

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРОГРАМИ РОЗРАХУНКІВ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ ТА ПАРИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Наведений опис програмної реалізації математичної моделі стану води та пари. Показані похибки розрахунків для різних ділянок діаграми стану водяної пари.

Ключові слова: паротурбінна установка, ентальпія, ентропія, коефіцієнт корисної дії.

Abstract

The description of the program realization of the mathematical model of water and steam state is given. Calculations error for different sections of the diagram of the state of water vapor is shown.

Keywords: steam turbine installation, enthalpy, entropy, coefficient of performance.

Вступ

В проектуванні котельних установок теплових електростанцій (ТЕС), паротурбінних установок ТЕС та атомних електростанцій (АЕС) визначаються параметри води та пари. Звіти ТЕС за формою №3 – тех. «Техніко-економічні показники роботи устаткування» також складаються за допомогою розрахунків параметрів води та пари. За цією формою коефіцієнт корисної дії (ККД) паротурбінної установки розраховується діленням вихідної електричної потужності електрогенератора на потужність теплоти підведеної до робочого тіла в парогенераторі. Ця теплота при розрахунку за прямим тепловим балансом визначається через різницю ентальпій пари та води на виході та вході до парогенератора. Поняття «ентальпія» (від грецького *ενθαλπω* – нагріваю) було введено голландським фізиком Хейке Камерлінг-Оннесом. Перевага цього поняття полягає в тому, що воно дозволяє описувати зміни енергії термодинамічного середовища без урахування відмінності між теплотою і роботою. Ілюстрацією параметра «ентальпія» – є циліндр об'ємом V з рухомих поршнем, під яким знаходиться газ з внутрішньою енергією U , з тиском p , який врівноважується вагою поршня. Енергія такої системи дорівнює ентальпії і позначається літерами I або H і складає $H=U+p \cdot V$, кДж. Питома ентальпія визначається, як $h=u+p \cdot v$, кДж/кг, де v – питомий об'єм газу, м³/кг. При постійному тиску p зміна ентальпії дорівнює кількості теплоти, підведеної до системи, тому ентальпію називають ще й тепловмістом. Також ентальпію називають повною енергією системи, але із деякими застереженнями. Ентальпія є кількісною характеристикою теплової енергії. В циліндрі парової машини 1 кг пари з більшою температурою виконає більшу роботу аніж 1 кг пари з такою ж ентальпією але меншою температурою. Якісною, з точки зору роботоспроможності, характеристикою теплоти є ентропія S . Поняття «ентропії» та її назву ввів німецький фізик Р. Клаузиус (від грецького *ἐντροπία* – перетворення). Ентропія визначається з виразу $\Delta S = \Delta Q / T$, де ΔS – зміна ентропії, ΔQ – зміна теплоти, T – абсолютна температура. Зменшення роботоспроможності ΔL пов'язане зі збільшенням ентропії ΔS в рівнянні Гюї-Стодоли $\Delta L = T \cdot \Delta S$. Розмірність питомої ентропії – Дж/(кг·К). Ентальпія та ентропія є функціями двох із трьох термічних параметрів $p, v, T(t)$. По даним експериментів з водою та парою при різних термічних параметрах були розраховані h та S . Результати розрахунків німецький теплотехнік Р. Моль'є в 1904р. представив діаграмою, яка в нашій країні відома як $h(i)$ - S діаграма.

Основна частина

При розрахунках теплоенергетичних установок для визначення параметрів води та пари користуються $h(i)$ - S діаграмою або таблицями [1]. В [1] наведені рівняння апроксимацій h - S діаграми. Їх недоліком є складність та, відповідно, великі трудовитрати на програмування. Значно простішими

є рівняння [2]. Проте, вони були розроблені раніше ніж більш сучасні рівняння, за якими розраховані загальноприйняті таблиці [1]. Тому є доцільним визначити точність рівнянь [2] відносно даних [1], які прийняті за еталон.

Програмна реалізація рівнянь [2] «ISD ВНТУ» містить підпрограми розрахунків параметрів води $h_b=h(p, t)$, $S_b=S(p, t)$, $v_b=v(p, t)$, $t_b=t(p, h_b)$ та пари. Це прямі функції $t_s=t(p)$, $p_s=p(t)$, $h_n=h(p, t)$, $S_n=S(p, t)$, $v_n=v(p, t)$ та зворотні функції $x, t=x, t(p, h_n)$, $h_n=h(p, S_n)$, $v_n=v(p, h_n)$.

Результати розрахунків за прямими функціями наведені в таблицях 1 та 2. В них позначені: «прогр.» – розраховані параметри, «довідн.» – параметри з довідника [1], δ – похибка розрахунку.

Таблиця 1. Дослідження параметрів водяної пари прямими функціями при тиску 3 кПа

P = 3 кПа t, °C	V, м/кг			H, кДж/кг			S, кДж/кг·град		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	прогр.	довідн.	δ , %	прогр.	довідн.	δ , %	прогр.	довідн.	δ , %
30	46,5722	46,58	0,016745	2556,1	2556,3	0,007824	8,614	8,6145	0,005804
40	48,1208	48,13	0,019115	2575	2575	0	8,675	8,6755	0,005763
50	49,6668	49,67	0,006443	2593,9	2593,8	0,003855	8,735	8,7345	0,005724
100	57,3801	57,38	0,000174	2688,3	2688,1	0,00744	9,006	9,0057	0,003331
150	65,0812	65,08	0,001844	2783,5	2783,3	0,007186	9,246	9,2451	0,009735
200	72,778	72,78	0,002748	2879,9	2879,6	0,010418	9,461	9,4603	0,007399
250	80,4728	80,47	0,00348	2977,7	2977,3	0,013435	9,657	9,6565	0,005178
300	88,1667	88,16	0,0076	3076,9	3076,5	0,013002	9,839	9,8375	0,015248
350	95,86	95,86	0	3177,7	3177,2	0,015737	10,007	10,006	0,009994
400	103,5529	103,55	0,002801	3280,1	3279,5	0,018295	10,165	10,164	0,009839
450	111,245	111,24	0,004495	3384,1	3383,3	0,023646	10,314	10,312	0,019395
500	118,9382	118,94	0,001513	3489,8	3488,9	0,025796	10,455	10,453	0,019133
550	126,6306	126,63	0,000474	3597,2	3596,2	0,027807	10,59	10,588	0,018889
600	134,323	134,32	0,002233	3706,3	3705,3	0,026988	10,719	10,717	0,018662
650	142,0152	142,01	0,003662	3817,2	3816	0,031447	10,842	10,84	0,01845
700	149,7075	149,7	0,00501	3929,9	3928,6	0,033091	10,961	10,959	0,01825
750	157,3997	157,4	0,000191	4044,4	4042,8	0,039577	11,076	11,073	0,027093
800	165,0918	165,1	0,004967	4160,6	4158,9	0,040876	11,187	11,184	0,026824

Таблиця 2. Дослідження параметрів водяної пари прямими функціями при тисках 0,3-25 МПа

P, МПа	t, °C	v, м ³ /кг		h, кДж/кг		s, кДж/кг·град	
		δ_{\min} , %	δ_{\max} , %	δ_{\min} , %	δ_{\max} , %	δ_{\min} , %	δ_{\max} , %
0,3	140 - 800	0	0,048	0	0,043	0	0,024
1,5	200 - 800	0	0,07	0,0098	0,048	0,008	0,032
6	300 - 800	0,012	0,18	0	0,072	0,0016	0,048
9	350 - 800	0	0,258	0,0067	0,0842	0,003	0,051
17	370 - 800	0,03	0,32	0,0062	0,11	0,003	0,063
25	450 - 800	0	0,35	0,043	0,12	0,0017	0,065

Результати розрахунків за зворотними функціями наведені в таблицях 3 та 4.

Таблиця 3. Дослідження параметрів водяної пари зворотними функціями при тиску 3 кПа

P = 3 кПа h, кДж/кг	V, м ³ /кг			S, кДж/кг·град			t, °C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	прогр.	довідн.	δ , %	прогр.	довідн.	δ , %	прогр.	довідн.	δ , %
2556,3	46,549	46,58	0,066552	8,613	8,6145	0,017413	30,181	30	0,603333

Продовження таблиці 3.

P = 3 кПа	V, м ³ /кг			S, кДж/кг·град			t, °C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	прогр.	довідн.	δ, %	прогр.	довідн.	δ, %	прогр.	довідн.	δ, %
2575	48,087	48,13	0,089341	8,6741	8,6755	0,016137	40,152	40	0,38
2593,8	49,62	49,67	0,100664	8,7332	8,7345	0,014884	50,185	50	0,37
2688,1	57,358	57,38	0,038341	9,0044	9,0057	0,014435	100,273	100	0,273
2783,3	65,074	65,08	0,009219	9,2437	9,2451	0,015143	150,278	150	0,185333
2879,6	72,778	72,78	0,002748	9,4579	9,4603	0,025369	200,028	200	0,014
2977,3	80,487	80,47	0,021126	9,657	9,6565	0,005178	250,126	250	0,0504
3076,5	88,205	88,16	0,051044	9,839	9,8375	0,015248	300,287	300	0,095667
3177,2	95,927	95,86	0,069894	10,0043	10,006	0,01699	350,27	350	0,077143
3279,5	103,656	103,55	0,102366	10,1621	10,164	0,018693	400,299	400	0,07475
3383,3	111,378	111,24	0,124056	10,3108	10,312	0,011637	450,25	450	0,055556
3488,9	119,11	118,94	0,142929	10,451	10,453	0,019133	500,25	500	0,05
3596,2	126,839	126,63	0,165048	10,586	10,588	0,018889	550,238	550	0,043273
3705,3	134,565	134,32	0,1824	10,7148	10,717	0,020528	600,5	600	0,083333
3816	142,268	142,01	0,181677	10,8379	10,84	0,019373	650,154	650	0,023692
3928,6	149,963	149,7	0,175685	10,9566	10,959	0,0219	700,137	700	0,019571
4042,8	157,47	157,4	0,044473	11,071	11,073	0,018062	750,064	750	0,008533
4158,9	165,26	165,1	0,096911	11,1818	11,184	0,019671	800,089	800	0,011125

Таблиця 4. Дослідження параметрів водяної пари зворотними функціями при тисках 1,5-25 МПа

P, МПа	h, кДж/кг	v, м ³ /кг		s, кДж/кг·град		t, °C	
		δ _{min} , %	δ _{max} , %	δ _{min} , %	δ _{max} , %	δ _{min} , %	δ _{max} , %
1,5	2795,3- 4151,8	0,04	2,7	0,02	0,034	0,001	0,67
6	2885- 4130,4	0,01	1,9	0,0016	0,033	0,001	0,1
9	2957,5- 4161,1	0,04	0,6	0,001	0,014	0,015	0,077
17	2742,3- 4077,9	0	2,9	0	0,032	0,1	0,26
25	2952,1- 4039,8	0,06	2,3	0,04	0,037	0,03	0,46

Висновки

1. В якості математичної моделі стану води та водяної пари прийняті відомі достатньо прості рівняння.

2. Математична модель стану води та водяної пари реалізована програмою «ISD ВНТУ». Її перевагою є наявність, так званих, зворотних функцій, полегшуючих розрахунки паротурбінних установок.

3. Досліджена точність результатів розрахунків програмою «ISD ВНТУ» відносно загальноприйнятих таблиць теплофізичних властивостей води та водяної пари. За прямими функціями максимальна похибка розрахунків питомого об'єму складає 0,35%, ентальпії – 0,0842%, ентропії – 0,065%. За зворотними функціями максимальна похибка розрахунків питомого об'єму складає 2,9 %, ентропії – 0,037 %, температури – 0,67%.

4. Точність програми «ISD ВНТУ» дозволяє її використання в навчальному та реальному проектуванні традиційних та відновлюваних джерел енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ривкин С. Л., Александров А. А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
2. Mayinger, F.; Schmidt, E.; Tratz, H.: Neue Zustandsgleichungen für Wasserdampf unter Berücksichtigung Ihrer Verwendung in elektronischen Rechenanlagen. BWK 14 (1962) 261–266.

Головченко Олексій Михайлович – к. т. н., доцент, доцент кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: aleksey.golovch@gmail.com.

Нанака Олена Миколаївна – к. т. н., доцент кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: e_nanaka@ukr.net.

Попсуй Ліна Віталіївна – студентка групи ЕМ-18м, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький Національний Технічний Університет, м. Вінниця.

Oleksiy M. Golovchenko – PhD, assistant professor at the department of renewable energy and electrical transportation systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: aleksey.golovch@gmail.com.

Olena M. Nanaka – PhD, assistant professor at the department of renewable energy and electrical transportation systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: e_nanaka@ukr.net.

Lina. V. Popsui – student of the group EM-18m, department of electroenergy and electromechanics, Vinnytsa National Technical University, Vinnytsya.