Вадим Викторович ТАРАСОВ[1]

УДК 536-34

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ АДИАБАТИЧЕСКОГО ИСТЕЧЕНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА ИЗ РЕЗЕРВУАРА ПОСТОЯННОГО ОБЪЕМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

[1] кандидат технических наук,
доцент кафедры инженерной графики,
Московский государственный технический
университет имени 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.

Полученные в этих работах с учетом принятых допущений соотношения позволяют с достаточной степенью точности решить поставленные задачи для каждой конкретного случая, определяемого абсолютными значениями исходных параметров.

На предварительном этапе разработки новых установок возможно применение более обобщенного расчетно-аналитического исследования с использованием относительных параметров, что позволяет выявить параметры, которые непосредственно влияют на характер протекания исследуемого процесса.

Поскольку в данной работе рассматривается процесс истечения газа в зависимости от времени, то при выводе расчетных соотношений за аргумент принято относительное время. Если учитывать, что термодинамические параметры идеального газа связаны

Цитирование: 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

уравнением состояния, в качестве функции может быть рассмотрена относительная величина одного из 3-х параметров газа: давления, температуры и плотности (или удельного объема).

В данной работе при выводе расчетных соотношений в качестве параметров приведения были приняты температура газа на выходе из резервуара и полное время истечения газа. В каждой конкретной задаче оба эти параметра являются постоянными величинами, значения которых можно определить по исходным данным. Параметры приведения взяты в выходном сечении, поскольку они являются результатом всего процесса истечения.

Использование относительных величин показало, что характер протекания процесса истечения, в принятой постановке задачи, зависит только от двух постоянных величин: полного перепада давлений — параметра, определяющего потенциальную энергию газа, заключенного в резервуаре, и показателя адиабаты — параметра, характеризующего рабочее тело.

В работе получены точные аналитические зависимости для расчета двух возможных режимов истечения газа — критического и докритического. Однако, если для критического режима получена прямая зависимость относительной температуры от относительного времени, то для докритического — обратная (время от температуры). Для получения наиболее востребованной в практике инженерных расчетов прямой зависимости (температура от времени) была использована аппроксимация функции. Полученное приближенное соотношение позволяет определить с достаточно высокой степенью точности значение относительной температуры по заданному значению относительного времени.

Ключевые слова

Адиабатический процесс, резервуар, газ, истечение, температура, давление, относительная величина.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-94-104

В общем случае, при полном перепаде давлений больше критического, истечение проходит в двух режимах [3] — критическом и докритическом. Исходя из этого, параметры, относящиеся к трем основным моментам процесса истечения, как и в предыдущих работах, будут отмечаться следующими индексами: «0» — начальный момент истечения, «1» — момент завершения критического режима и начало докритического режима, «2» — момент, соответствующий полному истечению газа из резервуара.

Обозначения основных параметров соответствуют ранее принятым: p — давление газа, T — температура газа, k — показатель адиабаты газа, R — газовая постоянная, V — объем резервуара, f_{en} — эффективная площадь проходного сечения выходного насадка, π_0 — полный перепад давлений, $\pi_{кр}$ — критический перепад давлений.

В работах [1] и [2] при выводе расчетных зависимостей уже использовались относительные параметры: для критического режима — $x = p/p_0$, для докритического режима — $z = T/T_2$, M — число Маха. Однако использование в ранее полученных соотношениях абсолютного значения времени истечения газа приводит к необходимости введение всех исходных данных, исключая тем самым проведение более обобщенного анализа.

В данной работе была поставлена задача нахождения аналитической зависимости $\overline{T}(\bar{t})$, т. е. зависимости между относительной температурой ($\overline{T} = T/T_2$ — отношение текущей температуры газа в резервуаре к температуре на выходе) и относительным временем ($\bar{t} = t/t_2$ — отношение текущего времени к полному времени истечения).

Для нахождения функциональных зависимостей для относительных величин, прежде всего, необходимо определить в общем виде значения для параметров приведения — t_2 и T_2 .

Полное время истечения газа из резервуара можно найти, используя данные работы [2]. При $\pi_0 \geq \pi_{кр}$:

$$t_2 = t_1 + K_v \left(\frac{k+1}{2}\right)^q \sqrt{\frac{\pi_0^{\frac{k-1}{k}}}{k}} \cdot \alpha_1 \,, \tag{1}$$

где $t_1 = K_v \dfrac{2}{k-1} \sqrt{\dfrac{1}{k}\left(\dfrac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \left(\sqrt{\dfrac{2}{k+1}\pi_0^{\frac{k-1}{k}}} - 1\right)$, $\quad K_v = \dfrac{V}{f_{en}\sqrt{RT_0}}$,

$$\alpha_1 = 1 + \sum_{n=1}^{N} \left\{ (-1)^n \left(\frac{2}{k+1}\right)^n \left[\prod_{m=1}^{n} \frac{1 - m(k-1)}{2m+1} \right] \right\},$$

$$\tilde{\alpha}_1 \approx \left(\frac{k+1}{2}\right)^{-0.643q}, \quad q = \frac{2-k}{k-1} \,.$$

Использованный ранее в работе [2] коэффициент $K_a = \dfrac{V}{f_{en}\sqrt{kRT_0}}$ был заменен на K_v , что позволило полностью оценить влияние показателя адиабаты k. Из представленных соотношений для определения t_1 и t_2 можно визуально оценить влияние каждого исходного параметра на возрастание или уменьшение времени истечении, кроме показателя адиабаты k, что связано со сложностью функциональных зависимостей $t_1(k)$ и $t_2(k)$. Для определения этого влияния были проведены расчеты и построены графики приведенных (безразмерных) функций $\hat{t}_1 = t_1 / K_v$ и $\hat{t}_2 = t_2 / K_v$, которые представлены на рис. 1.

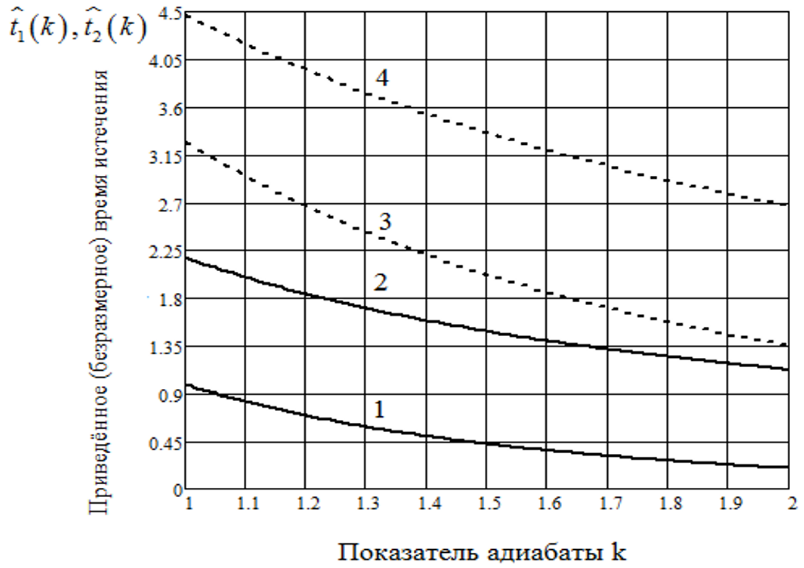

Рис. 1. Зависимость время истечения от показателя адиабаты k при различных значениях степени расширения π_0

Fig. 1. The dependence of the expiration time on the adiabatic exponent k for various values of the expansion ratio π_0

Примечание:

1 — $\hat{t}_1(k, \pi_0 = 3)$, 2 — $\hat{t}_2(k, \pi_0 = 3)$,
3 — $\hat{t}_1(k, \pi_0 = 12)$, 4 — $\hat{t}_1(k, \pi_0 = 12)$

Notes:

1 — $\hat{t}_1(k, \pi_0 = 3)$, 2 — $\hat{t}_2(k, \pi_0 = 3)$,
3 — $\hat{t}_1(k, \pi_0 = 12)$, 4 — $\hat{t}_1(k, \pi_0 = 12)$

Из представленной графической зависимости видно, что увеличение показателя адиабаты k приводит к уменьшению времени истечения газа.

При $\pi_0 \le \pi_{кр}$ истечение начинается при $t_1 = 0$. В этом случае полное время истечение будет равно:

$$t_2 = K_v \left(\frac{k+1}{2} \right)^q \sqrt{\frac{\pi_0^{\frac{k-1}{k}}}{k}} \cdot \alpha_1 .$$

Вторым параметром приведения является температура газа в резервуаре в конце процесса истечения, значение которой можно найти из соотношения:

$$T_2 = T_0 \Big/ \pi_0^{\frac{k-1}{k}} .$$

Критический режим

При этом режиме истечения время будет изменяться от 0 до t_1 , следовательно, относительное время будет меняться в диапазоне $0 \le \bar{t} \le \bar{t}_1$.

Разделив t_1 на t_2 (1), получим относительное значение времени окончания критического режима истечения:

$$\bar{t}_1 = \frac{Q-1}{\varepsilon Q - 1} \, . \tag{2}$$

Здесь, с целью упрощения записи расчетных зависимостей, введены обозначения, часто встречающихся констант $Q(k,\pi_0)$ и $\varepsilon(k,\alpha_1(k))$:

$$Q = \sqrt{\frac{2}{k+1}\pi_0^{\frac{k-1}{k}}}\, , \ \varepsilon = 1 + \frac{k-1}{k+1}\alpha_1 .$$

Так как температура газа при критическом режиме меняется в диапазоне от T_0 до T_1, то пределы изменения относительной температуры будут равны:

— начальная относительная температура — $\bar{T}_0 = T_0/T_2 = (p_0/p_2)^{\frac{k-1}{k}} = \pi_0^{\frac{k-1}{k}}$,

— конечная относительная температура — $\bar{T}_1 = T_1/T_2 = (p_1/p_2)^{\frac{k-1}{k}} = \pi_{кр}^{\frac{k-1}{k}} = \dfrac{k+1}{2}$.

Таким образом, при критическом режиме истечения относительное время меняется в пределах $0 \le \bar{t} \le \bar{t}_1$, а относительная температура — $\pi_0^{\frac{k-1}{k}} \ge \bar{T} \ge \dfrac{k+1}{2}$.

Для нахождения искомой зависимости $\bar{T}(\bar{t})$ воспользуемся формулой для определения давления при критическом режиме истечения из работы [2].

$$p(t) = \frac{p_0}{(B_0 t + 1)^{\frac{2k}{k-1}}}, \text{ где } B_0 = \frac{1}{K_a}\frac{k-1}{2}\sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}.$$

Следовательно, изменение относительного давления $(\bar{p} = p/p_2)$ в диапазоне критического режима $(\pi_0 \ge \bar{p} \ge \pi_{кр})$ можно определить по формуле:

$$\bar{p}(\bar{t}) = \frac{\pi_0}{\left[(\varepsilon Q - 1)\cdot \bar{t} + 1\right]^{\frac{2k}{k-1}}} \, . \tag{3}$$

Так как $\bar{p}^{\frac{k-1}{k}} = \bar{T}$, то для критического режима зависимость $\bar{T}(\bar{t})$ принимает вид:

$$\bar{T}(\bar{t}) = \frac{\pi_0^{\frac{k-1}{k}}}{\left[(\varepsilon Q - 1)\cdot \bar{t} + 1\right]^2} . \tag{4}$$

Нужно отметить, что формулы (3) и (4) дают практически точный результат даже при использовании приближенного значения $\tilde{\varepsilon}(\tilde{\alpha}_1)$. В этом случае максимальная ошибка при $\bar{t} = \bar{t}_1$ для $\bar{p}(\bar{t})$ ~ 0,011% , а для $\bar{T}(\bar{t})$ ~ 0,0026%.

Из полученных соотношений (3) и (4) видно, что характер протекания процесса истечения при критическом режиме определяется только двумя постоянными величинами: полной степенью расширения газа — π_0 и показателем адиабаты газа — k. Поскольку во всех полученных соотношениях присутствует не π_0 в явном виде, а параметр $\pi_0^{\frac{k-1}{k}} = T_0/T_2$, то также можно говорить о зависимости рассматриваемого процесса от отношения его крайних температур (относительного значения начальной температуры — $\overline{T}_0$) и k.

Для анализа процесса истечения вместо $Q(\pi_0,k)$ может быть использован параметр $\chi = \pi_0/\pi_{кр}$, определяющий соотношение между полным и критическим перепадами давлений:

$$Q = \sqrt{\frac{2}{k+1}\pi_0^{\frac{k-1}{k}}} = \sqrt{\left(\frac{\pi_0}{\pi_{кр}}\right)^{\frac{k-1}{k}}} = \sqrt{\chi^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Докритический режим

Время докритического режима истечения при $\pi_0 > \pi_{кр}$ меняется от t_1 до t_2, а температура в резервуаре от T_1 до T_2. В относительных величинах эти диапазоны составят соответственно $\bar{t}_1 \le \bar{t} \le 1$ и $\frac{k+1}{2} \ge \overline{T} \ge 1$. При $\pi_0 \le \pi_{кр}$ время меняется от 0 до T_2, или в относительных величинах — $0 \le \bar{t} \le 1$, $\pi_0^{\frac{k-1}{k}} \ge \overline{T} \ge 1$.

Исходное уравнение [2], описывающее докритический режим и содержащее относительные параметры $\bar{t}$ и $\overline{T}$, можно представить в следующем виде:

$$J\left(\overline{T}\right) - J_1 = -\frac{1}{K_v}\frac{t_2}{\sqrt{\dfrac{2}{k(k-1)}\dfrac{1}{\pi_0^{\frac{k-1}{k}}}}}\left(\bar{t} - \bar{t}_1\right), \tag{5}$$

где $J\left(\overline{T}\right) = \overline{T}^q\sqrt{\overline{T}-1}\cdot\alpha\left(\overline{T}\right)$, $\quad J_1 = \left(\frac{k+1}{2}\right)^q\sqrt{\frac{k-1}{2}}\cdot\alpha_1$,

$$\alpha\left(\overline{T}\right) = 1 + \sum_{n=1}^{N}\left\{(-1)^n\left[\frac{2}{k-1}\left(1-\frac{1}{\overline{T}}\right)\right]^n\left[\prod_{m=1}^{n}\frac{1-m(k-1)}{2m+1}\right]\right\},\ \ \tilde{\alpha}\left(\overline{T}\right) \approx \overline{T}^{\,-0.643q}.$$

Как видно из соотношения (5), нельзя выделить в явном виде $\overline{T}$, т. е. найти прямую функциональную зависимость — $\overline{T} = f\left(\bar{t}\right)$. Однако можно получить точное решение для обратной функции — $\bar{t}\left(\overline{T}\right)$. Из формулы (5) получим:

$$\bar{t}\left(\overline{T}\right) = 1 - \left(1-\bar{t}_1\right)\left(\frac{2}{k+1}\overline{T}\right)^q\sqrt{\frac{2}{k-1}\left(\overline{T}-1\right)}\cdot\overline{\alpha}\left(\overline{T}\right), \tag{6}$$

где $\overline{\alpha}\left(\overline{T}\right)=\alpha\left(\overline{T}\right)/\alpha_1$, или $\widetilde{\alpha}\left(\overline{T}\right)\approx\left(\dfrac{2}{k+1}\overline{T}\right)^{-0.643q}$.

Соотношение (6) позволяет получить точную графическую зависимость $\bar{t}=\varphi\left(\overline{T}\right)$, которую можно перестроить в график — $\overline{T}=f\left(\bar{t}\right)$.

При $\pi_0\le\pi_{кр}$ $\bar{t}_1=0$. Обозначим для этого случая $\bar{t}\left(\overline{T}\right)=\tau\left(\overline{T}\right)$. Тогда из соотношения (6) получим:

$$\tau\left(\overline{T}\right)=1-\left(\frac{2}{k+1}\overline{T}\right)^q\sqrt{\frac{2}{k-1}\left(\overline{T}-1\right)}\cdot\overline{\alpha}\left(\overline{T}\right).$$

Подставив в (6) значения $\bar{t}_1$ и $\tau\left(\overline{T}\right)$, найдем другой вид функции $\bar{t}\left(\overline{T}\right)$:

$$\bar{t}\left(\overline{T}\right)=\frac{\left[1+(\varepsilon-1)\cdot\tau\left(\overline{T}\right)\right]Q-1}{\varepsilon Q-1}. \tag{7}$$

Из соотношения (7) следует, что, как и при критическом режиме истечения, характер протекания процесса зависит от тех же 2-х констант — π_0 и k.

Если при расчете использовать приближенное значение $\widetilde{\alpha}\left(\overline{T}\right)$, то функция $\tau\left(\overline{T}\right)$ принимает вид:

$$\tilde{\tau}\left(\overline{T}\right)\approx1-\left(\frac{2}{k+1}\overline{T}\right)^{0.357q}\sqrt{\frac{2}{k-1}\left(\overline{T}-1\right)}. \tag{8}$$

В этом случае значения функции $\bar{t}\left(\overline{T}\right)$ в конечных точках расчетного диапазона принимают точные значения, а внутри него ошибка достигает своего максимального значения. При малых реальных значениях π_0 и k эта ошибка не превышает ~ 1,1%, а с их ростом она уменьшается до ~ 0,04%.

Для получения прямой функциональной зависимости $\overline{T}=f\left(\bar{t}\right)$, обеспечивающей возможность нахождения какого-либо текущего значения $T_i\left(t_i\right)$ без построения графической зависимости, как и в предыдущих работах [1] и [2], была использована аппроксимация исходной функции $J\left(\overline{T}\right)$. В данной работе в результате расчетно-аналитического исследования было получено следующее соотношение для определения приближенного значения относительной температуры $\overline{T}(\bar{t})$:

$$\widetilde{T}\left(\bar{t}\right)\approx1+\frac{k-1}{2}\left(\frac{1-\bar{t}}{1-\bar{t}_1}\right)^{2\alpha_1}. \tag{9}$$

После подстановки значения $\bar{t}_1$ формула (9) принимает вид:

$$\tilde{T}(\bar{t}) \approx 1 + \frac{k-1}{2}\left[\frac{\varepsilon \cdot Q - 1}{(\varepsilon - 1)Q}(1-\bar{t})\right]^{2\alpha_1}. \qquad (10)$$

Формула (10) обеспечивает получение в конечных точках расчетного диапазона не только точные значения функции $\bar{T}(\bar{t})$, но и значения ее производных $d\bar{T}/d\bar{t}$.

Из формулы (10), используя известную связь температуры и давления при адиабатическом процессе, можно найти соотношение для расчета $\bar{p}(\bar{t})$:

$$\bar{p}(\bar{t}) \approx \left\{1 + \frac{k-1}{2}\left[\frac{\varepsilon \cdot Q - 1}{(\varepsilon - 1)\cdot Q}(1-\bar{t})\right]^{2\alpha_1}\right\}^{\frac{k}{k-1}}. \qquad (11)$$

Расчетно-аналитическое исследование показало, что соотношения (10) и (11) обеспечивают получение достаточно точных результатов даже при использовании $\tilde{\alpha}_1$. В реальных диапазонах изменения π_0 и k максимальная ошибка определения $\bar{T}$ может достигать ~ 0,55%, а $\bar{p}$ ~ 2,6% (при k ~ 1,5).

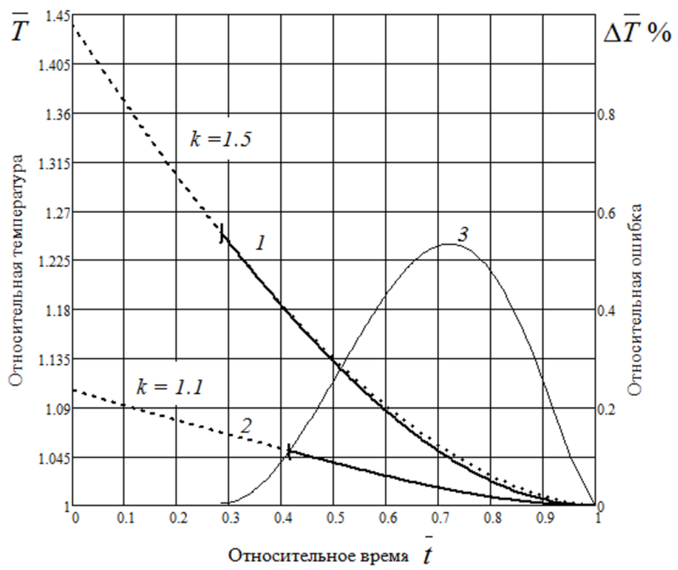

Рис. 2. Зависимость изменения относительной температуры $\bar{T}$ от относительного времени $\bar{t}$ истечения газа при π_0 = 3 и двух значениях *k*.

Примечание: на линиях 1 и 2 точные значения: пунктир — критический режим, сплошная — докритический режим, точки на линии 1 — приближенный расчет докритического режима, 3 — относительная ошибка определения $\bar{T}$ при *k* = 1,5

Fig. 2. Dependence of relative changes in temperature $\bar{T}$ of the relative time $\bar{t}$ of the gas expiration π_0 = 3 and two values of *k*

Notes: the precise values on the lines 1 and 2: dotted line — critical mode; solid line —subcritical regime; points on line 1 — an approximate calculation of the subcritical regime; 3 — relative error of defining $\bar{T}$ with *k* = 1.5

На рис. 2 представлен пример расчета в относительных величинах. Расчеты проведены для одного значения полной степени расширения газа $\pi_0 = 3$ и 2-х значений показателя адиабаты k. Из графика следует, что с ростом k интенсивность истечения газа возрастает. Это приводит к тому, что, как уже отмечалось, общее время истечения уменьшается.

Выводы

Полученные расчетные соотношения с использованием относительных параметров позволяют в рамках принятых ограничений провести предварительный расчет и исследовать характер процесса истечения газа в обобщенном виде, используя всего два параметра — показатель адиабаты и полную степень расширения давления. Такой подход может быть полезен на стадии эскизной проработки нового проекта. Кроме того, исследование влияния показателя адиабаты может помочь с выбором рабочего тела при проектирование замкнутых теплоэнергетических установок, использующих элементы, связанные с истечением газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. 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
3. Техническая термодинамика / под ред. В. И. Крутова. М.: Высшая школа, 1981. 472 с.

Vadim V. TARASOV[1]

UDC 536-34

CALCULATING THE TIME OF ADIABATIC FLOW OF AN IDEAL GAS FROM A CONSTANT VOLUME RESERVOIR USING RELATIVE PARAMETERS

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

Abstract

This work continues the computational and analytical study of the adiabatic process of the ideal gas outflow from the constant volume reservoir. The author's previous works considered two main tasks: 1) determining the total time of the gas outflow from the tank; and 2) finding the analytical expression to engineer the methods of calculation for determining the amount of gas pressure in the tank depending on the outflow time.

The results of these works (with some assumptions) allow solving the tasks for each specific case determined by the absolute values of the initial parameters with a sufficient degree of accuracy.

At the preliminary stage of the development of new units, it is possible to employ a more general computational and analytical study using relative parameters, excluding some initial values, and thus, to the identify parameters that directly affect the nature of the process under study.

Since this paper considers the process of gas flow depending on time, when showing the output of the calculated ratios for the argument, the relative time is used. Given that the thermo- dynamic parameters of an ideal gas are related by the equation of state, the relative value of one of the three gas parameters a can be considered s a function: pressure, temperature, and density.

Citation: 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

This paper considers the temperature of the gas at the outlet from the tank and the total time of the gas discharge as the parameters of the reduction in the output of the calculated ratios. In each specific task, both of these parameters are constant values, the values of which can be determined from the source data. The casting parameters are taken in the output section because they are the result of the entire expiration process.

The use of relative values has shown that the nature of the flow of the process of expiration, in the adopted formulation of the problem, depends only on two constant values: the total differential pressure (a parameter that determines the potential energy of the gas enclosed in the tank) and the adiabatic index (a parameter, which characterizes the working body).

In this paper, exact analytical dependences are obtained for the calculation of two possible modes of gas flow: critical and subcritical. However, if the direct dependence of the relative temperature on the relative time is obtained for the subcritical regime, then the opposite is obtained for the subcritical regime (time on temperature). To obtain the most popular in the practice of engineering calculations of direct dependence (temperature on time), the author has used the approximation function. The obtained approximate ratio allows to determine the value of the relative temperature at a given value of relative time with a sufficiently high degree of accuracy.

Keywords

Adiabatic process, reservoir, gas, outflow, temperature, pressure, relative value.

DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-2-94-104

REFERENCES

1. Tarasov V. V. 2016. “Vyvod raschetnoy zavisimosti dlya opredeleniya davle-niya ideal’nogo gaza v rezervuare postoyannogo ob”yema pri ego adia-baticheskom 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
2. Tarasov V. V. 2016. “Raschet vremeni istecheniya ideal’nogo gaza iz rezervuara postoyannogo ob”yema v sredu s postoyannym davleniyem pri adia-baticheskom 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
3. Krutov V. I. (ed.). 1981. Tekhnicheskaya termodinamika [Technical Thermodynamics]. Moscow: Vysshaya shkola.