

О РАЗРАБОТКЕ СПОСОБОВ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ПНЕВМОГИДРОСИСТЕМ ИЗДЕЛИЙ

© 2009 Т. Ч. Колбая¹, И. А. Дободейч², Ю. П. Барметов²

¹Конструкторское бюро химической автоматики, г. Воронеж

²Воронежская государственная технологическая академия

Исследуется влияние параметров элементов газонаполненной системы "ёмкость–трубопровод–клапан" на характер и количественные показатели первичных волн давления, возникающих после изменения проходного сечения клапана. Приводится математическая модель возникновения течения в газонаполненном трубопроводе в период открытия клапана, базирующаяся на численном и частном аналитическом решении исходной системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Гидрогазодинамика, пневмогидросистемы, методы диагностики

За последние годы изменились внешние исходные условия разработки, изготовления и эксплуатации изделий ракетной и авиационной техники, приведшие к увеличению потребности внедрения работ по дополнительному контролю технического состояния, диагностированию и техническому обслуживанию. Причинами этого, кроме всего прочего, являются: снижение финансовых возможностей разработчиков и изготовителей изделий, оптимизация объёма контрольных операций с целью сокращения временных и материальных затрат при обслуживании эксплуатирующими организациями; повышение конкурентных требований к вновь разрабатываемой продукции; как следствие, снижение привлекательности для исполнителей работ по разработке, изготовлению, испытаниям и эксплуатации, что может привести к увеличению количества и тяжести неисправностей, возникающих при огневых и других испытаниях, в межпусковой период.

В настоящее время в технологии пневмогидроиспытаний накопилось много проблем: старение технологического оборудования для испытаний; изношенность специализированных стендов для гидрогазодинамических испытаний, ограниченность систем автоматизации задачами регистрации и обработки измерительной информации. Необходимы модернизация и техническое переоснащение испытательных производств. Вместе с тем, для повышения уровня конкурентоспособности, привлекательности, эф-

фективности и надёжности требуется проводить совершенствование способов и методов мониторинга состояния и обслуживания как по объёму и по допускаемым пределам изменений критериев дополнительно контролируемых параметров и процессов, так и с учетом человеческого фактора и изменившихся внешних исходных условий разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации.

Одними из наиболее важных и приоритетных областей мониторинга состояния или определения качественных и количественных характеристик элементов и агрегатов изделий являются разработка новых и совершенствование существующих методов контроля функционирования агрегатов систем управления, регулирования, зажигания, контроля пневмогидравлических характеристик линий питания с увеличением точности получаемых результатов, уменьшением материальных, финансовых и временных затрат.

Для более полного понимания направления путей совершенствования способов рассмотрим сущность физических процессов, происходящих в пневмогидравлических системах (ПГС) изделий, при изменении площади проходного сечения исполнительных устройств, резком изменении расхода и перепада давления на этих элементах. В этих случаях в ПГС в начальный момент времени возникают волны пониженного или повышенного давления – первичные волны давления (ПВД), которые могут служить источ-

ником информации о параметрах элементов ПГС и рабочего тела. Знание зависимостей между параметрами первичных волн и характеристиками элементов позволит прогнозировать и, при необходимости, влиять на динамику переходных процессов в ПГС. Информация, заложенная в ПВД, может использоваться при оценке параметров элементов ПГС, в частности, таких как площадь эффективного проходного сечения (ЭПС) исполнительных устройств, времени их срабатывания и др. Знание этих параметров необходимо как для оценки характеристик разрабатываемых образцов, так и для подтверждения значений характеристик элементов и агрегатов, включенных в состав изделия, при контроле их состояния в межпусковой период.

В связи с влиянием большого числа факторов, определяющих характер нестационарного течения жидкости или газа в подобных системах, в настоящее время нет универсальной математической модели, позволяющей описать динамику изменения параметров с заданной степенью точности. Существуют несколько методик решения подобных задач, при этом не прекращается поиск новых, более точных методов.

ПГС различных изделий содержат такую последовательность элементов, как "ёмкость–трубопровод–клапан". Рассмотрим нестационарное течение рабочего тела (газа), возникающее в подобной системе при срабатывании клапана.

При моделировании численным методом нами использовалась известная система уравнений, описывающих движение невязкой сжимаемой жидкости (НСЖ) в трубопроводе переменного сечения для осредненной по площади сечения продольной скорости в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho F)}{\partial t} + \frac{\partial(uF\rho)}{\partial z} = 0; \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ , u , P , S – плотность, продольная скорость, давление и энтропия НСЖ; F – площадь сечения потока; t , z – время и продольная координата.

В [1] приведена схема расчета нестационарного течения НСЖ в подобных ПГС сеточно-характеристический методом. Он представляет собой комбинацию классических метода конечных разностей и метода характеристик, объединяет в себе положительные свойства этих методов при моделировании неустановившегося течения невязкой сжимаемой жидкости.

Разработана прикладная программа, позволяющая рассчитывать давление и скорость сжимаемой жидкости в определенных точках системы "ёмкость–трубопровод–клапан" по заданным геометрическим параметрам системы, времени срабатывания и закону изменения во времени площади проходного сечения клапана.

Пример результатов расчета изменения давления в системе "ёмкость–трубопровод–клапан", полученных с помощью программы, приведен на рис. 1.

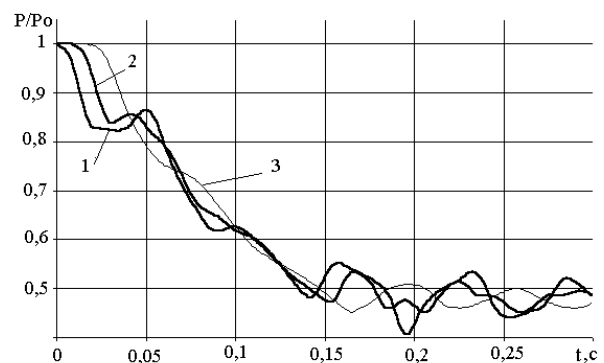


Рис. 1. Рассчитанные переходные процессы по давлению в трубопроводе: 1 - в сечении у клапана; 2 - в середине трубопровода; 3 - в сечении у емкости

Экспериментальные исследования переходных процессов, возникающих в пневмосистеме "ёмкость–трубопровод–клапан" при срабатывании клапана, проводились на нескольких вариантах материальной части (рис. 2) с использованием испытательной базы ОАО КБХА [2]. Истечение рабочего тела (воздуха) происходило через клапан в атмосферу. Начальный перепад давлений на клапане - сверхкритический. Испытывались клапаны различных типов и конструкций: электромагнитные, пневматические с различным диаметром условного проходного сечения.

Пример полученных экспериментально переходных процессов по давлению представлен на рис. 3.

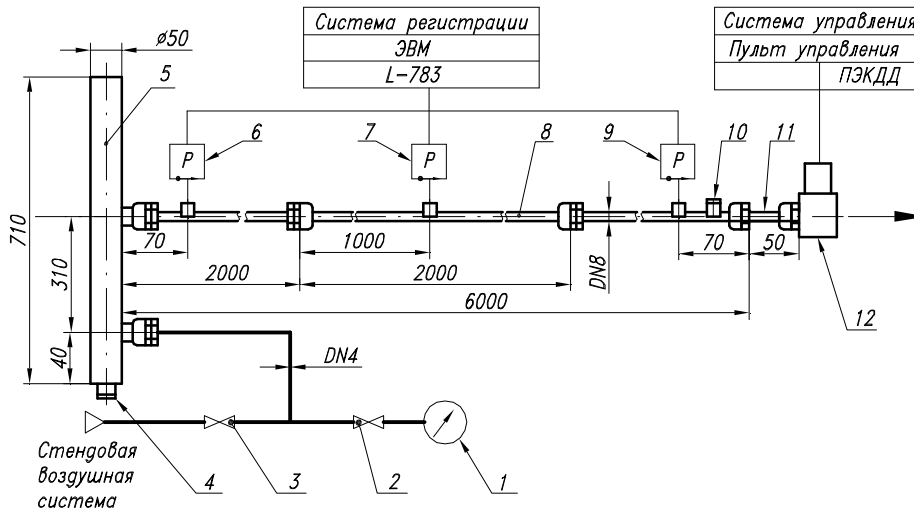


Рис. 2. Схема установки: 1 – манометр; 2, 3 – запорный кран; 4, 10 – заглушка; 5 – пневмоёмкость; 6, 7, 9 – датчик давления; 8 – трубопровод; 11 – переходник; 12 – клапан

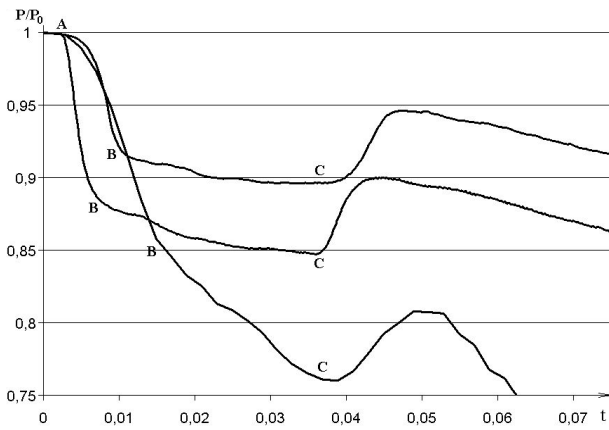


Рис. 3. Экспериментальные кривые изменения давления перед клапанами: 1 – электромагнитным, $d_y = 4$ мм; 2 – пневматическим, $d_y = 10$ мм; 3 – пневматическим, $d_y = 32$ мм

Анализ переходных процессов по давлению, полученных при срабатывании клапана, позволяет выделить некоторые характерные точки "изломов" на кривых давления (см. рис. 3): "А" – начало изменения ЭПС при открытии клапана; "В" – окончание открытия ЭПС; "С" – начало прихода отраженной волны от стыка "ёмкость–трубопровод" к клапану. Временной промежуток "АВ" соответствует времени открытия ЭПС клапана. Положение данных точек характерных изломов на кривой давления определяется по положению экстремумов производных сигнала, получаемого с датчика давления, расположенного перед клапаном, на прогнозируемых интервалах открытия и закрытия клапана. По результатам экспериментальных исследований предложен способ экспресс-оценки времени срабатывания клапанных устройств [3]. Способ определения величины площади ЭПС пневмогидросопротивлений основан на учёте зависимости падения давления в системе "ёмкость–

трубопровод–клапан" от площади ЭПС $S_{ЭПС}$, скорости его раскрытия, длины трубопровода, разности давлений на клапане. Используя экспериментальные значения величины давлений в соответствующие моменты времени, численными методами определялось значение величины площади ЭПС клапана.

Сравнение полученных результатов численного моделирования (рис. 1) [1] с экспериментальными данными (рис. 3) [2] показало [4], что характер рассчитанного изменения давления хорошо соответствует реальным процессам в период после прихода отражённых волн давления. Наибольшее несоответствие наблюдается в период формирования ПВД. При этом задание закона открытия проходного сечения носит определяющий характер, что вынудило провести дополнительное аналитическое исследование возникновения течения невязкой сжимаемой жидкости в трубопроводе.

Аналитическая модель возникновения течения невязкой сжимаемой жидкости основана на использовании системы модифицированных уравнений неразрывности и Эйлера в безразмерном виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho M)}{\partial z} = 0; \\ \rho \frac{\partial M}{\partial \tau} + \rho M \cdot \frac{\partial M}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} = B \rho; \\ \frac{\partial P}{\partial r} = B_0 \rho \cos \varphi; \quad \frac{\partial P}{\partial(r \sin \varphi)} = -B_0 \rho \sin \varphi; \\ B = \frac{R_0 g}{a^2} \cdot \sin \theta; \quad B_0 = \frac{R_0 g}{a^2} \cos \theta; \\ h = B_0 r \cos \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где $\tau \equiv at/R_0$; $M \equiv u/a$; $z \equiv x/R_0$; $P \equiv p/(\rho_0 a^2)$, R_0 , ρ_0 – масштабы линейных координат и плотности; θ – угол наклона трубопровода к горизонту; a – начальная скорость звука при $z = 0$.

Эта система соответствует однонаправленному течению в наклонном трубопроводе с жёсткими непроницаемыми стенками и предполагает постановку соответствующих начальных и граничных условий.

Подстановкой можно убедиться, что системе уравнений (2) удовлетворяют следующие выражения для давления P и плотности ρ :

$$\begin{aligned} \rho(\tau, z) &= C \exp((M(\tau, z) - B\tau)/b + h/b^2); \\ P(\tau, z) &= f(\tau) + b^2 \rho(\tau, z); \end{aligned} \quad (3)$$

где C , $b = \text{const}$, $f(\tau)$ – произвольная функция времени, а функция M удовлетворяет следующему уравнению:

$$\partial M / \partial \tau + (M + b) \cdot \partial M / \partial z = B. \quad (4)$$

В расчетах нами использованы следующие семейства частных аналитических решений уравнения (4):

$$\begin{aligned} M(\tau, z) &= K_2 + (K_3 + z)/(K_1 + 2\tau) + \\ &+ K_0 \sqrt{H(\tau, z)} - b + 3B(K_1 + 2\tau)/8; \\ H(\tau, z) &= K_4/(K_1 + 2\tau) + \end{aligned} \quad (5)$$

$$+ [(K_3 + z)/(K_1 + 2\tau) - K_2 - (K_1 + 2\tau)B/8]^2$$

и

$$\begin{aligned} M(\tau, z) &= C_2 + (C_3 + z)(C_1 + \tau)/T(\tau) - \\ &- b + (C_1 + \tau)B/2 + C_0 \sqrt{G(\tau, z)}/T(\tau); \\ G(\tau, z) &= C_4(C_3 + z)^2 + 2C_2(C_3 + z)(C_1 + \tau) + \\ &+ C_5 T(\tau) + C_2^2 + C_4(BT(\tau)/2)^2 - \end{aligned} \quad (6)$$

$$- BT(\tau) \cdot [C_4 z + C_2(C_1 + \tau)]$$

$$T(\tau) = (C_1 + \tau)^2 - C_4,$$

где C_i и K_i – некоторые константы, причем $C_0 = \pm 1$ и $K_0 = \pm 1$.

Эти решения включают в себя по 5 неизвестных констант интегрирования. В [5] показано, что все постоянные интегрирования могут быть однозначно определены для рассматриваемой задачи при постановке соответствующих граничных условий. Учитывая возможную негладкость функции изменения проходного сечения $S_k(\tau)$, поставленную задачу можно решить аналитически за счёт декомпозиции на сопряженные задачи.

Можно выделить для двух временных

интервалов три различных участка движения с соответствующими взаимосвязанными задачами и постановками начальных и граничных условий (рис. 4):

1) течение в период открытия проходного сечения клапана и неустановившегося процесса истечения сжимаемой жидкости через исполнительное устройство ($\tau \leq \tau_k$, где τ_k соответствует окончанию открытия ЭПС исполнительного устройства). В этот период формируется ПВД, одна граница которой подвижная, а площадь ЭПС переменная: $S_k(\tau) = f(\tau)$;

2) течение сжимаемой жидкости в зоне распространяющейся по трубопроводу ПВД после окончания открытия проходного сечения исполнительного устройства ($\tau > \tau_k$), обе границы которой подвижны;

3) течение на участке трубопровода между распространяющейся ПВД и исполнительным устройством ($\tau > \tau_k$) при истечении сжимаемой жидкости через исполнительное устройство с неизменным проходным сечением $S_k(\tau) = \text{const}$.

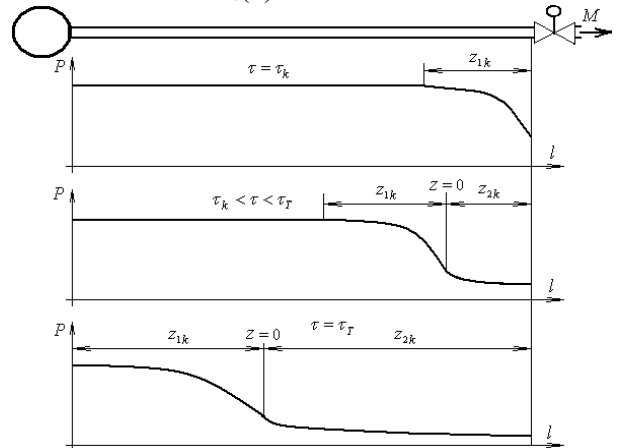


Рис. 4. Распределения давления по длине трубопровода в различные моменты времени

Начальные условия для поставленной задачи в период открытия исполнительного устройства, находящегося на торце горизонтально ($B = 0$) расположенного трубопровода:

$$\begin{aligned} M(0, z) &= 0; \quad \rho(0, z, 0) = 1; \\ P(0, z, r = 0) &= P(0, 0, 0) \equiv P_{000}; \\ S_k(0) &= 0; \quad T(0, z, 0) = \text{const}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $S_k(\tau)$ – переменная во времени площадь проходного сечения исполнительного устройства, $dS_k/dt > 0$; $P_{000} = \text{const}$.

В период формирования ПВД ($\tau \in [0; \tau_k]$, $z \in [z_k; 0]$) граница переднего фронта ПВД $z_{1k}(\tau)$ распространяется со скоростью звука в неподвижной НСЖ a , протяжённость ПВД равна $|z_{1k}| = \tau$. Задний фронт формирующейся ПВД ($z=0$) неподвижен и находится у клапана.

Граничные условия в данный период на переднем фронте ПВД:

$$\begin{aligned} M(\tau, z_{1k}) &= 0; \quad \rho(\tau, z_{1k}, 0) = 1; \\ P(\tau, z_{1k}, 0) &= P_{000}. \end{aligned} \quad (8)$$

Граничные условия у клапана определяются зависимостью

$$M(\tau, 0) = \mu \bar{S}_k(\tau) \cdot f(P/\rho)_{\tau, 0, 0}, \quad (9)$$

где $\mu \bar{S}_k$ – нормированная площадь ЭПС. Вид функции $f(P/\rho)_{\tau, 0, 0}$ определяется конструкцией клапана, режимом течения и свойствами НСЖ.

В период между завершением открытия ЭПС клапана τ_k и моментом достижения передним фронтом ПВД противоположного конца трубопровода τ_T , для участка, занятого бегущей ПВД ($\tau \in [\tau_k; \tau_T]$, $z \in [z_{1k}; 0]$) как головной, так и концевой фронты ПВД движутся с различными скоростями в направлении, противоположном направлению движения НСЖ. При этом протяжённость ПВД $|z_{1k}|$ возрастает, но с меньшей скоростью ($|z_{1k}| < \tau$), чем в период открытия ЭПС клапана.

Граничные условия на переднем фронте ПВД остаются прежними (9).

На участке течения, свободном от ПВД ($\tau \in [\tau_k; \tau_T]$, $z \in [0; z_{2k}]$), заключённом между задним фронтом ПВД и клапаном, режим течения существенно отличается от течения в период формирования ПВД за счёт постоянства площади сечения $S_k = \text{const}$. Длина этого участка z_{2k} определяется из зависимостей

$$z_{2k} - z_{1k} = \tau; \quad z_{2k}(\tau) = \int_{\tau_k}^{\tau} (A - M)_{\tau, 0} d\tau, \quad (10)$$

где A – местная скорость звука, делённая на a .

Результаты моделирования в виде графиков изменения скорости и давления в сечении у клапана для различных динамических характеристик открытия представлены на рис. 5 и 6. Расчёты показали, что давление у клапана продолжает падать и после

завершения открытия проходного сечения.

Предложенная математическая модель позволила описать течение невязкой сжимаемой жидкости в период формирования ПВД и после него. Она позволяет вычислять падение давления в любом сечении трубопровода до прихода отражённой волны.

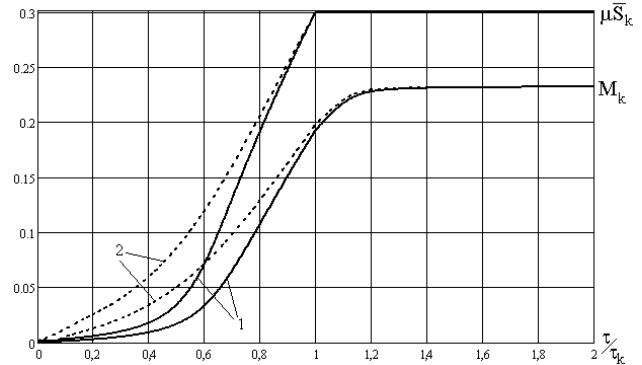


Рис. 5. Изменение во времени скорости НСЖ M_k перед клапаном при различных законах открытия его проходного сечения $\mu \bar{S}_k$ (кривые 1 и 2)

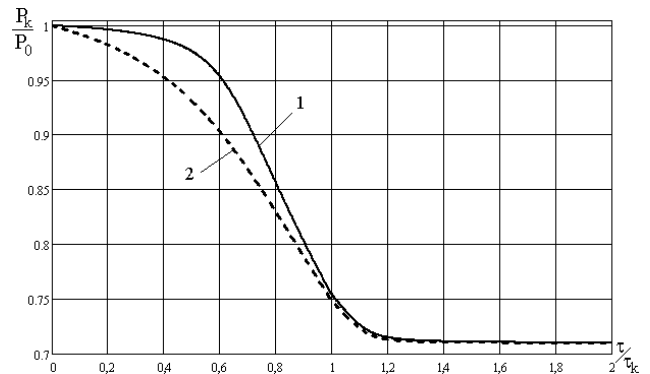


Рис. 6. Изменение во времени давления перед клапаном при различных законах открытия его проходного сечения $\mu \bar{S}_k$ (кривые 1 и 2)

Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных показывает достаточно близкое их совпадение (см. рис. 1, 3 и 6). Степень совпадения результатов моделирования и экспериментов зависит в первую очередь от степени совпадения расчётного (заданного) и реального характера открытия проходного сечения клапанного устройства.

Проведенные экспериментальные исследования позволили также сделать выводы:

- быстродействие клапана существенно влияет на характер переходного процесса в системе и на перепад давления (падение и возрастание), возникающие при срабатывании клапана;
- на характер переходного процесса, проходящего в системе, существенное влияние оказывает конструкция клапана;

- перепад давлений при срабатывании клапана зависит от отношения проходных сечений клапана и трубопровода – с увеличением отношения абсолютная величина перепада увеличивается;

- по информации, заложенной в ПВД, возможно определение величины площади ЭПС и времени срабатывания клапанных устройств.

По результатам испытаний был определён оптимальный диапазон частот дискретизации при регистрации подобных переходных процессов (частот опроса датчиков давления) – порядка 10 кГц.

Проведенная оценка погрешностей определения времени срабатывания и величины ЭПС клапанов показала, что для исследованного диапазона частот максимальная относительная погрешность определения времени срабатывания испытанных клапанов составила 8 %, а при определении величины площади их ЭПС погрешность не превысила 15 %.

Достоинствами предлагаемых способов определения параметров при кратковременной продувке воздухом являются: малый расход воздуха на продувку, оперативность получения, возможности сравнения и осреднения результата для однотипных экспериментов, возможность одновременной экспресс-оценки площади ЭПС и времени срабатывания исполнительных устройств.

Таким образом, численные, аналитические и экспериментальные исследования возникновения течения сжимаемой жидкости (воздуха) в трубопроводе при изменении проходного сечения исполнительного устройства или перепада давлений на нём позволили: выделить характерные точки на кривой изменения давления в трубопроводе, соответствующие изменению ЭПС исполнительных устройств; получить упрощённые математические зависимости, коэффициентами которых являются значения давления в трубопроводе в моменты времени соответствующие этим характерным точкам.

Библиографический список

1. Барметов, Ю.П. Сеточно-характеристический метод расчета нестационарного течения сжимаемой жидкости в потоке пе-

ременного сечения [Текст] / Ю.П. Барметов, И.А. Дободейч, Т.Ч. Колбая, Д.А. Палишкин // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 4 (30). – С. 4 - 8.

2. Манулиц, Э.Г. Переходные процессы в пневмосистеме "емкость–трубопровод–клапан" [Текст] / Э.Г. Манулиц, Т.Ч. Колбая, Ю.П. Барметов, И.А. Дободейч // Труды III Междунар. науч.-техн. конф. "СИНТ'05". – Воронеж, 2005. – С. 139 - 146.

3. Пат. 2265755 Российская Федерация, МПК⁷ 7F15B 19/00. Способ определения времени срабатывания клапана [Текст] / Дободейч И.А., Барметов Ю.П., Колбая Т.Ч.; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. технол. акад. – № 2004118359; заявл. 17.06.2004; опубл. 10.12.2005, Бюл. № 34. – 10 с.

4. Колбая, Т.Ч. Математическое моделирование возникновения течения сжимаемой жидкости в трубопроводе и диагностика клапанных устройств [Текст] / дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18: защищена 15.05.08; утв. 12.09.08 / Колбая Тимур Чичикович. – Воронеж, 2008. – 155 с. – Библиогр.: с. 138 - 147.

5. Дободейч, И.А. Первичная волна давления в жидкости после срабатывания клапана, установленного на трубопроводе [Текст] / И.А. Дободейч, Ю.П. Барметов // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46, № 1. – С. 78 – 84.

References

1 Barmetov, Yu.P. Grid - characteristic method of calculation non-stationary current of the compressed liquid in the stream of variable section [text]. / Yu.P. Barmetov, I.A. Dobodeich, T.Ch. Kolbaya, D.A. Palishkin//The control system and information technologies – 2007. – № 4 (30). – P. 4 - 8.

2. Manulits, E.G. Transients in pneumatic system "vessel–pipeline–valve"[text]./ E.G. Manulits, T.Ch. Kolbaya, Y.P. Barmetov, I.A. Dobodeych. // Materials of III International scientific and technical conference "SYPT'05" - Voronezh, 2005.– P. 139 - 146.

3. Patent 2265755 Russian Federation МПК⁷ 7F15B 19/00. Method for determination of valves response time [text]/ Dobodeich I.A., Barmetov Yu.P., Kolbaya T.Ch.; copyright proprietor and patenter Voronezh State Technological Academy. – № 2004118359; declare

17.06.2004; publication 10.12.2005, bulletin № 34. – 10 p.

4. Kolbaya, T.Ch. The mathematical models of a compressible fluid flow rising in a pipeline and diagnostics of valve elements [text]. / diss... of candidate of technical sciences: 05.13.18: defended on 15.05.08; approved on 12.09.08. // Kolbaya Timur Chichikovich. - Vo-

ronozh, 2008. - 155 p. – References: p. 138 - 147.

5. Dobodeich, I.A. The primary wave pressure in liquid after valve working, placed on pipeline [text] / I.A. Dobodeich, Yu.P. Barmetov. // Applied mechanics and technical physics. - 2005. – V. 46, № 1. – P. 78 – 84.

ABOUT ELABORATION DIAGNOSTIC METHODS OF ELEMENTS THE PNEUMOHYDROSYSTEM PRODUCTIONS

© 2009 T. Ch. Kolbaya¹, I. A. Dobodeich², Yu. P. Barmetov²

¹Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki, Voronezh

²Voronezh State Technological Academy

This article describes the research work of influence of gas-filled "vessel-pipeline-valve" system element parameters on nature and quantitative indexes of initial pressure waves appeared after change of valve cross section. The mathematical model describing initiation of flow in the gas-filled pipeline during valve opening. The scheme of calculation of non-stationary movement of a nonviscous compressed liquid in the pipeline which area changes on time and longitudinal coordinate is offered.

Hydro-flowdynamics, pneumohydrosystem, diagnostic methods

Информация об авторах

Колбая Тимур Чичикович, кандидат технических наук, инженер-конструктор II категории Конструкторского бюро химической автоматики. E-mail: timur2607@rambler.ru. Область научных интересов: математические модели гидрогазодинамики, диагностика устройств и агрегатов, технические средства и методы диагностики

Дободейч Иван Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем Воронежской государственной технологической академии. E-mail: kafasu@vgta.vrn.ru. Область научных интересов: математические модели гидрогазодинамики, системы уравнений в частных производных.

Барметов Юрий Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем Воронежской государственной технологической академии. E-mail: kafasu@vgta.vrn.ru. Область научных интересов: системы уравнений в частных производных, теория надежности, теория автоматического управления.

Kolbaya Timur Chichikovich, candidate of engineering sciences, design engineer of Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki. E-mail: timur2607@rambler.ru. Area of research: mathematical modeling of hydraulic gas dynamics, diagnostics of devices and units, hardware and methods of diagnostics.

Dobodeich Ivan Alexandrovich, doktor of engineering sciences, professor of Voronezh State Technological Academy. E-mail: kafasu@vgta.vrn.ru. Area of research: mathematical modeling of hydraulic gas dynamics, systems of the equations in partial derivatives.

Barmetov Yuri Pavlovich, candidate of engineering sciences, associate professor of Voronezh State Technological Academy. E-mail: kafasu@vgta.vrn.ru. Area of research: systems of the equations in partial derivatives, reliability theory, automatic control theory.