

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 БЫСТРОПРОТЕКАЮЩЕГО ПРОЦЕССА****НАПОЛНЕНИЯ СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ ЕМКОСТИ ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА**

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

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

Постановка задачи. В различных пневматических системах и пневмоприводах для расчетов требуются такие параметры как время наполнения, давление и температура в емкости постоянного объема. Время наполнения, давление и температура воздуха при наполнении полости постоянного объема, влияют на динамические характеристики пневмоприводов или на время передачи пневматического сигнала в системах пневмоавтоматики. По времени наполнения процессы делят на: сверхбыстропротекающие — меньше 1 секунды; быстро протекающие — от 1 до 10 секунд; медленно протекающие — от 10 до 60 секунд; сверхмедленнопротекающие — свыше 60 секунд.

Анализ известных исследований и публикаций. Известны методы расчета полости постоянного объема, где процесс изменения состояния воздуха описывается уравнением энергетического баланса, адиабатическим или изотермическим процессом [1–3]. Погрешность расчетов при определении времени наполнения полости постоянного объема зависит от выбранного процесса изменения состояния воздуха в емкости и может составлять 10...40 % [1]; а также от выбранного вида процесса истечения (адиабатического, изотермического) и может составлять 10...15 %; и от коэффициента расхода 30...40 % [3]. Необходимо также принимать во внимание учитывается ли в уравнении состояния изменение температуры газа в емкости и может составлять 5...10 %. Для быстро протекающих процессов время наполнения экспериментальное может быть в два раза больше, чем теоретическое, расчетное.

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. Необходимо также определить влияние 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 и привести сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей для определения минимальной погрешности представленных математических моделей.

Результаты исследований. Процесс наполнения воздухом емкости постоянного объема может протекать с точки зрения состояния газа в этой емкости по адиабатическому, изотермическому, политропному процессу и на основании уравнения энергетического баланса, а процесс истечения воздуха через сопло в емкость может описываться адиабатическим, изотермическим процессом, и упрощенной формулой Пранделя.

Уравнение изменения давления, полученное для политропного процесса наполнения емкости постоянного объема и надкритического адиабатического режима истечения имеет вид:

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

Для подкритического режима политропного процесса наполнения емкости постоянного объема и адиабатического процесса истечения воздуха уравнение имеет вид:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\eta \mu S_M P_M}{V_1} \sqrt{RT_M} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_1}{P_M} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_M} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \frac{P_1}{P_M}} \leq \beta_{кр} . \quad (2)$$

Здесь $\frac{dP_1}{dt}$ — изменение давления в емкости наполнения; P_1 — давление газа в емкости постоянного объема; P_M — давление воздуха в подводимой к емкости магистрали; n — показатель политропного процесса; μ — коэффициент расхода; V_1 — объем емкости; R — универсальная газовая постоянная; S_M — площадь сечения сопла; T_M — температура воздуха в магистрали.

Выражения (1) и (2) отражают три выше перечисленные процесса состояния воздуха в емкости (кроме адиабатического процесса). При $n=k=1,4$ процесс описывается уравнением энергетического баланса, а при $n=1$ процесс изотермический. Выражение (2) приведено для подкритического, а выражение (1) для надкритического режимов истечения сжатого воздуха с учетом уравнения для массового расхода Сен Вена и Ванцеля. Процесс в полости наполнения в общем виде может протекать при переменном показателе политропы, которая является функцией от давления. Если принять температуру воздуха поступающего в емкость, равной температуре магистрали и окружающей среды $T_1 = T_M = T_a$, то показатель политропного процесса можно определить из выражения [1]:

$$n = 1 + \frac{Y_a}{Y_1} (k - 1) . \quad (3)$$

Здесь $Y_a = \frac{P_a}{P_M}$; $Y_1 = \frac{P_1}{P_M}$; P_a — атмосферное давление.

Вначале наполнения показатель политропы равен максимальному значению и может быть равен $n=k$, т.е. показателю при адиабатическом процессе, а с повышением давления в полости он уменьшается, так как процесс изменения состояния воздуха стремится к изотермическому процессу $n=1$. Расход воздуха для надкритического режима истечения остается постоянным и показатель политропы будет постоянным, равным его максимальному значению n для критического давления $Y_1 = Y_{кр}$. Для выражения (1), т.е. для надкритического режима истечения в зависимость (3) необходимо подставлять критическое значение безразмерного параметра давления $Y_{кр}$. Выражение (3) применимо для уравнения (2) при условии $Y_1 = Y_{кр} \dots 1,0$ и $Y_a = 0,01 \dots Y_{кр}$, т.е. для подкритического режима истечения.

Для учета состояния газа в емкости по уравнению энергетического баланса, изотермическому или политропному процессу в уравнение (2), для политропного процесса истечения воздуха через сопло в емкость, подставляем политропу Цейнера [1, 2]. С учетом подкритического режима уравнение имеет вид:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{n\mu S_M P_M}{V_1} \sqrt{RT_M} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \sqrt{\left(\frac{P_1}{P_M}\right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_1}{P_M}\right)^{\frac{n+1}{n}}} . \quad (4)$$

Для политропного процесса истечения воздуха через сопло в емкость и политропного процесса состояния газа в емкости, и надкритического режима будем пользоваться уравнением (1). Полагая, что истечение воздуха через сопло в емкость для политропного процесса происходит с показателем политропы, который находится в пределах $1 < n < 1,4$, и для определения показателя политропы Цейнера будем пользоваться выражением (3).

Для учета состояния газа в емкости по уравнению энергетического баланса, изотермическому и политропному процессу и для изотермического процесса истечения воздуха через сопло в емкость получаем следующее уравнение [1]:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{n\mu S_M P_M}{V_1} \sqrt{2RT_M} \sqrt{\ln \frac{1}{\frac{P_1}{P_M}} \frac{P_1}{P_M}} \geq 0,607 , \quad (5)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = 0,7066 \frac{n\mu S_M P_M}{V_1} \sqrt{2RT_M} \frac{P_1}{P_M} = 0,607 . \quad (6)$$

Уравнение (5) приведено для подкритического, а уравнение (6) критического и надкритического истечения воздуха.

Уравнения (1)–(6) дают девять комбинаций для расчета давления воздуха в емкости наполнения для различных термодинамических процессов состояния газа и различных процессов истечения воздуха через сопло в емкость. Изменение состояния сжатого воздуха в емкости наполнения по адиабатическому закону в данной работе не рассматривалось, так как этот процесс приводит к наибольшей погрешности по сравнению с экспериментальными исследованиями и достаточно проанализирован в работе [1].

Для определения температуры воздуха в емкости постоянного объема V_1 процесса наполнения, продифференцируем известное уравнение состояния газа [2] $P_1 V_1 = m R T_1$, преобразуем его и получим выражение вида:

$$V_1 dP_1 = R(T_1 dm + m dT_1). \quad (7)$$

Учитывая, что изменение массы воздуха в емкости объемом V_1 равно $dm = G_1 dt$, а масса воздуха равна $m = P_1 V_1 / R T_1$, запишем уравнение состояния газа (7) с учетом массы и расхода в виде:

$$dT_1 = T_1 \frac{dP_1}{P_1} - \frac{R T_1^2}{P_1 V_1} G_1 dt. \quad (8)$$

Здесь P_1, T_1 — соответственно текущие значения давления и температуры в емкости наполнения; G_1 — массовый расход подводимого в емкость воздуха. Для определения изменения температуры воздуха в емкости уравнение (8) необходимо решать совместно с уравнениями (1), (2), (4) — (6) с учетом выражения (3) для политропного процесса, а для адиабатического процесса состояния воздуха в емкости показатель политропы принимаем равным $n = k = 1,4$. Температура сжатого воздуха в емкости наполнения рассчитывается для шести комбинаций уравнений за исключением, где изменение состояния газа в емкости описывается изотермическим процессом.

Подставив в выражение (8) давление в емкости наполнения для политропического процесса $dP_1 = \frac{n T_1 R}{V_1} G_1 dt$, получим:

$$dT_1 = \frac{R T_1}{P_1 V_1} G_1 (n T_1 - T_1) dt. \quad (9)$$

Анализируя уравнение (9), можно заметить, что температура воздуха в емкости наполнения зависит от величины давления P_1 , от поступающего из магистрали расхода воздуха G_1 и от разности температур поступающего из магистрали и находящегося в емкости воздуха.

Для адиабатического изменения состояния воздуха в емкости постоянного объема изменение температуры представлено следующей зависимостью:

$$dT_1 = T_{1H} \left(\frac{dP_1}{P_{1H}} \right)^{\frac{k-1}{k}} dt. \quad (10)$$

Здесь T_{1H}, P_{1H} — соответственно начальная температура и давление в емкости; k — показатель адиабатического процесса.

Для состояния газа в емкости постоянного объема, описываемого уравнением энергетического баланса, температура сжатого воздуха может быть определена из следующего выражения [1]:

$$dT_1 = \frac{k dP_1 T_M}{dP_1 - P_{1H} + k P_{1H} \frac{T_M}{T_{1H}}} dt. \quad (11)$$

Здесь T_M — температура сжатого воздуха, поступающего из магистрали в емкость постоянного объема.

Выражение (9) учитывает изменение температуры в полости наполнения в общем виде; выражение (10) — изменение температуры для процесса сжатия воздуха по адиабатическому процессу; выражение (11) учитывает изменение температуры в полости наполнения, не подчиняющееся не одному из простейших законов.

Эксперименты проводились на экспериментальной установке [4] для емкостей объемом 0,4 литра, 5 литров, 50 литров; избыточном давлении магистрали от 0,5 до 8 бар и для диаметров сопел 1 мм, 1,5 мм, 2,0 мм, 3,0 мм, 4,0 мм. Измерения проводились цифро-аналоговыми датчиками расхода с диапазоном измерения 0...60 и 0...600 л/мин, погрешностью измерения $\pm 5\%$; аналоговыми датчиками температуры с диапазоном измерения от -50° до $+150^\circ\text{C}$ и инерционностью 0,5 секунды; цифро-аналоговыми датчиками давления с диапазоном измерения 0,1...1,0 МПа и точностью $\pm 2\%$.

Результаты экспериментальных и теоретических зависимостей процесса наполнения полости постоянного объема сжатым воздухом представлены на рисунках 1, 2. На рисунках представлены графические зависимости давления наполнения от времени $P = f(t)$; массового расхода от времени $G = f(t)$; температуры от времени $T = f(t)$ для абсолютного давления подаваемого сжатого воздуха 2...6 бар и для адиабатического, политропного и изотермического процессов истечения.

На рисунках 1 и 2 представлены следующие графические зависимости давления и массового расхода от времени: 1 – для уравнения энергетического баланса и адиабатического истечения; 2 – для политропного процесса и адиабатического истечения; 3 – для политропного процесса и истечения по политропе Цейнера; 4 – изотермического процесса и адиабатического истечения; 5 – экспериментальная кривая. Температура воздуха на рисунках 1, 2 для кривых 1, 2 и 3 представлена для тех же законов состояния и закона истечения сжатого воздуха, как и для представленных выше давления и массового расхода, и рассчитывалась по зависимости (9). Графические зависимости температуры обозначены: 5 – экспериментальная кривая; 6 – для уравнения энергетического баланса, адиабатического истечения и зависимости (11); 7 – для политропного процесса и адиабатического истечения, зависимости (10); 8 – для политропного процесса и истечения по политропе Цейнера, зависимости (11); 9 – для уравнения энергетического баланса и адиабатического истечения для зависимости (9).

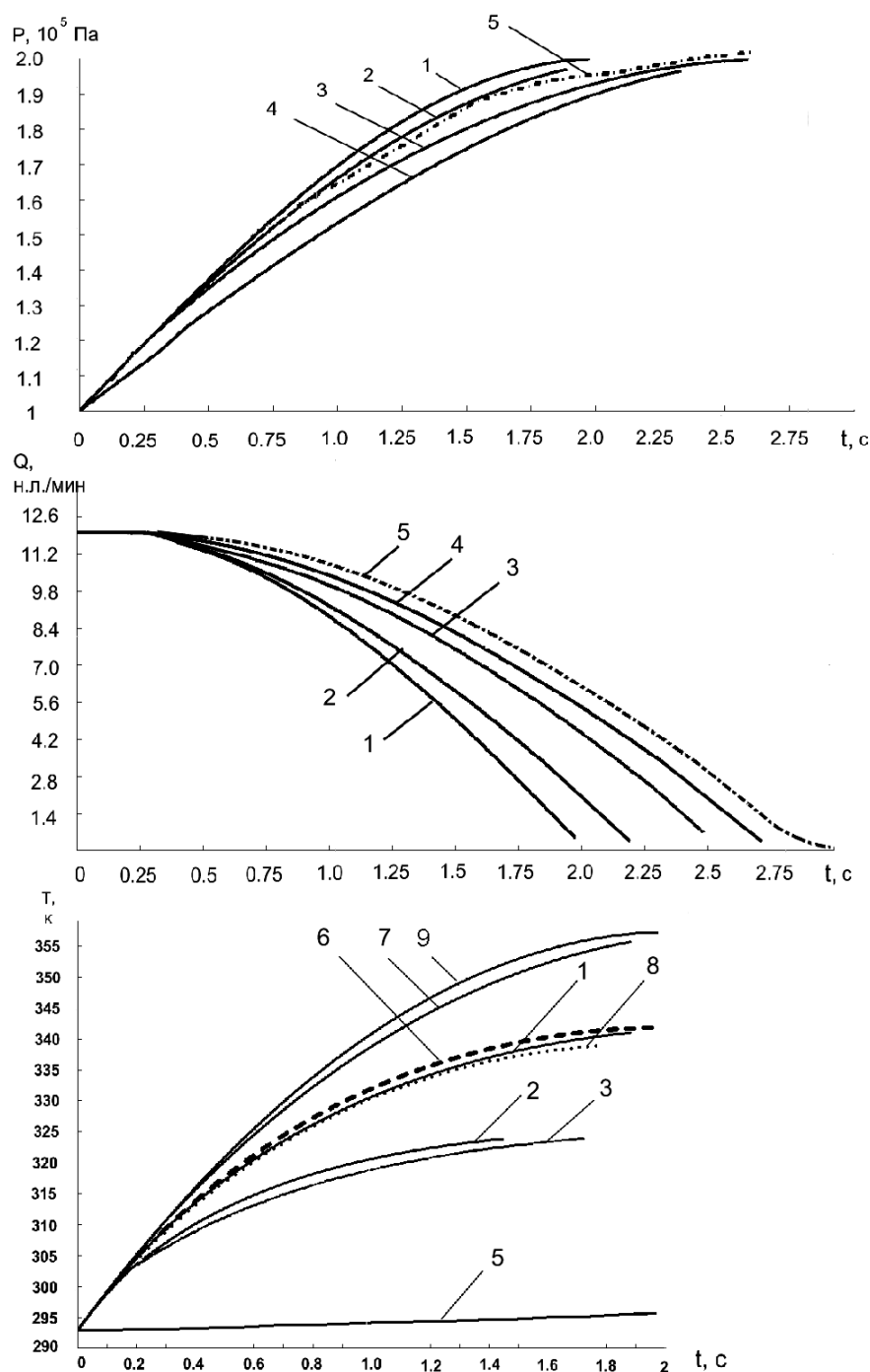


Рисунок 1 – Теоретические и экспериментальные зависимости давления, расхода и температуры от времени при наполнении ($P = 2$ бар)

Для небольших давлений (рисунок 1) наиболее близкой к экспериментальным зависимостям для кривых давления и массового расхода является политропный процесс изменения состояния воздуха в емкости и политропный процесс истечения по политропе Цейнера. Реальное изменение температуры воздуха минимальное и практически не описывается ни одним из приведенных процессов.

При давлениях от 5 до 12 бар теоретические и экспериментальные зависимости давления и расхода воздуха имеют наибольшее совпадение для кривых 4 и 3. Графические зависимости температуры теоретической и экспериментальной также наиболее близко совпадают с политропным процессом наполнения при истечении воздуха по политропе Цейнера.

Погрешность изменения давления между теоретической и экспериментальной зависимостями для приведенных выше законов лежит от 5 до 40 %, а для массового расхода от 15 до 60 %.

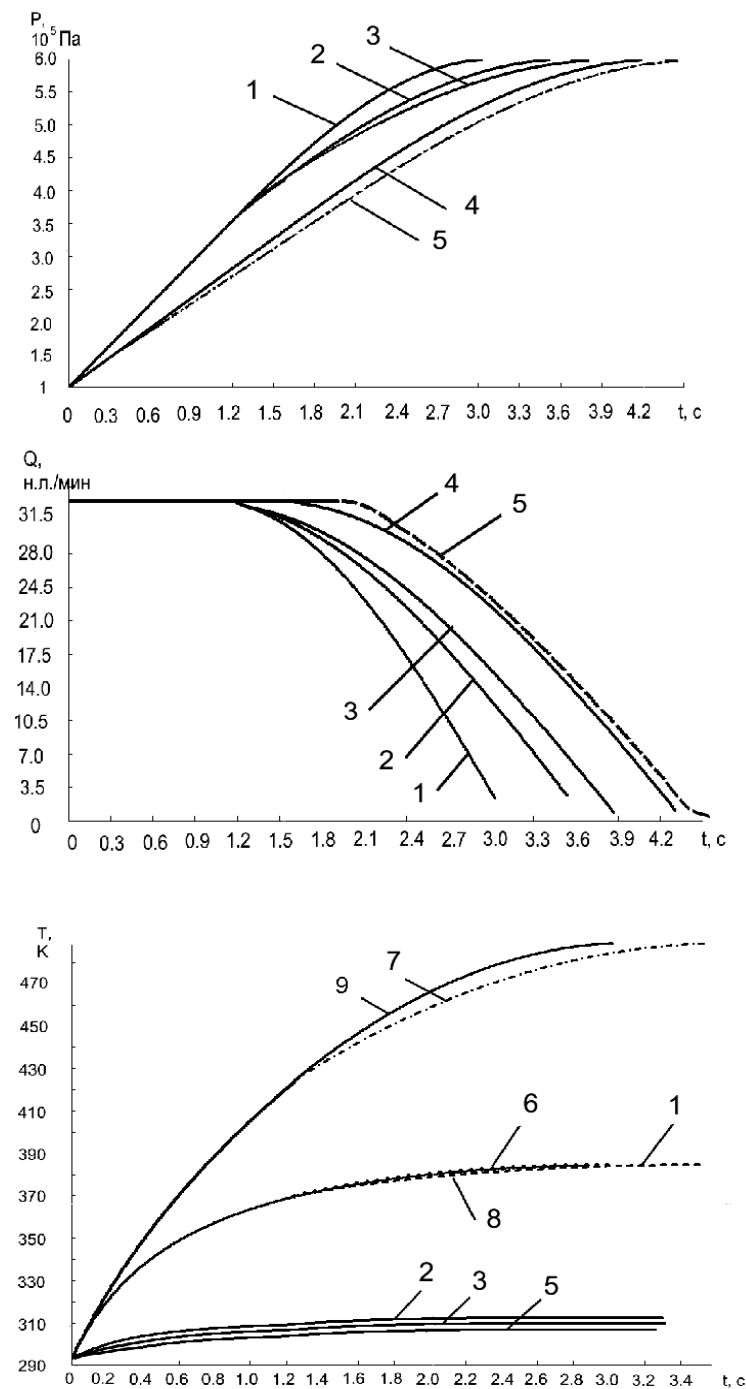


Рисунок 2 – Теоретические и экспериментальные зависимости давления, расхода и температуры от времени при наполнении ($P = 6$ бар)

Температура воздуха в емкости наполнения, вычисленная для различных термодинамических процессов, представленных зависимостями (1), (2), (4), отличается от экспериментальных данных реального процесса: для зависимости (10) на 20...63%; для зависимости (11) — на 15...27%; для зависимости (9) — на 1,5...22%. Наилучшей сходимостью для температуры воздуха в емкости наполнения между экспериментальной и теоретической зависимостью является уравнение (9). Чем больше объем полости наполнения, тем больше абсолютное повышение температуры воздуха при одних и тех же сечениях сопла и магистрального давления. Для небольших давлений (до 4 бар) повышением температуры при наполнении можно пренебречь.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. Как показывают экспериментальные исследования, температура сжатого воздуха повышается по экспоненциальной зависимости. Величина повышения температуры в экспериментах значительно меньше, чем представлено в зависимостях (9)–(11). Данные зависимости не учитывают того, что подведенная со сжатым воздухом теплота, сначала расходуется на частичное расширение газа после выхода воздуха из сопла в емкость (температура понижается; эффект Джоуля–Томпсона), а затем на частичное сжатие газа после смешивания с воздухом, находящимся в емкости (температура повышается).

2. Результаты сравнения теоретических и экспериментальных зависимостей температуры воздуха в емкости наполнения отличаются от представления данного процесса, протекающего при чисто адиабатическом сжатии, и наиболее точно описывается уравнением (9) для политропного процесса наполнения.

3. В математических моделях для различных термодинамических процессов состояния газа, представленных уравнениями (1), (2), (4) – (6) изменение давления P_1 в емкости наполнения не зависит от такого параметра, как температура воздуха T_1 в емкости, а зависит от температуры подаваемого из магистрали сжатого воздуха, которая выбирается постоянной, что приводит к погрешности расчетов.

Целью дальнейших исследований является описание процесса наполнения емкости постоянного объема через уравнения состояния для реального газа, что позволит уменьшить погрешность при расчете динамики процессов в устройствах пневмоавтоматики.

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.
4. Полищев В.П. Исследование процесса наполнения сжатым воздухом емкости постоянного объема через сопло постоянного сечения. / В.П. Полищев, В.В. Полищев // Вестник СевНТУ. Сер. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. — Севастополь, 2012. — Вып. 125. — С. 96–102.

Поступила в редакцию 26.12.2012 г.

Поліщев В.П., Поліщев В.В., Мусін Є.Є. Дослідження швидкоминучого процесу наповнення стисненням повітрям ємності постійного об'єму

Наведено дослідження витікання стисненого повітря в порожнину постійного об'єму. Зроблено аналіз відомих математичних моделей для різних термодинамічних процесів і проведено порівняльний аналіз з експериментальними дослідженнями.

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

Polivcev V.P., Polivcev V.V., Mosin Y.Y. Study of the high-speed process of filling a constant volume container with compressed air

The study of the compressed air efflux into a constant volume container is presented. The analysis of the known mathematical models for different thermodynamic processes is carried out, and the comparative analysis with experimental research is conducted.

Keywords: efflux, air, flow rate, nozzle, pressure.