

STANISŁAW JERZY GDULA, HENRYK GORNIAK
Instytut Techniki Ciepłej

KRYTYCZNE PARAMETRY WYPŁYWU PARY WODNEJ
Z ADIABATYCZNEGO RUROCIĄGU

Streszczenie. Dla przepływu adiabaticznego pary wodnej w rurociągu wyznaczono parametry krytyczne t_* i p_* uzyskiwane u wylotu rurociągu przy maksymalnym strumieniu masy. Parametry te zależą od entalpii spoczynkowej i_0 i od gęstości strumienia masy \dot{m}/A . Parę wodną traktowano jak gaz rzeczywisty. Wyniki przedstawiono na wykresach (rys. 2 i 3). Przeprowadzono porównanie z wynikami uzyskanymi przy założeniu, że para wodna jest gazem doskonałym.

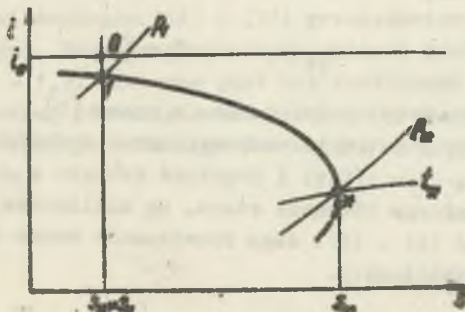
Do opisu zjawisk przepływu adiabaticznego gazu w rurociągu długim powszechnie stosuje się teorię słuszną dla gazów doskonałych [1, 2]. Jak wiadomo, para wodna przy zakresach parametrów występujących w technice ciepłej odbiega dość znacznie swymi właściwościami od modelu gazu doskonałego, co zmusza do stosowania ścisłej teorii gazu rzeczywistego.

Parametry uzyskiwane na wypływie z adiabaticznego rurociągu wynikają z podstawowych równań: bilansu energii i ciężkości

$$i = i_0 - \frac{1}{2} w^2 \quad (1)$$

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{w}{v} \quad (2)$$

gdzie $i = i(T, p)$, $v = v(T, p)$ są parametrami na wylocie rurociągu, \dot{m}/A jest gęstością strumienia masy, a i_0 - entalpią spoczynkową. Graficzną interpretacją przemiany zachodzącej w rurociągu przy danym \dot{m}/A oraz i_0 jest linia Fanno (rys. 1). Gdy przepływ jest maksymalny, na wypływie z rurociągu używa się prędkość dźwięku



Rys. 1. Linia Fanno

$$w_{\bar{x}} = a_{\bar{x}} = a(T_{\bar{x}}, p_{\bar{x}}). \quad (3)$$

Uwzględniając warunek (3) w równaniach (1) i (2) otrzymuje się układ równań

$$i(T_{\bar{x}}, p_{\bar{x}}) = i_0 - \frac{1}{2}(a(T_{\bar{x}}, p_{\bar{x}}))^2, \quad (4)$$

$$a(T_{\bar{x}}, p_{\bar{x}}) = \frac{\dot{m}}{A} v(T_{\bar{x}}, p_{\bar{x}}), \quad (5)$$

w którym niewiadomymi są $T_{\bar{x}}$ i $p_{\bar{x}}$, a parametrami (w sensie matematycznym) i_0 oraz \dot{m}/A . Z rozwiązania tego układu równań znajdujemy szukane krytyczne parametry (termodynamiczne) pary na wypływie z rurociągu, które, jak wiadac, zależą od entalpii spoczynkowej i_0 oraz gęstości strumienia masy \dot{m}/A

$$T_{\bar{x}} = f(i_0, \dot{m}/A), \quad (6)$$

$$p_{\bar{x}} = g(i_0, \dot{m}/A). \quad (7)$$

Rozwiązanie układu równań (4) i (5) wymaga znajomości funkcji $v=v(T,p)$, $i = i(T,p)$ oraz $a = a(T,p)$. Pierwsza z nich jest termicznym równaniem stanu, pozostałe można wyznaczyć w oparciu o to równanie stanu oraz dodatkowo o zależność ciepła właściwego $c_{po} = c_{po}(T)$ pary traktowanej jak gaz półdoskonały.

W niniejszej pracy wykorzystano termiczne równanie stanu Wukałowicza, Zubarewa i Sergiejewej [3] w postaci

$$\frac{pv}{RT} = 1 + p \sum_{j=0}^2 \sum_{k=0}^8 a_{jk} \frac{p^j}{T^k}, \quad (8)$$

oraz zależność od temperatury ciepła właściwego pary wodnej traktowanej jak gaz półdoskonały

$$c_{po} = a + b T + \frac{c}{T}. \quad (9)$$

Współczynniki równań (8) i (9) podano w pracy [3].

Za pomocą znanych metod termodynamicznych dochodzi się do równania na entalpię właściwą $i = i(T,p)$ i prędkość dźwięku $a = a(T,p)$. Zależności te podobnie jak termiczne równanie stanu, są nieliniowe, nieliniowy zatem jest układ równań (4) - (5). Jego rozwiązanie można uzyskać za pomocą któregoś z metod przybliżonych.

Jeżeli nie chodzi o wyznaczenie parametrów krytycznych T_x i p_x odpowiadających konkretnej parze wartości i_0 i \dot{m}/A , lecz o sporządzenie wykresu zależności funkcyjnych (6) i (7), to można bez trudu wyznaczyć funkcje od

$$i_0 = \varphi(T_x, p_x) = i(T_x, p_x) + \frac{1}{2} (a(T_x, p_x))^2, \quad (10)$$

$$\frac{\dot{m}}{A} = \psi(T_x, p_x) = \frac{a(T_x, p_x)}{v(T_x, p_x)} \quad (11)$$

i na tej podstawie sporządzić wykresy szukanych funkcji. Wykresy te przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Gdyby parę wodną traktować jak gaz doskonały, to do równań (4) i (5) należało by wstawić następujące funkcje określające objętość właściwą, entalpię i prędkość dźwięku dla gazu doskonałego

$$v_x = \frac{RT_x}{p_x},$$

$$i_x = \frac{\gamma}{\gamma-1} RT_x,$$

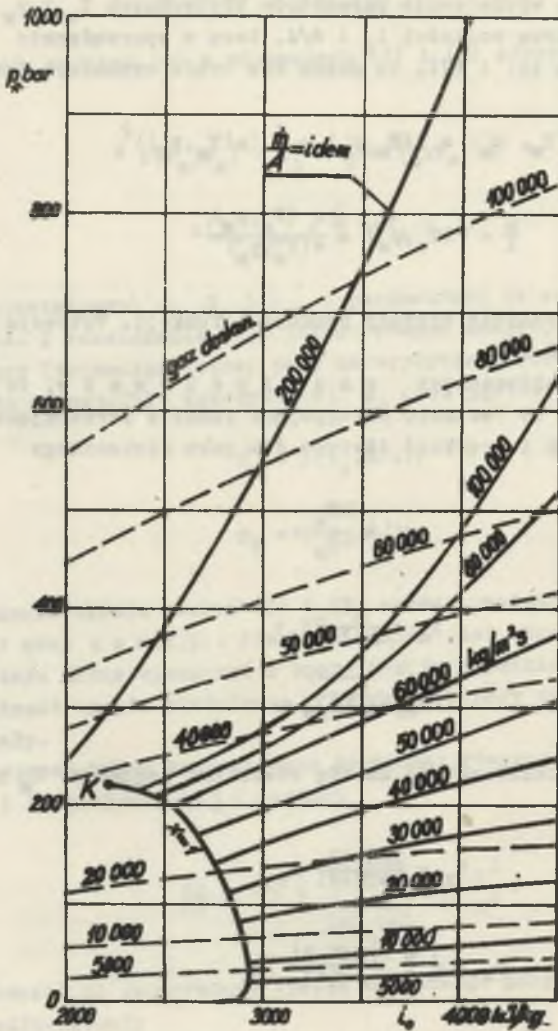
$$a_x = \sqrt{\gamma RT_x}.$$

Uzyskany w ten sposób układ równań da się rozwickłać względem T_x i p_x

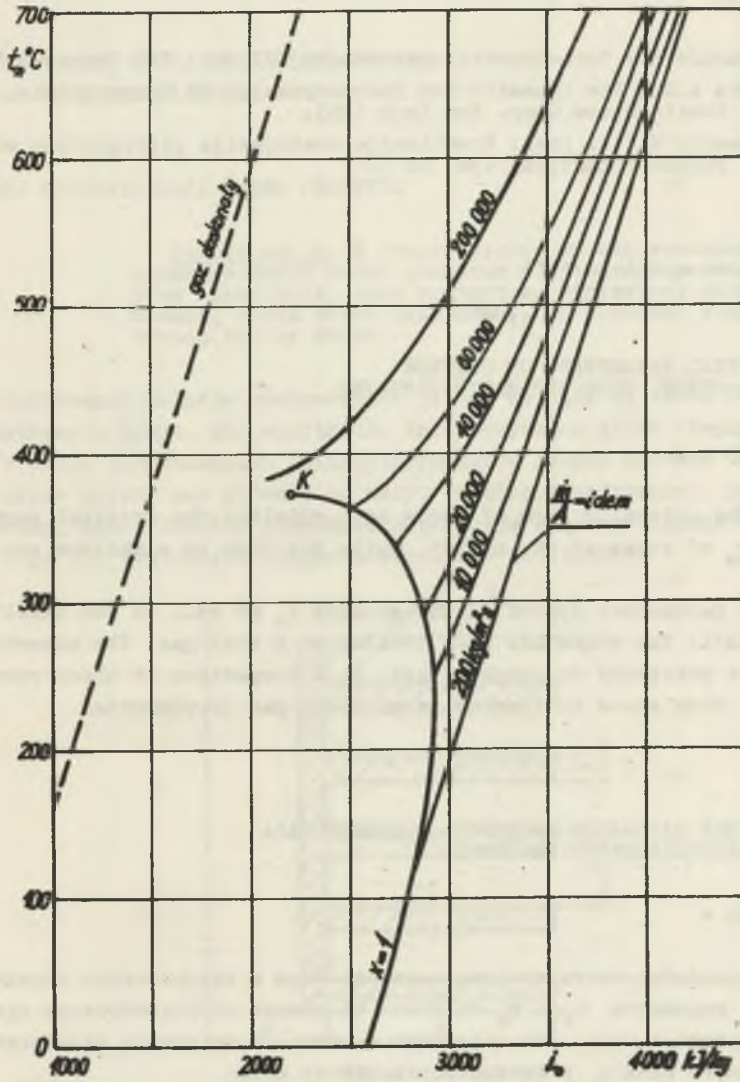
$$T_x = \frac{2(\gamma-1)}{\gamma(\gamma+1)} i_0, \quad (12)$$

$$p_x = \frac{1}{\gamma} \frac{\dot{m}}{A} \sqrt{\frac{2(\gamma-1)}{\gamma+1}} i_0 \quad (13)$$

Linie odpowiadające zależnościom (12) i (13) przedstawiono na rysunkach 2 i 3 liniami przerywanymi. Dla przegrzanej pary wodnej posłużono się wykładnikiem adiabaty $\gamma = 1,3$. Widoczne jest bez dodatkowych przeliczeń, że stosowanie dla pary wodnej równań gazu doskonałego przy obliczaniu parametrów wypływu z adiabatycznego rurociągu daje błędy nie do przyjęcia w obliczeniach technicznych.



Rys. 2. Zależność krytycznego ciśnienia pary p_* w przekroju wylotowym adiabatycznego rurociągu od entalpii spoczynkowej i_0 oraz gęstości strumienia masy \dot{m}/A



Rys. 3. Zależność temperatury krytycznej pary t_c w przekroju wylotowym adiabatyicznego rurociągu od entalpii spoczynkowej i_0 oraz gęstości strumienia masy \dot{m}/A

LITERATURA

1. Ochęduszek S.: Termodynamika stosowana, III wyd. WNT Warszawa 1970.
2. Shapiro A.H.: The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow. Ronald Press Comp. New York 1953.
3. Wukałowicz M.P. i inn.: Urownienije sostojanija pieregretogo wodianogo para. Tiepłoennergetika, 1967 nr 5.

Gliwice, we wrześniu 1971 r.

THE CRITICAL PARAMETERS OF OUTFLOW
OF WATER-STEAM FROM ADIABATIC PIPELINE

S u m m a r y

For the adiabatic flow of steam in a pipeline the critical parameters t_x and p_x of steam at the outlet, while the flow is a maximum one, are derived.

These parameters depend on the entalpy i_0 as well on the density of the stream \dot{m}/A . The steam has been treated as a real gas. The numerical results are presented on graphs 2 and 3. A comparison of these results with the case when steam is treated as an ideal gas is presented.

КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА
ИЗ АДИАБАТИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА

Р е з ю м е

Для адиабатического течения водяного пара в трубопроводе определены критические параметры t_x и p_x получены на выходе из трубопровода при максимальном расходе пара. Эти параметры зависят от энтальпии адиабатически заторможенного газа i_0 и от плотности потока \dot{m}/A .

Водяной пар рассмотрен как реальный газ. Результаты представлены по диаграммам (рис. 2 и 3). Проведено сравнение с результатами полученными в том случае если водяной пар будем рассматривать как идеальный газ.