

Вадим Викторович ТАРАСОВ<sup>1</sup>

УДК 536-34

## РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ АДИАБАТИЧЕСКОГО ИСТЕЧЕНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА ИЗ РЕЗЕРВУАРА ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА ОТКРЫТИЯ ВЫПУСКНОГО КЛАПАНА

<sup>1</sup> кандидат технических наук, доцент  
кафедры инженерной графики,  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана  
midav-5491@mail.ru

### Аннотация

Данная работа является продолжением расчетно-аналитического исследования адиабатического процесса истечения идеального газа из резервуара постоянного объема, приведенного в предыдущих работах. В этих работах были рассмотрены две основные задачи: 1-я — определение полного времени истечения газа из резервуара, 2-я — нахождение аналитического выражения, позволяющего инженерными методами расчета определять величину давления газа в резервуаре в зависимости от времени истечения. При этом полагалось, что запорное устройство (ЗУ) на выходе из резервуара открывается мгновенно и площадь выходного отверстия в процессе истечения остается постоянной. Такой подход возможен, когда пусковой период (время до полного открытия ЗУ) составляет незначительную часть от общего времени истечения, например, для больших резервуаров или запорных устройств с быстрым открытием (предохранительный клапан) и т. д. Однако возможны случаи, когда время пускового периода будет соизмеримо с общим временем истечения (регулируемый клапан). В этих случаях учет пускового периода может привести к заметной ошибке при определении общего времени истечения.

В данной работе предлагается метод, позволяющий в принятой постановке задачи рассчитать время истечения с учетом изменения площади отверстия запорного клапана ЗУ.

**Цитирование:** Тарасов В. В. Расчет времени адиабатического истечения идеального газа из резервуара постоянного объема с учетом процесса открытия выпускного клапана / В. В. Тарасов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 4. С. 80-92.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-80-92

В качестве дополнительного ограничения для расчета, принято, что коэффициент расхода — постоянная величина, равная его осредненному по времени значению.

### Ключевые слова

Адиабатический процесс, резервуар, газ, истечение, температура, давление, расход, насадок, коэффициент расхода.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-80-92

Обозначения параметров в данной работе соответствуют обозначениям, ранее принятым в работах [2], [3] и [4]<sup>1</sup>.

Исходными данными для рассматриваемой задачи являются:  $V$  — объем резервуара,  $T_0$  — начальная температура газа в резервуаре,  $p_0$  — начальное давление в резервуаре,  $p_2$  — давление на выходе из резервуара,  $R$  — газовая постоянная,  $k$  — показатель адиабаты,  $t$  — время,  $\pi$  — перепад давлений,  $\mu$  — коэффициент расхода,  $f$  — площадь отверстия пропускного клапана ЗУ.

При обозначениях параметров, как и ранее, используются следующие индексы: «0» — начало истечения, «1» — конец критического режима истечения, «2» — окончание истечения, «п» — полностью открытое отверстие клапана.

В рассматриваемой постановке задачи к ранее используемым параметрам необходимо добавить функцию  $f_e(t)$ , определяющую изменение эффективной площади отверстия клапана ЗУ в процессе его открытия. Поскольку  $f_e(t) = \mu(t)f(t)$ , то необходимо знать вид двух функций:  $\mu(t)$  и  $f(t)$ . Используя известные геометрические и кинематические соотношения, для выбранного ЗУ можно всегда найти аналитическую зависимость для изменяющейся площади выходного отверстия —  $f(t)$ . Зависимость  $\mu(t)$ , в связи с очень сложным характером течения в области запорного клапана, можно найти только экспериментальным путем. Для определения функции  $\mu(t)$  для определенных типов ЗУ можно воспользоваться связью коэффициента расхода с такими параметрами, как пропускная способность  $K_v$  и число Рейнольдса  $Re$ . Эти параметры, широко использующиеся в гидравлике и пневматике, позволяют оценить потери давления  $\Delta p$  [1, 6, 7]. В этом случае для непосредственного применения в предлагаемом методе расчета необходимо предварительно найти последовательно зависимости типа  $\Delta p[Re(t)]$  или  $\mu[\Delta p(t)]$  и получить необходимую для расчетов аналитическую зависимость  $f_e(t)$ . Однако такой подход, предполагающий использование метода последовательных приближений, значительно усложняет расчет. Поэтому в данной работе, как это принято в практике инженерных расчетов влияние коэффициента расхода предлагается учесть приближенно, с последующим уточнением, исходя из того, что уменьшение коэффициента  $\mu$  практически равносильно физическому уменьшению площади отверстия запорного клапана

<sup>1</sup> В работе [4] допущена опечатка: формулу на стр. 88

$\frac{z^q}{\sqrt{z-1}} dz = A dt$  следует читать как:  $-\frac{z^q}{\sqrt{z-1}} dz = A dt$  (знак минус слева).

ЗУ, а следовательно, увеличению времени истечения. Примем, что  $\mu(t) \approx \mu_s = \text{const}$ , где  $\mu_s$  — некоторое осредненное по времени значение коэффициента расхода. Поэтому далее будет рассмотрен вывод расчетных соотношений с учетом изменения по времени только площади отверстия запорного клапана —  $f(t)$ . Если для используемого ЗУ будет известна зависимость  $\mu(t)$ , то в предлагаемом методе расчета можно принять  $\mu_s = 1$ , а  $f(t)$  заменить на  $f_e[\mu(t), t]$ .

В зависимости от полного перепада давлений ( $\pi_0 = p_0/p_2$ ) истечение газа может проходить в двух режимах. Если полный перепад давлений больше критического ( $\pi_0 > \pi_{кр}$ ), то истечение последовательно проходит два режима — критический и докритический, а при  $\pi_0 < \pi_{кр}$  имеет место только докритическое истечение [5].

В работе [4] были получены два основных интегральных уравнения, описывающих истечение для рассматриваемого случая.

Для критического режима истечения было получено следующее уравнение, определяющее зависимость давления в резервуаре от времени —  $p(t)$ :

$$-\int_1^{x_1} x^{-\frac{3k-1}{2k}} dx = B \int_0^{t_1} dt, \quad (1)$$

где  $x = p/p_0$  (отношение текущего давления в резервуаре к начальному),  $t_1$  —

время окончания критического режима,  $B = \frac{1}{K_a} k \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$ ,  $K_a = \frac{V}{f_{en} \sqrt{kRT_0}}$ .

При докритическом режиме процесс изменения давления в резервуаре описывается следующим интегральным уравнением:

$$-\int_{z_1}^1 \frac{z^{2-k}}{\sqrt{z-1}} dz = A \int_{t_1}^{t_2} dt, \quad (2)$$

где  $z = (p/p_2)^{\frac{k-1}{k}} = T/T_2$ ,  $z_1 = z_{кр} = \frac{k+1}{2}$ ,  $A = \frac{2}{K_a} \sqrt{\frac{k-1}{2}} \pi_0^{-\frac{k-1}{k}}$ .

При выводе уравнений (1) и (2) было принято:  $f_{en} = \mu_n f_n = \text{const}$ , что соответствует мгновенному открытию ЗУ и  $\mu = \text{const}$ . Теперь, для временного диапазона, соответствующего процессу открытия ЗУ, когда меняется площадь отверстия, эффективная площадь будет равна  $f_e(t) = \mu_s f(t)$ , или  $f_e(t) = \mu_s f_n \bar{f}(t) = f_{en} \bar{f}(t)$ , где  $f_n$  — площадь полностью открытого пропускного отверстия ЗУ. Ввод относительного параметра  $\bar{f}$  сохраняет в расчетах значения постоянных коэффициентов А и В, что позволяет проводить предварительные проектировочные расчеты в относительных величинах [3]. Также в расчет вводится относительное время  $\bar{t} = t/t_n$ , где  $t_n$  — характерное время, соответствующее моменту полного открытия ЗУ. Функция  $\bar{f}(t)$  и величина  $t_n$  не зависят от режима истечения, а определяются только геометрическими и кинематическими параметрами запорного клапана. Для выбранной конструкции запорного клапана и заданной скорости его открытия величина  $t_n$  определяется однозначно, т. е.  $t_n = \text{const}$ . Значение  $t_n$  может быть определено до расчета процесса истечения.

В этом случае уравнения (1) и (2), с учетом переменности площади отверстия запорного клапана, преобразуются к следующим видам:

$$-\int_{x_i}^x x^{-\frac{3k-1}{2k}} dx = B t_n \int_{t_i}^t \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t}, \quad (3)$$

$$-\int_{z_i}^z \frac{z^q}{\sqrt{z-1}} dz = A t_n \int_{t_i}^t \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t}. \quad (4)$$

В интегралах уравнений (3) и (4) проставлены условные пределы ( $x_i$ ,  $z_i$  и  $t_i$ ), поскольку их значения меняются в зависимости от временных интервалов истечения, которые будут рассмотрены ниже.

Рассмотрим три возможных варианта истечения при изменяющейся площади отверстия запорного клапана:

I.  $\pi_0 > \pi_{кр}$ , полное открытие пропускного клапана ЗУ происходит раньше, чем заканчивается критический режим, т. е.  $t_1 \geq t_n$ .

II.  $\pi_0 > \pi_{кр}$ , критический режим заканчивается до полного открытия,  $t_1 \leq t_n$ .

III.  $\pi_0 \leq \pi_{кр}$ , истечение полностью докритическое при  $t_n > 0$ .

Виды графических зависимостей  $p(t)$ , иллюстрирующих процессы истечения для этих вариантов, представлены на рис. 1.

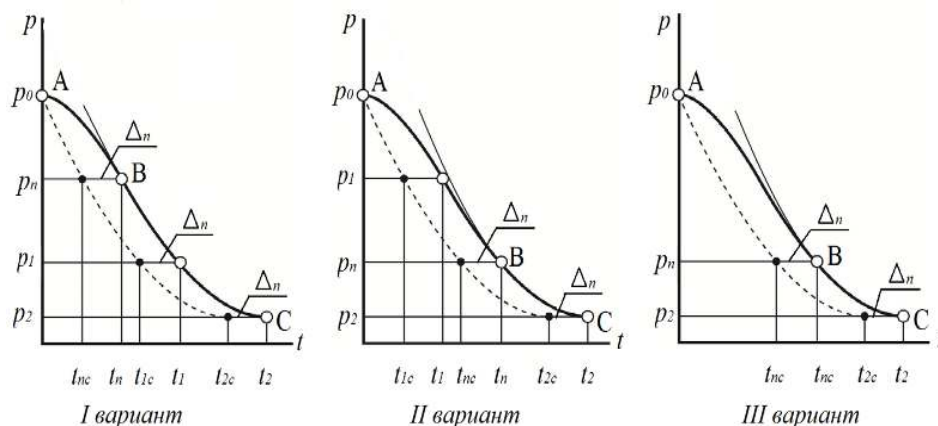


Рис. 1 Изменение давления в резервуаре при трех вариантах истечения газа:

I —  $\pi_0 > \pi_{кр}$ ,  $t_1 \geq t_n$ ;

II —  $\pi_0 > \pi_{кр}$ ,  $t_1 \leq t_n$ ;

III —  $\pi_0 \leq \pi_{кр}$ ,  $t_n > 0$ .

Пунктирная линия — все истечение происходит при  $f = \text{const}$ , сплошная линия — истечение с учетом постепенного открытия ЗУ (интервалы: AB —  $f = \text{var}$ , BC —  $f = \text{const}$ ).

Fig. 1. Changes in tank pressure in 3 cases of gas flow:

I —  $\pi_0 > \pi_{кр}$ ,  $t_1 \geq t_n$ ;

II —  $\pi_0 > \pi_{кр}$ ,  $t_1 \leq t_n$ ;

III —  $\pi_0 \leq \pi_{кр}$ ,  $t_n > 0$ .

Dotted line — the outflow occurs when  $f = \text{const}$ ; solid line — the outflow occurs when gradually opening the shut-off device (the intervals: for AB,  $f = \text{var}$ ; for BC,  $f = \text{const}$ ).

В варианте I [ $t_1 \geq t_n, (\bar{t}_1 \geq 1)$ ] общее время истечения разбивается на три временных диапазона: первый — критический режим в процессе открытия ЗУ ( $0 \leq t \leq t_n, f = \text{var}$ ), второй — критический режим продолжается уже при полностью открытом ЗУ ( $t_n \leq t \leq t_1, f = \text{const}$ ) и третий — докритический режим при открытом ЗУ ( $t_1 \leq t \leq t_2, f = \text{const}$ ).

Используя уравнения (3), (1) и (2), составим систему из трех интегральных уравнений, каждое из которых описывает истечение в соответствующем диапазоне:

$$\begin{cases} - \int_1^{x_n} x^{-\frac{3k-1}{2k}} dx = B t_n \int_0^1 \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t} \\ - \int_{x_n}^{x_1} x^{-\frac{3k-1}{2k}} dx = B t_n \int_1^{\bar{t}_1} d\bar{t} \\ - \int_{z_1}^1 \frac{z^q}{\sqrt{z-1}} dz = A t_n \int_{t_1}^{\bar{t}_2} dt \end{cases}, \quad (5)$$

где  $x_n = p_n/p_0$ ,  $p_n$  — давление в резервуаре в момент полного открытия ЗУ.

В результате интегрирования и преобразования 1-го уравнения получим соотношение для определения  $p_n$ :

$$p_n = \frac{p_0}{(B_0 F_n + 1)^{\frac{2k}{k-1}}}, \quad (6)$$

где  $B_0 = \frac{k-1}{2k} B$ ,  $F_n$  — постоянная величина, соответствующая моменту полного открытия ЗУ, когда  $t = t_n$ ,  $F_n = t_n \bar{F}_n$ ,  $\bar{F}_n = \int_0^1 \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t}$ .

Текущее значение давления в резервуаре в рассматриваемом диапазоне можно найти по формуле:

$$p_{on}(t) = \frac{p_0}{[B_0 F_{on}(t) + 1]^{\frac{2k}{k-1}}}, \quad (7)$$

где  $F_{on}(t) = t_n \bar{F}_{on}(\bar{t})$ ,  $\bar{F}_{on}(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t}$ .

(Здесь и далее индекс при  $p$  и  $F$  соответствует временному интервалу, в котором применима формула. В данном случае «on» — время от  $t = 0$  до  $t = t_n$ .)

Второе уравнение системы интегрируется в пределах  $1 \leq \bar{t} \leq \bar{t}_1$  ( $t_n \leq t \leq t_1$ ), причем при  $t = t_1$  ( $\bar{t} = \bar{t}_1$ ) давление равно  $p_1 = p_2 \pi_{кр}$ , т. е.  $x_1 = \pi_{кр}/\pi_0$ . В результате его интегрирования получим соотношение, из которого найдем время окончания критического режима ( $t_1 = \bar{t}_1 \cdot t_n$ ) для варианта I:

$$t_1 = t_n (1 - \bar{F}_n) + \frac{1}{B_0} \left( \sqrt{\frac{2}{k+1} \pi_0^{\frac{k-1}{k}} - 1} \right). \quad (8)$$

Из (8) можно найти время окончания критического режима  $t_1$  для случая постоянно открытого ЗУ ( $f = \text{const}, \bar{F}_n = 1$ ):  $t_1 = \frac{1}{B_0} \left( \sqrt{\frac{2}{k+1} \pi_0^{\frac{k-1}{k}} - 1} \right)$ , что соответствует ранее полученному в работе [4] значению  $t_{1c}$ . Обозначим это время через  $t_{1c}$ . Тогда формула (8) принимает вид:

$$t_1 = t_{1c} + \Delta_n, \quad (9)$$

где  $\Delta_n = (1 - \bar{F}_n) t_n$  — постоянная величина, показывающая, насколько увеличилось время истечения  $t_1$  при постепенном открытии ЗУ.

Далее, проводя необходимые преобразования, получим формулу, позволяющую рассчитать текущее значение давления в интервале  $t_n \leq t \leq t_1$ :

$$p_{n1}(t) = \frac{P_0}{[B_0(t - \Delta_n) + 1]^{\frac{2k}{k-1}}}. \quad (10)$$

При  $\Delta_n = 0$  получим известную зависимость для  $p(t)$  при  $f = \text{const}$  [4]:

$$p(t) = \frac{P_0}{(B_0 t + 1)^{\frac{2k}{k-1}}}.$$

Как и следовало ожидать, в рассматриваемом варианте, когда ЗУ полностью открыто, график функции  $p_{n1}(t)$  получается параллельным смещением вдоль оси  $t$  графика  $p(t)$  на величину  $\Delta_n$  (рис. 1), поскольку при  $t \geq t_n$  процессы истечения и уравнения, описывающие их, в обоих случаях идентичны. Кроме того, функции  $p_{on}(t)$  и  $p_{n1}(t)$  при  $t = t_n$  имеют одинаковые производные, что свидетельствует о плавном переходе с одного режима на другой.

Дальнейшее истечение газа в интервале  $t_1 \leq t \leq t_2$  будет проходить при полностью открытом ЗУ, но уже при докритическом режиме.

Для определения полного времени истечения газа из резервуара  $t_2$  была получена формула, такая же, как и в работе [4]:

$$t_2 \approx t_1 + K_a \pi_{кр}^{0,357 \frac{2-k}{k}} \sqrt{\pi_0^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (11)$$

По аналогии с  $t_{1c}$ , введем время  $t_{2c}$  — полное время истечения при  $f = \text{const}$ .

Т. к.  $t_{2c} \approx t_{1c} + K_a \pi_{кр}^{0,357 \frac{2-k}{k}} \sqrt{\pi_0^{\frac{k-1}{k}}}$  [4], то с учетом (9) время  $t_2$  будет равно:

$$t_2 = t_{2c} + \Delta_n. \quad (12)$$

Для определения изменения давления в докритическом диапазоне истечения, по аналогии с работой [3], с помощью аппроксимации функции  $J(z)$ , являющейся решением левого интеграла уравнения (2), была получена приближенная, но достаточно точная формула:

$$p_{12}(t) \approx p_2 \left[ 1 + \frac{k-1}{2} \left( \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} \right)^{2\alpha_1} \right]^{\frac{k}{k-1}}, \quad (13)$$

или с учетом формул (9) и (12):

$$p_{12}(t) \approx p_2 \left\{ 1 + \frac{k-1}{2} \left[ \frac{t_{2c} - (t - \Delta_n)}{t_{2c} - t_{1c}} \right]^{2\tilde{\alpha}_1} \right\}^{\frac{k}{k-1}}. \quad (14)$$

Из соотношения (14) видно, что в данном временном диапазоне, как и в предыдущем, график функции  $p_{12}(t)$  получается путем параллельного смещения графика  $p(t)$  для случая  $f = \text{const}$  на величину  $\Delta_n$  вдоль оси  $t$ .

В варианте II, при  $t_1 < t_n$  ( $t_1 < 1$ ), общее время истечения также разбивается на три временных интервала:

1-й — от 0 до  $t_1$ , открытие клапана ЗУ проходит в критическом режиме;

2-й — от  $t_1$  до  $t_n$ , открытие клапана продолжается при докритическом режиме;

3-й — от  $t_n$  до  $t_2$ , истечение продолжается в докритическом режиме при полностью открытом клапане ЗУ.

В этом случае система трех интегральных уравнений, определяющих изменение давления в резервуаре при истечении газа, принимает вид:

$$\begin{cases} - \int_1^{x_1} x^{-\frac{3k-1}{2k}} dx = B t_n \int_0^{\tilde{t}_1} \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t} \\ - \int_{z_1}^{z_n} \frac{z^q}{\sqrt{z-1}} dz = A t_n \int_{t_1}^1 \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t} \\ - \int_{z_n}^1 \frac{z^q}{\sqrt{z-1}} dz = A t_n \int_1^{\tilde{t}_2} d\bar{t} \end{cases} \quad (15)$$

В первом временном интервале для нахождения зависимости, определяющей изменение давления —  $p_{01}(t)$ , получим формулу:

$$p_{01}(t) = \frac{p_0}{\left[ B_0 F_{01}(t) + 1 \right]^{\frac{2k}{k-1}}}, \quad (16)$$

$$\text{где } F_{01}(t) = t_n \int_0^{\tilde{t}} \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t}.$$

Из последнего соотношения, учитывая, что в обоих случаях истечения ( $f = \text{const}$ ,  $t = t_{1c}$  и  $f = \text{var}$ ,  $t = t_1$ ) давление  $p_1$  одно и то же и равно  $p_1 = p_1 \pi_{\text{кр}}$ , получим равенство:

$$F_1 = t_{1c} = \frac{1}{B_0} \left( \sqrt{\frac{2}{k+1} \pi_0^{\frac{k-1}{k}}} - 1 \right), \quad (17)$$

$$\text{где } F_1 = t_n \bar{F}_1, \quad \bar{F}_1 = t_n \int_0^{\tilde{t}_1} \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t} = \text{const}.$$

Поскольку значение интеграла  $\bar{F}_1$  зависит от  $\bar{t}_1$ , то, определив  $\bar{F}_1$ , можно найти время окончания критического режима —  $t_1 = t_n \bar{t}_1$ . Если из  $\bar{F}_1$  нельзя выделить в явном виде значение  $\bar{t}_1$ , то равенство (17) может быть решено либо графическим путем, либо с помощью аппроксимации функции  $\bar{F}_{01}(\bar{t})$ .

Решая совместно 2-е и 3-е уравнения системы (15), получим формулу для нахождения полного времени истечения  $t_2$ , аналогичную формуле (12):

$$t_2 = t_{2c} + \Delta_n, \quad (18)$$

где  $\Delta_n = t_n(1 - \bar{F}_n)$ ,  $\bar{F}_n = \int_0^1 \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t}$  — значение интеграла при  $t = t_n$ .

Для второго временного интервала ( $t_1 \leq t \leq t_n$ ,  $\bar{t}_1 \leq \bar{t} \leq 1$ ), как и в предыдущем случае, путем все той же аппроксимации функции  $J(z)$ , можно найти зависимость, определяющую изменение давления в резервуаре:

$$p_{1n}(t) = p_2 \left\{ 1 + \frac{k-1}{2} \left[ 1 - \frac{F_{1n}(t)}{t_{2c} - t_{1c}} \right]^{2\alpha_1} \right\}^{\frac{k}{k-1}}, \quad (19)$$

где  $F_{1n}(t) = t_n \int_{\bar{t}_1}^{\bar{t}} \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t}$ .

При  $t = t_n$  рассчитывается значение  $F_{1n} = t_n \int_{\bar{t}_1}^1 \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t}$  и по формуле (19) определяется давление в момент полного открытия клапана ЗУ —  $p_n$ .

В третьем временном интервале ( $1 \leq t \leq t_2$ ), дозвуковое истечение с открытым клапаном, формула для расчета текущего давления принимает вид:

$$p_{n2}(t) \approx p_2 \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{p_n}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \left( \frac{t_2 - t}{t_2 - t_n} \right)^{2\alpha_n} \right\}^{\frac{k}{k-1}}, \quad \alpha_n \approx \left( \frac{p_2}{p_n} \right)^{0,643 \frac{2-k}{k}}. \quad (20)$$

**В варианте III**, при  $\pi_0 > \pi_{кр}$ , истечение происходит в полностью докритическом режиме. В этом случае общее время истечения разбивается на два интервала: первый ( $0 \leq t \leq t_n$ ) — истечение в процессе открытия ЗУ, второй ( $t_n \leq t \leq t_2$ ) — истечение при полностью открытом ЗУ.

Система двух исходных интегральных уравнений для данного варианта истечения принимает вид:

$$\begin{cases} - \int_{z_0}^{\bar{z}_n} \frac{z^{\frac{2-k}{k-1}}}{\sqrt{z-1}} dz = A t_n \int_0^1 \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t} \\ - \int_{\bar{z}_n}^1 \frac{z^{\frac{2-k}{k-1}}}{\sqrt{z-1}} dz = A t_n \int_1^{\bar{t}_2} d\bar{t} \end{cases}. \quad (21)$$

Решив эту систему, найдем полное время истечения:



$$t_2 = t_{2c} + \Delta_n, \quad (22)$$

где, как и прежде,  $\Delta_n = t_n(1 - \bar{F}_n)$ ,  $\bar{F}_n = \int_0^1 \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t}$ ,  $F_n = t_n \bar{F}_n$ ,

а  $t_{2c} \approx K_a \pi_0^{0,143 \frac{k+1,5}{k}} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left( \pi_0^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}$ , что соответствует значению, полученному в работе [4].

Давление в момент полного открытия ЗУ можно найти по формуле:

$$p_n \approx p_2 \left[ 1 + \left( \pi_0^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \left( \frac{t_2 - t_n}{t_2 - \Delta_n} \right)^{2\tilde{\alpha}_0} \right]^{\frac{k}{k-1}}, \quad \tilde{\alpha}_0 \approx \pi_0^{-0,643 \frac{2-k}{k}}. \quad (23)$$

Формула (21) позволяет определить  $z_n = (p_n/p_2)^{\frac{k-1}{k}}$  и далее  $\tilde{\alpha}_n \approx z_n^{-0,643 \frac{2-k}{k-1}}$ .

Текущее давление в 1-ом интервале ( $0 \leq t \leq t_n$ ), при переменной площади отверстия, определяется из соотношения:

$$p_{0n}(t) \approx p_2 \left\{ 1 + \left( \pi_0^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \left[ 1 - \frac{F'_{0n}(t) - F'_n}{t_2 - \Delta_n} \right]^{2\tilde{\alpha}(t)} \right\}^{\frac{k}{k-1}}, \quad (24)$$

где  $F'_{0n}(t) = t_n \int_0^{\bar{t}} \bar{f}(\bar{t}) d\bar{t}$ ,  $\tilde{\alpha}(t) \approx \tilde{\alpha}_0 - \frac{\tilde{\alpha}_0 - \tilde{\alpha}_n}{t_n} t$ .

Т. к. в общем случае  $\alpha[z(t)]$  [4], то, учитывая небольшой диапазон изменения

параметра  $z \left( \Delta z_{\max} = z_{\text{кр}} - 1 = \frac{k-1}{2} \right)$ , введение приближенной линейной зависимости  $\alpha(t)$  позволяет уточнить значения функции  $p_{0n}(t)$  и обеспечить плавность ее перехода к функции  $p_{n2}(t)$  при  $t = t_n$  (равенство производных).

Во втором временном интервале текущее значение давления можно найти по формуле:

$$p_{n2}(t) \approx p_2 \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{p_n}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \left( \frac{t_2 - t}{t_2 - t_n} \right)^{2\tilde{\alpha}_n} \right\}^{\frac{k}{k-1}}. \quad (25)$$

В качестве примера расчета ниже представлены результаты, полученные для случая, когда полное открытие запорного клапана тарельчатого типа происходит до завершения критического режима истечения (вариант I).

На рис. 2 приведены графические зависимости  $p(t)$ , полученные для двух случаев истечения: первый — мгновенное открытие ЗУ ( $f_n = \text{const}$ ), второй — истечения с открывающимся постепенно ЗУ ( $f = \text{var}$ ).

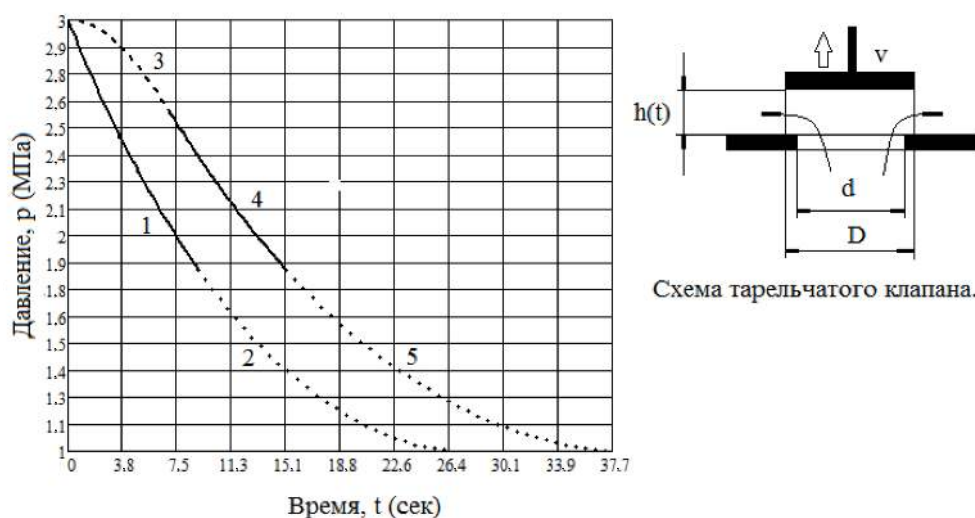


Рис. 2. Изменение давления в резервуаре по времени, участки на графике:

- 1 — критический режим при  $f_n = \text{const}$ ;
- 2 — докритический режим при  $f_n = \text{const}$ ;
- 3 — критический режим в процессе открытия ЗУ;
- 4 — продолжение критического режима после открытия ЗУ;
- 5 — докритический режим при открытом ЗУ

Fig. 2. Changes in tank pressure with time:

- 1 — the critical regime when  $f_n = \text{const}$ ;
- 2 — the pre-critical regime when  $f_n = \text{const}$ ;
- 3 — the critical regime when opening the locking device;
- 4 — the critical regime after the opening the locking device;
- 5 — the pre-critical regime when the locking device is open

Расчет проведен для истечения природного газа ( $R = 506,8$  Дж/кг·К,  $k = 1,31$ ) через клапан тарельчатого типа (рис. 1). Скорость подъема клапана с винтовым штоком  $v = 0,75$  мм/с. Диаметр отверстия  $d = 25$  мм. Коэффициент перекрытия  $D/d = 1,2$ . Газ вытекает из резервуара объемом  $2,7$  м<sup>3</sup>. Начальное давление газа в резервуаре — 3 МПа, конечное — 1 МПа. Начальная температура — 298 К. Коэффициент расхода при  $f_n = \text{const}$  —  $\mu = 0,9$ , а при  $f = \text{var}$  —  $\mu_s = 0,7$ .

В закрытом положении клапан (рис. 1) полностью перекрывает выходное цилиндрическое отверстие, площадь которого равна  $f_n = \pi d^2/4$ . При открытии клапана образуется кольцевой зазор, высота которого является функцией времени  $h(t)$ . Изменяющаяся площадь боковой поверхности зазора, через которую проходит истечение газа, будет равна  $S(t) = \pi D \cdot h(t)$ . Если принять, что скорость открытия клапана постоянна ( $v = \text{const}$ ), то  $h(t) = v \cdot t$ . (Например, при перемещении клапана с помощью винтового штока скорость будет равна:  $v = ipn/60$ , где  $i$  — число заходов резьбы,  $p$  — шаг резьбы,  $n$  — скорость вращения штока, об/мин.) Полное открытие клапана произойдет в момент, когда  $S = f_n$ , т. е. в момент полного открытия  $h_n = d^2/4D = v \cdot t_n$ , откуда  $t_n = d^2/4Dv$ .

В данном случае функция  $\bar{f}(t)$  принимает вид:  $\bar{f}(t) = S(t) / f_n = t/t_n = \bar{t}$ , тогда

$$\overline{F_{on}}(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \bar{t} d\bar{t} = \frac{1}{2} \bar{t}^2, \quad \overline{F_n} = \int_0^1 \bar{t} d\bar{t} = \frac{1}{2} \bar{t}^2 \Big|_0^1 = \frac{1}{2}.$$

### Выводы

В принятой постановке задачи предлагаемый метод расчета позволяет оценить время истечения газа из резервуара с учетом времени, необходимого для полного открытия запорного клапана ЗУ. С помощью полученных аналитических соотношений можно найти зависимость изменения давления в резервуаре от времени с учетом переменности площади отверстия запорного клапана для трех различных вариантов, учитывающих режим истечения. Точность расчета может быть заметно повышена, если для используемого ЗУ известна зависимость изменения коэффициента расхода —  $\mu[\Delta p(t)]$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Д. Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры / Д. Ф. Гуревич. Изд. 5-е. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. С. 480.
2. Тарасов В. В. Вывод расчетной зависимости для определения давления идеального газа в резервуаре постоянного объема при его адиабатическом истечении / В. В. Тарасов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 4. С. 80-88. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-80-88
3. Тарасов В. В. Расчет времени адиабатического истечения идеального газа из резервуара постоянного объема с использованием относительных параметров / В. В. Тарасов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 2. С. 94-104. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-94-104
4. Тарасов В. В. Расчет времени истечения идеального газа из резервуара постоянного объема в среду с постоянным давлением при адиабатическом процессе / В. В. Тарасов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 2. С. 84-95. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-84-95
5. Техническая термодинамика / под ред. В. И. Крутова. М.: Высшая школа, 1981. 472 с.
6. Черноштан В. И. Газодинамический расчет предохранительного клапана и выпускного трубопровода: Начало / В. И. Черноштан, Э. Е. Благов // Арматуростроение. 2011. № 2 (71). С. 48-52.
7. Черноштан В. И. Газодинамический расчет предохранительного клапана и выпускного трубопровода: Продолжение / В. И. Черноштан, Э. Е. Благов // Арматуростроение. 2011. № 3 (72). С. 61-65.

Vadim V. TARASOV<sup>1</sup>

UDC 536-34

### **CALCULATION OF THE ADIABATIC FLOW TIME OF AN IDEAL GAS FROM A CONSTANT VOLUME RESERVOIR, ACCOUNTING FOR THE PROCESS OF OPENING THE EXHAUST VALVE**

<sup>1</sup> Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Engineering Graphics, Bauman Moscow State Technical University  
midav-5491@mail.ru

#### **Abstract**

The author's previous works have already considered the calculation of the process of adiabatic outflow of an ideal gas from a constant volume tank. It was assumed that the shut-off device (storage) at the outlet of the tank opens instantly and the area of the outlet during the expiration remains constant. This approach is possible when the start-up period (time to open the storage completely) is a small part of the total expiration time, for example, for large tanks or shut-off devices with rapid opening (safety valve). However, there may be cases where the start-up time will be commensurate with the total expiration time (control valve). In these cases, not accounting for the starting period can lead to a noticeable error in determining the total time of the flow.

In this paper, the author proposes a method that based on the accepted formulation of the problem, allows calculating the expiration time taking into account the change in the opening area of the valves. As an additional limitation for the calculation, it is assumed that the flow coefficient is a constant value equal to its time-averaged value.

#### **Keywords**

Adiabatic process, tank, gas, flow, temperature, pressure, flow, nozzles, flow coefficient.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-80-92**

---

**Citation:** Tarasov V. V. 2018. "Calculation of the Adiabatic Flow Time of an Ideal Gas from a Constant Volume Reservoir, Accounting for the Process of Opening the Exhaust Valve". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 4, pp. 80-92.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-4-80-92

## REFERENCES

1. Gurevich D. F. 2008. Raschet i konstruirovaniye truboprovodnoy armatury [Calculation and Design of Pipefittings]. 5<sup>th</sup> edition. Moscow: LKI.
2. Tarasov V. V. 2016. "Vyvod raschetnoy zavisimosti dlya opredeleniya davleniya ideal'nogo gaza v rezervuare postoyannogo ob'yoma pri ego adiabaticheskom istechenii" [Withdrawal of the Calculated Dependence to Determine the Pressure of the Ideal Gas in the Tank of a Constant Volume during Its Adiabatic Outflow]. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 4, pp. 80-88. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-80-88
3. Tarasov V. V. 2018. "Calculating the Time of Adiabatic Flow of an Ideal Gas from a Constant Volume Reservoir Using Relative Parameters". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 4, no 2, pp. 94-104. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-94-104
4. Tarasov V. V. 2016. "Raschet vremeni istecheniya ideal'nogo gaza iz rezervuara postoyan-nogo ob'yema v sredu s postoyannym davleniyem pri adiabaticheskom protsesse" [Calculation of the Ideal Gas Outflow Time from the Reservoir of Constant Volume into the Environment with a Constant Pressure at an Adiabatic Process]. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 2, pp. 84-95. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-84-95
5. Krutov V. I. (ed.). 1981. Tekhnicheskaya termodinamika [Technical Thermodynamics]. Moscow: Vysshaya shkola.
6. Chernoshtan V. I., Blagov E. E. 2011. "Gazodinamicheskiy raschet predokhranitel'nogo klapana i vypusknogo truboprovoda" [Gas-Dynamic Design of a Safety Valve and an Outlet Pipeline]. Armaturostroyeniye, part 1, no 2 (71), pp. 48-52.
7. Chernoshtan V. I., Blagov E. E. 2011. "Gazodinamicheskiy raschet predokhranitel'nogo klapana i vypusknogo truboprovoda" [Gas-Dynamic Design of a Safety Valve and an Outlet Pipeline]. Armaturostroyeniye, part 2, no 3 (72), pp. 61-65.