

Ռ.Ա. ՌԱՖՅԱՆ, Ռ.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ

ԳԱԶԱՏՈՒՐՔԻՆԱՅԻՆ ՏԵՂԱԿԱՑԱՆՔՆԵՐԻ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՐԿՆԵՐՈՒՄ ԶՐԱՅԻՆ ԳՈԼՈՐՇՈՒ ԹԵՐՄՈՂԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Վերլուծվել է գազատուրբինային տեղակայանքների (ԳՏ) ջերմային հաշվարկում ջրային գոլորշու թերմոդինամիկական պարամետրերի որոշման ժամանակ վերջինս որպես իդեալական գազ դիտարկելու նպատակահարմարությունը: Ներկայացվել են բանաձևային առնչություններ ջրային գոլորշու թերմոդինամիկական պարամետրերի, ինչպես նաև խոնավ օդի էնթալպիայի և էնտրոպիայի որոշման համար:

Առանցքային բառեր. գազատուրբինային տեղակայանք, կոմպրեսոր, ջրային գոլորշի, էնթալպիա, էնտրոպիա, այրման արգասիքներ, իդեալական գազ:

Գազատուրբինային տեղակայանքների սկզբունքային ջերմային սխեմայի հաշվարկում ջրային գոլորշու թերմոդինամիկական պարամետրերն օգտագործվում են կոմպրեսոր ներծծվող խոնավ օդի, կոմպրեսորի ելքում սեղմված օդի և ծխագազերի պարամետրերի որոշման համար:

Հաշվի առնելով այն հանգամանքը, որ այրման արգասիքների թերմոդինամիկական պարամետրերի հաշվարկներում ջրային գոլորշին և այրման արգասիք հանդիսացող մյուս բաղադրիչ գազերը դիտարկվում են որպես իդեալական, ապա նպատակահարմար է կիրառել նույն մոտեցումը նաև օդի՝ կոմպրեսոր ներծծվելիս և դրա ելքում պարամետրերի հաշվարկի դեպքում: Ջրային գոլորշին որպես իդեալական գազ դիտարկելիս, դրա իզոբար ջերմունակության հաշվարկման համար, Ջրի և ջրային գոլորշու հատկությունների միջազգային կազմակերպության (IAPWS [1]) կողմից կիրառվում են [2]-ում բերված հավասարումները, որոնք էլ ստացվել են ըստ [3]-ի տվյալների: Սակայն վերջին տարիներին կատարված հետազոտությունները [4-6] վկայում են այն մասին, որ հատկապես բարձր ջերմաստիճանների դեպքում ստացված արդյունքները տարբերվում են [2]-ի տվյալներից: [7]-ում ջրային գոլորշու համար դուրս է բերվել նոր հավասարում, որով կատարված հաշվարկների արդյունքները [3]-ում բերված տվյալներից տարբերվում են $0,32 \cdot 10^{-2}$ միջին թվաբանական սխալանքով:

Եթե ջրային գոլորշին դիտարկվում է որպես իրական գազ, ապա վերջինիս էնթալպիայի մեջ հաշվի է առնվում թաքնված ջերմաքանակի արժեքը: Սակայն ջերմատեխնիկական տեսանկյունից հետաքրքրություն է ներկայացնում աշխատող մարմնի թերմոդինամիկական պարամետրի փոփոխությունը, այլ ոչ թե դրա

բացարձակ արժեքը: Մասնավորապես, կոմպրեսորում սեղմման հետևանքով խոնավ օդի էնթալպիայի փոփոխության թվային արժեքը կմնա նույնը՝ թաքնված ջերմաքանակը հաշվի առնելու և չառնելու պարագայում:

Ջրային գոլորշին որպես իդեալական գազ դիտարկելը հնարավորություն է տալիս օգտագործել այրման արգասիքներում պարունակվող բաղադրիչ գազերի ջերմաքիմիական պարամետրերի հաշվարկման համար կիրառվող բանաձևային առնչությունները՝ փոփոխելով միայն գործակիցների համախումբը: Հաշվի առնելով, որ ջերմատեխնիկական նման հաշվարկները հիմնականում կատարվում են համակարգչային ծրագրերի կիրառմամբ, ապա այդօրինակ մոտեցումը պարզեցնում և ավելի մատչելի է դարձնում դրանց ընթացքը:

Այսպիսով, որպես իդեալական գազ ջրային գոլորշու էնթալպիայի և էնտրոպիայի հաշվարկման հիմքում ընկած է իզոբար ջերմունակության որոշման միասնական հավասարումը՝

$$\frac{c_p}{R} = \sum_{i=0}^6 a_i \tau^i + \sum_{i=7}^{12} a_i \left(\frac{1}{\tau}\right)^{i-6}, \quad (1)$$

որտեղ $\tau = T/T^*$ -ը հարաբերական ջերմաստիճանն է, $T^* = 1000$ K, R-ը՝ ունիվերսալ գազային հաստատունը, 20.786 J/mol K, a_i -ն գործակիցների համախումբ է, որոնց թվային արժեքները բերված են աղ.1-ում:

Աղյուսակ 1

a_i մեծության թվային արժեքները

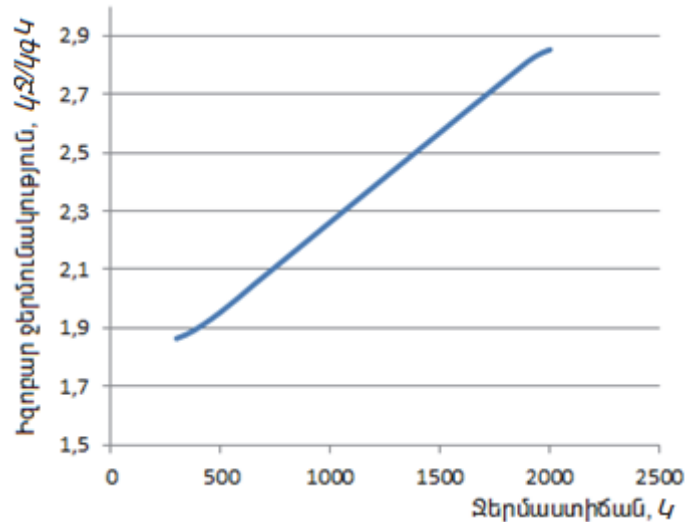
i	a_i	i	a_i
0	31,0409601236035	7	-12,0771176848589
1	-39,1422080460869	8	3,39105078851732
2	37,9695277233575	9	-0,584520979955060
3	-21,8374910952284	10	-0,0589930846488082
4	7,42251494566339	11	-0,00312970001415882
5	-1,38178929609470	12	0,0000657460740981757
6	0,108807067571454	-	-

Օգտվելով (1) արտահայտությունից՝ կառուցվել է ջերմաստիճանից ջրային գոլորշու տեսակարար իզոբար ջերմունակության կախվածությունը բնութագրող գրաֆիկը (նկ. 1):

Ջրային գոլորշու մյուս թերմոդինամիկական պարամետրերը որոշվում են՝ օգտագործելով (1) արտահայտությունը: Մասնավորապես, ջրային գոլորշու տեսակարար էնթալպիայի համար կարելի է կիրառել ստորև բերված բանաձևային առնչությունը՝

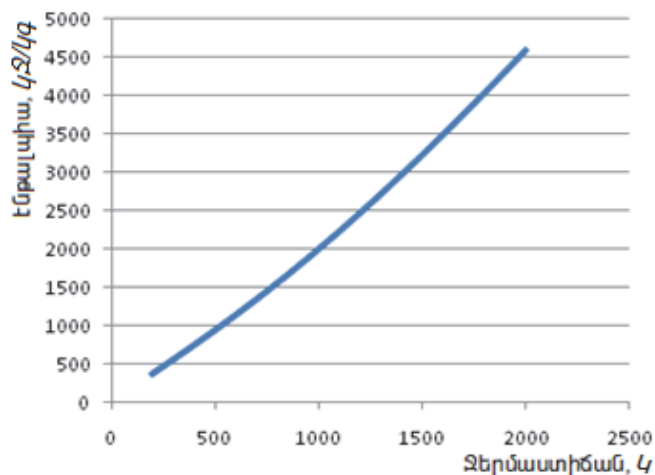
$$i' = T \left[\sum_{i=0}^6 \frac{a_i}{i+1} \tau^{i+1} + a_7 \ln(\tau) + \sum_{i=8}^{12} \frac{a_i}{7-i} \left(\frac{1}{\tau} \right)^{i-7} \right] + i_{int}, \quad (2)$$

որտեղ $i' = i/R$ -ը հարաբերական տեսակարար էնթալպիան է, τ , i_{int} -ը՝ ինտեգրման հաստատունը, որի թվային արժեքը որոշվում է աղ. 2-ում բերված տվյալներով՝ (2) արտահայտության հաշվարկման արդյունքում:



Նկ. 1. Ջրային գոլորշու տեսակարար իզոբար ջերմունակության կախվածությունը ջերմաստիճանից

Օգտվելով (2) արտահայտությունից՝ կառուցվել է ջրային գոլորշու տեսակարար էնթալպիայի ջերմաստիճանից կախվածությունը բնութագրող գրաֆիկը (նկ. 2):



Նկ. 2. Ջրային գոլորշու տեսակարար էնթալպիայի կախվածությունը ջերմաստիճանից

Որևէ P ճնշման դեպքում ջրային գոլորշու էնտրոպիայի հաշվարկման համար օգտագործվում է հետևյալ բանաձևը.

$$S = S_0 - R \ln\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad (3)$$

որտեղ S_0 -ն ստանդարտ էնթալպիան է $P_0=100$ կՊա ճնշման դեպքում և հաշվարկվում է ըստ ստորև բերված արտահայտության՝

$$s' = a_0 \ln(\tau) + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{a_i}{i} \tau^i \right) + \sum_{i=7}^{12} \frac{a_i}{6-i} \left(\frac{1}{\tau} \right)^{i-6} + S_{\text{int}}, \quad (4)$$

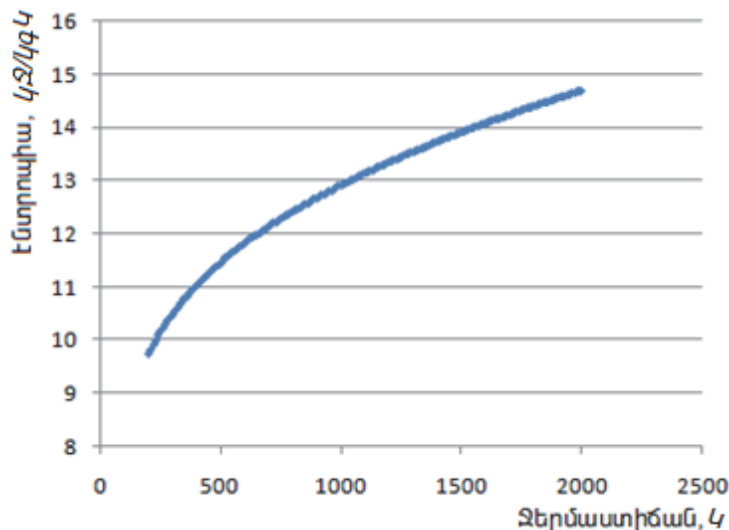
որտեղ $s' = S_0/R$ -ը հարաբերական տեսակարար էնթալպիան է, S_{int} -ը՝ ինտեգրման հաստատունը, որի թվային արժեքը ևս որոշվում է աղ. 2-ում բերված տվյալներով՝ (4) արտահայտության հաշվարկման արդյունքում:

Աղյուսակ 2

(3) բանաձևի ինտեգրման հաստատունի որոշման որոշիչ կետի տվյալները

Գազ	T, Կ	i, Ջ/մոլ	P, Պա	S, Ջ/մոլ Կ
H ₂ O	298,15	9908	101325	188,724

Օգտվելով վերը նկարագրված բանաձևային արտահայտություններից՝ նկ. 3-ում պատկերվել է ջրային գոլորշու տեսակարար էնտրոպիայի կախվածությունը ջերմաստիճանից, երբ ճնշումը հավասար է 100000 Պա:



Նկ. 3. Ջրային գոլորշու տեսակարար էնտրոպիայի կախվածությունը ջերմաստիճանից՝ 100000 Պա ճնշման պայմաններում

Մթնոլորտային խոնավ օդի էնթալպիան հաշվարկվում է որպես չոր օդի և ջրային գոլորշու էնթալպիաների գումար.

$$i_{o\eta}^h = \frac{i_{o\eta}^s + d_{o\eta} i_{H_2O}^s}{1 + d_{o\eta}}, \quad (5)$$

որտեղ $d_{o\eta}$ -ը մթնոլորտային օդի զանգվածային խոնավապարունակությունն է, h_g/h_f իսկ $i_{H_2O}^s$ -ն՝ ջրային գոլորշիների էնթալպիան, h_g/h_f :

Մթնոլորտային խոնավ օդի էնտրոպիան հավասար է մեկ ամբողջ մաս չոր օդի էնտրոպիայի և $d_{o\eta}$ ջրային գոլորշու էնտրոպիաների գումարին.

$$S_{o\eta}^h = \frac{S_{o\eta}^s + d_{\eta o} S_{H_2O}^s}{1 + d_{\eta o}}, \quad (6)$$

որտեղ $S_{o\eta}^s$ -ը և $S_{H_2O}^s$ -ն համապատասխանաբար չոր օդի և ջրային գոլորշիների էնտրոպիաներն են, h_g/h_f :

Միևնույն ժամանակ, պետք է հաշվի առնել այն հանգամանքը, որ մթնոլորտային խոնավ օդի յուրաքանչյուր բաղադրիչ գտնվում է որոշակի պարզիալ ճնշման տակ, ուստի անհրաժեշտ է նախապես հաշվարկել չոր օդի և ջրային գոլորշու պարզիալ ճնշումները ստորև բերված բանաձևերով.

$$P_{o\eta}^u = P_{o\eta} \frac{1}{1 + X_{o\eta}}, \quad (7)$$

$$P_{H_2O}^u = P_{o\eta} \frac{X_{\eta o}}{1 + X_{o\eta}}, \quad (8)$$

որտեղ $P_{o\eta}^u$ -ն և $P_{H_2O}^u$ -ն համապատասխանաբար չոր օդի և ջրային գոլորշու պարզիալ ճնշումներն են $P_{o\eta}$ մթնոլորտային ճնշման դեպքում, $X_{o\eta}$ -ը՝ մթնոլորտային օդում մոլային խոնավապարունակությունը, որը հաշվարկվում է ստորև բերված բանաձևով՝

$$X_{o\eta} = \frac{M_{o\eta}}{M_{H_2O}} d_{o\eta} 100\%: \quad (9)$$

Կատարված վերլուծությունը հնարավորություն է ընձեռում փաստել ԳՏՏ-ի ջերմային հաշվարկում ջրային գոլորշին որպես իդեալական գազ դիտարկելու դրական հանգամանքը: Մասնավորապես, այրման արգասիքներում պարունակվող բաղադրիչ գազերի թերմոդինամիկական պարամետրերի որոշման համար կարելի է կիրառել վերոնշյալ մոտեցումը և բանաձևային խումբը՝ փոփոխելով միայն գործակիցները: Նմանատիպ մոտեցումն ընդունելի է նաև ԳՏՏ-ի կոմպրեսոր մատուցվող օդի թերմոդինամիկական պարամետրերի հաշվարկման դեպքում: Վերջնարդյունքում՝ ԳՏՏ-ի ջերմային հաշվարկի իրականացման համար ստանում ենք միասնական բանաձևերի ամբողջություն, ինչը թույլ է տալիս ապա-

հովել հաշվարկների պարզեցումը՝ միաժամանակ ստանալով ելակետային ճշգրիտ արդյունքներ:

Ներկայացված բանաձևերը բավարար ճշգրտությամբ կարելի է կիրառել նաև այլ բնագավառներում, որտեղ ջրային գոլորշու պարունակությամբ աշխատող մարմինների համար կատարվում են հաշվեկշռային հավասարումների լուծումներ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Release on the IAPWS Formulation-1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. International association for the properties of water and steam. – Frederica, 1996. – 18 p.
2. **Cooper J.R.** Representation of the ideal-gas thermodynamic properties of water // Int. J. Thermophys. – 1982. – № 3. – P. 35 – 43.
3. **Friedman A.S., Haar L.** High speed machine computing of ideal gas thermodynamic functions –I. isotopic water molecules // Journal of Chemical Physics. – 1954. – №22. – P. 2051 – 2058.
4. **Vidler M., Tennyson J.** Accurate partition function and thermodynamic data for water // Journal of Chemical Physics. – 2000. – T. 113, № 21. – P. 9766 – 9771.
5. **Woolley H.W.** Thermodynamic properties for H₂O in the ideal gas state. water and steam: their properties and current industrial application // Proceedings of the 9th International Conference on the Properties of Water and Steam. – New York: Pergamon Press, 1980. – P. 166 – 175.
6. **Woolley H.W.** Ideal gas thermodynamic functions for water // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1987. – № 92. – P. 35 – 51.
7. **Орлов К.А.** Исследование схем парогазовых установок на основе разработанных прикладных программ по свойствам рабочих тел: Дис. ... к.т.н. – М, 2004.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 20.03.2017:

Р.А. РАФЯН, В.З. МАРУХЯН

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНОГО
ПАРА В ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТАХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

Анализируется целесообразность рассмотрения водяного пара в качестве идеального газа при определении его термодинамических свойств в тепловых расчетах газотурбинных установок. Представлены расчетные уравнения для определения термодинамических свойств водяного пара, а также энтальпии и энтропии влажного воздуха.

Ключевые слова: газотурбинная установка, компрессор, водяной пар, энтальпия, энтропия, продукты сгорания, идеальный газ.

R.A. RAFYAN, V.Z. MARUKHYAN

**DETERMINING THE THERMODYNAMIC PROPERTIES OF STEAM IN
THERMAL CALCULATIONS OF GAS TURBINES**

The feasibility of considering steam as an ideal gas at determining its thermodynamic properties in thermal calculations of gas turbines is analyzed. Equations for determining the thermodynamic properties of steam, as well as enthalpy and entropy of moist air are introduced.

Keywords: gas turbine, compressor, steam, enthalpy, entropy, combustion products, ideal gas.