

Henryk GÓRNIAK, Józef SZYMCZYK

ANALIZA TERMODYNAMICZNA PROCESU NAPEŁNIANIA ZBIORNIKA

Streszczenie. W pracy wyprowadzono równania pozwalające obliczyć czas τ napełnienia zbiornika przy założeniu, że ciśnienie p , przed zaworem dolutowym pozostaje niezmienna. Przyjęto, że stan gazu znajdującego się aktualnie w zbiorniku można opisać za pomocą zależności słusznych dla przemiany politropowej. W ogólnym przypadku wykorzystuje się do obliczeń funkcje pomocnicze Y , których wartości liczbowe wyznaczono metodami numerycznymi. Do pracy dołączono tablice obliczonych wartości funkcji Y dla różnych gazów doskonałych i różnych wartości wykładnika ϑ .

Zestawienie ważniejszych oznaczeń

- A - pole przekroju poprzecznego przewodu, m^2 ,
 k - \dot{m}/\dot{m}_g - liczba zmniejszenia masy strumienia, [1],
 \dot{m} - $dm/d\tau$ - masa strumienia gazu, kg/s,
 p - ciśnienie, Pa,
 R - indywidualna stała gazowa, J/(kg.K),
 T - temperatura bezwzględna, K,
 V - objętość zbiornika, m^3 ,
 Y - funkcja pomocnicza zdefiniowana wzorem (4),
 $\beta = p_2/p_1$ - stosunek ciśnień,
 κ - wykładnik izentropy,
 ϑ - wykładnik politropy,
 τ - czas, s,
 ϕ - liczba przepływu [1].

Indeksy i apostrofy dotyczą

- 1 - parametrów gazu przed zaworem dolutowym,
 2 - " " " " za zaworem (i w napełnianym zbiorniku),
 L - parametrów krytycznych (de LAVALA [1]),
 s - izentropy,
 max - przepływu maksymalnego,
 ' - parametrów początkowych procesu ($\tau = 0$),
 " - parametrów końcowych procesu ($\tau = \tau_k$).

1. Wstęp

W czasie napełniania zbiornika zmienia się nie tylko ilość gazu, ale zmiany ulegają także jego parametry termiczne (np. temperatura i ciśnienie). Zmiany te, a szczególnie zmiana temperatury gazu, są bardzo istotnego znaczenia zarówno dla konstruktorów różnego rodzaju butli gazowych, jak i dla użytkowników gazu. Rozpatrywany tu przypadek napełniania zbiornika przy założeniu stałego ciśnienia p_1 gazu na dopływie (przed zaworem dolotowym) ma duże znaczenie praktyczne. Napełnianie wszelkiego rodzaju butli (niewielkich zbiorników) gazem pobieranym z dużych zbiorników nie powoduje bowiem w czasie tego procesu większych zmian parametrów termicznych gazu przed zaworem zamykającym napełniany zbiornik (butlę). Jako niemal identyczny przypadek można również potraktować napełnianie zbiorników przy ciśnieniu zbliżonym do ciśnienia stoczenia (np. napełnianie mieszanką paliwowo-powietrzną cylindra silnika spalinowego z zapłonem iskrowym).

Przy analizie teoretycznej napełniania zbiornika przyjęto, że aktualny stan termiczny gazu w zbiorniku można przedstawić za pomocą zależności słusznych dla przemiany politropowej. Opis termodynamiczny rozpatrywanego procesu jest podobny do przedstawionego w pracy [2] procesu wypływu gazu ze zbiornika. Ponieważ najogólniejszy przypadek, zarówno dla procesu napełniania jak i opróżniania zbiornika, nie daje się rozwiązać przy użyciu funkcji elementarnych, więc oba wymienione procesy trzeba rozpatrywać oddzielnie. Dla każdego z nich należy wprowadzić inną funkcję pomocniczą.

2. Zależność pomiędzy ciśnieniem gazu w zbiorniku i czasem napełniania

Napełnianie zbiornika gazem rozpoczyna się zwykle w zakresie podkrytycznym, czyli przy stosunku ciśnień $\beta = p_2/p_1 < \beta_L$. W miarę dopływu gazu do zbiornika następuje wzrost ciśnienia p_2 i zarazem stosunku ciśnień β . Do chwili osiągnięcia krytycznego stosunku ciśnień β_L masa strumienia gazu dopływającego przez zawór do zbiornika jest stała i ma wartość maksymalną, jeżeli założy się, że w przestrzeni, z której gaz dopływa do zaworu, jest stałe ciśnienie ($p_1 = \text{idem}$). Przepływ gazu przez zawór daje się bowiem sprowadzić za pomocą odpowiednich poprawek do klasycznego przepływu przez dyszę BENDEMANNA.

Zależność między czasem τ napełniania zbiornika i ciśnieniem p_2 gazu (w zbiorniku), zmieniającym się według politropy o dowolnym wykładniku ν - dla przepływu podkrytycznego (dźwiękowego, gdy $0 < \beta \leq \beta_L$), daje się wyrazić za pomocą funkcji elementarnych. Wykorzystując równanie ciągłości

przepływu termiczne równanie stanu gazu doskonałego i podstawowe zależności dotyczące przepływu przez dyszę BENDEMANNA można wyprowadzić następujący wzór:

$$\bar{c} = \frac{v}{v_2} \frac{\sqrt{RT_1}}{kA \phi_s \max p_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] = \frac{v}{v_2} \frac{\sqrt{RT_1}}{kA \phi_s \max p_1} \left[\left(\frac{\beta}{\beta'} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right]. \quad (1)$$

Jeżeli w czasie napełniania zbiornika przejdzie się do zakresu przepływu nadkrytycznego (poddźwiękowego, $\beta_L < \beta < 1$), to wtedy masa strumienia gazu przepływającego przez zawór nie jest już maksymalna. Wówczas różniczkę masy gazu doskonałego dopływającego do zbiornika można wyrazić następująco:

$$dm = - \dot{m} d\bar{c} = k \dot{m}_s d\bar{c} = - k \phi_s A \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} d\bar{c}, \quad (a)$$

gdzie:

$$\phi_s = \frac{2\gamma}{\gamma-1} \sqrt{\left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right]} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\beta^{\frac{2}{\gamma}} - \beta^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right]}. \quad (2)$$

Różniczka masy daje się również określić z równania charakterystycznego gazów doskonałych

$$dm = d\left(\frac{p_2 \bar{v}}{RT_2}\right) = d\left[\frac{p_2 \bar{v}}{RT_2} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right] = \frac{p_2^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\gamma RT_2} v \frac{1-\gamma}{\gamma} dp_2. \quad (b)$$

Po porównaniu prawych stron zależności (a) oraz (b) i odpowiednich przekształceniach algebraicznych otrzymuje się następujące równanie różniczkowe:

$$\begin{aligned} d\bar{c} &= \frac{v}{k\gamma AT_2} \sqrt{\frac{T_1}{R}} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \frac{d\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} \phi_s} = \\ &= \frac{v}{k\gamma AT_2} \sqrt{\frac{T_1}{R}} \beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \frac{d\beta}{\beta^{(\gamma-1)/\gamma} \phi_s(\beta)}, \end{aligned} \quad (3)$$

które podaje zależność pomiędzy czasem ładowania i aktualnym ciśnieniem p_2 gazu w zbiorniku.

Dla dowolnej przemiany politropowej równania (3) nie można rozwiązać przy użyciu znanych funkcji elementarnych. Należy je więc rozwiązać metodami numerycznymi po wprowadzeniu funkcji pomocniczej

$$Y = \int_{\beta_L}^{\beta} \frac{d\beta}{\beta^{(\gamma-1)/\gamma} \psi_s(\beta)} \cdot k \quad (4)$$

Gdy ładowanie zbiornika gazem w zakresie nadkrytycznym jest realizowane od $\beta' = p'_2/p_1 > \beta_L$ do $\beta'' = p''_2/p_1 > \beta' > \beta_L$, wówczas rozwiązanie równania (3) przy użyciu funkcji pomocniczej Y można przedstawić następująco:

$$\tau = \frac{V}{k\gamma AT_2'} \sqrt{\frac{T_1}{R}} \beta'^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} (Y'' - Y') \quad (5)$$

Jeżeli proces napełniania zbiornika rozpoczyna się dla podkrytycznego stosunku ciśnień $\beta' = p'_2/p_1 < \beta_L$, a kończy przy nadkrytycznym stosunku $\beta'' = p''_2/p_1 > \beta_L$, wówczas czas napełniania jest sumą czasu napełniania w zakresie podkrytycznym (wzór (1)) i nadkrytycznym (wzór (5)). Wtedy

$$\tau = \frac{V\sqrt{RT_1}}{kA} \left\{ \frac{1}{v_2' \psi_s \max p_1} \left[\left(\frac{\beta_L}{\beta'} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] + \frac{1}{\gamma RT_2'} \beta'^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} Y'' \right\} \quad (6)$$

Funkcja pomocnicza Y może być wykorzystana również w przypadkach, gdy napełnianie zbiornika realizowane jest przy zmiennym polu poprzecznego przekroju zaworu. Jeżeli pole to (zmiennie w czasie) opisane jest przez funkcję $A(\tau)$, a napełnianie zbiornika gazem realizowane jest w zakresie nadkrytycznym (β' oraz β'' są większe od β_L), wtedy zależność pomiędzy aktualnym ciśnieniem gazu w zbiorniku i czasem wpływu można ująć za pomocą równania:

$$\int_{\beta'}^{\beta''} \frac{A(\tau)}{A} d\tau = \frac{V}{k\gamma AT_2'} \sqrt{\frac{T_1}{R}} (\beta'^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} (Y'' - Y')), \quad (7)$$

gdzie wielkość A oznacza pole przekroju przy całkowitym otwarciu zaworu. Funkcje Y mogą być wykorzystane także dla jeszcze bardziej złożonych przypadków, np. do analizy procesu napełniania cylindra silnika tłokowego, w czasie którego to procesu zmienia się napełniana objętość (cylindra).

3. Uwagi dotyczące tablic funkcji pomocniczej Y

Tablice 1 do 5 zawierają obliczone za pomocą całkowania numerycznego wartości funkcji pomocniczej Y dla jedno-, dwu- oraz trójatomowych gazów doskonałych ($\kappa = 1,667; 1,400$ oraz $1,333$), a także przegrzanej ($\kappa = 1,3$) i nasyconej ($\kappa = 1,135$) pary wodnej traktowanej w przybliżeniu jak gaz doskonały. Na każdego wykładnika κ izentropy obliczono wartości funkcji pomocniczej Y przy różnych wykładnikach ν politropy, a mianowicie od $\nu = 1,0$ do $1,3$ w odstępach $\Delta\nu = 0,05$, a także dla $\nu = \kappa$ oraz przy różnych stosunkach ciśnień większych od β_L aż do 1 w odstępach $\Delta\beta = 0,025$.

Tablica 1

Wartości funkcji pomocniczej Y
dla jednoatomowego gazu doskonałego
 $\kappa = 5/3 = 1,666\ 667$

| β | Wykładnik politropy | | | | | | | |
|---------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1,00 | 1,05 | 1,10 | 1,15 | 1,20 | 1,25 | 1,30 | 1,667 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0,500 | 0,0145 | 0,0150 | 0,0154 | 0,0159 | 0,0163 | 0,0166 | 0,0170 | 0,0192 |
| 0,525 | 0,0489 | 0,0505 | 0,0520 | 0,0535 | 0,0548 | 0,0560 | 0,0572 | 0,0642 |
| 0,550 | 0,0835 | 0,0862 | 0,0887 | 0,0910 | 0,0932 | 0,0952 | 0,0972 | 0,1086 |
| 0,575 | 0,1184 | 0,1220 | 0,1253 | 0,1285 | 0,1315 | 0,1343 | 0,1369 | 0,1524 |
| 0,600 | 0,1535 | 0,1580 | 0,1622 | 0,1662 | 0,1699 | 0,1734 | 0,1767 | 0,1959 |
| 0,625 | 0,1890 | 0,1944 | 0,1994 | 0,2041 | 0,2085 | 0,2126 | 0,2165 | 0,2391 |
| 0,650 | 0,2251 | 0,2313 | 0,2370 | 0,2423 | 0,2474 | 0,2521 | 0,2565 | 0,2823 |
| 0,675 | 0,2619 | 0,2687 | 0,2751 | 0,2811 | 0,2867 | 0,2920 | 0,2969 | 0,3256 |
| 0,700 | 0,2994 | 0,3069 | 0,3139 | 0,3205 | 0,3266 | 0,3324 | 0,3378 | 0,3692 |
| 0,725 | 0,3379 | 0,3460 | 0,3536 | 0,3607 | 0,3674 | 0,3736 | 0,3794 | 0,4133 |
| 0,750 | 0,3775 | 0,3862 | 0,3944 | 0,4020 | 0,4091 | 0,4157 | 0,4219 | 0,4581 |
| 0,775 | 0,4185 | 0,4278 | 0,4364 | 0,4445 | 0,4520 | 0,4590 | 0,4656 | 0,5038 |
| 0,800 | 0,4613 | 0,4710 | 0,4801 | 0,4886 | 0,4965 | 0,5039 | 0,5108 | 0,5508 |
| 0,825 | 0,5062 | 0,5164 | 0,5258 | 0,5347 | 0,5429 | 0,5506 | 0,5579 | 0,5996 |
| 0,850 | 0,5537 | 0,5643 | 0,5742 | 0,5833 | 0,5919 | 0,5999 | 0,6074 | 0,6506 |
| 0,875 | 0,6047 | 0,6157 | 0,6259 | 0,6353 | 0,6442 | 0,6524 | 0,6602 | 0,7047 |
| 0,900 | 0,6604 | 0,6717 | 0,6822 | 0,6919 | 0,7010 | 0,7095 | 0,7174 | 0,7632 |
| 0,925 | 0,7228 | 0,7344 | 0,7451 | 0,7551 | 0,7644 | 0,7731 | 0,7812 | 0,8279 |
| 0,950 | 0,7900 | 0,8078 | 0,8187 | 0,8288 | 0,8383 | 0,8471 | 0,8554 | 0,9030 |
| 0,975 | 0,8901 | 0,9021 | 0,9132 | 0,9235 | 0,9331 | 0,9420 | 0,9504 | 0,9986 |
| 1,000 | 1,1140 | 1,1260 | 1,1372 | 1,1476 | 1,1572 | 1,1667 | 1,1747 | 1,2236 |

Tablica 2

Wartości funkcji pomocniczej Y
dla dwuatomowego gazu doskonałego
 $\kappa = 7/5 = 1,4$

| $\beta \backslash \theta$ | | Wykładnik politropy | | | | | | | |
|---------------------------|--------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| | | 1,00 | 1,05 | 1,10 | 1,15 | 1,20 | 1,25 | 1,30 | 1,40 |
| 1 | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0,550 | 0,0317 | 0,0326 | 0,0335 | 0,0344 | 0,0351 | 0,0359 | 0,0366 | 0,0378 | |
| 0,575 | 0,0683 | 0,0703 | 0,0721 | 0,0738 | 0,0754 | 0,0769 | 0,0784 | 0,0810 | |
| 0,600 | 0,1051 | 0,1080 | 0,1107 | 0,1133 | 0,1156 | 0,1179 | 0,1200 | 0,1238 | |
| 0,625 | 0,1422 | 0,1460 | 0,1495 | 0,1528 | 0,1559 | 0,1588 | 0,1615 | 0,1665 | |
| 0,650 | 0,1797 | 0,1843 | 0,1886 | 0,1926 | 0,1963 | 0,1998 | 0,2031 | 0,2091 | |
| 0,675 | 0,2178 | 0,2231 | 0,2281 | 0,2327 | 0,2371 | 0,2412 | 0,2450 | 0,2519 | |
| 0,700 | 0,2565 | 0,2626 | 0,2682 | 0,2734 | 0,2783 | 0,2829 | 0,2872 | 0,2951 | |
| 0,725 | 0,2961 | 0,3028 | 0,3091 | 0,3148 | 0,3203 | 0,3253 | 0,3301 | 0,3387 | |
| 0,750 | 0,3368 | 0,3441 | 0,3509 | 0,3572 | 0,3631 | 0,3686 | 0,3737 | 0,3831 | |
| 0,775 | 0,3788 | 0,3867 | 0,3939 | 0,4007 | 0,4070 | 0,4129 | 0,4184 | 0,4285 | |
| 0,800 | 0,4225 | 0,4308 | 0,4385 | 0,4457 | 0,4524 | 0,4587 | 0,4646 | 0,4752 | |
| 0,825 | 0,4682 | 0,4769 | 0,4851 | 0,4927 | 0,4997 | 0,5063 | 0,5125 | 0,5237 | |
| 0,850 | 0,5164 | 0,5256 | 0,5341 | 0,5421 | 0,5494 | 0,5563 | 0,5628 | 0,5745 | |
| 0,875 | 0,5681 | 0,5777 | 0,5865 | 0,5947 | 0,6024 | 0,6095 | 0,6162 | 0,6284 | |
| 0,900 | 0,6244 | 0,6342 | 0,6434 | 0,6519 | 0,6598 | 0,6672 | 0,6741 | 0,6866 | |
| 0,925 | 0,6873 | 0,6974 | 0,7068 | 0,7155 | 0,7237 | 0,7312 | 0,7383 | 0,7512 | |
| 0,950 | 0,7608 | 0,7712 | 0,7808 | 0,7897 | 0,7980 | 0,8057 | 0,8130 | 0,8261 | |
| 0,975 | 0,8553 | 0,8658 | 0,8756 | 0,8846 | 0,8931 | 0,9009 | 0,9083 | 0,9216 | |
| 1,000 | 1,0800 | 1,0894 | 1,1004 | 1,1084 | 1,1180 | 1,1259 | 1,1322 | 1,1468 | |

Tablica 3

Wartości funkcji pomocniczej Y
dla trój- lub więcejatomowego gazu doskonałego
 $\kappa = 4/3 = 1,333\ 333$

| $\beta \backslash \theta$ | | Wykładnik politropy | | | | | | | |
|---------------------------|--------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | 1,00 | 1,05 | 1,10 | 1,15 | 1,20 | 1,25 | 1,30 | 1,333 |
| 1 | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0,550 | 0,0147 | 0,0151 | 0,0155 | 0,0159 | 0,0163 | 0,0166 | 0,0169 | 0,0171 | |
| 0,575 | 0,0519 | 0,0533 | 0,0547 | 0,0560 | 0,0572 | 0,0583 | 0,0594 | 0,0600 | |
| 0,600 | 0,0892 | 0,0916 | 0,0939 | 0,0960 | 0,0980 | 0,0998 | 0,1016 | 0,1027 | |
| 0,625 | 0,1268 | 0,1301 | 0,1332 | 0,1361 | 0,1388 | 0,1413 | 0,1436 | 0,1452 | |
| 0,650 | 0,1648 | 0,1689 | 0,1727 | 0,1763 | 0,1797 | 0,1828 | 0,1858 | 0,1877 | |
| 0,675 | 0,2033 | 0,2081 | 0,2127 | 0,2169 | 0,2209 | 0,2246 | 0,2281 | 0,2303 | |
| 0,700 | 0,2424 | 0,2480 | 0,2532 | 0,2581 | 0,2626 | 0,2668 | 0,2708 | 0,2733 | |

cd. tablicy 3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,725 | 0,2824 | 0,2886 | 0,2944 | 0,2998 | 0,3049 | 0,3096 | 0,3140 | 0,3168 |
| 0,750 | 0,3234 | 0,3303 | 0,3366 | 0,3425 | 0,3481 | 0,3532 | 0,3580 | 0,3611 |
| 0,775 | 0,3657 | 0,3731 | 0,3800 | 0,3864 | 0,3923 | 0,3979 | 0,4031 | 0,4064 |
| 0,800 | 0,4096 | 0,4175 | 0,4249 | 0,4317 | 0,4380 | 0,4440 | 0,4495 | 0,4530 |
| 0,825 | 0,4556 | 0,4639 | 0,4717 | 0,4789 | 0,4856 | 0,4918 | 0,4977 | 0,5014 |
| 0,850 | 0,5041 | 0,5129 | 0,5210 | 0,5285 | 0,5355 | 0,5421 | 0,5482 | 0,5521 |
| 0,875 | 0,5560 | 0,5651 | 0,5735 | 0,5814 | 0,5887 | 0,5955 | 0,6019 | 0,6059 |
| 0,900 | 0,6124 | 0,6219 | 0,6306 | 0,6387 | 0,6463 | 0,6533 | 0,6599 | 0,6641 |
| 0,925 | 0,6755 | 0,6852 | 0,6942 | 0,7026 | 0,7103 | 0,7176 | 0,7243 | 0,7286 |
| 0,950 | 0,7491 | 0,7591 | 0,7685 | 0,7768 | 0,7848 | 0,7922 | 0,7991 | 0,8035 |
| 0,975 | 0,8437 | 0,8538 | 0,8635 | 0,8719 | 0,8800 | 0,8875 | 0,8945 | 0,8989 |
| 1,000 | 1,0682 | 1,0784 | 1,0883 | 1,0966 | 1,1047 | 1,1123 | 1,1194 | 1,1238 |

Tablica 4

Wartości funkcji pomocniczej Y
dla przegrzanej pary wodnej traktowanej jak gaz doskonały
 $\alpha = 1,300\ 000$

| $\beta \backslash \alpha$ | | W y k ł a d n i k p o l i t r o p y | | | | | | |
|---------------------------|--------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| | | 1,00 | 1,05 | 1,10 | 1,15 | 1,20 | 1,25 | 1,30 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 0,550 | 0,0064 | 0,0066 | 0,0068 | 0,0070 | 0,0071 | 0,0073 | 0,0074 | |
| 0,575 | 0,0434 | 0,4552 | 0,0463 | 0,0474 | 0,0484 | 0,0493 | 0,0502 | |
| 0,600 | 0,0815 | 0,0837 | 0,0858 | 0,0877 | 0,0895 | 0,0912 | 0,0927 | |
| 0,625 | 0,1194 | 0,1225 | 0,1254 | 0,1281 | 0,1306 | 0,1329 | 0,1351 | |
| 0,650 | 0,1576 | 0,1615 | 0,1652 | 0,1686 | 0,1718 | 0,1747 | 0,1775 | |
| 0,675 | 0,1963 | 0,2010 | 0,2054 | 0,2094 | 0,2132 | 0,2168 | 0,2201 | |
| 0,700 | 0,2357 | 0,2411 | 0,2461 | 0,2508 | 0,2551 | 0,2592 | 0,2630 | |
| 0,725 | 0,2759 | 0,2819 | 0,2875 | 0,2928 | 0,2976 | 0,3022 | 0,3065 | |
| 0,750 | 0,3171 | 0,3237 | 0,3299 | 0,3356 | 0,3410 | 0,3460 | 0,3507 | |
| 0,775 | 0,3596 | 0,3668 | 0,3734 | 0,3797 | 0,3854 | 0,3908 | 0,3959 | |
| 0,800 | 0,4036 | 0,4113 | 0,4185 | 0,4251 | 0,4313 | 0,4371 | 0,4425 | |
| 0,825 | 0,4497 | 0,4579 | 0,4654 | 0,4725 | 0,4790 | 0,4851 | 0,4908 | |
| 0,850 | 0,4983 | 0,5069 | 0,5149 | 0,5222 | 0,5229 | 0,5355 | 0,5415 | |
| 0,875 | 0,5503 | 0,5593 | 0,5675 | 0,5752 | 0,5824 | 0,5890 | 0,5953 | |
| 0,900 | 0,6069 | 0,6161 | 0,6247 | 0,6327 | 0,6400 | 0,6469 | 0,6534 | |
| 0,925 | 0,6700 | 0,6796 | 0,6884 | 0,6966 | 0,7042 | 0,7113 | 0,7179 | |
| 0,950 | 0,7438 | 0,7535 | 0,7626 | 0,7709 | 0,7787 | 0,7860 | 0,7929 | |
| 0,975 | 0,8384 | 0,8483 | 0,8575 | 0,8660 | 0,8739 | 0,8813 | 0,8882 | |
| 1,000 | 1,0617 | 1,0729 | 1,0820 | 1,0906 | 1,0985 | 1,1061 | 1,1115 | |

Tablica 5

Wartości funkcji pomocniczej Y
dla nasyconej pary wodnej traktowanej jak gaz doskonały
 $\kappa = 1,135$

| $\beta \backslash \vartheta$ | Wykładnik politropy | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1,00 | 1,05 | 1,10 | 1,15 | 1,20 | 1,25 | 1,30 | 1,135 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0,600 | 0,0356 | 0,0365 | 0,0373 | 0,0381 | 0,0388 | 0,0395 | 0,0402 | 0,0379 |
| 0,625 | 0,0750 | 0,0769 | 0,0786 | 0,0802 | 0,0817 | 0,0831 | 0,0844 | 0,0797 |
| 0,650 | 0,1147 | 0,1174 | 0,1199 | 0,1223 | 0,1245 | 0,1265 | 0,1284 | 0,1216 |
| 0,675 | 0,1548 | 0,1583 | 0,1615 | 0,1646 | 0,1674 | 0,1700 | 0,1725 | 0,1637 |
| 0,700 | 0,1954 | 0,1996 | 0,2036 | 0,2072 | 0,2106 | 0,2138 | 0,2168 | 0,2061 |
| 0,725 | 0,2368 | 0,2417 | 0,2462 | 0,2504 | 0,2544 | 0,2580 | 0,2615 | 0,2492 |
| 0,750 | 0,2790 | 0,2846 | 0,2897 | 0,2944 | 0,2988 | 0,3030 | 0,3068 | 0,2930 |
| 0,775 | 0,3225 | 0,3286 | 0,3342 | 0,3394 | 0,3443 | 0,3489 | 0,3531 | 0,3379 |
| 0,800 | 0,3675 | 0,3741 | 0,3802 | 0,3858 | 0,3911 | 0,3960 | 0,4006 | 0,3842 |
| 0,825 | 0,4143 | 0,4214 | 0,4279 | 0,4340 | 0,4396 | 0,4449 | 0,4498 | 0,4322 |
| 0,850 | 0,4637 | 0,4712 | 0,4781 | 0,4845 | 0,4905 | 0,4960 | 0,5012 | 0,4826 |
| 0,875 | 0,5163 | 0,5242 | 0,5314 | 0,5382 | 0,5444 | 0,5502 | 0,5557 | 0,5362 |
| 0,900 | 0,5735 | 0,5816 | 0,5892 | 0,5962 | 0,6027 | 0,6087 | 0,6144 | 0,5941 |
| 0,925 | 0,6371 | 0,6455 | 0,6534 | 0,6606 | 0,6673 | 0,6735 | 0,6794 | 0,6585 |
| 0,950 | 0,7112 | 0,7199 | 0,7279 | 0,7353 | 0,7422 | 0,7486 | 0,7546 | 0,7332 |
| 0,975 | 0,8062 | 0,8150 | 0,8232 | 0,8307 | 0,8378 | 0,8443 | 0,8504 | 0,8285 |
| 1,000 | 1,0296 | 1,0386 | 1,0468 | 1,0545 | 1,0616 | 1,0682 | 1,0743 | 1,0523 |

Wartości funkcji pomocniczej Y rosną ze wzrostem stosunku ciepła właściwego (wykładnika izentropy) κ , ze wzrostem wykładnika politropy ϑ oraz oczywiście ze wzrostem stosunku ciśnień β . Wartości funkcji Y są na ogół mniejsze od 1, jedynie dla stosunku ciśnień bliskiego 1 ($\beta \approx 1$) przekraczają one 1 i to bardzo nieznacznie. Maksymalną wartość funkcji pomocniczej $Y_{\max} \approx 1,224$ uzyskano dla adiabatycznej odwracalnej (izentropowej, $\vartheta = \kappa$) zmiany stanu (w zbiorniku) gazu jednoatomowego ($\kappa = 1,667$) przy stosunku ciśnień $\beta = 1$.

Obliczone wartości funkcji pomocniczej Y są bezwymiarowe i przystosowane do wykorzystania ich w równaniach wielkościowych (np. przy użyciu jednostek układu SI).

LITERATURA

- [1] Ochęduszek S.: Termodynamika stosowana. WNT, Warszawa, 1974.
- [2] Górniak H., Szymczyk J.: Tablice funkcji pomocniczej do obliczeń termodynamicznych procesu wypływu gazu ze zbiornika. ZN Pol. Śląskiej, Energetyka z. 96, Gliwice 1988.

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Zbigniew Pietrzyk

Wpłynęło do Redakcji w lipcu 1985 r.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ РЕЗЕРВУАРА

Р е з ю м е

В работе получены уравнения, позволяющие рассчитать время заполнения резервуара при предположении, что давление p_1 перед входным клапаном остается неизменным. Предполагается, что состояние газа находящегося в данный момент в резервуаре, можно описать при помощи зависимостей справедливых для политропного превращения. В общем случае для расчетов используются вспомогательные функции Y , числовые значения которых определены машинными методами. К работе присоединены таблицы рассчитанных значений функций Y для различных идеальных газов и разных показателей степени.

THERMODYNAMICAL ANALYSIS OF THE PROCESS OF TANKAGE

S u m m a r y:

In this paper equations enabling calculation of the time τ of the tankage are derived under assumption that the pressure p_1 before the inflow valve is invariant. It was assumed that the state of the gas in the tank may be described by the relations for the polytropic process. In the general case aiding functions Y are used for computation. Their values are found numerically. This paper contains also tables of the values of functions Y found for different perfect gases and different values of ν .