

КЮРДЖИЕВ
Юрий Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ,
РАЗРАБОТКА И МОДЕРНИЗАЦИЯ
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И АГРЕГАТОВ
С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ КОНДЕНСАТА
РАБОЧЕГО ТЕЛА**

**Специальность 05.04.06 — Вакуумная, компрессорная техника
и пневмосистемы**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва — 2004

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного знамени государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.Ф. Никитин, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: М.И. Киселев, доктор физ.-мат. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана,
В.Н. Сологуб, кандидат технических наук, ФГУП ВНИИСУ г. Москва

Ведущая организация: ФГУП «ЦНИИМАШ»,
г. Королев, МО

Защита диссертации состоится 23 июня 2004 г. в 14 час. 30 мин. на заседании специализированного Совета Д 212.141.16 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д.1, ф-т «Энергомашиностроение»

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ

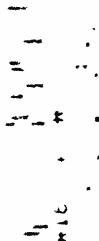
Отзывы в двух экземплярах просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, д.5.

Автореферат разослан «19» мая 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.1
кандидат технических наук



Гл



Актуальность работы. Пневматические системы и агрегаты (ПСИА) являются одним из наиболее эффективных средств автоматизации и механизации современных производственных процессов в машиностроении, нефтяной, газовой, химической промышленности, строительстве и транспорте. Устройства с пневматическим приводом имеют ряд преимуществ по сравнению с механизмами с гидравлическим, электрическим или механическим приводом. Пневматические системы не загрязняют окружающей среды, малочувствительны к перегрузкам, работают в широком диапазоне изменения параметров окружающей среды, отличаются простотой конструкции и малой удельной массой. Широкий спектр выполняемых работ обуславливает потребность в большом количестве пневматических систем и агрегатов.

Анализ результатов эксплуатации ПСИА при пониженных температурах окружающей среды выявил устойчивые случаи отказов пневматических систем и агрегатов, рабочим телом которых является сжатый воздух. Методы восстановления ПСИА включают прогрев и разборку конструкций с целью удаления образовавшегося конденсата. Использование этих методов приводит к простому оборудования, снижению срока эксплуатации, роста эксплуатационных затрат и необходимости увеличения парка ПСИА.

В известных теоретических исследованиях не учитываются процессы, вызывающие отказы пневматических систем и агрегатов. Результаты этих исследований невозможно использовать для решения задач снижения количества отказов ПСИА до приемлемого уровня. Результаты экспериментальных исследований не могут быть обобщены для широкого спектра существующих и вновь разрабатываемых конструкций. Необходимы математические модели, обоснованные методы расчета и методики, позволяющие проводить исследования с целью повысить надежность, расширить диапазон температур эксплуатации и наиболее полно использовать потенциальные возможности как существующих, так и вновь разрабатываемых конструкций пневматических систем и агрегатов.

Цель работы. Целями настоящей работы являются: разработка математических моделей рабочих процессов пневматических систем и агрегатов; разработка методов расчета для создания современных ПСИА, учитывающих процесс образования конденсата рабочего тела; разработка практических рекомендаций для модернизации существующего оборудования.



Объект исследования. Объектом исследования являются пневматические системы и агрегаты. Общим для них является наличие проточных полостей, каналов и щелей, в которых скапливается конденсат, вызывающий изменение режима работы вплоть до отказа.

Предмет исследования. Предметом исследования являются способы уменьшения влияния процесса образования конденсата рабочего тела на технические характеристики пневматических систем и агрегатов.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается:

- в созданной общей математической модели пневматической системы и ее элементов, отличающейся тем, что в ней учитываются: массовый и фазовый баланс компонентов рабочего тела, состоящего из смеси сухого воздуха и воды в различных фазовых состояниях; массовый и фазовый баланс конденсата на поверхностях элементов конструкций; теплообмен между элементами конструкции, конденсатом, рабочим телом и окружающей средой;
- в обосновании численных методов расчета параметров конденсата на поверхностях элементов конструкции, рабочего тела в канале и проточной полости;
- в созданной математической модели и методике расчета пневматических устройств с поршневым приводом возвратно-поступательного действия, позволяющей учитывать влияние процесса образования конденсата рабочего тела на технические характеристики и время работы конструкций до отказа;
- в результатах экспериментальных исследований зависимости процесса образования конденсата рабочего тела и технических характеристик пневматических молотков от конструктивных особенностей и условий эксплуатации;
- в результатах теоретических исследований эффективности технологических, конструктивных и схемных способов снижения влияния процесса образования конденсата рабочего тела на технические характеристики пневматических молотков.

Практическая ценность

- На этапе разработки и модернизации современных пневматических систем и агрегатов созданная математическая модель и методы ее реализации позволяют учитывать влияние конструктивного исполнения и условий эксплуатации на процесс образования конденсата рабочего тела и его воздействие на технические характеристики ПСиА на нестационарных режимах работы; в

частном случае математическая модель и методики расчета позволяют рассчитывать характеристики ПСиА, работающих на сухом воздухе и на различных газах в качестве рабочего тела при различных условиях эксплуатации;

- разработанная математическая модель и методы ее реализации позволяет выявить резервы для улучшения технических характеристик современных ПСиА, отказаться от дорогостоящих экспериментальных исследований, повысить эффективность проектирования и совершенствования конструкций ПСиА, сократить сроки их разработки;
- предложены конструктивные, технологические и схемные решения, позволяющие во всем интервале температур эксплуатации увеличить время работы пневматических молотков до допустимых для практического применения значений.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались автором на XV Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов РКК «Энергия» им. С.П. Королева (ноябрь, 1999 г., г. Королев), на научно-технических семинарах кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 1997, 1998, 2000, 2002, 2003г).

Результаты диссертационной работы использовались при разработке серийных конструкций пневматических молотков МОП-3 и МПДС-4. Полученные результаты используются в организациях «Мосметрострой», «Мосэнерго» и «Мосводоканал». Математическая модель и результаты расчета по предложенной методике использованы при исследовании технических характеристик кодового пневматического замка НО-5 (завод «Гидроавтоматика»), при работах над АС РФ № 2153048, АС РФ № 2172809, заявкой на патент № 2000127408 (РФ).

Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 5 работ, в том числе 2 патента РФ, положительное решение по заявке на патент РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. По объему работа состоит из 163 страниц текста, 36 рисунков и 2-х таблиц. Библиография насчитывает 97 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель, научная новизна, практическая ценность полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе исследованы причины отказов пневматических систем и агрегатов и сделан вывод о важной роли конденсата рабочего тела как основной причине отказов современных ПСиА.

На основании анализа методов улучшения технических характеристик ПСиА, работающих в условиях образования конденсата рабочего тела, показано, что для их применения необходимо проведение обширных экспериментальных или теоретических исследований, направленных на определение эффективности каждого метода или их комбинаций для каждой конкретной конструкции ПСиА.

В существующих математических моделях, методах расчета и проектирования ПСиА не учитываются свойства воды, входящей в состав рабочего тела, и теплообмен между рабочим телом, элементами конструкций и окружающей средой как факторы, практически не влияющие на технические характеристики пневматических систем и агрегатов. Такие модели и методы расчета позволяют описать только часть причин возникновения отказов ПСиА при снижении температуры окружающей среды: заклинивание подвижных элементов конструкций вследствие их температурных деформаций, увеличение сил трения вследствие изменения свойств смазочных материалов и изменение перепадов давления в системах управления и регулирования вследствие охлаждения рабочего тела от элементов конструкций.

В заключение главы сформулированы задачи исследования:

- создать общую математическую модель и соответствующие методики и алгоритмы расчета ПСиА, позволяющие численно определять влияние процесса конденсации рабочего тела на характеристики пневматических систем и агрегатов;
- выполнить проверку адекватности созданной модели и алгоритмов расчета задачам определения влияния процесса конденсации рабочего тела на технические характеристики ПСиА;
- на примере пневматических молотков — широко используемых серийных конструкций пневматических систем, провести исследование эффективности

- различных методов улучшения характеристик ПСиА, работающих в условиях образования конденсата рабочего тела;
- определить комплекс условий, обеспечивающий надежную работу пневматических молотков во всем диапазоне температур эксплуатации конструкций;
 - разработать практические рекомендации по модернизации существующих и проектируемых конструкций пневматических молотков.

Вторая глава посвящена вопросам математического моделирования процессов, протекающих в пневматических системах и агрегатах. Рассмотрены созданные автором математические модели основных элементов ПСиА: проточной полости переменного объема, конденсата на поверхности, течения рабочего тела в канале и теплового состояния ступеней пневматического устройства. Выполнены проверка алгоритмов расчета и основных положений моделей путем решения ряда тестовых задач, имеющих аналитические решения, и моделирования процессов, протекающих в конструкциях, для которых известны экспериментальные данные. Определены вычислительная погрешность, устойчивость работы алгоритмов расчета и границы применения разработанных моделей.

Проточная полость. Под проточной полостью понимается полость переменного объема, ограниченная поверхностью раздела (оболочкой), через которую происходит обмен веществом и энергией между рабочим телом и внешней для рабочего тела средой. В качестве поверхности раздела могут выступать поверхности пленок конденсата на элементах конструкции ПСиА, поверхности элементов конструкций, границы с другими полостями, каналами или окружающей средой. Вариант расчетной схемы проточной полости приведен на рис. 1, где $G_{i,j,k}$ — массовый расход компонентов рабочего тела, i — компонент рабочего тела ($i=1$ — воздух, $i=2$ — вода), j — фаза компонента ($j=1$ — пар, $j=2$ — жидкость, $j=3$ — твердое тело), k — индекс источника массового потока вещества (например выхлопное отверстие, поверхность ячейки конденсата и т.п.), Ω — поверхность раздела, Q — теплота, переданная через поверхность раздела, L — работа, совершаемая рабочим телом, L_T — работа диссипативных сил. При построении математической модели приняты следующие основные допущения:

- рабочее тело (РТ) представляет собой смесь сухого воздуха и воды в виде пара, взвеси жидкости (тумана) и кристаллов льда;

- компоненты сухого воздуха не претерпевают фазовых переходов;
- процессы в рабочем теле протекают равновесно;
- полная температурная аккомодация рабочего тела у поверхности раздела полости.

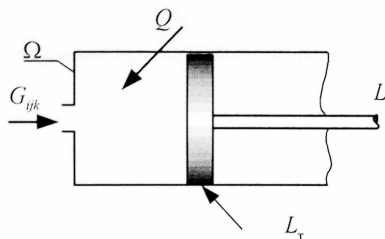


Рис. 1 Расчетная схема проточной полости

Основу математической модели составляет уравнение баланса энергии открытой термодинамической системы, записанное для многофазной многокомпонентной среды:

$$E = E_{\tau=0} + \int_0^{\tau} \left(\sum_k \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^2 \left(h_{ijk} + \frac{u_{ijk}^2}{2} \right) \cdot \frac{\partial m_{ijk}}{\partial \tau} + \frac{\partial Q}{\partial \tau} - \frac{\partial L}{\partial \tau} - \frac{\partial L_{\tau}}{\partial \tau} \right) d\tau,$$

где E — энергия рабочего тела, h — удельная энтальпия, u — скорость, m — масса, τ — время.

Температура определяется из уравнения энергии с учетом массового и фазового состава компонентов рабочего тела:

$$T = \frac{E}{\sum_{i=1}^2 (c_{\nu})_{i,j} m_{i,j} + \sum_{j=2}^3 c_{2,j} m_{2,j}},$$

где c — теплоемкость.

Массовый и фазовый состав компонентов рабочего тела определяется следующим образом. Масса сухого воздуха:

$$m_{1,i} = m_{1,i}|_{\tau=0} + \int_0^{\tau} \left(\sum_k G_{1,i,k} \right) d\tau.$$

Расход воздуха $G_{1,i,k}$ из полости в полость рассчитывается по известным зависимостям Сен-Венана—Венцеля. В системе канал — полость расход воздуха определяется при решении сопряженной задачи течения рабочего тела в канале переменного сечения и проточной полости. Расход воды через отверстия $G_{2,jk}$

определяется из условия равенства скоростей всех фаз компонентов рабочего тела: $G_{2jk} = \rho_{2j} u \Omega_m$, где ρ_{2j} — осредненные по объему плотности воды в газовой, жидкой и твердой фазе. Массовый баланс воды в рабочем теле определяется с учетом осаждения (испарения) конденсата на поверхность раздела $G_{22m}^* = \Omega_m \cdot j_{22m}$. Плотность массового потока воды $j_{2,2,m}$ на элементарную поверхность Ω_m рассчитывается по зависимости Герца-Кнудсена:

$$j_{22m} = \xi \frac{P_{2,1} - P_{2,1}^*}{\sqrt{2\pi RT^*}},$$

где индекс "*" означает параметр на границе раздела, P — давление, R — газовая постоянная, T — температура. Масса воды m_2 в рабочем теле:

$$m_2 = m_2|_{\tau=0} + \int_0^{\tau} \left(\sum_k \sum_{j=1}^3 G_{2jk} - \sum_m G_{22m}^* \right) d\tau.$$

Фазовый состав воды в рабочем теле определяется температурой рабочего тела с учетом $P_2 \leq P_{2,1\text{нас}}$, где $P_{2,1\text{нас}}$ — давление насыщенных паров воды.

Давление в полости рассчитывается согласно закону парциальных давлений Дальтона и уравнениям состояния воды и воздуха.

Конденсат на поверхности оболочки. Под ячейкой конденсата Ψ_m (рис. 2) понимается объем, заполненный водой в жидкой и твердой фазе и ограниченный

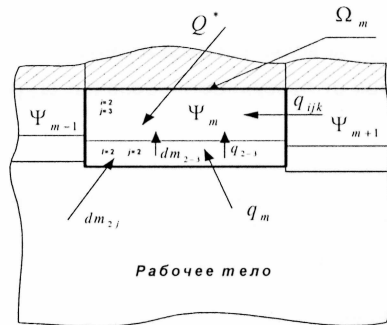


Рис. 2 Расчетная схема ячейки конденсата.

поверхностью конструкции Ω_m , поверхностью раздела фаз с рабочим телом и границами раздела с другими ячейками конденсата. Между ячейками Ψ_{m-1} , Ψ_m , Ψ_{m+1} и рабочим телом происходит обмен веществом и энергией, а с оболочкой — теплообмен. Учитываются фазовые переходы воды и теплообмен между водой и льдом. Кинетическая энергия и работа по изменению объема ячейки кон-

денсата не учитываются.

Температуры, энергии, массовый и фазовый баланс компонентов рабочего тела определяется следующим образом:

$$\text{При } T_{2,3}^{**} > 273,15K \left\{ \begin{array}{l} T_{2,2}^{*} = T_{2,2}^{**} \\ T_{2,3}^{*} = 273,15K \\ m_{2,3}^{*} = \frac{h_{2,2}^{**} m_{2,3}^{**} - E_{2,3}^{**}}{h_{2,2}^{**} - h_{2,3}^{*}} \\ m_{2,2}^{*} = m_{2,2}^{**} + m_{2,3}^{**} - m_{2,3}^{*} \\ E_{2,3}^{*} = h_{2,3}^{*} m_{2,3}^{*} \\ E_{2,2}^{*} = E_{2,2}^{**} + E_{2,3}^{**} - E_{2,3}^{*} \end{array} \right. , \quad \text{При } T_{2,2}^{**} < 273,15K \left\{ \begin{array}{l} T_{2,3}^{*} = T_{2,3}^{**} \\ T_{2,2}^{*} = 273,15K \\ m_{2,2}^{*} = \frac{E_{2,2}^{**} - h_{2,3}^{**} m_{2,2}^{**}}{h_{2,2}^{*} - h_{2,3}^{**}} \\ m_{2,3}^{*} = m_{2,3}^{**} + m_{2,2}^{**} - m_{2,2}^{*} \\ E_{2,2}^{*} = h_{2,2}^{*} m_{2,2}^{*} \\ E_{2,3}^{*} = E_{2,3}^{**} + E_{2,2}^{**} - E_{2,2}^{*} \end{array} \right. ,$$

где индекс "***" означает, что параметр определен без учета фазовых переходов воды в ячейке конденсата по следующим зависимостям.

Температуры воды и льда в ячейке:

$$T_{2,j}^{*} = \frac{E_{2,j}^{*}}{c_{2,j} m_{2,j}^{*}}.$$

Энергия воды в ячейке:

$$E_{2,2}^{*} = E_{2,2}^{*} \Big|_{\tau=0} + \int_0^{\tau} \left(\frac{\partial Q_{2,2}^{*}}{\partial \tau} + \sum_k h_{2,2,k}^{*} G_{2,2,k}^{*} \right) d\tau,$$

где $G_{2,j,k}^{*}$ — массовый приток воды или льда из других ячеек или рабочего тела, $\partial Q_{2,j}^{*} / \partial \tau$ — тепловой поток от поверхности оболочки Ω , рабочего тела или других ячеек.

Энергия льда в ячейке:

$$E_{2,3}^{*} = E_{2,3}^{*} \Big|_{\tau=0} + \int_0^{\tau} \left(\frac{\partial Q_{2,3}^{*}}{\partial \tau} + \sum_k h_{2,3,k}^{*} G_{2,3,k}^{*} \right) d\tau.$$

Массы воды и льда в ячейке:

$$m_{2,j}^{*} = m_{2,j}^{*} \Big|_{\tau=0} + \int_0^{\tau} G_{2,j}^{*} d\tau.$$

Течение рабочего тела в канале переменного сечения. Основные допущения модели:

— существует доминирующее (маршевое) направление течения, примерно совпадающее с одной из координатных осей;

- вязкой диффузией и теплопроводностью в доминирующем направлении можно пренебречь по сравнению с вязкой диффузией и теплопроводностью в направлении, поперечном маршевому;
- скорости всех компонентов и фаз РТ в маршевом направлении потока равны между собой;
- процесс конденсации или испарения воды в потоке принят равновесным;
- на поверхности канала расположены ячейки конденсата, изменение объема которых вызывает изменение поперечного сечения канала.

Задача дозвукового течения сжимаемой и несжимаемой среды в канале переменного сечения рассматривается в интегральной постановке с учетом фазовых переходов рабочего тела. При этом для любого рассматриваемого контрольного объема его боковые границы совпадают со стенками канала или ячейками конденсата. Границы, через которые проходит основной поток РТ, перпендикулярны маршевому направлению. Дискретизация уравнений проводится по методу контрольных объемов на совмещенных сетках. Используется метод равного порядка скорости и давления, применена полностью неявная противопоточная схема первого порядка точности.

Параметры течения рабочего тела описываются параболизированными уравнениями Навье-Стокса, учитывающими допущения модели:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho u \vec{u} - \mu \cdot \operatorname{grad}(u)) = -\frac{\partial p}{\partial x} + S_u$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = S_\rho$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial \tau} + \operatorname{div}\left(\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \vec{u}_{ij} \rho_{ij} h_{ij} - [k] \cdot \operatorname{grad}(T)\right) = S_T$$

$$\rho = \sum_j \sum_i \rho_{ij},$$

где S_u, S_T, S_ρ — источниковые члены соответствующих уравнений;

ρ_{ij} — осредненные по контрольному объему плотности фаз компонентов РТ;

μ, k — коэффициенты диффузии.

Граничные условия: на входе: $T = T(t, y, z)$, $P = P(t, y, z)$, $\rho = \rho(t, y, z)$, $\vec{u} = \vec{u}(t, y, z)$; на стенках канала: $u = 0$, $v = 0$, $\omega = 0$, $G_{2,2,k}^* = \Omega_k \cdot j_{2,2,k}$. Для расчета тепловых потоков через стенки канала использовались граничные условия первого, второго или третьего рода.

Для решения системы уравнений применена модифицированная итерационная процедура SIMPLER (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Методика расчета позволяет определить параметры дозвуковых потоков рабочего тела в каналах. При наличии информации о распределении скорости потока в канале параметры РТ рассчитываются и в случае сверхзвуковых потоков.

Температуры, фазовый и массовый баланс компонентов рабочего тела для каждого контрольного объема определяются по модели проточной полости с учетом скорости потока.

Тепловое состояние ступеней ПСиА. Под ступенью ПСиА понимается элемент конструкции, который обменивается с рабочим телом, окружающей средой и другими ступенями энергией в виде конвективного теплообмена и теплопередачи. Расчетная область ступени ПСиА представляет собой сплошную среду, ограниченную поверхностью раздела, через которую проходит теплообмен с внешней областью (например, стенки проходящих внутри конструкции каналов, проточных полостей или границы ячеек конденсата). Для расчета тепловых потоков через поверхность раздела необходимо определить поле температур во всей расчетной области. При этом расчетная область разбивается на контрольные объемы таким образом, чтобы расчетная точка находилась в центре контрольного объема. Для каждой расчетной точки решается уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial \tau} - \operatorname{div}(k \cdot \operatorname{grad}(T)) = S_T,$$

где S_T — удельная по объему мощность тепловыделения.

В третьей главе представлена методика расчета пневматических устройств с поршневым приводом возвратно-поступательного действия. В методике по математической модели определяются изменения геометрических размеров ПСиА, происходящих в результате примерзания конденсата к поверхностям конструкций. Учет перераспределения потоков рабочего тела как результата изменения проходных сечений каналов и полостей позволяет определить изменение режима работы и рабочих характеристик ПСиА на нестационарных режимах работы. Анализ расчетных данных и результатов экспериментальных исследований серийно выпускаемых пневматических молотков МПДС-4 и МОП-3 как широко распространенных конструкций, содержащих в себе все компоненты общей модели ПСиА, подтвердил адекватность созданных моде-

лей и методик расчетов задачам определения влияния процесса образования конденсата на технические характеристики ПСиА. При различных температурах окружающей среды экспериментально определены время работы до отказа конструкций (рис. 4), координаты пробок из замерзшего конденсата и изменение с течением времени расхода рабочего тела. Одинаковая схема и компоновка элементов (рис. 3) и различия в конструкциях клапанов, геометрических размерах и количестве каналов позволили определить влияние этих отличий на процесс образования конденсата и технические характеристики пневматических молотков.

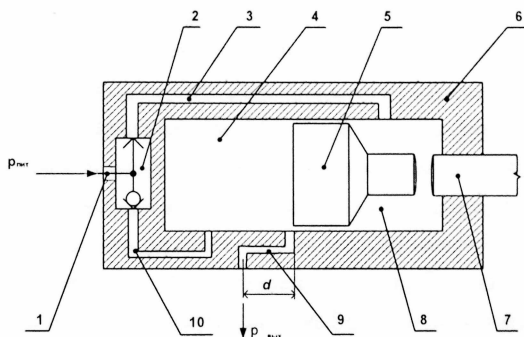


Рис. 3 Общая схема пневматических молотков МПДС-4 и МОП-3.

1 - канал питания молотка, 2 - клапан, 3 - канал питания нижней полости, 4 - верхняя полость, 5 - поршень, 6 - корпус, 7 - пика, 8 - нижняя полость, 9 - выхлопной канал, 10 - канал питания верхней полости.

При составлении математической модели пневматических молотков (ПМ) принималось, что при скоростях потока рабочего тела свыше 20 м/с образовавшийся в потоке РТ конденсат не прилипает к поверхностям стенок и уносится потоком. Поле температур корпуса рассчитывалось по модели теплового состояния ПСиА с трехмерной расчетной областью. Поля температур поршня и пика рассчитались по модели теплового состояния ПСиА с одномерной расчетной областью. Температура тарелки клапана определялась по модели теплового состояния ПСиА в приближении сосредоточенных параметров. За критерий отказа принято падение мощности удара поршня о пик до 40% от номинальной.

Максимальные расхождения расчетных и экспериментальных данных во всем диапазоне эксплуатации температур окружающей среды для каждой конструкции не превысили 20% по времени работы до отказа молотков, 10% по

координатам образования ледяной пробки конденсата и 4% по расходу рабочего тела.

В четвертой главе на примере пневматических молотков МОП-3 и МПДС-4 по предложенной методике выполнены исследования влияния процесса образования конденсата рабочего тела, условий эксплуатации и конструктивных особенностей на технические характеристики конструкций, исследованы эффективности различных способов снижения влияния процесса образования конденсата РТ на время непрерывной работы до отказа молотков (рис.4÷7). Были определены направления и оптимальные сочетания методов улучшения конструкций (рис.8), обеспечивающие приемлемое время работы до отказа конструкций. Показано, что модернизация пневматических молотков, включающая в себя устранение обратного потока рабочего тела из полостей 4 и 8 (рис. 3), минимизацию числа каналов питания 3 и 10, минимизацию числа выхлопных каналов 9, минимизацию числа поворотов потока рабочего тела в каналах при использовании схемы с радиальным расположением выхлопных каналов обеспечивает необходимое время работы конструкций во всем диапазоне температур эксплуатации молотков. При этом отпадает необходимость в подогреве и осушке рабочего тела перед входом в ПМ и подогреве корпусов 6 (рис. 3) во время работы молотков (рис. 8).

Основные выводы и итоги работы

1. Выполнен теоретический анализ процессов, протекающих в пневматических системах и агрегатах, и установлено, что выпавший из рабочего тела конденсат является основной причиной отказов современных ПСиА, работающих в условиях отрицательных по шкале Цельсия температур окружающей среды.
2. Впервые создана общая математическая модель пневматической системы и ее элементов, отличающаяся от известных моделей тем, что в ней учитываются: массовый и фазовый баланс компонентов рабочего тела, состоящего из смеси сухого воздуха и воды в различных фазовых состояниях; массовый и фазовый баланс конденсата на поверхностях элементов конструкций; теплообмен между элементами конструкции, выпавшим конденсатом, рабочим телом и окружающей средой.
3. Обоснованы методы расчета параметров рабочего тела в проточной полости, канале переменного сечения и конденсата на поверхностях элементов конструкции на нестационарных режимах работы ПСиА.

4. Разработана методика и программы расчета пневматических устройств с поршневым приводом возвратно-поступательного действия, впервые позволившие определять время работы конструкции до отказа и изменение рабочих характеристик в условиях образования конденсата рабочего тела. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 20% по времени работы до отказа конструкций, 10% по координатам накопления конденсата и 4% по расходу рабочего тела.

5. Выполнены экспериментальные исследования технических характеристик пневматических молотков МПДС-4 и МОП-3, работающих в условиях образования конденсата РТ, и установлено, что:

- основным фактором, определяющим время работы до отказа ПМ в реальных условиях эксплуатации, является температура окружающей среды;
- причиной отказа конструкций является изменение проходного сечения каналов питания нижней полости в результате накопления конденсата в виде льда;
- нанесение жидких гидрофобных покрытий на стенки каналов не влияет на работоспособность молотков;
- минимальная продолжительность работы до отказа пневматических молотков во всем интервале температур эксплуатации должна составлять не менее 20 минут.

6. Выполнено теоретическое исследование эффективности технологических, конструктивных и схемных способов увеличения времени работы молотков МПДС-4 и МОП-3 до отказа. Установлено, что радиальное расположение выхлопных каналов обеспечивает максимальную продолжительность работы ПМ. Изменение расположения выхлопных каналов ведет к уменьшению продолжительности работы до отказа на время от 1 до 12 минут в зависимости от температуры окружающей среды. Установлено, что при радиальном расположении выхлопных каналов минимальная заданная продолжительность работы конструкций до отказа обеспечивается следующими способами:

- подачей рабочего тела с температурой не ниже 150°C ;
- подачей рабочего тела с относительной влажностью не более 5%;
- подведением теплового потока мощностью 50 Вт к корпусу со стороны пики — при температурах окружающей среды, превышающих -5°C ;
- модернизацией конструкции, устраняющий обратный поток рабочего тела из полостей в клапан и магистраль — при температурах окружающей среды,

превышающих 4 °С;

- модернизацией конструкции, включающую минимизацию числа каналов питания нижней полости и минимизацию числа поворотов потока РТ от клапана к полостям — при температурах окружающей среды, превышающих 12 °С;
- модернизацией конструкции, включающую минимизацию числа поворотов потока РТ от клапана к полостям или минимизацию числа каналов питания нижней полости, — при температурах окружающей среды, превышающих 16 °С.

Для обеспечения минимальной заданной продолжительности работы пневматических молотков до отказа во всем интервале температур эксплуатации без специальной подготовки РТ и подогрева конструкций во время работы ПМ рекомендовано внести изменения в конструкции, включающие в себя использование схемы с радиальным расположением выхлопных каналов, устранение обратного потока рабочего тела из полостей в клапан и магистраль, минимизацию числа каналов питания нижней полости и числа поворотов потока РТ от клапана к полостям.

Публикации по теме диссертации.

1. Кюрджиев Ю.В., Никитин Ю.Ф. Методика расчета рабочих характеристик пневматических молотков, работающих на влажном воздухе // Компрессорная техника и пневматика.— 2000.— №4.— С. 8-15.
2. Кюрджиев Ю.В. Снижение влияния влаги рабочего тела на надежность пневматических молотков // Компрессорная техника и пневматика.— 2002.— №11.— С. 15-21.
3. Патент РФ № 2153048. Теплоизолирующее ограждение / Ю.Ф. Никитин, Д.Д. Никитин, Д.А. Калинин, Ю.В. Кюрджиев // Б.И. — 2000. — №17.
4. Решение ВНИИГПЭ о выдаче АС по заявке № 2000127408 (РФ). Оконный блок / Ю.Ф. Никитин, Д.Д. Никитин, Д.А. Калинин, Ю.В. Кюрджиев.— Заявл. 1.11.00.
5. Патент РФ № 2172809. Стеклопрозрачное ограждение / Ю.Ф. Никитин, Д.Д. Никитин, Д.А. Калинин, Ю.В. Кюрджиев // Б.И. — 2001.— №26.

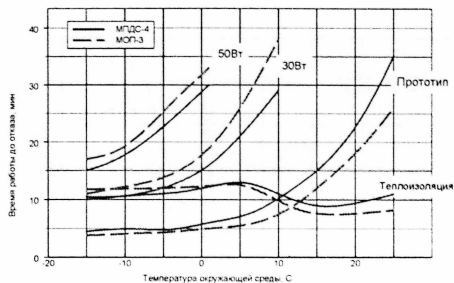


Рис.4 Эффективность технологических методов увеличения времени работы до отказа пневматических молотков МПДС –4 и МОП–3: отсутствие теплообмена между конструкцией и окружающей средой, подведение тепловой мощности в 30 и 50 Вт равномерно к нижней (со стороны пики) половине корпуса молотка.

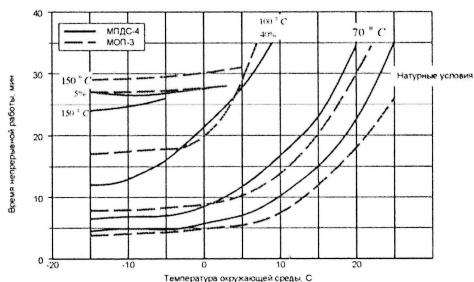


Рис.5 Эффективность технологических методов увеличения времени работы до отказа пневматических молотков МПДС –4 и МОП–3: специальная подготовка рабочего тела — РТ при 70 °С, РТ при 100 °С и 40% отн. влажности, РТ при 5% отн. влажности, РТ при 150 °С.

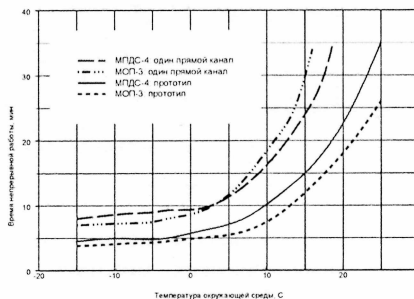


Рис. 6 Эффективность конструктивных методов увеличения времени работы до отказа пневматических молотков МПДС –4 и МОП–3: оптимизация числа и формы каналов питания нижней полости.

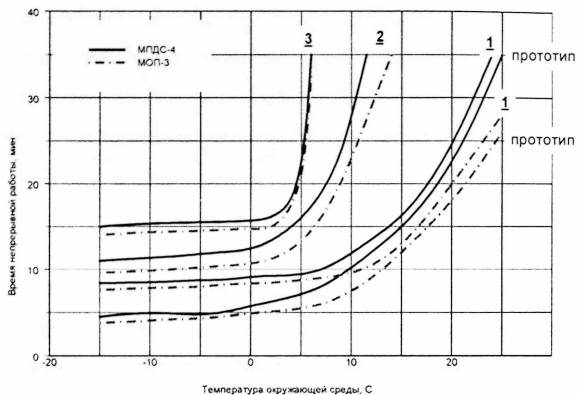


Рис. 7 Эффективность схемных методов увеличения времени работы до отказа пневматических молотков МПДС-4 и МОП-3: 1 – устранение обратного потока РТ из верхней полости в клапан и магистраль; 2 – устранение обратного потока РТ из нижней полости в клапан и магистраль; 3 – устранение обратного потока РТ из верхней и нижней полости в клапан и магистраль.

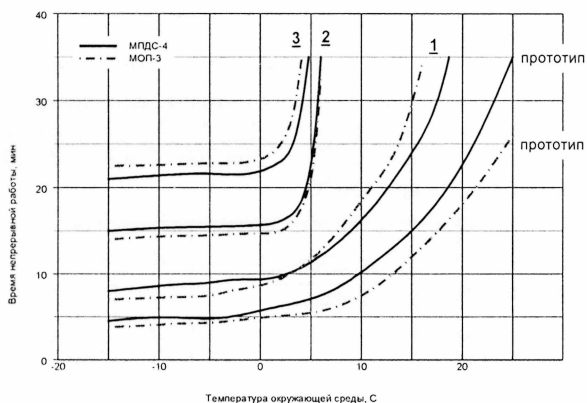


Рис. 8 Эффективность конструктивных и схемных методов увеличения времени работы до отказа пневматических молотков МПДС-4 и МОП-3: 1 – конструктивные методы; 2 – схемные методы; 3 – комбинация конструктивных и схемных методов.