

УДК 621.757.007.52

В.П. Поливцев, канд. техн. наук, доцент, В.В. Поливцев, аспирант*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33 г. Севастополь, Украина. 99053**E-mail: pvv@tci.com.ua***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СОПЛО В АТМОСФЕРУ***Приведены исследования истечения сжатого воздуха через сопло в атмосферу. Приведена математическая модель для определения коэффициента расхода воздуха.***Ключевые слова:** *истечение, воздух, расход, сопло, давление.*

В современных машинах и механизмах достаточно широко применяется пневматический привод и различные пневматические системы, работающие на сжатом воздухе. Конструкции приводов и пневматических систем используют разные по форме и объему полости, емкости в которых происходит процесс истечения сжатого воздуха в атмосферу или наполнение полости, в которой в начальный момент воздух находится под атмосферным давлением. При проектировании таких систем требуется динамический расчет основных ее характеристик. В литературе освещены вопросы посвященные исследованиям процесса истечения сжатого воздуха в полость или атмосферу, но некоторые физические явления, происходящие при истечении воздуха, требуют дальнейших исследований. Для расчета теоретического расхода воздуха истекающего через сопло в атмосферу чаще всего пользуются методом основанным на перепаде давления, который описывается известным уравнением Сен-Венана Ванцеля. В данном уравнении вводят коэффициент расхода, который приводит данное уравнение для его соответствия фактическому расходу. Для реальной конструкции пневмопривода или элементов пневмосистемы коэффициент расхода определяют экспериментальным путем. При проектировании новых пневмоэлементов коэффициент расхода определяют по аналогии с известными конструкциями [1–3]. При таком подходе значительно возрастает погрешность расчетов, так как нет данных для определения теоретического коэффициента расхода даже для такого простого элемента как сопло.

Целью данной публикации является определение теоретического коэффициента расхода соответствующего экспериментальному при истечении сжатого воздуха через сопло в атмосферу, что позволит производить расчеты динамических параметров конструкции элементов пневмосистем и пневмоприводов еще на стадии их проектирования и на основании расчетов вносить изменения в конструкции.

Начальный момент (начальные условия) процесса наполнения через сопло полости постоянного или переменного объема имеющей атмосферное давление и начальный момент процесса опорожнения через сопло полости постоянного или переменного объема в атмосферу аналогичен процессу истечения сжатого воздуха из неограниченного объема через сопло в атмосферу. Так как процесс истечения сжатого воздуха из емкости неограниченного объема через сопло в атмосферу является общим и входит составной частью в другие выше перечисленные процессы, были проведены экспериментальные исследования данного процесса.

Расход газа в процессе наполнения полости ограниченного объема через короткую насадку из полости неограниченного объема описывается уравнением Сен-Венана Ванцеля представленными выражениями:

$$G = \mu S P_M \sqrt{\frac{1}{RT_M} \frac{2n}{n-1} \left[\left(\frac{P_1}{P_M} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_1}{P_M} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]}, \quad P_1 / P_M \geq \beta_{KP} \quad (1)$$

$$G = \mu S P_M \sqrt{\frac{1}{RT_M} \frac{2n}{n+1} \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{n}}}, \quad P_1 / P_M \leq \beta_{KP} \quad (2)$$

где G – массовый расход газа, P_M – давление газа перед насадкой, P_1 – давление газа в полости ограниченного объема, S – площадь проходного сечения насадки, R – универсальная газовая постоянная, T_M – температура газа перед насадкой, n – показатель политропного процесса и при $n = k$, то есть для

адиабатического процесса $\beta_{KP} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$.

Уравнение массового расхода (1) записано для докритического режима истечения газа, а уравнение (2), для надкритического режима истечения газа. Схема экспериментальной установки, позволяющей провести исследования процесса истечения сжатого воздуха в атмосферу представлена на рисунке 1.

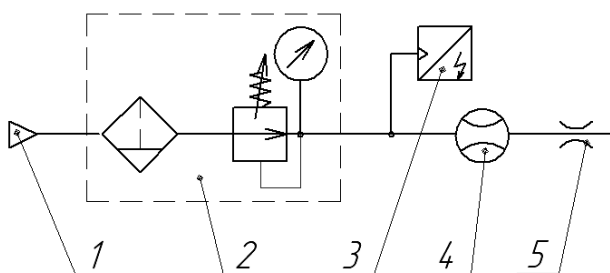


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Установка состоит из компрессора с ресивером 1, блока подготовки воздуха с вентилем 2, датчика давления 3, датчика расхода 4, сопла 5 и гибких шлангов. Давление сжатого воздуха в ресивере в процессе истечения через сопло остается постоянным. Поэтому для данного физического процесса будет справедливо уравнение (1) и (2) для нахождения теоретического массового расхода истекающего сжатого воздуха в атмосферу. В уравнении (1) давление после сопла равно атмосферному давлению $P_1 = P_a$. В уравнении (1) и (2) входит коэффициент расхода, который определяется как отношение фактического (экспериментального) расхода к теоретическому $\mu = Q_T / Q_\phi$. Данный коэффициент

может быть больше нуля, но не превышать единицы. Не всегда представляется возможным определить фактический расход сжатого воздуха особенно на стадии проектирования пневмоэлементов, а следовательно и определить коэффициент расхода и реальный расход воздуха. Коэффициент расхода зависит от формы сопла, площади сечения сопла, давления на входе сопла и других параметров. Коэффициент расхода можно представить следующей зависимостью:

$$\mu = \mu_\xi \mu_\phi \mu_\chi, \quad (3)$$

где μ_ξ – коэффициент расхода за счет потерь от сопротивления, которое зависит от местных потерь на входе сопла. Потери за счет местных сопротивлений зависят от формы сечения сопла достаточно хорошо исследованы и представлены в литературе [1,2]. Коэффициент расхода μ_ξ можно определить из выражения вида:

$$\mu_\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}}. \quad (4)$$

где ξ – коэффициент местных потерь, зависящий от формы и размеров сопла.

На рисунке 2 представлены формы сопел имеющих различный коэффициент местных потерь, который находящийся в пределах 0,05...0,5. В экспериментальных исследованиях применялась форма сопла, представленная на рисунке 2, а.

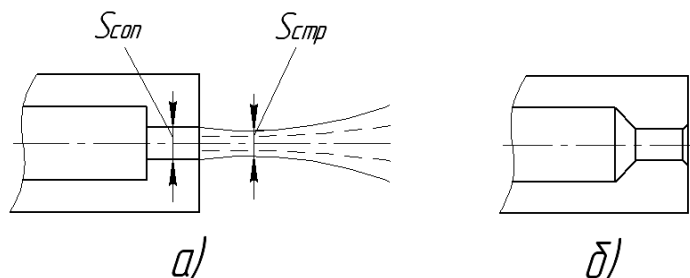


Рисунок 2 – Формы сопел и формирование струи сжатого воздуха при истечении в атмосферу

В выражение (3) входит коэффициент $\mu_\chi = S_{cmp} / S_{con}$ учитывающий сужение площади истекающей из сопла струи сжатого воздуха, на расстоянии не более одного диаметра сопла от его среза, по сравнению с площадью проходного сечения сопла. Сжатие струи воздуха рассматривается как

совершенное и полное по аналогии с жидкостью [2]. Теоретическая зависимость коэффициента расхода μ_χ для сопел от 1 до 10 мм представлена выражением:

$$\mu_\chi = 1 - 10^{-4} \times d^2 - 3 \times 10^{-3} d - 0,04, \quad (5)$$

где d – диаметр сопла.

Эксперименты с истечением сжатого воздуха через сопло в атмосферу в данной работе проводились при избыточном давлении от 0,05 МПа до 0,7 МПа с площадью проходного сечения сопел от 0,3 мм² до 5 мм². В процессе экспериментальных исследований датчиком расхода измерялся объемный расход в л/мин с точностью 0,1 л/мин, а датчиком давления – давление сжатого воздуха перед соплом в барах с точностью 0,01 бара.

На рисунке 3 представлены графические зависимости объемного расхода воздуха от давления на входе, при истечении через сопло в атмосферу. Теоретический расход был определен по зависимостям (1) и (2), а фактический – экспериментально. Обе зависимости в пределах абсолютного давления до 0,8 МПа для различных диаметров сопел имеют характеристику близкую к линейной. Режим истечения воздуха для этих зависимостей в основном надкритический и начинается с абсолютного давления $P_M > 2,0 \cdot 10^5$ Па.

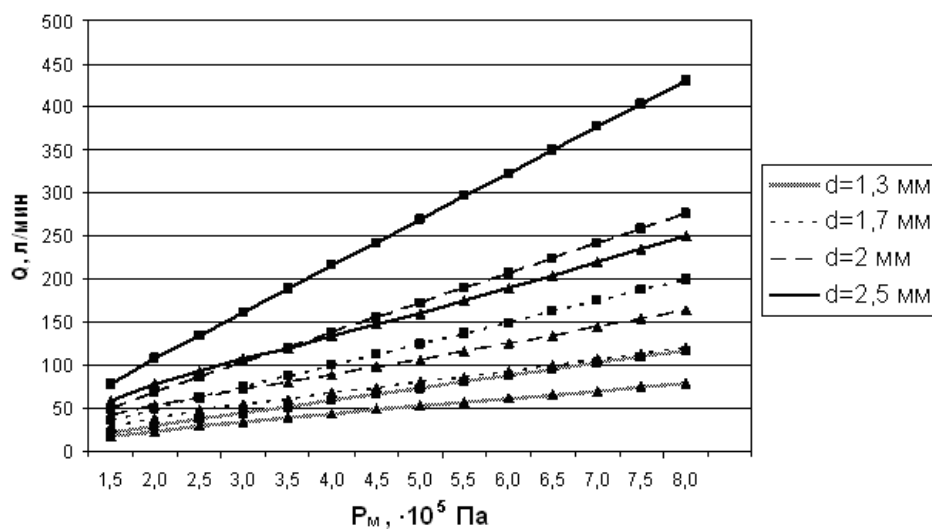


Рисунок 3 – Теоретический (■) и фактический (▲) расход воздуха при различных давлениях и диаметрах сопел

Графические зависимости коэффициента расхода сжатого воздуха μ от давления на входе сопла при истечении в атмосферу, представленные на рисунках 4 и 5, имеют не линейный характер и построены на основании данных рисунка 3. Зависимости, представленные на рисунке 4 для сверхмалых диаметров сопел, отличаются от графических зависимостей, представленных на рисунке 5, так как они могут рассматриваться как капиллярные трубки.

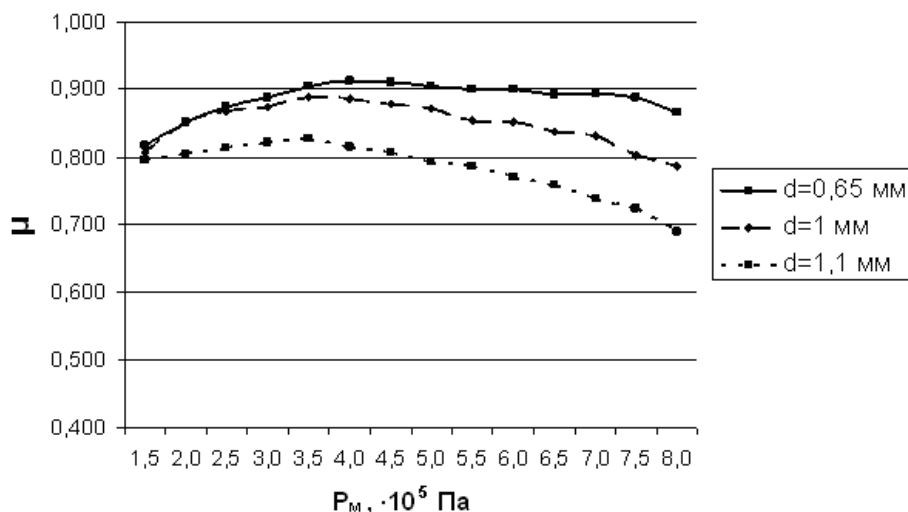


Рисунок 4 – Фактический коэффициент расхода при истечении воздуха через сопла диаметром 0,65; 1,0; 1,1 мм в атмосферу

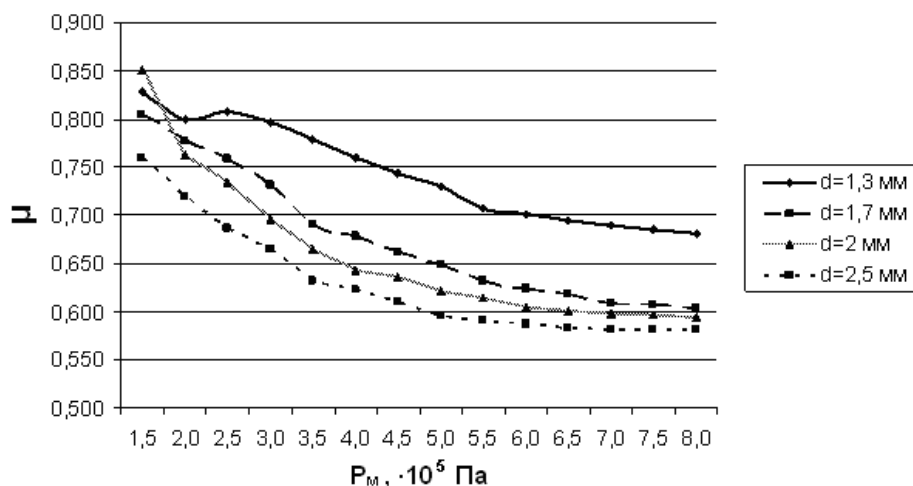


Рисунок 5 – Фактический коэффициент расхода при истечении воздуха через сопла диаметром 1,3; 1,7; 2,0; 2,5 мм в атмосферу

Коэффициент расхода μ_ϕ , зависящий от давления на входе сопла (в некоторой литературе коэффициент скорости) представлен только как эмпирический коэффициент. Расход воздуха и скорость истечения являются функцией от давления на входе сопла. Данная теоретическая зависимость в литературе не представлена.

На рисунках 6 и 7 представлены графические зависимости коэффициента расхода (по скорости) μ_ϕ от давления сжатого воздуха перед соплом при различных площадях поперечного сечения сопла. Коэффициент расхода μ_ϕ определялся как отношение фактического расхода воздуха, определяемого экспериментально датчиком расхода к теоретическому расходу, определяемому по зависимостям (1) или (2). В коэффициент расхода, представленный зависимостью (3) входит коэффициент расхода μ_ξ как постоянный коэффициент, который учитывает потери от сопротивления воздуха в сопле, а также коэффициент расхода μ_χ , учитывающий площадь проходного сечения сопла. Графические зависимости экспериментального коэффициента расхода μ_ϕ представленного на рисунке 4 получены с учетом выражения (3) из формулы:

$$\mu_\phi = \frac{\mu}{\mu_\xi \mu_\chi}.$$

Значения μ рассчитывались как коэффициенты фактического расхода воздуха через сопло, а значения μ_ξ , μ_χ из выражений (4) и (5).

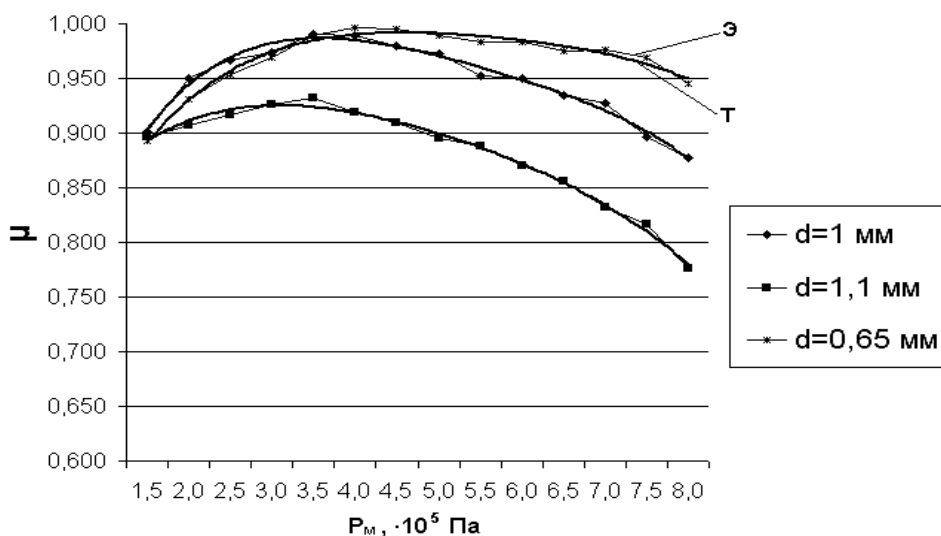


Рисунок 6 – Графические зависимости экспериментального (э) и теоретического (т) коэффициентов расхода μ_ϕ от давления сжатого воздуха перед соплами с диаметрами 0,65; 1,0; 1,1 мм

Для малых диаметров сопла (до 1,1 мм) характерен некоторый максимум функции с последующим ее убыванием.

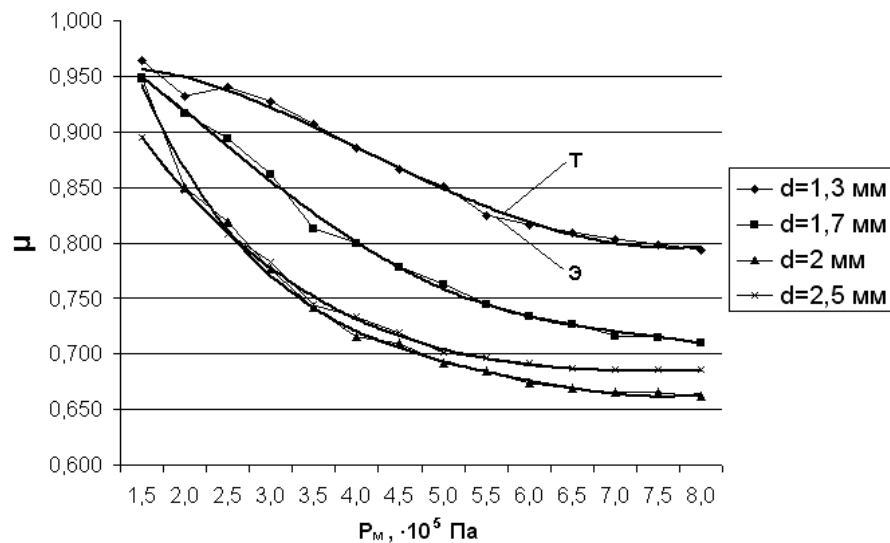


Рисунок 7 – Графические зависимости экспериментального и теоретического коэффициентов расхода μ_ϕ от давления сжатого воздуха перед соплами с диаметрами от 1,3 до 2,5 мм.

Для диаметров сопел от 1,3 до 2,5 мм коэффициент расхода μ_ϕ с увеличением давления P_M уменьшается нелинейно. При небольших давлениях, кривые коэффициента расхода имеют более интенсивный характер уменьшения, а с дальнейшим увеличением давления сжатого воздуха перед соплом, характер изменения кривых становится плавным.

Для графических зависимостей коэффициента расхода μ_ϕ полученных в результате экспериментальных исследований и представленных на рисунках 6 и 7 применен процесс подбора по эмпирическим зависимостям функциональной зависимости (теоретической). Подбор производился с помощью полинома четвертого порядка, для различных сечений сопел, которые представлены в виде следующих функций:

для диаметров сопел 0,65; 1,0; 1,1 мм

$$\mu_\phi = -2 \times 10^{-5} P_M^4 - 9 \times 10^{-3} P_M^2 + 6.2 \times 10^{-2} P_M + 0.837 \quad (6)$$

$$\mu_\phi = -2 \times 10^{-5} P_M^4 - 12 \times 10^{-3} P_M^2 + 7.2 \times 10^{-2} P_M + 0.842 \quad (7)$$

$$\mu_\phi = -1 \times 10^{-5} P_M^4 - 6 \times 10^{-3} P_M^2 + 3.4 \times 10^{-2} P_M + 0.864 \quad (8)$$

для диаметров сопел 1,3; 1,7; 2,0; 2,5 мм

$$\mu_\phi = -4 \times 10^{-6} P_M^4 - 3 \times 10^{-5} P_M^3 - 3 \times 10^{-3} P_M^2 + 2 \times 10^{-3} P_M + 0.957 \quad (9)$$

$$\mu_\phi = -1 \times 10^{-5} P_M^4 - 1 \times 10^{-4} P_M^3 - 2 \times 10^{-3} P_M^2 - 2.4 \times 10^{-2} P_M + 0.976 \quad (10)$$

$$\mu_\phi = 2 \times 10^{-6} P_M^4 - 3 \times 10^{-4} P_M^3 + 4 \times 10^{-3} P_M^2 - 6 \times 10^{-2} P_M + 0.950 \quad (11)$$

$$\mu_\phi = 3 \times 10^{-5} P_M^4 - 1.2 \times 10^{-3} P_M^3 + 15 \times 10^{-3} P_M^2 - 11.3 \times 10^{-2} P_M + 1.041 \quad (12)$$

Полином четвертого порядка наиболее близко описывает экспериментальные зависимости, которые представлены на рисунках 6 и 7. Наихудшая погрешность между теоретической и экспериментальной зависимостью коэффициента расхода μ_ϕ составляет 2,2%.

Теоретические зависимости коэффициента расхода μ_ϕ вычисляются по выражениям (6) – (12).

Обобщенный теоретический коэффициент расхода можно определить из выражения (3), если известны теоретические зависимости μ_ϕ , μ_χ , μ_ξ . Максимальная погрешность обобщенного теоретического коэффициента расхода μ_T по отношению к фактическому μ_ϕ не превышает 4,3%.

Возможность определения теоретического коэффициента расхода соответствующего фактическому коэффициенту расхода, позволяет вести предварительные расчеты еще на стадии

проектирования элементов пневмоавтоматики, что снижает затраты на стадиях проектирования и испытания.

Дальнейшие исследования требуют расширения диапазона максимального давления сжатого воздуха до 1,2 МПа и диаметр сопел до 16 мм, как наиболее часто встречаемых в элементах пневмопривода и пневмоавтоматики.

Библиографический список использованной литературы

1. Дмитриев В.Н. Основы пневмоавтоматики. / В.Н. Дмитриев, В.Г. Градецкий. — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.
2. Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Б.Б. Некрасов, Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев. — 2-е изд., перераб. и доп. — Минск: Выш. шк., 1985. — 382 с.
3. Пашков Е.В. Промышленные механотронные системы на основе пневмопривода: учеб. пособие / Е.В. Пашков, ЮА. Осинский. — Севастополь: СевНТУ, 2007. — 401 с.

Поступила в редакцию 03.06.2011 г.

Полівцев В.П., Полівцев В.В. Дослідження процесу виділення стисненого повітря через сопло в атмосферу

Дослідження виділення стисненого повітря через сопло в атмосферу. Наведено математичну модель для визначення коефіцієнта витрати повітря.

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

Polivtsev V.P., Polivtsev V.V. Research of the process of the compressed air leakage through a nozzle into the atmosphere

Research results on the compressed air leakage through a nozzle into the atmosphere are provided. A mathematical model is developed for the determination of the air consumption coefficient.

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