

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного  
господарства та природокористування

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та  
гідравлічних машин

**01-06-67М**

### **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт № 3 та № 4 з навчальної  
дисципліни «Котельні установки промислових підприємств»  
для здобувачів вищої освіти першого(бакалаврського) рівня за  
ОПП 144 «Теплоенергетика» галузі знань 14 «Електрична  
Інженерія» денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-методичною ра-  
дою з якості ННІВГП  
Протокол № 10 від 20 червня 2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт № 3 та № 4 з навчальної дисципліни «Котельні установки промислових підприємств» для здобувачів вищої освіти першого(бакалаврського) рівня за ОПП 144 «Теплоенергетика» галузі знань 14 «Електрична інженерія» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Куба В. В. – Рівне : НУВГП, 2023. – 29 с.

Укладач:

Куба В. В. – старший викладач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Відповідальний за випуск – Рябенко О. А., д.т.н., професор, завідувач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Керівник ОПП

Костюк О. П.

© В. В. Куба, 2023

© НУВГП, 2023

## ЗМІСТ

Передмова	3
1.Лабораторна робота № 3. Балансові випробування котла в умовах котельні студмістечка	4
2.Лабораторна робота № 4. Дослідження роботи поверхневого водяного економайзера в умовах котельні студмістечка	21
Література	29

## ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Котельні установки промислових підприємств» є базовою для студентів спеціальності «Теплоенергетика». Для закріплення теоретичного курсу передбачається проведення циклу лабораторних робіт.

Метою вивчення дисципліни «Котельні установки промислових підприємств» є отримання знань з проектування, експлуатації та налагодження котельних агрегатів.

Дані лабораторні роботи проводяться безпосередньо на діючій котельні, де студенти ознайомлюються з котлами, а також виконують необхідні заміри з подальшою їх обробкою. Після проведення кожної лабораторної роботи студент повинен оформити звіт та захистити лабораторну роботу викладачу.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

**Тема: БАЛАНСОВІ ВИПРОБУВАННЯ КОТЛА В УМОВАХ КОТЕЛЬНОЇ СТУДМІСТЕЧКА**

**Мета роботи:** Визначити теплові втрати і ККД брутто котла, питомі витрати палива; скласти режимну карту котла

### 3.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Балансові дослідження — найбільш відповідальні, тому що за їхніми результатами розраховують економічні показники роботи котла - ККД і питому витрату палива. Ці дослідження проводять для трьох-чотирьох варіантів навантаження.

Тепловий баланс котла являє собою рівність між кількістю теплоти, що внесена в котел, та сумою теплоти, що використана корисно, та втратами теплоти. Складові теплового балансу відносять до одиниці маси або об'єму палива, що спалюється.

Рівняння теплового балансу для котла при усталеному режимі

$$Q_P = Q_I + \sum Q_{BT}, \quad (1)$$

де  $Q_P$  - теплота, що внесена в топку котла, кДж/кг (Дж/м<sup>3</sup>);

$Q_I$  - теплота, що використана корисно на виробництво пари або гарячої води, кДж/кг (Дж/м<sup>3</sup>);  $\sum Q_{BT}$  - сумарні втрати теплоти, кДж/кг (Дж/м<sup>3</sup>).

При складанні теплового балансу для котлів малої і середньої потужності, що працюють на газовому паливі, теплота, що внесена в топку котла  $Q_P$  рівна нижчій теплоті згоряння палива  $Q_P = Q_H$ . Нижча теплота згоряння палива являє собою кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні одиниці маси або об'єму палива з утворенням оксидів  $RO_2(SO_2+CO_2)$  і води в пароподібному стані. Існує поняття «вища теплота згоряння». Тут вода, що утвориться при згорянні, є присутньою у рідкому стані. Нижча теплота згоряння відрізняється від вищої витратами теплоти на випаровування вологи, що утримується в паливі й утвориться при його згорянні. Для природного газу різниця між вищою і нижчою теплотою згоряння  $\sim 4190$  кДж/м<sup>3</sup>.

Теплота, використана на виробництво гарячої води у водогрійному котлі, може бути визначена за формулою

$$Q_1 = \frac{G_B}{B} (h_2 - h_1), \quad (2)$$

де  $h_1$  та  $h_2$  - відповідно ентальпії води, що надходить у котел і виходить з нього, кДж/кг;  $G_B$  - витрата води, кг/с.

Сумарні втрати теплоти включають в себе

$$\sum Q_{BT} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (3)$$

де  $Q_2 - Q_6$  - втрати теплоти, кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>) з вихідними газами; від хімічної неповноти згоряння палива; від механічної неповноти згоряння; від зовнішнього охолодження котла; з фізичною теплою шлаків.

При роботі котла на газі відсутні втрати теплоти  $Q_4$  та  $Q_6$ . Сумарні втрати теплоти визначаються за формулою

$$\sum Q_{BT} = Q_2 + Q_3 + Q_5, \quad (4)$$

Таким чином, рівняння теплового балансу для котлів, що працюють на газі,

$$Q_H = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_5, \quad (5)$$

Якщо складові теплового балансу виразити їх процентним відношенням до  $Q_H$ , то одержимо

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_5, \quad (6)$$

де  $q_1 = \frac{Q_1}{Q_H} 100$ ;  $q_2 = \frac{Q_2}{Q_H} 100$ ;  $q_3 = \frac{Q_3}{Q_H} 100$ ;  $q_5 = \frac{Q_5}{Q_H} 100$ .

Відношення корисно використаної теплоти  $Q_1$  до затраченої  $Q_H$  являє собою коефіцієнт корисної дії (ККД) бруто котла:

$$\eta_K^{BP} = q_1 = 100 - q_2 - q_3 - q_5. \quad (7)$$

На відміну від ККД бруто, ККД нетто котла враховує витрати теплоти на його власні потреби. Однак на практиці ККД нетто окремих котлів не розраховують, а визначають ККД нетто котельні в цілому. При цьому враховують витрати теплоти на власні потреби в загальному на котельню.

ККД котла може бути визначений за прямим та зворотним теплових балансах. При прямому балансі ККД для водогрійного котла розраховується за формулою

$$\eta_K^{пр} = \frac{Q_1}{Q_H} 100 = \frac{G_B(h_2 - h_1)}{BQ_H} 100. \quad (8)$$

З приведених формул видно, що для визначення ККД котла за прямим балансом необхідно виміряти кількість і теплоту згоряння палива, що спалюється, а також кількість виробленої теплової енергії у вигляді пари або гарячої води.

При визначенні ККД котла за зворотним балансом необхідно обчислити втрати теплоти та за відомою теплотою згоряння палива знайти ККД котла:

$$\eta_K = 100 - (q_2 + q_3 + q_5). \quad (9)$$

Втрати теплоти з вихідними газами  $Q_2$  виникають унаслідок того, що температура вихідних газів вища за температуру повітря і палива, що надходять у котел. Втрати теплоти від хімічної неповноти згоряння  $Q_3$  мають місце при недостатній кількості повітря, що надходить для горіння і при його неякісному змішуванні з паливом. Втрати  $Q_2$  та  $Q_3$  можуть бути підраховані за результатами вимірів обсягу продуктів згоряння та їхніх теплофізичних характеристиках (температурі, теплоємності, теплоті згоряння продуктів, хімічної неповноти згоряння палива).

Однак з метою скорочення трудомісткості та спрощення аналізів і розрахунків при спалюванні рідкого і газоподібного палива ці втрати визначаються за методикою теплотехнічних розрахунків, що запропонована професором М.Б. Равичем. Застосування цієї методики дозволяє відмовитися від підрахунку теплоти згоряння палива. Вона ґрунтується на використанні узагальнених характеристик продуктів згоряння, що коливаються в досить малих межах. До узагальнених характеристик відносяться (табл. 1):

- жаропродуктивність палива, максимальна температура горіння  $t_{MAX}$ , °С, що розвивається при повному згорянні палива з теоретично необхідною для горіння кількістю повітря ( $\alpha = 1,0$ ) при температурі палива та повітря 0 °С;
- співвідношення обсягів вологих і сухих продуктів згоряння, В;

- кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні палива при  $\alpha = 1,0$ , що віднесена до  $1 \text{ м}^3$  сухих продуктів згоряння  $P$ ,  $\text{кДж/м}^3$ ;
- коефіцієнт зміни об'єму сухих продуктів горіння  $h$  - відношення дійсного об'єму сухих продуктів згоряння до теоретичного об'єму сухих газів, що одержані при повному згорянні палива при  $\alpha = 1,0$ ;
- коефіцієнт  $C'$ , відношення теплоємностей продуктів повного згоряння при  $\alpha = 1,0$  в інтервалі температур від  $0^\circ\text{C}$  до  $t_{yx}$  до їхньої теплоємності в інтервалі температур від  $0^\circ\text{C}$  до  $t_{MAX}$  (табл.2);
- коефіцієнт  $K$ , відношення об'ємної теплоємності повітря в інтервалі температур від  $0^\circ\text{C}$  до  $t_{yx}$  до об'ємної теплоємності продуктів згоряння при  $\alpha = 1,0$  в інтервалі температур від  $0^\circ\text{C}$  до  $t_{MAX}$  (табл.2).

При підрахунку жаропродуктивності з урахуванням вмісту в повітрі 1 % вологи по масі, як це прийнято в теплотехнічних розрахунках, її позначають  $t'_{MAX}$ . Вона приблизно на  $30^\circ\text{C}$  нижче за  $t_{MAX}$ .

Таблиця 1.

Узагальнені теплотехнічні характеристики газоподібного палива

Паливо	$t'_{MAX}, ^\circ\text{C}$	$V$	$CO_{2max}, \%$	$P, \text{кДж/м}^3$
Природний газ	2010	0,80	11,8	4190
Нафтопромисловий	2050	0,84	13,0	4190
Коксовий газ	2090	0,77	10,4	4567
Сланцевий газ	1950	0,82	16,2	4190
Доменний газ	1470	0,98	24,5	2598
Мазут	2100	0,88	16,5	4022

Таблиця 2.

Значення коефіцієнтів  $C'$  та  $K$ 

Температура продуктів згорання, $^{\circ}C$	<b>Паливо з <math>t'_{MAX} \geq 2000^{\circ}C</math></b> (з малим вмістом баласту)		<b>Паливо з <math>t'_{MAX} = 1600 \div 1700^{\circ}C</math></b> (з великим вмістом баласту)	
	$C'$	$K$	$C'$	$K$
100	0,82	0,77	0,83	0,79
200	0,83	0,78	0,84	0,79
300	0,84	0,79	0,86	0,80
400	0,86	0,80	0,87	0,81
500	0,87	0,81	0,88	0,82
600	0,88	0,82	0,90	0,83
700	0,89	0,83	0,91	0,84
800	0,90	0,83	0,92	0,85
900	0,91	0,84	0,93	0,86
1000	0,92	0,85	0,94	0,87
1100	0,93	0,86	0,95	0,87
1200	0,94	0,86	0,96	0,88
1300	0,95	0,87	0,97	0,88
1400	0,96	0,88	0,98	0,89
1500	0,97	0,89	-	-



Коефіцієнт зміни об'єму сухих продуктів згоряння  $h$  у загальному випадку визначається за формулою

$$h = RO_{2MAX} / (RO_2 + CO + CH_4), \quad (10)$$

де  $RO_2 = CO_2 + SO_2$  - вміст  $RO_2$  у сухих продуктах згоряння, %;  $CO, CH_4$  - вміст  $CO, CH_4$  у сухих продуктах згоряння, %;  $RO_{2MAX}$  - максимально можливий вміст  $RO_2$  в сухих продуктах згоряння при  $\alpha = 1,0$ , %.

При відсутності в паливі сірки та повному згорянні палива

$$h = CO_{2MAX} / CO_2. \quad (11)$$

Вміст  $CO_{2MAX}$  в природних газах газових родовищ, що складаються в основному з метану, дорівнює 11,8 %. Зі збільшенням вмісту в газі  $N_2$ ,  $CO_2$  і зменшенням вмісту  $CH_4$  кількість  $CO_{2MAX}$  зростає і підлягає визначенню залежно від складу продуктів його згоряння:

$$CO_{2MAX} = \frac{(CO_2 + CO + CH_4)100}{100 - 4,76(O_2 - 0,4CO - 0,2H_2 - 1,6CH_4)}, \quad (12)$$

де  $O_2$ ,  $H_2$  - вміст  $O_2$  і  $H_2$  у продуктах згоряння, %.

Втрати теплоти з вихідними газами визначаються за формулою

$$q_2 = \frac{t_{VX} - t_B}{t'_{MAX}} [C' + (h - 1)BK] 100, \quad (13)$$

де  $t_{VX}$  - температура вихідних газів,  $^{\circ}C$ ;  $t_B$  - температура повітря, що надходить у топку,  $^{\circ}C$ .

Формула (13) може бути застосована для усіх видів палива і для сумісного спалювання різних видів палива.

При спалюванні одного виду палива з відомими значеннями  $t'_{MAX}$ ,  $B$ ,  $C'$  та  $K$  формула (13) набуде вигляду

$$q_2 = 0,01z(t_{VX} - t_B), \quad (14)$$

де  $z$  - величина, що визначається в залежності від температури вихідних газів та сумарного вмісту в продуктах згоряння вуглевмісних газів  $CO_2 + CO + CH_4$  (для природного газу  $z$  знаходиться за табл. 3).

Втрати тепла від хімічної неповноти згоряння при спалюванні палива з відомим максимальним тепловмістом сухих продуктів згоряння  $P$  втрати тепла  $q_3$  можна визначити за формулами:

$$\begin{aligned} & \text{- при спалюванні газу з } P = 4190 \text{ кДж/м}^3 \\ & q_3 = (3,02CO + 2,58H_2 + 8,55CH_4)h. \end{aligned} \quad (15)$$

Таблиця 3.

Значення  $z$  для природного газу

Вміст $CO_2$ + + $CO$ + + $CH_4$ , %	Температура продуктів згорання, °C				Вміст $CO_2$ + + $CO$ + + $CH_4$ , %	Температура продуктів згорання, °C			
	0-250	250- 350	350- 500	500- 700		0-250	250- 350	350- 500	500- 700
11,8	4,13	4,16	4,28	4,37	9,6	4,84	4,90	5,00	5,10
11,7	4,15	4,21	4,31	4,40	9,5	4,88	4,95	5,05	5,15
11,6	4,18	4,25	4,33	4,43	9,4	4,93	5,00	5,10	5,20
11,5	4,21	4,28	4,37	4,47	9,3	4,97	5,05	5,15	5,25
11,4	4,24	4,30	4,40	4,50	9,2	5,02	5,07	5,20	5,30
11,3	4,26	4,32	4,43	4,53	9,1	5,07	5,10	5,25	5,35
11,2	4,28	4,34	4,46	4,56	9,0	5,10	5,15	5,30	5,40
11,1	4,30	4,37	4,48	4,58	8,9	5,13	5,22	5,33	5,45
11,0	4,35	4,40	4,50	4,60	8,8	5,17	5,26	5,35	5,50
10,9	4,40	4,43	4,53	4,63	8,7	5,22	5,30	5,40	5,55
10,7	4,45	4,50	4,60	4,70	8,5	5,30	5,40	5,50	5,65
10,6	4,48	4,53	4,65	4,75	8,4	5,35	5,45	5,55	5,70
10,5	4,50	4,56	4,67	4,78	8,3	5,40	5,50	5,60	5,75
10,4	4,53	4,60	4,70	4,80	8,2	5,45	5,55	5,65	5,80
10,3	4,57	4,63	4,75	4,85	8,1	5,50	5,60	5,70	5,85
10,2	4,60	4,65	4,78	4,88	8,0	5,57	5,67	5,77	5,90
10,1	4,63	4,70	4,80	4,90	7,9	5,62	5,72	5,85	5,95
10,0	4,67	4,75	4,85	4,95	7,8	5,68	5,80	5,90	6,00
9,9	4,70	4,80	4,90	5,00	7,7	5,75	5,85	5,97	6,08
9,8	4,75	4,83	4,93	5,03	7,6	5,80	5,90	6,05	6,15
9,7	4,80	4,87	4,97	5,07	7,5	5,85	6,00	6,10	6,25
7,4	5,90	6,05	6,20	6,3	6,1	7,05	7,15	7,25	7,45
7,3	6,00	6,10	6,25	6,35	6,0	7,15	7,25	7,35	7,55
7,2	6,05	6,15	6,30	6,40	5,9	7,25	7,35	7,50	7,65
7,1	6,10	6,25	6,40	6,50	5,8	7,40	7,45	7,60	7,75
7,0	6,22	6,32	6,45	6,60	5,7	7,45	7,55	7,70	7,85
6,9	6,35	6,40	6,55	6,70	5,6	7,55	7,65	7,80	7,95
6,8	6,45	6,50	6,65	6,75	5,5	7,70	7,80	7,95	8,10
6,7	6,50	6,60	6,70	6,85	5,4	7,85	7,95	8,05	8,25
6,6	6,55	6,65	6,80	6,95	5,3	7,95	8,05	8,20	8,35
6,5	6,65	6,75	6,85	7,05	5,2	8,05	8,20	8,35	8,50
6,4	6,70	6,85	6,95	7,15	5,1	8,20	8,35	8,50	8,65
6,3	6,80	6,95	7,05	7,25	5,0	8,35	8,50	8,65	8,80

Втрати тепла в оточуюче середовище  $q_5$  визначаються орієнтовно за нормативними графіками або приймаються за даними заводських або дослідних випробувань (рис. 1).

При потужності котла, яка відрізняється від номінальної, втрати тепла в оточуюче середовище  $q_5$  для водогрійних котлів складуть

$$q'_5 = q_5 \frac{Q_{НОМ}}{Q_{\Phi}}, \quad (16)$$

де  $q_5$  – втрати тепла в оточуюче середовище при номінальній продуктивності, які визначаються за нормативними графіками, %;  $Q_{НОМ}$  – номінальні теплопродуктивність, МВт;  $Q_{\Phi}$  – фактична теплопродуктивність, МВт.

При порівнянні результатів розрахунку ККД бруто котла за прямим і зворотним балансам розходження не повинно перевищувати точність визначення ККД в умовах проведення теплотехнічних випробувань за другою категорією складності (1,5-2%).

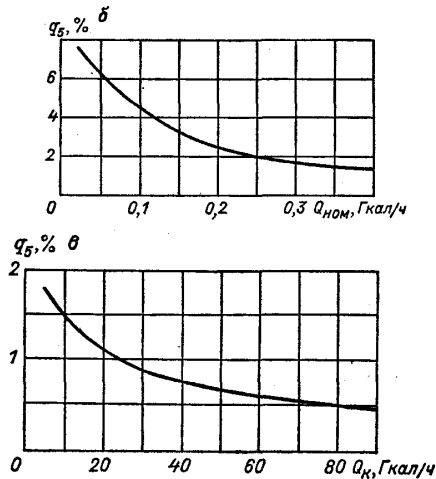


Рис. 1. Залежність втрат теплоти в навколишнє середовище  $q_5$  від номінальної продуктивності водогрійних котлів  $Q_{НОМ}$  до 0,4 Гкал/год (а) та  $Q_K=10-80$  Гкал/год (б)

Теплопродуктивність котла, МВт, для водогрійного котла підраховують за формулою

$$Q_K = G_B(h_2 - h_1). \quad (17)$$

Витрата палива  $B$ , м<sup>3</sup>/с для водогрійного котла визначається за формулою

$$B = \frac{G_B(h_2 - h_1)}{Q_H \cdot \eta_K}. \quad (18)$$

Питома витрата палива на 1 МДж відпрацьованої котлом теплоти  $b_H$ , м<sup>3</sup>/МДж

$$b_H = \frac{1}{Q_H \eta_K}. \quad (19)$$

Питома витрата умовного палива на 1 МДж, відпрацьованої котлом теплоти, м<sup>3</sup>/МДж

$$b_H = \frac{1}{29,31 \eta_K}. \quad (20)$$

Питомі витрати електроенергії, кВт/МВт

- на тягу

$$e_D = \frac{N_D}{Q_K}. \quad (21)$$

- на дуття

$$e_B = \frac{N_B}{Q_K}. \quad (22)$$

де  $N_D$  і  $N_B$  – потужність, що споживається електродвигунами димососа та дуттєвого вентилятора котла, кВт.

Для оптимального спалювання палива необхідно, щоб об'єм повітря, який поступає, забезпечував мінімальні втрати теплоти. В ідеальному випадку об'єм повітря для повного спалювання палива можна визначити за формулою горіння складових палива в стехіометричних умовах:

$$V_{BT} = 4,76 \left( \begin{array}{l} 0,5CO + 0,5H_2 + 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + \\ + 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12} + 3C_2H_4 + 4,5C_3H_6 + \\ + 6C_4H_8 + 7,5C_5H_{10} + 1,5H_2S - O_2 \end{array} \right) / 100, \quad (23)$$

де  $V_{BT}$  – теоретичний об'єм повітря для повного спалювання 1 м<sup>3</sup> газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; CO, H<sub>2</sub> і т.д. – вміст окремих компонентів в паливі, %.

Практична неможливість отримати стехіометричні умови горіння, що обумовлено недосконалістю процесу змішування палива з повітрям, приводить до необхідності витрати повітря для повного спалювання палива в кількості, яка перевищує теоретичну.

Таблиця 4.

Значення коефіцієнтів  $h$  і  $\alpha$

Вміст продуктів спалювання, %			h	$\alpha$
CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
11,8	0,0	88,2	1,00	1,00
11,6	0,4	88,0	1,02	1,02
11,4	0,7	87,9	1,03	1,03
11,2	1,1	87,7	1,05	1,05
11,0	1,4	87,6	1,07	1,06
10,8	1,8	87,4	1,09	1,08
10,6	2,1	87,3	1,11	1,10
10,4	2,5	87,1	1,13	1,12
10,2	2,8	87,0	1,15	1,14
10,0	3,2	86,8	1,18	1,16
9,8	3,6	86,6	1,20	1,18
9,6	3,9	86,5	1,23	1,20
9,4	4,2	86,4	1,25	1,22
9,2	4,6	86,2	1,28	1,25
9,0	5,0	86,0	1,31	1,28
8,8	5,3	85,9	1,37	1,30
8,6	5,7	85,7	1,40	1,33
8,4	6,1	85,5	1,44	1,36
8,2	6,4	85,4	1,47	1,40
8,0	6,8	85,2	1,51	1,43
7,8	7,1	85,1	1,55	1,46
7,6	7,5	84,9	1,59	1,50
7,4	7,8	84,8	1,64	1,53
7,2	8,2	84,6	1,65	1,57
7,0	8,5	84,5	1,68	1,61
6,8	8,9	84,3	1,73	1,66
6,6	9,2	84,2	1,79	1,71
6,4	9,6	84,0	1,85	1,76
6,2	10,0	83,8	1,90	1,82
6,0	10,3	83,7	1,96	1,87
5,8	10,7	83,6	2,03	1,94
5,6	11,0	83,4	2,11	2,00

Відношення дійсної витрати повітря до теоретично необхідної визначається коефіцієнтом надлишку повітря

$$\alpha = \frac{V_{ВД}}{V_{BT}} = \frac{V_{BT} + V_{BH}}{V_{BT}}, \quad (24)$$

де  $V_{ВД}$  і  $V_{BH}$  – дійсна і надлишкова витрата повітря,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Коефіцієнт витрати повітря може бути підрахований також за складом продуктів спалювання

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76(O_2 - 0,5CO - 0,5H_2 - 2CH_4)}. \quad (25)$$

Між коефіцієнтами  $\alpha$  і  $h$  існує залежність

$$V_{BH} = V_{BT}(\alpha - 1); \quad V_{BH} = V_{CГТ}(h - 1); \quad (26)$$

$$V_{BT}(\alpha - 1) = V_{CГТ}(h - 1); \quad (27)$$

$$\alpha = \frac{V_{CГТ}}{V_{BT}}(h - 1) + 1; \quad (28)$$

$$\alpha = J(h - 1) + 1, \quad (29)$$

де  $V_{CГТ}$  – теоретична витрата повітря в сухих продуктах згоряння,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $J$  – відношення теоретичних об'ємів сухих продуктів згоряння і повітря при повному спалюванні палива для природного газу  $J = 0,90$ .

Значення  $h$  і  $\alpha$  в залежності від складу продуктів повного спалювання природного газу наведені в табл.4.

### 3.2. Порядок виконання роботи

Принципова схема вимірів наведена на рис. 2, на якій показані усі точки замірів.

Для кожного навантаження встановлюють режим, при якому процес горіння відбувається з оптимальною витратою повітря.

При проведенні розглянутої серії дослідів вимірюють:

1. продуктивність котла;
2. тиск і температуру перегрітої пари (температуру гарячої води);
3. температуру води на вході в котел;
4. витрату газу;

5. тиск газу перед пальниками, після регулюючої засувки в газовому колекторі котла;
6. температуру і тиск газу перед діафрагмою (лічильником);
7. температуру холодного і гарячого повітря;
8. тиск повітря після дуттєвого вентилятора, перед пальниками (первинного, вторинного);
9. розрідження вверху топки, за котлом, за економайзером, за повітропідігрівником, перед димососом;
10. температуру продуктів згоряння за котлом, за економайзером, за повітропідігрівником, перед димососом;
11. склад продуктів згоряння у вимірювальній (за котлом) балансовій точці (за економайзером або за повітропідігрівником);
12. навантаження електродвигунів димососа, дуттєвого вентилятора.

Тривалість балансового досліду при одному навантаженні 3 год. За даними цих вимірів підраховують втрати теплоти і визначають економічні показники роботи котла.

### **3.3. Аналіз результатів іспитів**

При аналізі варто звертати увагу на: діапазон навантажень, при якому забезпечується надійна, економічна робота котла; причини, що визначають максимальне і мінімальне навантаження котла; якість роботи пальників по сумішоутворенню, довжині факела, вібрації, нагріванню конструкції, шуму, що створюється, зручності і надійності розпалювання, стійкості роботи; результати включення різного числа пальників і в різних комбінаціях; характер розподілу факела в топковому просторі; забезпечення котла тягою і дуттям і роботу тягодуттєвих пристроїв; значення коефіцієнта витрати повітря по газоходах, причини їхнього завищеного значення, характер зміни зі зміною продуктивності котла; значення ККД котлів і витрати палива, причини відхилень ККД котлів від розрахункових значень (у випадку розбіжності більш ніж на 1 %); характер зміни ККД і витрати палива зі зміною продуктивності котла; споживання теплоенергії на власні потреби котельні; питомі витрати палива на вироблену і відпущену теплоенергію, а також на інші питання, що мають місце в конкретних умовах. Аналіз результатів іспитів зводяться у табл. 5 та 6.

Таблиця 5

Зведена відомість результатів випробувань водогрійного котла  
№ \_\_\_\_\_ типу \_\_\_\_\_ з пальниками \_\_\_\_\_ котельні \_\_\_\_\_

№ з/п	Параметр, одиниця виміру	Спо- сіб отри ман.	Навантаження котла, %		
			4	5	6
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<u>Паливо</u>					
1	Нижча теплота згорання $Q_H$ , кДж/м <sup>3</sup>				
2	Густина газу в нормальних умовах $\rho_{НОРМ}$ , кг/м <sup>3</sup>				
3	Кількість працюючих пальників $n$ , шт.				
4	Температура газу перед діафрагмою (лічильником) $t_G$ , °С				
5	Надлишковий тиск перед діафрагмою (лічильником) $p_H$ , кгс/см <sup>2</sup>				
6-7	Тиск газу, кгс/см <sup>2</sup> : - після регулюючої засувки $p_{КОЛ}$ -перед пальниками $p_G$				
8	Витрата газу за приладом $V_{П}$ , м <sup>3</sup> /год				
9	Фактична витрата газу з врахуванням поправок на відхилення робочих параметрів газу від розрахункових $V_{П}^Д$ , м <sup>3</sup> /год				
10	Витрата газу по оберненому балансу (визначається при відсутності витратоміра) $V$ , м <sup>3</sup> /год				



продовження таблиці 5

1	2	3	4	5	6
<u>Вода</u>					
1	Витрата води через котел G				
2	Тиск води $p_B$ , кгс/см <sup>2</sup> : -до котла -після котла				
3	Температура води $t_B$ , °C: -до котла -після котла				
4-5	Теплопродуктивність котла, МВт: -за прямим балансом $Q_K$ -за зворотнім балансом $Q_{K\text{обр}}$				
<u>Продукти згорання</u>					
1	Склад вихідних газів, %: CO <sub>2</sub> O <sub>2</sub> CO N <sub>2</sub> NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>				
2	Коефіцієнт витрати повітря за котлом $\alpha_K$				
3	Температура вихідних газів $t_{yX}$ , °C				
<u>Повітря</u>					
1-2	Тиск повітря, кгс/см <sup>2</sup> : -за вентилятором $p_{\text{вент}}$ -перед пальниками (первинног/вторинного) $p_B$				
3	Температура холодного повітря $t_{XB}$ , °C				
<u>Розрідження, кгс/см<sup>2</sup></u>					
1	Вверху топки $S_T$				
2	За котлом $S_K$				
3	Перед димососом $S_D$				
4	Опір газового тракту $\Delta S$	$S_D - S_K$			

продовження таблиці 5

1	2	3	4	5	6
<u>Навантаження електродвигунів</u>					
1	Сила струму електродвигунів, А: -димососа $I_D$ -дугтевого вентилятора $I_B$				
2	Потужність, що споживається електродвигунами, кВт: -димососа $N_D$ -дугтевого вентилятора $N_B$				
3	Питомі витрати електроенергії, кВт год/МВт: -на тягу $\mathcal{E}_D$ -на дугтя $\mathcal{E}_B$				
<u>Тепловий баланс</u>					
1	Втрати теплоти з вихідними газами $q_2$ , %				
2	Значення $z$				
3	Втрати теплоти від хімічної неповноти згорання палива $q_3$ , %				
4	Втрати теплоти в навколишнє середовище $q_5$ , %				
5-6	ККД бруто котла, % -за зворотнім балансом $\eta_k$ -за прямим балансом (визначається при наявності приладів по витраті газу та води) $\eta_{kpr}$				
7	Витрата палива на виробництво 1МДж теплоти $b_H$ , м <sup>3</sup> /МДж				
8	Витрата умовного палива на виробництво 1 МДж теплоти $b_y$ , м <sup>3</sup> /МДж				
9	Нев'язка за прямим і зворотнім балансами $\Delta\eta$				

Таблиця 6

## Режимна карта роботи водогрійного котла

№ \_\_\_\_\_ типу \_\_\_\_\_, який обладнаний пальниками типу \_\_\_\_\_ котельні \_\_\_\_\_

№ з/п	Параметр, одиниця виміру	Навантаження котла, %		
1	Теплопродуктивність, МВт			
2	Витрата води через котел, кг/с			
3-4	Температура води, °С: -до котла -після котла			
5-6	Тиск води, кгс/см <sup>2</sup> : -до котла -після котла			
7	Кількість працюючих пальників, шт			
8	Витрата газу, м <sup>3</sup> /год			
9-10	Тиск газу, кгс/см <sup>2</sup> : -після регулюючої засувки (перед котлом) -перед пальниками			
11-12	Тиск повітря, кгс/см <sup>2</sup> : -після вентилятора -перед пальниками (первинного, вторинного)			
13-15	Розрідження, кгс/см <sup>2</sup> : -вверху топки -за котлом -перед димососом			
16	Температура вихідних газів, °С			
17	Склад вихідних газів, %: CO <sub>2</sub> O <sub>2</sub> CO NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>			
18	Коефіцієнт витрати повітря за котлом			
19	Навантаження електродвигунів, А: -димососа -дутьового вентилятора			
20	ККД бруто котла, %			
21	Питома витрата умовного палива на виробництво 1 Мдж теплоти, м <sup>3</sup> /МДж			

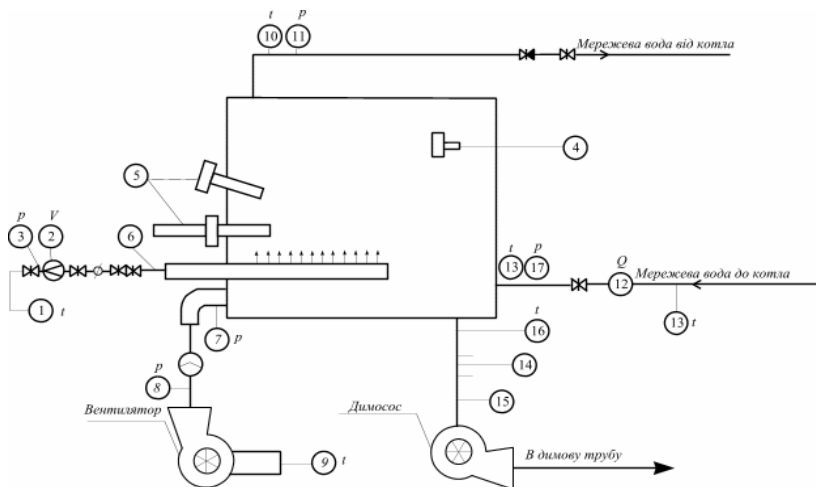


Рис.2. Схема точок замірів

1. Температура газу; 2. Витрата газу; 3. Тиск газу в газопроводі; 4. Розрідження в топці; 5. Склад газу; 6. Тиск газу; 7. Тиск повітря перед пальниками; 8. Тиск повітря після вентилятора; 9. Температура повітря; 10. Температура води на виході з котла; 11. Тиск води на виході з котла; 12. Витрата води; 13. температура води на вході; 14. Склад продуктів згорання за котлом; 15. Розрідження за котлом; 16. Температура димових газів; 17. Тиск води на вході

### 3.4. Контрольні запитання

1. Яка мета роботи ?
2. Написати тепловий баланс котла, що досліджується.
3. Пояснити методику по визначенню втрат теплоти з відхідними газами.
4. Як визначають в даній роботі втрат теплоти від хімічної неповноти згорання палива?
5. Як визначають втрати теплоти в оточуюче середовище ?
6. Що таке ККД брутто та ККД нетто котла ? Як вони визначаються ?
7. Як визначаються теплопродуктивність котла, витрата палива, питома витрата палива, питомі витрати електроенергії ?
8. Як можна визначити коефіцієнт витрати повітря?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПОВЕРХНЕВОГО ВОДЯНОГО ЕКОНОМАЙЗЕРА В УМОВАХ КОТЕЛЬНІ СТУДМІСТЕЧКА

**Мета роботи:** Дослідити роботу поверхневого водяного економайзера

#### 4.1. Загальні відомості

У водяних економайзерах (теплообмінниках) нагрівання живильної води перед надходженням її в котел відбувається за рахунок димових газів. Корисно використана теплота в економайзері зменшує витрату палива в котлі і тим самим підвищує КПД котла в цілому.

Існує два варіанти включення в роботу економайзерів: перший, коли вода нагрівається перед надходженням у котел; і другий, коли вода, що нагрівається в економайзері, який встановлений в газоході котла, не використовується в котлі, а призначається для потреб теплофікації. В другому випадку використання теплоти продуктів згоряння не впливає на ККД котла.

У ході випробувань процес горіння палива повинен відбуватися без хімічної неповноти згоряння.

Присоси повітря в економайзер підраховують за різницею коефіцієнтів надлишку повітря за економайзером  $\alpha''_{ЕК}$  і перед ним  $\alpha'_{ЕК}$

$$\Delta\alpha_{ЕК} = \alpha''_{ЕК} - \alpha'_{ЕК} . \quad (1)$$

Аеродинамічний опір економайзера визначається як різниця розрідження за економайзером  $S''_{ЕК}$  і перед ним  $S'_{ЕК}$

$$\Delta S_{ЕК} = S''_{ЕК} - S'_{ЕК} . \quad (2)$$

Теплопродуктивність економайзера, МВт, визначають за формулою

$$Q_{ЕК} = 4,19 \cdot 10^{-3} G_{ЖВ} (t''_{ЖВ} - t'_{ЖВ}) , \quad (3)$$

де  $G_{ЖВ}$  - витрата живильної води через економайзер, кг/с;

$t''_{ЖВ}$  та  $t'_{ЖВ}$  - температура живильної води на виході з економайзера і на вході в нього, °С.

Приріст ККД котла за рахунок роботи економайзера, %, визначається за формулою

$$\Delta\eta_K = \eta_K - \eta'_K, \quad (4)$$

де  $\eta_K$ ,  $\eta'_K$  - відповідно ККД брутто котла, які визначені по складу і температурі продуктів згоряння за економайзером і перед економайзером, %.

ККД котла розраховують за зворотним балансом за методикою, яка запропонована професором М. Б. Равичем (див. лаб. робота “Балансові випробування котла”).

ККД економайзера, %, визначають із співвідношення

$$\eta_{ЕК} = \frac{\Delta\eta_K 0,01 Q_H}{a q_2 0,01 Q_H} 100 = \frac{\Delta\eta_K}{a q_2} 100, \quad (5)$$

де  $a$  - відносний об'єм продуктів згоряння, що проходять через економайзер;  $q_2$  - втрати теплоти з вихідними газами, %, які розраховані за складом і температурою продуктів згоряння перед економайзером.

У випадку «некиплячого» економайзера, з якого вода надходить у котел, отримана економія палива, %, складе

$$\Delta B = \frac{t''_{ЖВ} - t'_{ЖВ}}{t_{KB} - t'_{ЖВ}} 100, \quad (6)$$

де  $t_{KB}$  - температура котлової води, °С, рівна температурі насичення при тиску в барабані котла.

Коефіцієнт теплопередачі, кВт/(м<sup>2</sup> град), визначається за формулою

$$K = Q_{ЕК} / (\Delta t_{ЛH}), \quad (7)$$

де  $H$  - площа поверхні нагріву економайзера з боку продуктів згоряння, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{ЛH}$  - середньологарифмічний температурний напір, °С, який визначається за формулою

$$\Delta t_{Л} = \frac{(t'_{ЕК} - t''_{ЖБ}) - (t'_{ЕК} - t'_{ЖБ})}{2,3 \lg \left[ \frac{(t'_{ЕК} - t''_{ЖБ})}{(t''_{ЕК} - t'_{ЖБ})} \right]}, \quad (8)$$

де  $t'_{ЕК}$  та  $t''_{ЕК}$  - температура продуктів згорання перед економайзером і за ним, °С.

Розрахунковий коефіцієнт теплопередачі порівнюється з нормативним  $K_H$  який визначений за графіком (рис. 1) без врахування поправки на температуру в залежності від швидкості продуктів горіння

$$W_{ЕК} = V_{ПЗ} / (3600 F_{ЕК}), \quad (9)$$

де  $W_{ЕК}$  - швидкість продуктів згорання, м/с;  $F_{ЕК}$  - живий переріз для проходу продуктів згорання, м<sup>2</sup>;  $V_{ПЗ}$  - об'єм продуктів згорання при середньому значенні коефіцієнта витрати повітря  $\bar{\alpha}_{ЕК}$ , м<sup>3</sup>/с.

$$\bar{\alpha}_{ЕК} = (\alpha'_{ЕК} + \alpha''_{ЕК}) / 2; \quad (10)$$

$$V_{ПЗ} = B(1 + V_{ВТ} \bar{\alpha}_{ЕК}) \left[ (\bar{t}_{ЕК} + 293) / 273 \right], \quad (11)$$

де  $B$  - витрата палива, м<sup>3</sup>/с;  $V_{ВТ}$  - теоретична витрата повітря, яке необхідне для спалювання 1 м<sup>3</sup> газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

$K_H, \text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С})$

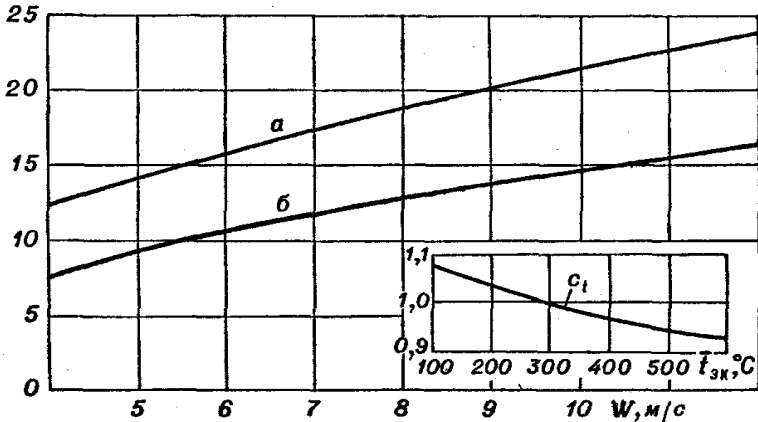


Рис. 3. Графіки для визначення коефіцієнта теплопередачі чавунних ребристих водяних економайзерів:

а — економайзер ВТИ; б — економайзер ЦККБ.

За графіком (рис. 3) знаходять поправку на температуру  $C_t$  до коефіцієнта теплопередачі в залежності від середньої температури продуктів згоряння, яка визначається за формулою

$$\bar{t}_{EK} = (t'_{EK} + t''_{EK})/2. \quad (12)$$

Нормативний коефіцієнт теплопередачі визначається за формулою

$$K_{НОРМ} = K_H C_t. \quad (13)$$

#### **4.2. Порядок виконання**

При випробуваннях економайзера визначають його теплопродуктивність, ККД, коефіцієнт теплопередачі від газу до води, а також продуктивність котла, параметри гарячої води, що виробляється котлом, витрату води (1), температуру живильної води до і після економайзера (2, 4), тиск живильної води до і після економайзера (3, 5), температуру продуктів згоряння перед економайзером і за ним (6, 7), склад продуктів згоряння перед економайзером і за ним (8, 9), розрідження перед економайзером і за ним (10, 11), витрату палива на котел (рис. 2).



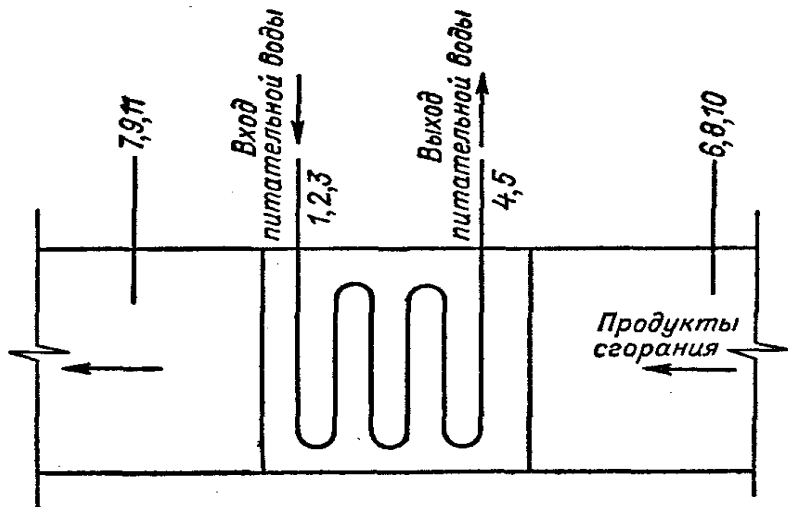


Рис. 4. Схема вимірів при теплотехнічних випробуваннях поверхневого економайзера. 1-11 - точки вимірів

### 4.3. Аналіз результатів іспитів

Результати вимірювань зводяться у таблицю 7.

Таблиця 7.

Результати теплотехнічних випробувань поверхневого економайзера типу \_\_\_\_\_  $N_{ек} =$  \_\_\_\_\_  $кгс/м^2$ ;  $F_{ек} =$  \_\_\_\_\_  $м^2$ , встановленого на котлі № \_\_\_\_\_ типу \_\_\_\_\_

№ з/п	Параметр, одиниця вимірювання	Режим	
		I	II
1	2	3	4
1.	Продуктивність котла $Q_k$ , МВт		
2.	Температура гарячої води з котла $t_{г.в.}$ , °С		
3.	Витрата води через економайзер $G_{жв.}$ , кг/с		
4.	Температура живильної води, °С до економайзера $t'_{жв}$ після економайзера $t''_{жв}$		

5.	Тиск живильної води, кгс/см <sup>2</sup> : до економайзера $p'_{ЖВ}$ після економайзера $p''_{ЖВ}$		
6.	Температура продуктів згоряння, °С до економайзера $t'_{ЕК}$ після економайзера $t''_{ЕК}$		
7.	Склад продуктів згоряння, %: перед економайзером CO <sub>2</sub> O <sub>2</sub> CO за економайзером CO <sub>2</sub> O <sub>2</sub> CO		
8.	Розрідження, кгс/м <sup>2</sup> : перед економайзером $S'_{ЕК}$ за економайзером $S''_{ЕК}$		

1	2	3	4
9.	Опір економайзера $\Delta S_{EK}$ , кгс/м <sup>2</sup>		
10.	Витрата палива на котел В, м <sup>3</sup> /с		
11.	Нижча теплота згоряння палива $Q_H$ , кДж/м <sup>3</sup>		
12.	Коефіцієнт надлишку повітря: перед економайзером $\alpha'_{EK}$ за економайзером $\alpha''_{EK}$		
13.	Присоси повітря в газохід економайзера $\Delta\alpha_{EK}$		
14. 15.	Втрати тепла з відхідними газами, % перед економайзером за економайзером		
16. 17.	Втрати тепла в оточуюче середовище, %: без економайзера $q'_5$ з економайзером $q_5$		
18. 19.	ККД брутто котла, %: без економайзера $\eta'_K$ з економайзером $\eta_K$		
20.	Приріст ККД котла за рахунок економайзера $\Delta\eta_{EK}$ , %		
21.	ККД економайзера $\eta_{EK}$ , %		
22.	Відносний об'єм продуктів згоряння, які проходять через економайзер		
23.	Економія палива з економайзером $\Delta B$ , %		
24.	Ентальпія котлової води (температура на- сичення котлової води) $t_H$ , °С		
25.	Середньологарифмічний температурний градієнт $\Delta t_L$ , °С		
26.	Розрахунковий коефіцієнт теплопередачі К, кВт/(м <sup>2</sup> ·град)		
27.	Швидкість продуктів згоряння в газоході економайзера $W_{EK}$ , м/с		

1	2	3	4
28.	Секундний об'єм продуктів згоряння в газоході економайзера $V_{ПЗ}$ , м <sup>3</sup> /с		
29.	Середній коефіцієнт надлишку повітря в газоході економайзера $\bar{\alpha}_{ЕК}$		
30.	Середня температура продуктів згоряння в газоході економайзера $\bar{t}_{ЕК}$ , °С		
31.	Нормативний коефіцієнт теплопередачі $K_H$ , кВт/(м <sup>2</sup> ·град), без поправки на $C_t$		
32.	Поправка на температуру $C_t$		
33.	Нормативний коефіцієнт теплопередачі $K_{НОРМ}$ , кВт/(м <sup>2</sup> ·град), з поправкою на $C_t$		
34.	Теплопродуктивність економайзера $Q_{ЕК}$ , МВт		

#### 4.4. Висновки і рекомендації

Отримані результати випробувань аналізують. При перевищенні допустимих присосів повітря вживають заходів по усуненню нещільностей. Якщо отриманий в дослідах опір економайзера перевищує допустимий, необхідно очистити зовнішню поверхню нагрівання. Крім того, необхідно прийняти міри по очищенню зовнішніх і внутрішніх поверхонь нагрівання економайзера у випадку заниженого коефіцієнта теплопередачі.

#### 4.5. Контрольні запитання

1. Яка мета роботи?
2. Які величини вимірюються під час дослідження роботи економайзера?

3. Як впливає робота економайзера на підвищення ККД котла?
4. Як визначається ККД економайзера?
5. Які є формули для розрахунку економайзера?

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Волощук В. А., Денісов А. К., Трофимчук І. П. Котельні установки промислових підприємств : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2013. 227 с.
2. Тепловой расчет промышленных парогенераторов : учеб. пособие для вузов / Под ред. В. И. Частухина. Киев : Выща школа. Головное изд-во, 1980. 184 с.
3. Трёмбовля В. И., Фингер Е. Д., Авдеева А. А. Теплотехнические испытания котельных установок. М., Энергия, 1977. 296 с.