

Prof. WSTE dr hab. inż. Benedykt Julian LITKE (†)

Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna w Szczecinie, Wydział Systemów Automotive
Higher School of Technology and Economics in Szczecin, Faculty of Automotive Systems

GAZY WILGOTNE

Streszczenie

Wstęp i cele: W pracy opisano parametry gazu wilgotnego oraz opracowano charakterystykę wilgotności i stopnia nasycenia. Celem pracy jest analiza parametrów i charakterystyka gazu wilgotnego.

Materiał i metody: Materiał stanowią źródła z literatury z zakresu termodynamiki. W pracy zastosowano metodę analizy teoretycznej.

Wyniki: Opracowano wykres zmian stanu czynnika. Przy małej zawartości pary w gazie, jej ciśnienie cząstkowe jest niskie i jeżeli jest mniejsze od ciśnienia nasycenia występuje para przegrzana i otrzymuje się gaz wilgotny nienasycony. W miarę zwiększania zawartości wody w gazie ciśnienie cząstkowe rośnie i może osiągnąć możliwą najwyższą wartość, równą ciśnieniu nasycenia. Uzyskany gaz jest wilgotnym nasyconym. Przy ciśnieniu nasycenia zawarta jest w gazie możliwa, największa ilość wody (albo innej cieczy) w postaci gazowej (lotnej). Zwiększenie zawartości wody w gazie ponad stan nasycenia może spowodować utworzenie się mgły.

Wnioski: Do określenia wilgotności bezwzględnej nie włącza się zawartości wody w postaci mgły tzn. cząstek wody lub lodu. Zwiększenie zawartości wody w gazie, ponad stan nasycenia przy tej samej temperaturze nasycenia, nie spowoduje jej odparowania i wzrostu ciśnienia cząstkowego powyżej ciśnienia nasycenia. Stopień wilgoci gazu nasyconego odpowiada maksymalnej zawartości pary lotnej w gazie.

Słowa kluczowe: Gaz wilgotny, charakterystyka, parametry, wilgotność, stopień nasycenia.

(Otrzymano: 01.05.2017; Zrecenzowano: 10.05.2017; Zaakceptowano: 20.05.2017)

MOIST GASSES

Abstract

Introduction and aim: The work describes moist gas parameters and develops humidity and saturation characteristics. The purpose of the work is to analyze parameters and characteristics of moist gas.

Material and methods: Material covers some sources based on the literature in the field of thermodynamics. The method of theoretical analysis has been shown in the paper.

Results: A graph of changes in the state of the factor was prepared. With a low content of vapor in the gas, its partial pressure is low and if it is less than the saturation pressure, superheated steam occurs and a wet unsaturated gas is obtained. As the water content in the gas increases, the partial pressure increases and can reach the highest value possible, equal to saturation pressure. The resulting gas is moist saturated. At saturation pressure, the largest possible amount of water (or other liquid) in gaseous (volatile) form is contained in the gas. Increasing the water content of the gas above saturation may cause fog to form.

Conclusion: Water content in the form of fog, i.e. water or ice particles, is not included in the determination of absolute humidity. Increasing the water content in the gas, above saturation at the same saturation temperature, will not cause it to evaporate and the partial pressure to rise above saturation pressure. The moisture content of the saturated gas corresponds to the maximum content of volatile vapor in the gas.

Keywords: Moist gas, characteristics, parameters, humidity, saturation level.

(Received: 01.05.2017; Revised: 10.05.2017; Accepted: 20.05.2017)

1. Gazy wilgotne

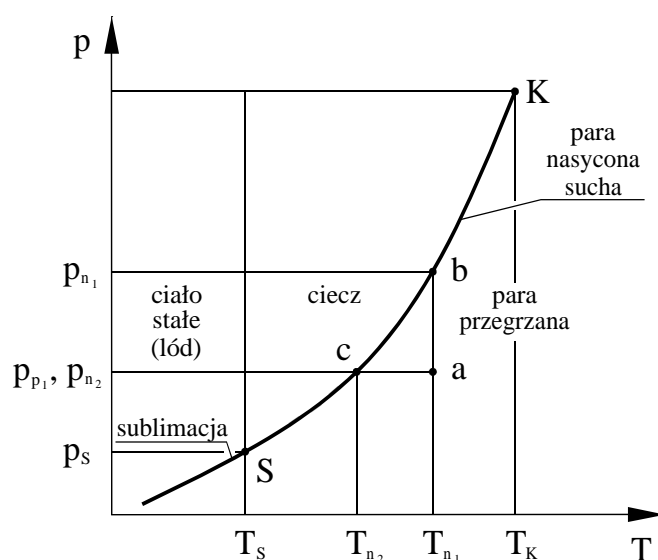
Gazem wilgotnym nazywa się mieszaninę gazu suchego i pary innego czynnika. W technice najczęściej występuje powietrze zawierające parę wodną. Powietrze atmosferyczne jest również mieszaniną suchego powietrza i pary wodnej. Poza powietrzem, gazami technicznymi zawierającymi parę wodną często są spaliny, dwutlenek węgla, paliwa gazowe i inne.

Wiadomo, że można wytworzyć parę wilgotną (mokrą), parę nasyconą suchą i parę przegrzaną. Para nasycona sucha występuje przy parametrach nasycenia tj. przy temperaturze nasycenia T_n i ciśnieniu nasycenia p_n .

W zależności od tego, jaki rodzaj pary występuje w suchym gazie, mogą być następujące rodzaje gazów wilgotnych:

- *nienasycony*, tj. gaz suchy zawierający parę przegrzaną,
- *nasycony*, będący mieszaniną (roztworem) gazu suchego i pary nasyconej suchej,
- *przesycony*, składający się z suchego gazu i pary mokrej, jest mieszaniną pary nasyconej suchej i wrzącej cieczy. Kropelki cieczy przeważnie tworzą mgłę i w zależności od parametrów jest ona ciekła lub lodowa.

W przypadku odpowiedniej zmiany warunków, tzn. temperatury lub ciśnienia, może samoczynnie nastąpić zmiana rodzaju gazu wilgotnego.



Rys. 1. Wykres zmian stanu czynnika
 S - punkt potrójny, K - punkt krytyczny,
 T_s i p_s - parametry punktu potrójnego, dla wody: $T_s = 0,098^\circ\text{C}$, $p_s = 611,16 \text{ Pa}$
 Źródło: Opracowanie autora

Fig. 1. Graph of factor state changes
 S - triple point, K - critical point,
 T_s i p_s - triple point parameters for water: $T_s = 0,098^\circ\text{C}$, $p_s = 611,16 \text{ Pa}$
 Source: Elaboration of the Author

Zgodnie z prawem Daltona ciśnienie całkowite p mieszaniny gazów doskonałych jest sumą ciśnień cząstkowych gazów składowych. Wobec tego ciśnienie gazu wilgotnego jest równe sumie ciśnień cząstkowych gazu suchego p_g i pary p_p .

$$p = p_g + p_p \quad (1)$$

Para w gazie wilgotnym na ogół ma niskie ciśnienie cząstkowe w stosunku do ciśnienia cząstkowego suchego gazu, więc może być traktowana jak gaz doskonały. Najczęściej mamy do czynienia z gazami zawierającymi parę wodną, więc dalsze rozważania będą prowadzone na przykładzie gazów zawilgoconych wodą.

Ciśnienie cząstkowe pary zależy od ilości wody odparowanej w gazie. Przy małej zawartości pary w gazie, jej ciśnienie cząstkowe p_p jest niskie i jeżeli jest mniejsze od ciśnienia nasycenia p_n występuje para przegrzana i otrzymuje się gaz wilgotny nienasycony. W miarę zwiększania zawartości wody w gazie ciśnienie cząstkowe p_p rośnie i może osiągnąć możliwą najwyższą wartość, równą ciśnieniu nasycenia p_n . Uzyskany gaz jest wilgotnym nasyconym. Przy ciśnieniu nasycenia zawarta jest w gazie możliwa, największa ilość wody (albo innej cieczy) w postaci gazowej (lotnej). Zwiększenie zawartości wody w gazie ponad stan nasycenia może spowodować utworzenie się mgły.

W powietrzu atmosferycznym zawsze znajduje się pewna zawartość wody. Rodzaj pary wodnej zależy od jej ciśnienia cząstkowego i temperatury. Wartość ciśnienia cząstkowego pary zależy od zawartości wody w powietrzu. Zwykle, ciśnienie cząstkowe pary w powietrzu jest niskie i przy najczęściej panujących temperaturach otoczenia para jest przegrzana, więc na ogół mamy powietrze wilgotne nienasycone. W atmosferze są częste sytuacje kiedy w wyniku zmiany temperatury lub ciśnienia, rodzaj zawilgocenia powietrza ulega zmianie. Gdy przy stałej zawartości wody w powietrzu, a więc i stałym ciśnieniu cząstkowym, nastąpi spadek temperatury do wartości nasycenia, para przegrzana stanie się nasyconą. Przy dalszym obniżeniu temperatury wydzieli się część wody w postaci kropelek i w powietrzu pojawi się mgła. Powstanie powietrze wilgotne przesycone.

Analogiczne zmiany rodzaju zawilgocenia powietrza nastąpią, gdy ciśnienie cząstkowe pary będzie wzrastało, przy stałej temperaturze. Jeżeli mgła pojawi się przy temperaturze niższej od 0°C będzie ona miała postać lodową (Rys.1). Wynika to z właściwości wody, która przy ciśnieniach wyższych od ciśnienia punktu potrójnego S ($p_s = 611,16 \text{ Pa}$) zawsze przechodzi w stan lodowy przy temperaturze poniżej 0°C . Przy ciśnieniach mniejszych para wodna przechodzi bezpośrednio w stan lodowy (brak jest fazy ciekłej) przy temperaturach odpowiednio niższych. Zjawisko to nazywa się *sublimacją*.

2. Wilgotność

Do oceny stanu gazu wilgotnego mają zastosowanie różne miary.

Wilgotność bezwzględna (wilgoć) jest to masa pary, wyrażana w gramach, zawarta w 1 m^3 gazu wilgotnego

$$\rho_p = \frac{m_p}{V} = \frac{p_p}{R_p \cdot T}. \quad (2)$$

Z tego wynika, że

$$0 \leq \rho_p \leq \rho_p'' \quad (3)$$

Wilgotność bezwzględna jest gęstością pary ρ_p przy jej ciśnieniu cząstkowym p_p i temperaturze wilgotnego gazu.

Z powyższej definicji wynika, że do określenia wilgotności bezwzględnej nie włącza się zawartości wody w postaci mgły tzn. cząstek wody lub lodu.

Wilgotność względna ϕ jest stosunkiem wilgotności bezwzględnej ρ_p do maksymalnej wilgotności bezwzględnej $\rho_{p\text{max}}$, mogącej wystąpić w tej samej temperaturze.

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_p''}, \quad \text{przy } T = \text{const.} \quad (4)$$

Największa wilgotność bezwzględna ρ_p może być równa gęstości pary nasyconej suchej ρ_p'' , oznacza to, że $0 \leq \varphi \leq 1$.

Korzystając z równania stanu gazu, można wykazać, że wilgotność względna jest stosunkiem ciśnienia cząstkowego p_p pary znajdującej się w gazie do ciśnienia nasycenia pary p_n w temperaturze gazu wilgotnego

$$\varphi = \frac{p_p}{p_n}. \quad (5)$$

Na rysunku 1 zaznaczono ciśnienia, przy których uzyskuje się różne stany gazu wilgotnego, mogące wystąpić w tej samej temperaturze T_{n1} .

Stan a: $p_p = p_{p1} < p_{n1}$, $\varphi < 1$ - gaz wilgotny nienasycony

Stan b: $p_p = p_{n1}$, $\varphi = 1$ - gaz wilgotny nasycony

Zwiększenie zawartości wody w gazie, ponad stan nasycenia przy tej samej temperaturze nasycenia T_{n1} , nie spowoduje jej odparowania i wzrostu ciśnienia cząstkowego powyżej ciśnienia nasycenia p_{n1} . Wilgotność względna pozostanie równa 1. Wilgotność względna φ nie może być większa od 1.

W przypadku obniżenia temperatury T_{n1} do wartości T_{n2} , jak zaznaczono na rysunku pierwszym (stan c), nastąpi spadek ciśnienia nasycenia p_{n1} do ciśnienia p_{n2} , odpowiadającego nowej temperaturze T_{n2} , a nadmiar wody wydzieli się w postaci mgły. Wilgotność względna w dalszym ciągu będzie równa 1.

Oprócz dwóch poprzednich stosowane są również inne wielkości służące do oceny zawilgocenia gazu, uwzględniające zawartość pary cieczy nie tylko w postaci lotnej (gazowej), lecz również skondensowanej (mgła ciekła lub lodowa).

3. Stopień wilgoci i nasycenia

Stopień wilgoci (zawilżenia) X jest stosunkiem łącznej zawartości pary lotnej m_p i pary skondensowanej m_s do masy gazu suchego:

$$X = \frac{m_p + m_s}{m_g}. \quad (6)$$

Z powyższego wynika, że

$$0 \leq X \leq \infty. \quad (7)$$

Stopień wilgoci powietrza wilgotnego nienasyconego parą wodną można obliczyć z zależności:

$$X = 0,6219 \frac{\varphi \cdot p_n}{p - \varphi p_n}, \quad (8)$$

$$X'' = 0,6219 \frac{p_n}{p - p_n} \quad (9)$$

a nasyconego ($\varphi=1$), gdzie: p - całkowite ciśnienie wilgotnego gazu.

Stopień nasycenia ψ jest stosunkiem stopnia wilgoci X do stopnia wilgoci X'' gazu nasyconego ($\varphi=1$) przy tej samej temperaturze. Należy zaznaczyć, że stopień wilgoci X'' gazu nasyconego odpowiada maksymalnej zawartości pary lotnej w gazie.

$$\psi = \frac{X}{X''} = \varphi \frac{p - p_n}{p - \varphi p_n}, \quad (10)$$

gdy $p_n \ll p$ przy umiarkowanych temperaturach, $\psi \approx \varphi$.

Do pomiaru wilgotności powietrza stosuje się przyrządy o nazwach psychrometr i higrometr, różniące się zasadą działania.

4. Wnioski

- Przy małej zawartości pary w gazie, jej ciśnienie cząstkowe jest niskie i jeżeli jest mniejsze od ciśnienia nasycenia występuje para przegrzana i otrzymuje się gaz wilgotny nienasycony. W miarę zwiększania zawartości wody w gazie ciśnienie cząstkowe rośnie i może osiągnąć możliwą najwyższą wartość, równą ciśnieniu nasycenia. Uzyskany gaz jest wilgotnym nasyconym.
- Przy ciśnieniu nasycenia zawarta jest w gazie możliwa, największa ilość wody (albo innej cieczy) w postaci gazowej (lotnej). Zwiększenie zawartości wody w gazie ponad stan nasycenia może spowodować utworzenie się mgły.
- Do określenia wilgotności bezwzględnej nie włącza się zawartości wody w postaci mgły tzn. cząstek wody lub lodu.
- Zwiększenie zawartości wody w gazie, ponad stan nasycenia przy tej samej temperaturze nasycenia, nie spowoduje jej odparowania i wzrostu ciśnienia cząstkowego powyżej ciśnienia nasycenia.
- Stopień wilgoci gazu nasyconego odpowiada maksymalnej zawartości pary lotnej w gazie.

Wykaz oznaczeń

<i>Symbol</i>	<i>Opis</i>	<i>Jednostka</i>
a	stan gazu wilgotnego nienasyconego	[-]
b	stan gazu wilgotnego nienasyconego	[-]
c	stan gazu wilgotnego nienasyconego	[-]
m_p	masa cząstkowa pary	[g]
m_s	masa pary w punkcie krytycznym	[g]
m_g	masa pary gazu suchego	[g]
p	ciśnienie całkowite	[N/m ² ≡ Pa]
p_g	ciśnienie cząstkowe gazu suchego	[N/m ² ≡ Pa]
p_p	ciśnienie cząstkowe pary	[N/m ² ≡ Pa]
p_s	ciśnienie w punkcie krytycznym	[N/m ² ≡ Pa]
p_n	ciśnienie nasycenia pary w temperaturze gazu wilgotnego	[N/m ² ≡ Pa]
p_{n1}	ciśnienie nasycenia przy temperaturze T_{n1}	[N/m ² ≡ Pa]
p_{n2}	ciśnienie nasycenia przy temperaturze T_{n2}	[N/m ² ≡ Pa]
T_s	temperatura w punkcie potrójnym	[°C]
K	punkt krytyczny	[-]
S	punkt potrójny	[-]

T	temperatura	[°C]
T_n	temperatura nasycenia	[°C]
T_s	temperatura w punkcie potrójnym	[°C]
T_{n1}	temperatura nasycenia przy ciśnieniu p_{n1}	[°C]
T_{n2}	temperatura nasycenia przy ciśnieniu p_{n2}	[°C]
X	stopień wilgoci (<i>zawilżenia</i>)	[-]
X''	stopień wilgoci gazu nasyconego	[-]
V	objętość gazu	[m ³]
φ	wilgotność względna	[%]
ρ	wilgotność bezwzględna (<i>wilgoć</i>)	[%]
ρ_p	wilgotność bezwzględna pary	[%]
ρ_{pmax}	maksymalna wilgotność bezwzględna	[%]
ρ_p''	wilgotność bezwzględna pary nasyconej suchej	[%]
ψ	stopień nasycenia gazu	[-]

Literatura

- [1] Ochęduszek S.: *Termodynamika stosowana*. WNT, Warszawa 1974.
- [2] Staniszewski B.: *Termodynamika*. PWN, Warszawa 1986.
- [3] Szargut J.: *Termodynamika*. PWN, Warszawa 2000.
- [4] Wrzeński Z.: *Termodynamika*. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.