм; 1.0 мм; 1.5 мм; 2.0 мм. В каждом случае значения давлений в ёмкости РСВ1 равнялось 30 МПа для воздуха и 25 МПа для азота. Давление в ёмкости РСВ2 равнялось атмосферному.

Результаты экспериментальных исследований были обработаны и проверены на воспроизводимость по критерию Кохрена. Максимальная величина относительной погрешности не превысила 5% для всех наблюдений. Расчетное значение коэффициента Кохрена не превышало 0.66 и лежало в диапазоне от 0.58 до 0.63, поэтому измерения в эксперименте считаются воспроизводимыми.

В результате решения обратной задачи получены рекомендации по выбору УС рабочего тела, учитывающих свойства реального газа, для расчета динамических процессов в АПС. Рекомендации по безразмерным критериям для расчетов изменения давления представлены в Таблице 2, а для расчета изменения температуры в Таблице 3.

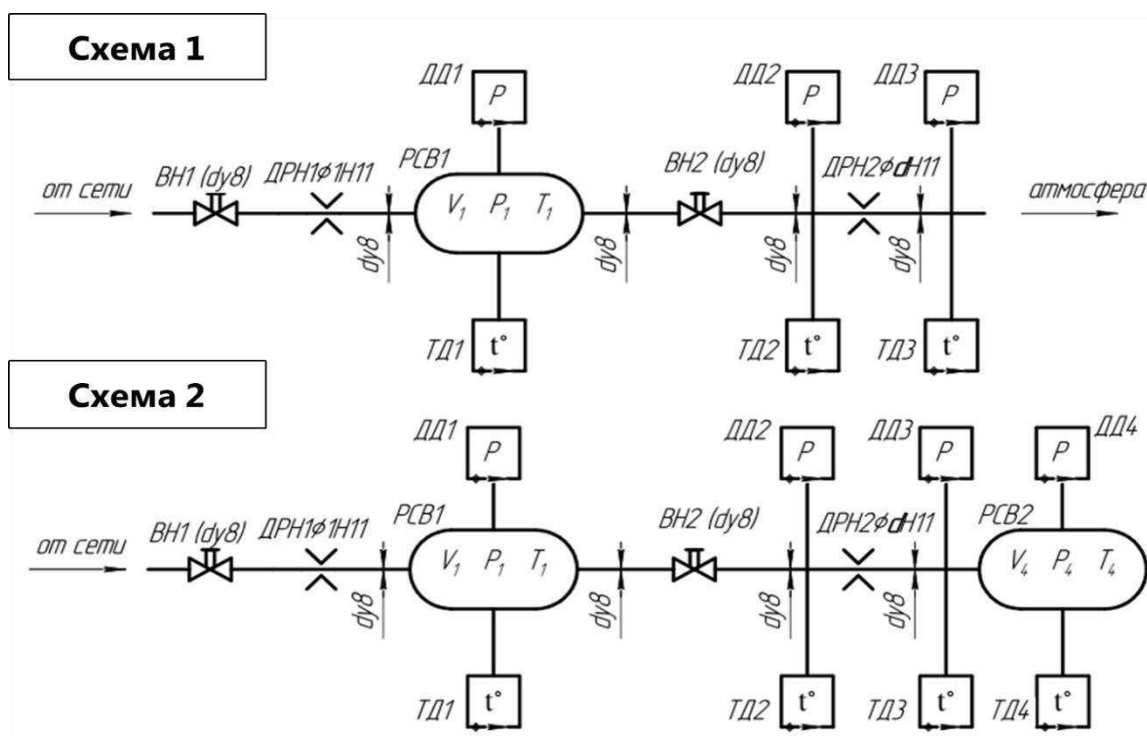


Рисунок 7. Схемы экспериментальных стендов. (ДРН – дроссельная шайба, ДД – датчик давления, ТД – датчик температуры, РСВ – ёмкость, ВН – вентиль)

Таблица 2.

Критерии выбора УС для расчета давления.

|                                                  |             |                               |                |
|--------------------------------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|
| Диапазоны безразмерного давления ( $P_6$ ) $M=1$ | 0.0—2.5     | 2.5—4.5                       | 4.5—7.0        |
| Рекомендуемое УС для определения давления        | Дюпре-Абеля | Дюпре-Абеля<br>Редлиха-Квонга | Редлиха-Квонга |
| Диапазоны безразмерного давления ( $P_6$ ) $M<1$ | 0.0—0.04    |                               | 0.04—0.1       |
| Рекомендуемое УС для определения давления        | Дюпре-Абеля |                               | Редлиха-Квонга |

Таблица 3.

Критерии выбора УС для расчета температуры.

|                                              |             |             |
|----------------------------------------------|-------------|-------------|
| Диапазоны безразмерной температуры ( $T_6$ ) | 2.03—2.15   | 2.15—2.29   |
| Рекомендуемое УС для определения давления    | Дюпре-Абеля | Дюпре-Абеля |

При решении прямой задачи математического моделирования по полученным безразмерным критериям отклонения расчетных значений от экспериментальных составляют не более 11% по значениям давления и не более 12% по значениям температуры. Пример результатов математического моделирования по безразмерным критериям для азота по схеме 1 экспериментальной установки представлен на рисунке 8 (для диаметров дроссельной шайбы ДРН2 1 и 1.5 мм).

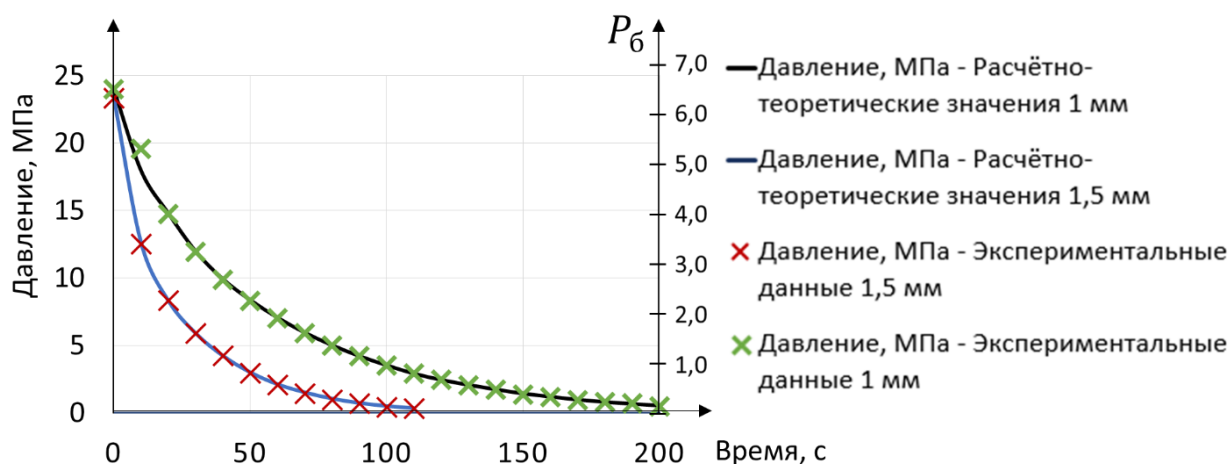


Рисунок 8. Изменение давления – расчетно-теоретические и экспериментальные значения для азота, значения ДРН2 1 и 1.5 мм (Схема 1).

На рисунке 9 представлены отклонения от экспериментальных значений по давлению  $\delta_o$  для расчета, проведенного по разработанной методике, и расчета с использованием допущения об идеальности газа при значении коэффициента расхода  $\mu=0.95$ .

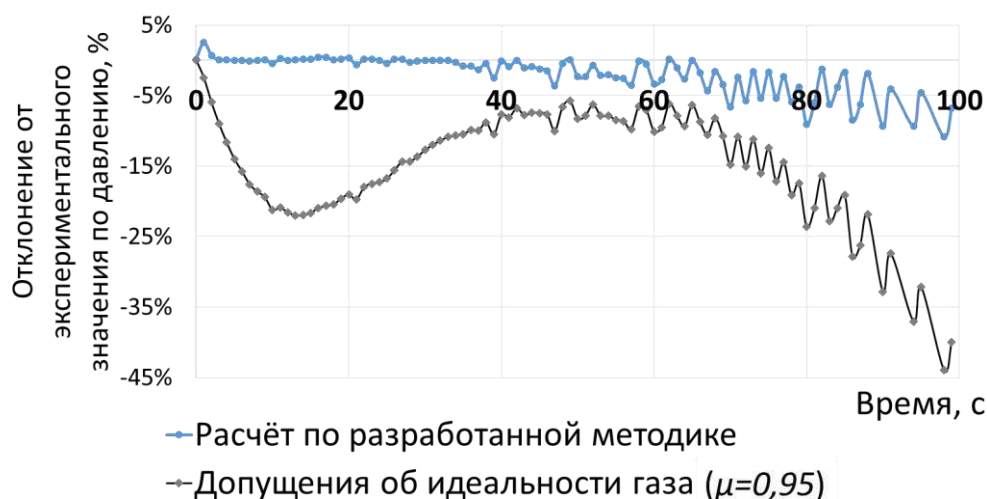


Рисунок 9. Отклонения от экспериментальных значений по давлению  $\delta_o$  при расчете по полученным рекомендациям по применению УС и при расчете с допущением об идеальности газа (при  $\mu=0.95$ ) для азота, значения ДРН2 1.5 мм (Схема 1).

Четвертая глава посвящена реализации разработанного метода расчета и математической модели динамических процессов АПС для задач проектирования, исследования и совершенствования АПС.

Одной из задач реализации результатов диссертации является исследование динамических процессов в обратном клапане (ОК) для проверки штатной работы конструкции изделия на кислороде, воздухе и гелии. Работа выполнена в интересах ПАО «РКК «Энергия». Для её решения было проведено математическое моделирование динамических процессов в ОК при его работе в переходном режиме (входные давления в диапазоне от 2.9 до 24.5 МПа) и выполнено сопоставление результатов, полученных с помощью разработанной программы расчета, с результатами, полученными в процессе проведения экспериментальных

исследований. Синтез расчетной схемы представлен на рисунке 10. В результате расчетно-теоретических и экспериментальных исследований подтверждена работоспособность разработанной ММ ОК и программы его расчета.

Экспериментальные исследования динамических процессов в ОК проводились в составе штатной системы подачи газовой смеси. Программа испытаний включала испытания на двух рабочих средах – воздухе и гелии под давлением 24.5 МПа. По параметрам каждого пункта программы испытаний выполнен расчет динамических процессов в ОК, а именно рассчитаны процессы изменения параметров состояния рабочего тела в каждой полости и перемещение клапана.

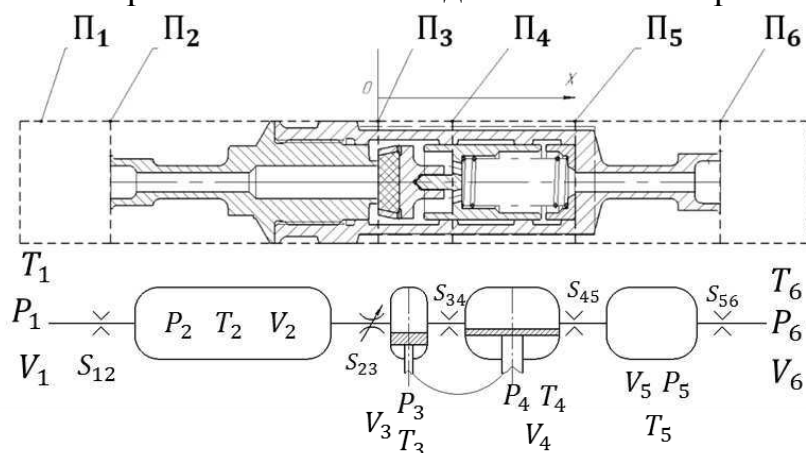


Рисунок 10. Синтез расчетной схемы ОК.  $P_i$  – полости ОК,  $S_{ij}$  – площадь проходного сечения условного дросселя

Для сопоставления экспериментальных и расчетных данных по перемещению клапана использовался метод неразрушающего контроля, основанный на сборе данных с акустических датчиков. В результате анализа собранных данных при испытании на воздухе выявлено преобладание частот звуковых колебаний, вызванных перемещением клапана и ударами о седло, в диапазоне 250-400 Гц ( $f_3$ ). По результатам вычислительного эксперимента частота соударений клапана с седлом составила 293 Гц ( $f_{вз}$ ). Таким образом, средняя экспериментальная частота соударений клапана с седлом составляет 325 Гц. Отклонение расчетного значения частоты колебаний клапана от её среднего экспериментального значения составляет 9.85%, что даёт качественное и количественное совпадение результатов расчета по разработанной математической модели обратного клапана и данных эксперимента.

При испытаниях на гелии акустическими датчиками не зафиксировано периодических звуковых колебаний, что также качественно совпадает с результатами вычислительного эксперимента.

Другой задачей по реализации результатов исследования является внедрение разработанных ММ и метода расчета в специализированный программный комплекс исследования динамических рабочих процессов в регуляторах давления (РД) прямого действия (СКРД), разработанный в МГТУ им. Баумана для задач ПАО «РКК «Энергия». СКРД предназначен для проведения расчетно-теоретических исследований динамических рабочих процессов в РД прямого действия с целью анализа и обобщения полученных результатов для обеспечения безотказности их работы. Особенности режимов работы РД (давление на входе – 30



МПа, а на выходе – 1 МПа) накладывают требования по учёту свойств реальных газов. В результате интеграции разработанной математической модели и метода расчета в СКРД увеличен набор функциональных возможностей программного обеспечения СКРД, исходный вариант которого включал только возможность расчетов, основанных на допущении об идеальности газа.

#### **Основные результаты, выводы и заключение**

1. Разработаны ММ рабочих процессов на основе УС Менделеева-Клапейрона (Идеального газа); Дюпре-Абея; Ван-дер-Ваальса; Оригинал уравнения Редлиха-Квонга; Дитеричи; УС, учитывающее фактор сжимаемости  $Z$ ; Битти-Бриджмена и получены безразмерные критерии выбора УС для моделирования рабочих процессов в АПС и их компонентах для расчетов динамики по давлению для чисел Маха  $M \leq 1$  и безразмерных давлений  $P_6 \leq 7$ , а для расчетов динамики по температуре для безразмерной температуры  $2.03 \leq T_6 \leq 2.29$
  2. Разработан метод расчета динамических процессов в АПС и проведен вычислительный эксперимент. Выполнен анализ полученных результатов, на основе которого сформулирована и решена обратная задача.
  3. Разработан экспериментальный стенд и по методике проведен эксперимент на высоком давлении для двух типов газов для случаев наполнения и опорожнения ёмкости. Максимальная величина относительной погрешности не превысила 5% для всех наблюдений. Подтверждена воспроизводимость результатов по критерию Кохрена (0.58..0.63).
  4. Выполнено сопоставление результатов расчетно-теоретических и экспериментальных исследований. При сопоставлении результатов расчета с экспериментальными данными отклонения по значениям давления не превышали 12%, а по температуре – 14%.
  5. Выполнена реализация результатов работы для задачи исследования динамических процессов в обратном клапане. Получено совпадение с результатами экспериментальных исследований (отклонение по частоте колебаний клапана менее 10%).
  6. Результаты работы интегрированы в специализированный программный комплекс исследования динамических рабочих процессов в регуляторах давления прямого действия (СКРД), применяемый в ПАО «РКК «Энергия», г. Королев, что подтверждено актом о внедрении.
  7. Результаты диссертационной работы внедрены в практику проведения НИОКР в Дивизионе инженерных моделей АО «НЕОЛАНТ», г. Москва, и внедрены в учебный процесс МГТУ им. Н.Э. Баумана, г.Москва, что подтверждено актами о внедрении.
  8. Получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета математической модели динамических процессов в агрегатах пневматических систем с учётом свойств реального газа» № 2018616191.
- Перспективы дальнейшей разработки темы:
- развитие полученных результатов с целью расширения диапазона полученных критериев по применению УС рабочего тела, учитывающих свойства реального

газа, для других типов газов и конфигураций проходного сечения условных дросселей;

- использование результатов исследования для описания динамических процессов в АПС в приближении распределенных термодинамических параметров с учётом их неравномерности внутри полостей АПС.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах**

1. Атамасов Н.В. Разработка математической модели перемешивания жидкости при подготовке пробы для медико-биологических исследований. // Будущее машиностроения России: сб. тр. Шестой всерос. конф. молодых ученых и специалистов, Москва, 25-28 сент. 2013г. М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. С.42-43. (0.18 п.л./0.18 п.л.)
2. Атамасов Н.В., Чернышев А.В. Математическое моделирование рабочих процессов в блоке пробоподготовки. // Медико-технические технологии на страже здоровья «МЕДТЕХ-2014»: сб.тр. 16-й науч.-техн. конф., Греция, о. Кефалония, 21-28 сент. 2014г. М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 36. (0.12 п.л./0.12 п.л.)
3. Атамасов Н.В. К вопросу математического моделирования рабочих процессов в запорно-регулирующей арматуре // ТПА, №5, 2016. С. 36-39 (0.25 п.л./0.25 п.л.)
4. Атамасов Н.В. Учёт свойств реального газа при расчете пневматических систем как способ повышения энергоэффективности // Сборник тезисов практической конференции по вопросам реализации научных разработок, Москва, 2016, С. 12. (0.11 п.л./0.11 п.л.)
5. Чернышев А.В., Атамасов Н.В. Рекомендации по моделированию процессов истечения в пневматических системах с учётом свойств реального газа на основе безразмерных критериев // Компрессорная техника и пневматика. – 2017. – №3. – С. 19-23 (0.31 п.л./0.31 п.л.)
6. Атамасов Н.В. Учет реальных свойств газа в математическом моделировании рабочих процессов компонентов пневматических систем // Тезисы докладов X Общероссийской молодежной научно - технической конференции «Молодежь.Техника. Космос». 2018 . С. 10 (0.04 п.л./0.04 п.л.)
7. Атамасов Н.В. Учет реальных свойств газа в математическом моделировании рабочих процессов компонентов пневматических систем // Сборник статей X Общероссийской молодежной научно - технической конференции «Молодежь.Техника. Космос». 2018 . С. 29-35 (0.44 п.л./0.44 п.л.)
8. Чернышев А.В., Атамасов Н.В., Зеленов М.С. Применение концепции киберфизических систем в проектировании газового оборудования нового поколения. // Компрессорная техника и пневматика. 2018. №2. С. 19–22. (0.28 п.л./0.14 п.л.)
9. Атамасов Н.В. Программа расчета математической модели динамических процессов в агрегатах пневматических систем с учётом свойств реального газа // Официальный бюллетень Федеральной Службы по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). 2018. №6. (0.06 п.л./0.06 п.л.)
10. Обоснование выбора модели рабочего тела при расчете динамических параметров пневмогидравлических систем / Н.В. Атамасов [и др.]. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. №9. С. 56–62. (0.56 п.л./0.28 п.л.)