

УДК 621.757.007.55

В.П. Поливцев, канд. техн. наук, доцент,

В.В. Поливцев, аспирант,

Е.Е. Мосин, студент

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33 г. Севастополь, Украина. 99053

E-mail: pvv@tci.com.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПОЛНЕНИЯ СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ ЕМКОСТИ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА ЧЕРЕЗ СОПЛО ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ

Приведены исследования истечения сжатого воздуха через сопло в полость постоянного объема. Сделан анализ известных математических моделей для различных термодинамических процессов с экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: истечение, воздух, расход, сопло, давление.

Постановка задачи. В различных системах пневмоавтоматики и в пневмоприводах используются полости постоянного объема, которые наполняются сжатым воздухом. Такой процесс наполнения характеризуется временем наполнения и увеличением давления в емкости. Время и давление при наполнении полости постоянного объема, влияют на динамические характеристики пневмоприводов или на время передачи пневматического сигнала в системах пневмоавтоматики. Правильный выбор физического процесса наполнения и стечения сжатого воздуха с его математическим обоснованием значительно определяют точность моделирования пневматических систем.

Анализ исследований и публикаций. Известны методы расчета полости постоянного объема, где процесс изменения состояния воздуха описывается уравнением энергетического баланса, адиабатическим или изотермическим процессом [1], а также методом расчета по экспоненциальным зависимостям [2, 3]. Данные методы основаны на применении различных уравнений массового расхода. Так как теоретический и фактический расход отличаются, в уравнение вводят коэффициент расхода, который корректирует расхождение между теоретическим и фактическим расходом воздуха. Данный коэффициент определяется экспериментально, а для теоретических расчетов выбирается по аналогии с уже известными параметрами конструкций пневмоэлементов. Погрешность расчетов давления наполнения и времени наполнения полости постоянного объема зависят, от выбранного процесса изменения состояния воздуха в полости и может составлять 10...40 % [1], от вида процесса истечения через сопло — адиабатического, изотермического 10...15 % и коэффициента расхода 30...50 % [3].

Целью статьи является определение физического процесса наполнения емкости постоянного объема и процесса истечения воздуха через сопло в емкость, математическая модель которого максимально приближена к реальному процессу. Определение влияния переменного показателя политропного процесса на точность определения величины давления наполнения и времени наполнения емкости постоянного объема в зависимости от уровня подводимого давления сжатого воздуха и площади поперечного сечения сопла. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей для определения минимальной погрешности представленных математических моделей.

Результаты исследований. Параметры воздуха, поступающего в полость постоянного объема, определяются процессом изменения состояния воздуха в полости и видом процесса истечения сжатого воздуха в полость. Процесс изменения состояния в полости постоянного объема перечислен процессами, представленными выше. Истечение воздуха из магистрали через сопло в полость постоянного объема описывается адиабатическим и изотермическим процессом, а также упрощенными формулами расхода [1–3].

Как показывают теоретические исследования [1], процесс изменения состояния воздуха в полости наполнения постоянного объема не совпадает ни с одним из элементарных термодинамических процессов, протекающих при постоянном показателе политропы. Экспоненциальные зависимости изменения давления в полости наполнения могут описывать только докритический режим истечения сжатого воздуха, так как в надкритическом режиме истечения зависимость изменения давления от времени линейная, и расход воздуха, поступающий в полость, остается постоянным.

Для дальнейших исследований процесса изменения состояния воздуха в полости постоянного объема будем пользоваться уравнением энергетического баланса, изотермическим процессом и политропным процессом с переменным показателем политропы.

Для адиабатического процесса истечения сжатого воздуха через сопло в емкость используют формулу массового расхода Сен-Венана и Ванцеля для докритического и надкритического режимов:

$$dG_M^{ad} = \mu S_M P_M \sqrt{\frac{2}{RT_M}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \sqrt{\left[\left(\frac{P_1}{P_M}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_1}{P_M}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}\right]} dt \quad \frac{P_1}{P_M} \geq 0,5282, \quad (1)$$

$$G_{MK}^{ad} = 0,4841 \mu S_M P_M \sqrt{\frac{2}{RT_M}} \quad \frac{P_1}{P_M} = 0,5282. \quad (2)$$

Здесь dG_M^{ad}, G_{MK}^{ad} – массовый расход и критический массовый расход поступающего в емкость сжатого воздуха; R – универсальная газовая постоянная; T_M – температура подводимого воздуха; P_M – давление воздуха в магистрали; P_1 – давление воздуха в полости ограниченного объема; S_M – площадь проходного сечения сопла (дресселя) на входе в полость; κ – показатель адиабатического процесса; μ – коэффициент расхода.

Выражение $\sigma\left(\frac{P_1}{P_M}\right) = \sqrt{\left(\frac{P_1}{P_M}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_1}{P_M}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}$ есть функция расхода для P_1/P_M от 0,5282 до 1,0.

Для изотермического процесса докритического и надкритического режимов истечения сжатого воздуха через сопло в емкость, используют следующие формулы расхода:

$$dG_{MK}^{u3} = \mu S_M P_M \sqrt{\frac{2}{RT_M}} \sqrt{\ln \frac{P_M}{P_1}} dt \quad \frac{P_1}{P_M} \geq 0,607, \quad (3)$$

$$G_M^{u3} = 0,7066 \mu S_M P_M \sqrt{\frac{2}{RT_M}} \quad \frac{P_1}{P_M} = 0,607. \quad (4)$$

В практических расчетах для докритического и надкритического режимов истечения, часто используют упрощенную формулу расхода, предложенную Прандтлем:

$$dG_M = \mu S_M P_M \sqrt{\frac{2}{RT_M}} \sqrt{\frac{P_1}{P_M} \left(1 - \frac{P_1}{P_M}\right)} dt \quad \frac{P_1}{P_M} \geq 0,5, \quad (5)$$

$$G_{MK} = 0,5 \mu S_M P_M \sqrt{\frac{2}{RT_M}} \quad \frac{P_1}{P_M} = 0,5. \quad (6)$$

Максимальный расход для всех трех видов зависимостей определяется надкритическим режимом истечения при критическом отношении давлений. Если проанализировать зависимости (2), (4), (6), то наибольший расход при $\mu = 1$ будет для надкритического истечения при изотермическом процессе и он на 46 % больше, чем при адиабатическом процессе. Упрощенная формула расхода дает значение массового расхода на 3 % больше, чем расход, рассчитанный по формуле расхода при адиабатическом процессе истечения. Так как коэффициент расхода μ определяют в основном экспериментальным путем и он всегда меньше 1, т.е. теоретический массовый расход воздуха, рассчитанный по зависимостям (1) – (6) всегда больше фактического в дальнейших исследованиях будем использовать формулу расхода Сен-Венана и Ванцеля для адиабатического процесса истечения, как наиболее близкую к реальному процессу истечения сжатого воздуха через сопло в емкость постоянного объема. Изменение расхода от времени поступающего в емкость можно определить из выражений (1), (3), (5) только при совместном решении с уравнением давления.

Уравнение изменения давления, полученное, для процесса наполнения полости постоянного объема с учетом уравнений энергетического баланса (при постоянном показателе политропного процесса $n = \kappa$) и надкритического режима истечения, учитывающего истечение воздуха для адиабатического процесса, имеет вид:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{n S_M P_M}{V_1} \sqrt{RT_M} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}}}, \quad \frac{P_1}{P_M} \geq \beta_{кр}. \quad (7)$$

Для докритического режима и адиабатического процесса истечения воздуха, состояние газа в емкости постоянного объема, описываемое уравнением энергетического баланса с постоянным ($n = \kappa$) и переменным показателем политропного процесса имеет вид:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{nS_M P_M}{V_1} \sqrt{RT_M} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \sqrt{\left(\frac{P_1}{P_M}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_1}{P_M}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}, \quad \frac{P_1}{P_M} \leq \beta_{KP}. \quad (8)$$

Здесь $\frac{dP_1}{dt}$ — изменение давления в полости наполнения; P_1 — давление газа в полости ограниченного объема; n — показатель политропного процесса; μ — коэффициент расхода; V_1 — объем полости. При $n = \kappa$, т.е. для адиабатического процесса $\beta_{KP} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$. Выражение (8) приведено для докритического, а выражение (7) — для надкритического режимов истечения сжатого воздуха с учетом уравнения для массового расхода и адиабатического процесса. Процесс в полости наполнения протекает при переменном показателе политропы, которая является функцией от давления. Если принять температуру воздуха поступающего в полость равной температуре окружающей среды $T_1 = T_a$, то показатель политропного процесса для истечения воздуха можно определить из выражения вида [1]:

$$n = 1 + \frac{Y_a}{Y_1} (\kappa - 1). \quad (9)$$

Здесь $Y_a = P_a / P_1$, $Y_1 = P_1 / P_M$, P_a — атмосферное давление.

Для изотермического процесса изменения состояния воздуха в полости постоянного объема используются те же уравнения изменения давления воздуха (7), (8), в которых показатель политропного процесса равен единице ($n=1$). Расход воздуха для надкритического режима истечения остается постоянным и показатель политропы остается постоянным, и равным его максимальному значению n для критического давления Y_1 . Поэтому выражение (9) применимо для уравнения (8) при условии $Y_1 = 0,5282 \dots 1,0$ и $Y_a = 0,01 \dots 0,5282$, т.е. для докритического режима истечения, а выражение (7), для надкритического режима истечения, где в зависимость (9) необходимо подставлять критическое значение безразмерного параметра давления. Уравнения (7), (8) не учитывают изменения температуры, как поступающего в емкость воздуха, так и воздуха в самой емкости и чаще всего она принимается постоянной и равной температуре окружающей среды. Эти теоретические зависимости (7)–(9) были использованы для расчетов и сравнения их с экспериментальными зависимостями.

Схема и внешний вид экспериментальной установки показаны на рисунках 1 и 2. Экспериментальная установка состоит из компрессора с ресивером (на рисунках не изображен), блока подготовки воздуха 1, распределителя 2, двух датчиков давления 3 и 7, датчика расхода 4, сопла 5 и емкости 6.

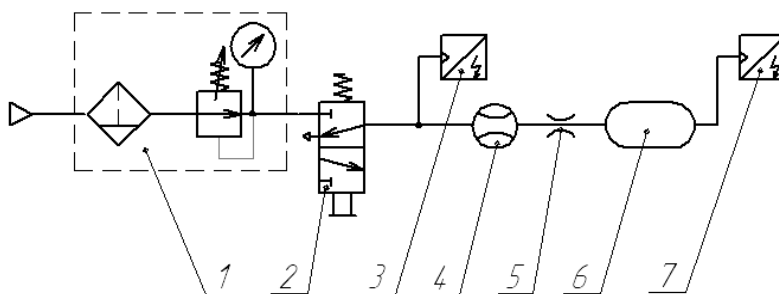


Рисунок 1 — Пневматическая схема экспериментальной установки

Исследования проводились для емкостей объемом 0,4 и 5 л, диаметром сопел 1,3 мм, 1,8 мм, 2,5 мм и избыточным давлением магистрали от $0,5 \times 10^5$ до 6×10^5 Па. В экспериментальном стенде используются аналого-цифровые датчики давления с диапазоном измерения $0,1 \dots 1 \times 10^6$ Па, точностью измерения $\pm 2\%$, повторяемостью $\pm 0,3\%$, временем прохождения сигнала 25 мс, аналого-цифровой датчик объемного расхода с диапазоном измерения $0 \dots 60$ л/мин, точностью измерения $\pm 5\%$, повторяемостью $\pm 3\%$, временем прохождения сигнала 50 мс, фирмы «FESTO» Германия. Датчик давления 4 и датчик объемного расхода 3 измеряют давление и расход воздуха на подающей в емкость магистрали. Датчик давления 5 измеряет давление в самой емкости постоянного объема. Коэффициент расхода для теоретических зависимостей определялся как отношение экспериментального расхода воздуха к теоретическому расходу $\mu = \frac{Q_{\text{эксп}}}{Q_{\text{теор}}}$. Коэффициент расхода для теоретических моделей находился в пределах от 0,701 до 0,799.

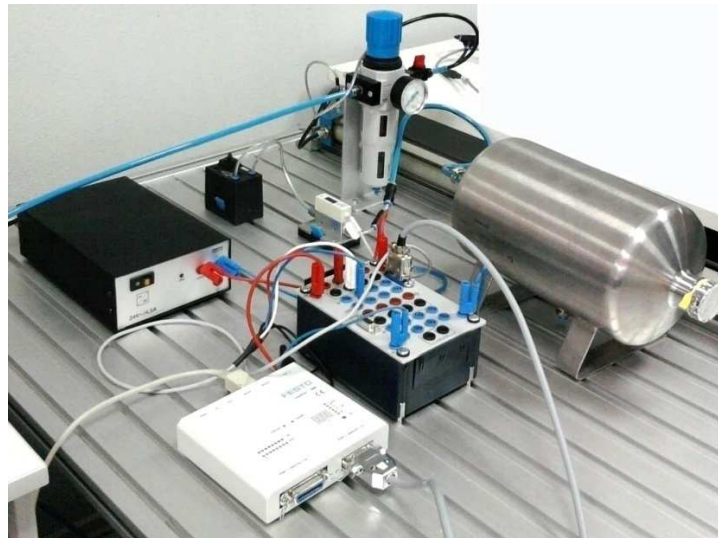


Рисунок 2 – Внешний вид экспериментальной установки

На рисунках 3, 4 изображены графические зависимости процесса наполнения емкости постоянного объема сжатым воздухом. Зависимости представлены параметром давления $P=f(t)$ и расхода $G=f(t)$, поступающего в емкость наполнения сжатого воздуха от времени при различных давлениях подводимой магистрали P_M . Зависимости представлены для различных теоретических процессов изменения состояния воздуха: уравнением энергетического баланса с постоянным показателем политропы 1, уравнением энергетического баланса с переменным показателем политропы 2, изотермическим процессом 3, экспериментальной зависимостью 4, откорректированным изотермическим процессом 5. На рисунках 3 и 4 давление подводимой магистрали представлено абсолютным давлением $P_M=2 \times 10^5$ Па и $P_M=6 \times 10^5$ Па.

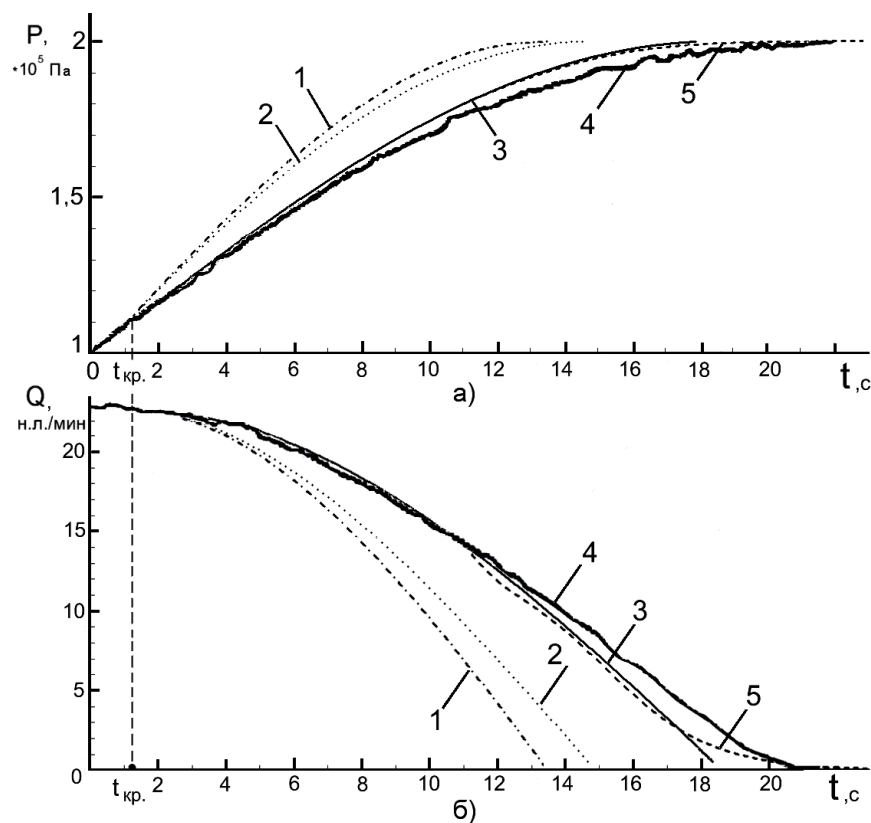


Рисунок 3 — Графические теоретические и экспериментальные зависимости ($P_M=2 \times 10^5$ Па, $V=5$ л, $S=1$ мм²):
а) давления от времени; б) расхода от времени

Для участка надкритического режима истечения на рисунках 4 функция давления от времени для теоретических и экспериментальных зависимостей является линейной. Угол наклона прямой зависит от параметров давления магистрали P_M , площади проходного сечения сопла S_M , то есть от поступающего в емкость расхода, который остается величиной постоянной при отношении давлений P_1/P_M в диапазоне от 0 до 0,528. Расход на рисунке 4 для надкритического режима истечения представляет горизонтальную прямую линию. На рисунке 3 представлен только докритический режим истечения, а на рисунке 4 как надкритический, так и докритический режимы истечения.

Для докритического режима истечения, функция давления от времени для процессов, описанных теоретическими и экспериментальными зависимостями, представленными выше, является нелинейной и последовательно приближается к давлению питания P_M . Функция расхода также является нелинейной убывающей до нуля. Как видно из графиков давления и расхода (рисунки 3, 4), наиболее близкой к экспериментальным зависимостям, является графическая зависимость, описываемая изотермическим процессом наполнения полости постоянного объема. Погрешность при расчете динамических параметров для данного процесса, представленного на рисунке 3, 4 теоретическими и экспериментальными графическими зависимостями, составляет: по параметру давления — 5...6 %, по параметру времени наполнения — 12...15 %. У других термодинамических процессов эта погрешность для параметра давления составляет от 20 до 30 %, а для параметра времени наполнения составляет от 30 до 50 %. Время процесса наполнения сжатым воздухом емкости постоянного объема 5 л (рисунки 3 и 4) лежит в пределах от 10 до 40 секунд для вышеуказанных диаметров сопел.

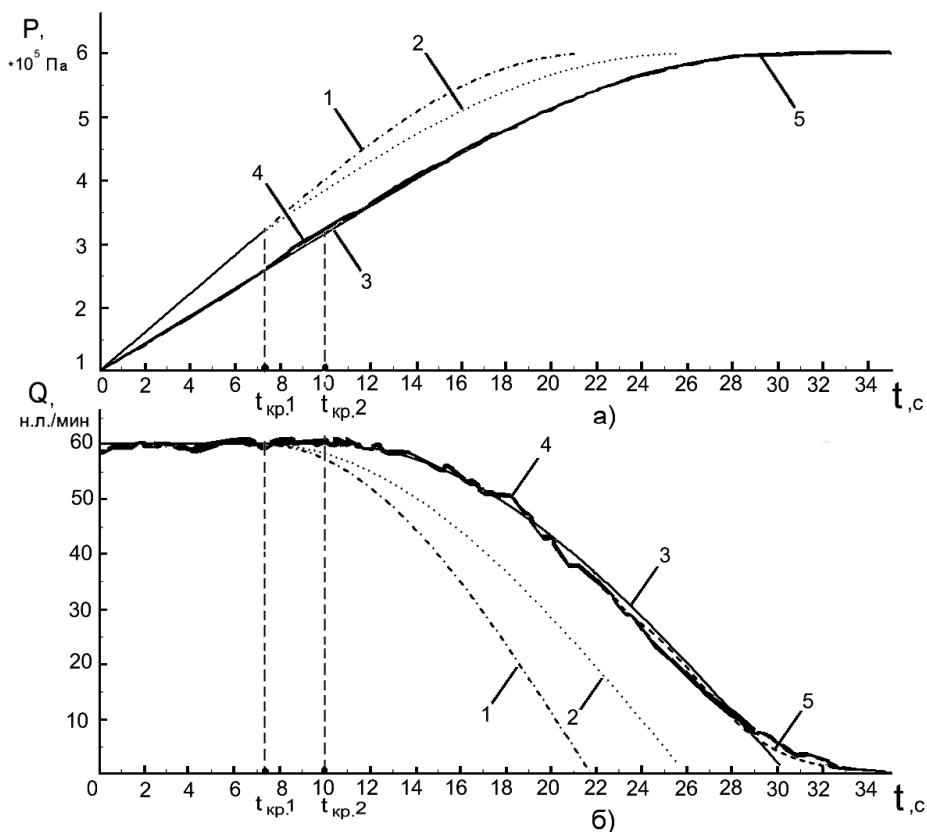


Рисунок 4 — Графические теоретические и экспериментальные зависимости ($P_M = 6 \times 10^5$ Па, $V = 5$ л, $S = 1$ мм²):
а) давления от времени; б) расхода от времени

Проанализировав теоретические и экспериментальные графические зависимости для изотермического процесса наполнения емкости для графиков давления и расхода, представленных на

рисунках 3 и 4, можно заметить, что теоретическая функция расхода $\sigma\left(\frac{P_1}{P_M}\right) = \sqrt{\left(\frac{P_1}{P_M}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_1}{P_M}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}$ для

выражения (1) и функция нарастания давления отклоняются от экспериментальных зависимостей при отношении давлений P_1/P_M от 0,9 до 1,0.

Экспериментальные и теоретические графические зависимости функции расхода для отношения давлений P_1/P_M в диапазоне от 0,9 до 1,0 и давлений питания от $0,5 \times 10^5$ до $6,0 \times 10^5$ Па, диаметров сопла 1×10^{-6} м, 2×10^{-6} м и емкости объемом 5×10^{-3} м³ изображены на рисунке 5. Теоретическая функция расхода для адиабатического процесса истечения обозначена Т. Экспериментальные функции расхода для давлений 2, 3, 4, 6×10^5 Па обозначены на рисунке 5 как кривые 2, 3, 4, 6. Аппроксимируемые полиномом зависимости обозначены 2п, 3п, 4п, 6п.

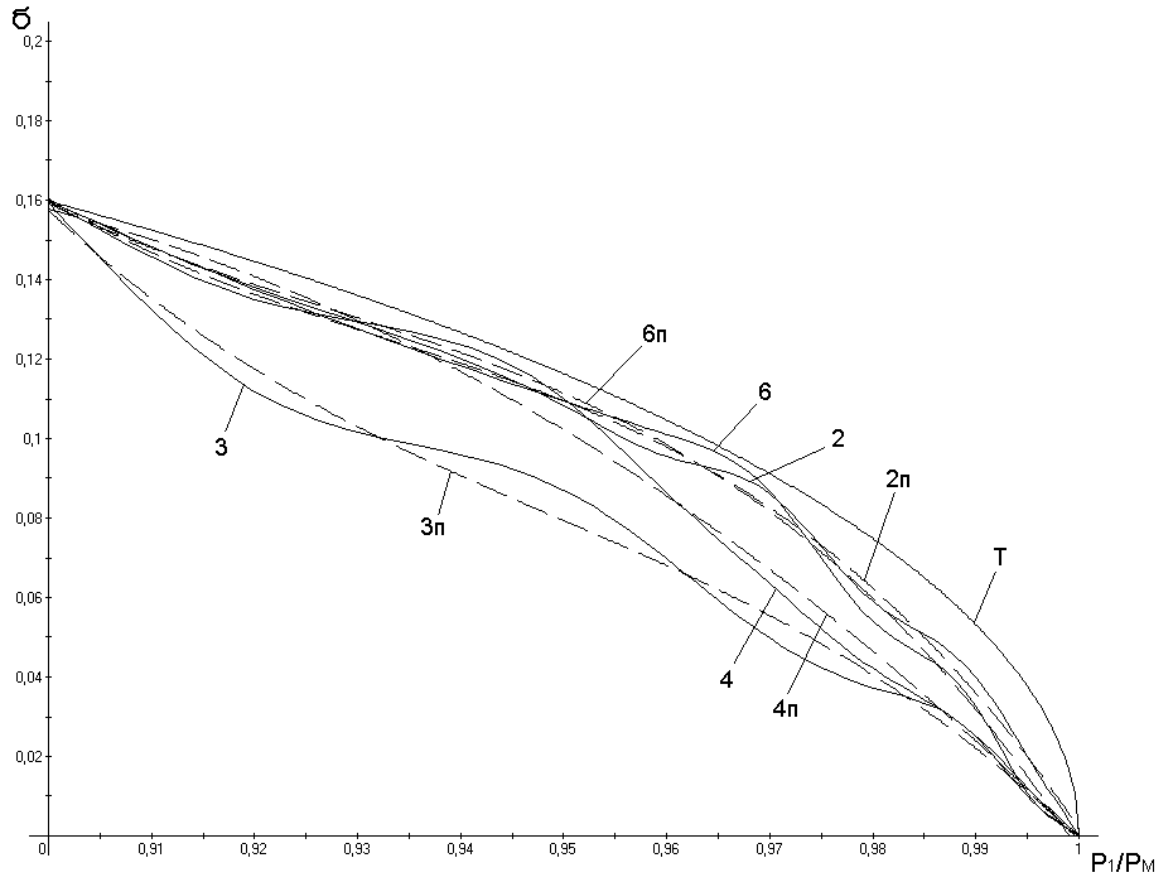


Рисунок 5 — Графические теоретические и экспериментальные зависимости функции расхода от отношения давлений P_1/P_M

Аппроксимируя экспериментальные зависимости (рисунок 5) были получены следующие полиномы функций расхода:

для давления $P_M = 2,0 \times 10^5$ Па

$$\sigma = -219,50179 \left(\frac{P_1}{P_M} \right)^3 + 614,24088 \left(\frac{P_1}{P_M} \right)^2 - 573,79182 \left(\frac{P_1}{P_M} \right) + 179,05467 ; \quad (10)$$

для давления $P_M = 3,0 \times 10^5$ Па

$$\sigma = -189,05977 \left(\frac{P_1}{P_M} \right)^3 + 538,37819 \left(\frac{P_1}{P_M} \right)^2 - 512,15183 \left(\frac{P_1}{P_M} \right) + 162,83236 ; \quad (11)$$

для давления $P_M = 4,0 \times 10^5$ Па

$$\sigma = -8,72764 \left(\frac{P_1}{P_M} \right)^3 + 15,39336 \left(\frac{P_1}{P_M} \right)^2 - 7,18111 \left(\frac{P_1}{P_M} \right) + 0,51450 ; \quad (12)$$

для давления $P_M = 6,0 \times 10^5$ Па

$$\sigma = -194,95428 \left(\frac{P_1}{P_M} \right)^3 + 542,15907 \left(\frac{P_1}{P_M} \right)^2 - 503,40463 \left(\frac{P_1}{P_M} \right) + 156,19610 . \quad (13)$$

Выражения (10)–(13) для функции расхода позволяют корректировать теоретическую зависимость давления и расхода в диапазоне отношения давлений P_1/P_M от 0,9 до 1,0 для изотермического процесса и уменьшить погрешность времени наполнения емкости постоянного объема с 12...15 % до 2...5 %.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. Как показывают сравнение экспериментальных и теоретических исследований, процесс изменения состояния воздуха в полости наполнения постоянного объема наиболее близко описывается изотермическим процессом, как с длительностью процесса от 10 до 40 с. Другие термодинамические процессы дают погрешность теоретических вычислений до 40 % по сравнению с полученными экспериментальными данными.

2. Экспериментальные исследования показывают, что для надкритического и докритического режимов истечения сжатого воздуха через сопло в полость постоянного объема, при увеличении давления в подводящей магистрали, расход поступающего в емкость воздуха возрастает.

3. Для процесса регулирования давления, например в регуляторах давления, предпочтительным является надкритический режим истечения, так как он имеет линейную зависимость давления и расхода.

4. В уравнении расхода для истечения адиабатического процесса, функция расхода при докритическом режиме, в диапазоне отношения давлений P_1/P_M от 0,9 до 1,0 не соответствует экспериментальным данным и дает погрешность по времени наполнения до 15 %. Эта погрешность может быть уменьшена до 2...5 % применением уравнений (10)–(13), полученных методом аппроксимации экспериментальных зависимостей.

5. Для уменьшения погрешностей расчета динамических параметров пневмосистем максимальное давление наполнения емкости P_1 не должно превышать соотношения $0,85 P_M$, то есть от давления питания. При превышении этого соотношения для расчетов следует пользоваться зависимостями (10)–(13).

В дальнейших исследованиях предполагается расширить диапазон давлений сжатого воздуха до 1×10^6 Па, диаметр подаваемых сопел до 10 мм, объем емкости до 10 л, а также провести исследования по истечению сжатого воздуха из полости постоянного объема и определить влияние температуры поступающего воздуха и изменение температуры воздуха в емкости на процесс наполнения полости постоянного объема.

Библиографический список использованной литературы

1. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин / Е.В. Герц. — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с.
2. Федорец В.А. Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / В.А. Федорец, М.Н. Педченко, А.Ф. Пичко. — К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. — 375 с.
3. Дмитриев В.Н. Основы пневмоавтоматики / В.Н. Дмитриев, В.Г. Градецкий. — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.

Поступила в редакцию 31.10.2011 г.

Полівцев В.П., Полівцев В.В., Мосін Е.Е. Дослідження процесу наповнення стислим повітрям ємкості постійного об'єму через сопло постійного перетину

Наведено дослідження виділення стислого повітря через сопло у порожнину постійного об'єму. Зроблено аналіз відомих математичних моделей для різних термодинамічних процесів з експериментальними дослідженнями.

Ключові слова: виділення, повітря, витрата, сопло, тиск.

Polivcev V.P., Polivcev V.V., Mosin E.E. Research of Process Filling with the Compressed Air of Capacity through Nozzle of Permanent Section

Researches of expiration of the compressed air are resulted through a nozzle in the cavity of permanent volume. The analysis of the known mathematical models is done for different thermodynamics processes with experimental researches.

Keywords: expiration, air, expense, nozzle, pressure.