

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи та виконання контрольної роботи
з освітньої компоненти «**Котельні установки**»

Розрахунок конвективних поверхонь котельних установок
для здобувачів вищої освіти спеціальності 144 «Теплоенергетика»
(освітня програма «Промислова і комунальна теплоенергетика»)
усіх форм навчання

Методичні вказівки до самостійної роботи та виконання контрольної роботи з освітньої компоненти «Котельні установки» «Розрахунок конвективних поверхонь котельних установок» для здобувачів вищої освіти спеціальності 144 «Теплоенергетика» (освітня програма «Промислова і комунальна теплоенергетика») усіх форм навчання./ Укл.:Трикашний М.В., Кузьменко А.А., Каюков Ю.М., Назаренко І.А., Запоріжжя: НУЗП, 2022. 93 с.

Укладачі:	Трикашний М.В., доц. канд.техн.наук; Кузьменко А.А., старш. викладач; Каюков Ю.М., доц. канд.техн.наук; Назаренко І.А., доц. канд.техн.наук.
Рецензент	Назаренко О.М., доц. канд.техн.наук.
Відповідальний за випуск	Яримбаш Д.С., професор докт.техн.наук.

Затверджено на засіданні
кафедри «Електричні машини»
Протокол №1 від 30.08. 2022

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного факультету
Протокол №5 від 22.12.2022

ЗМІСТ

ТЕПЛООБМІН В КОНВЕКТИВНИХ ПОВЕРХНЯХ.....	5
1 РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ В КОТЕЛЬНИХ ПУЧКАХ..	6
1.1 Послідовність розрахунку котельних пучків.....	6
2 Особливості конструкції і розрахунку теплообміну в котельних пучках котельних установок ДКВР	11
1.2.1 Примітки до розділу 1.....	12
1.3 Розрахунки теплообміну в котельному пучку котельної установки ДКВР-6,5-13 при спалюванні природного газу.....	13
1.3.1 Геометричні характеристики поверхні нагрівання.....	13
1.3.2 Розрахунки теплообміну в котельному пучку.....	15
2 РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ В ПАРОПЕРЕГРІВАЧАХ..	18
2.1 Геометричні характеристики поверхонь нагріву пароперегрівача.....	20
2.2 Розрахунок теплообміну в першій ступені пароперегрівача.....	23
2.3 Розрахунок теплообміну в другій ступені пароперегрівача.....	28
2.4 Конструкції і розрахунок теплообміну в пароперегрівачах з горизонтальним розташуванням петель змієвиковіків	33
2.5 Розрахунок теплообміну в пароперегрівачах котельних установок типу ДКВР.....	36
2.6 Примітки до розділу 2.....	43
2.7 Конструкція і теплообмін в пароперегрівачі котельної установки ДКВР-10-13-250.....	46
2.7.1 Опис конструкції і робота пароперегрівача.....	46
2.7.2 Конструктивні характеристики.....	47
2.7.3 Розрахунок теплообміну.....	48
3 ПРИЗНАЧЕННЯ І ПРИНЦИП КОМПОНОВКИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ КОТЛІВ.....	53
3.1 Конструкції водяних економайзерів.....	55
3.1.1 Економайзери котлів середніх параметрів.....	55
3.1.2 Економайзери з чавунних труб.....	56
3.2 Конструкції повітропідігрівачів.....	58
3.3 Теплообмін в економайзерах.....	58

3.4	Послідовність виконання розрахунків теплообміну в економайзері при одноступінчатій компоновці.....	59
3.5	Розрахунок теплообміну в економайзері при двоступінчатій компоновці низькотемпературних поверхонь нагріву.....	64
3.6	Розрахунок теплообміну в другій ступені водяного економайзера.....	69
3.7	Розрахунок теплообміну в сталевих блочних економайзерах.....	71
3.8	Розрахунок теплообміну в блочних економайзерах з чавунних ребристих труб.....	75
3.9	Розрахунок теплообміну в поверхнях нагріву повітропідігрівачів.....	77
3.10	Примітки до розділу 3.....	88
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	92

ТЕПЛООБМІН В КОНВЕКТИВНИХ ПОВЕРХНЯХ

Поверхні нагрівання котельних установок, омивані продуктами згоряння палива після виходу їх з топки, сприймають тепло конвекцією при безпосередньому контакті з потоком минаючих газів. Вони мають форму трубчастих пучків різного конструктивного виконання і називаються конвективними поверхнями. До них відносять котельні пучки, пароперегрівачі, водяні економайзери та повітропідігрівачі.

Частина тепла, реалізованого в конвективних поверхнях нагрівання, передається також за рахунок випромінювання газів з міжтрубного простору та об'ємів, що розділяють окремі поверхні. Частка тепла, переданого випромінюванням, зменшується по мірі зниження температури продуктів згоряння і при температурі нижче 200 °C стає настільки малою, що її можна не враховувати.

Розрахунки теплообміну в конвективних поверхнях нагрівання здійснюють конструкторським або перевірочним методами. Перший може бути застосовано, коли задана (або прийнята) кількість тепла, яку необхідно передати в поверхні, що розраховується. У другому випадку по наявній величині поверхні нагрівання, її геометричним характеристикам і умовам теплопередачі підраховують кількість тепла, яка може бути сприйнята поверхнею. У практичній діяльності спеціаліста-теплоенергетика використання перевірочного методу розрахунку більш імовірно, та викладені далі рекомендації надані стосовно до цього методу.

Описи поверхонь нагріву та їх розрахунки проілюстровані рисунками в Альбомі креслень конструкцій поверхонь нагріву котельних установок промислових підприємств [8]. В тексті цих методичних вказівок посилання на відповідні ескізи поверхонь записані, як рисунок з номером розділу Альбому та номером ескізу, наприклад (рисунок 3.1).

1 РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ В КОТЕЛЬНИХ ПУЧКАХ

В котельних установках промислових підприємств зустрічаються два види котельних пучків - фестони та котельні пучки як такі.

Фестони – котельні пучки, утворені розведенням верхньої частини труб задніх екранів у три – чотири ряди, що утворюють газохід для виходу продуктів згоряння з топки.

Котельні пучки – поверхні нагрівання, що виконані із гнутих труб, кінці яких розвальцьовані у двох барабанах. Їх звичайно розміщують перед пароперегрівачами за фестонами, але можуть розміщати і після них.

В промислових котельних установках виконують котельні пучки п'яти видів (рис.(1.1...1.6)). Два останні пучки подібні по пристрою, але мають різний характер омивання газами.

Котельні пучки (фестони), показані на рисунках 1.1 і 1.2 з косими коридорами між трубами, розраховують як шахові трубчасті пучки. Розрахунок теплообміну в поверхні нагрівання фестона і котельного пучка ідентичний.

1.1 Послідовність розрахунку котельних пучків

1.1.1 Коротко описати конструкцію поверхні, що розраховується. Указати, чи є ця поверхня самостійним контуром циркуляції або утворена трубами екрану.

При складному омиванні поверхні, що розраховується, візуально відзначити, яка схема взаємної течії середовищ прийнята при розрахунку (поперечне, косе або поздовжнє омивання). Якщо частина поверхні має коридорне розташування труб, а інша – шахове, указати, яка кількість рядів віднесена до кожної з них.

1.1.2 Привести конструктивні характеристики поверхні, що розраховується, у такій послідовності:

а) зовнішній діаметр труб, мм
 $d =$

б) кількість рядів труб ,шт.

$$Z =$$

в) число труб у кожному ряду, шт.

$$n_1 = \quad n_2 = \quad \text{і т.п.}$$

г) довжина труб в кожному ряду, м

$$l_1 = \quad l_2 = \quad \text{і т.п.}$$

д) крок труб поперечний, м $/^{1.1}$

$$S_1 =$$

[1, с.74, табл. П-13; 2, с.115, текст; 3, с.121, текст];

е) крок труб поздовжній, м

$$S_2 =$$

[1, с.74, табл. П-13; 2, с.115, текст; 3, с.121, текст];

ж) відносний поперечний крок

$$S_1/d =$$

з) відносний поздовжній крок

$$S_2/d =$$

1.1.3 Підрахувати поверхню нагрівання пучка, м²

$$H_{\text{к.п.}} =$$

[1, с.35, п.7-01, с.59, п.8-36; 2, с.116, текст; 3, с.122, формули (20) ... (30)].

1.1.4 Визначити живий перетин газоходу, м²

$$F_{\text{к.п.}} =$$

[1, с.38, п.7-17; 2, с.95, текст; 3, с.81, текст; 4, с.46, текст].

Тут і далі зазначені виноски, пояснення яких наведено в «Примітках до розділу».

1.1.5 Знайти ефективну товщину випромінюючого газового шару, м

$$S_{\text{к.п.}} =$$

[1, с.43, п.7-35; 2, с.110, текст; 3, с.99, текст; 4, с.48, текст]

1.1.6 Визначити температуру газів на вході в пучок, °C $/^{1.2}$

$$g'_{\text{к.п.}} =$$

1.1.7 Знайти ентальпію продуктів згоряння при цій температурі, МДж/кг (МДж/м³ при спалюванні газового палива)

$$I'_{\text{к.п.}} =$$

1.1.8 Прийняти температуру продуктів згоряння на виході з поверхні нагрівання, °C

$$g''_{\text{к.п.}} =$$

[2, с.115, текст; 3, с.122, текст; 4, с.53, текст].

1.1.9 Знайти ентальпію продуктів згоряння, відповідну до цієї температури, МДж/кг (МДж/м³)

$$I''_{\text{к.п.}} =$$

[6, таблиця 1.2].

1.1.10 Підрахувати коефіцієнт збереження тепла

$$\varphi =$$

[1, с.21, п.5-10; 2, с.53, текст; 3, с.120, текст; 4, с.18, (3-13)].

1.1.11 Підрахувати теплосприйняття пучка по різниці ентальпій продуктів згоряння (по балансу), МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{\text{к.п. б.}} =$$

[1, с.35, п.7-02; 2, с.90, текст; 3, с.122, текст; 4, с.38, текст].

1.1.12 Підрахувати середню температуру продуктів згоряння в поверхні, що розраховується, °C

$$g_{\text{к.п.}} =$$

1.1.13 Вказати температуру кипіння води при тиску в барабані, °C

$$t_{\text{кип}} =$$

[5, таблиця I-II].

1.1.14 Підрахувати середній температурний напір, °C

$$\Delta t_{\text{к.п.}} =$$

[1, с.49, пп.7-60, 7-62; 2, с.111, текст; 3, с.107, текст; 4, с.49, текст].

1.1.15 Виписати об'єм продуктів згоряння при надлишку повітря, прийнятому в пучку, м³/кг (м³/м³)

$$V_{\text{г}} =$$

[6, таблиця 1.1].

1.1.16 Підрахувати середню швидкість продуктів згоряння, м/с
 $W_r =$

[1, с.38, п.7-16; 2, с.95, текст; 3, с.81, текст; 4, с.44-45, текст].

1.1.17 Знайти коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·К)

$$\alpha_k =$$

[1, с.39, пп.7-20, 7-21, 7-22, 7-23, 7-24; 2, с.98-99, текст; 3, с.82-84, текст; 4, с.42-43, текст].

1.1.18 Виписати об'ємну частку водяних парів і сумарну частку водяних парів і трьохатомних газів у продуктах згоряння в поверхні нагрівання, що розраховується

$$r_{H_2O} =$$

$$r_{п} =$$

[6, таблиця 1.1].

1.1.19 Виписати концентрацію золи в продуктах згоряння, г/м³

$$\mu_{зл} =$$

[6, таблиця 1.1].

1.1.20 Указати тиск газів в поверхні, що розраховується, МПа

$$p =$$

[1, с.43, п.7-32; 2, с.109, текст; 3, с.99, текст; 4, с.48, текст].

1.1.21 Підрахувати парціальний тиск трьохатомних газів і водяних парів, МПа

$$p = r_{п} p =$$

1.1.22 Визначити товщину випромінюючого газового об'єму в міжтрубному просторі, м

$$S =$$

[1, с.43, п.7-35; 2, с.110, текст; 3, с.99, текст; 4, с.48, текст].

1.1.23 Підрахувати оптичну щільність (оптичну товщину) газового потоку /^{1.3}

$$\tau_r =$$

[1, с.24, п.6-07, с.25, пп.6-08, 6-09; 2, с.56, текст; 3, с.97, текст; 4, с.31, текст].

1.1.24 Підрахувати оптичну щільність золових часток у газі /^{1.4}

$$\tau_{зл} =$$

[1, с.25, п.6-08; 2, с.57, текст; 3, с.97, текст; 4, с.31, текст].

1.1.25 Підрахувати міру чорноти газового потоку

$$a =$$

[1, с.43, п.7-32; 2, с.109, текст; 3, с.97, текст; 4, с.48, текст].

1.1.26 Визначити температуру на зовнішній поверхні золоних відкладень, °C

$$t_3 =$$

[1, с.44, п.7-36; 2, с.97, текст; 3, с.100, текст; 4, с.48, текст].

1.1.27 Визначити коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·K)

$$\alpha_{\text{л}} =$$

[1, с.43, п.7-32; 2, с.109, текст; 3, с.97, текст; 4, с.49, текст].

1.1.28 Прийняти коефіцієнт використання поверхні нагрівання

$$\zeta =$$

[1, с.37, п.7-07; 2, с.92, текст; 3, с.80, текст; 4, с.41, текст].

1.1.29 Підрахувати коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки, Вт/(м²·K)

$$\alpha_1 =$$

[1, с.37, п.7-07; 2, с.92, текст; 3, с.80, текст; 4, с.41, текст].

1.1.30 Прийняти вихідний коефіцієнт забруднення, Вт/(м²·K)

$$\varepsilon_0 =$$

[1, с.49, п.7-58; 2, с.94, рис.8-3; 3, с.104, рис.9-14; 4, с.40, рис.6-1].

1.1.31 Знайти поправки до вихідного коефіцієнта забруднення

$$C_d =$$

$$C_{\text{фр}} =$$

[1, с.49, рис.7-11; 2, с.94, рис.8-4; 3, с.104, рис.9-14; 4, с.40, рис.6-1].

1.1.32 Прийняти поправку до коефіцієнта забруднення, Вт/(м²·K)

$$\Delta \varepsilon =$$

[1, с.47, п.7-52; 2, с.94, текст; 3, с.103, текст; 4, с.40, текст].

1.1.33 Підрахувати коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·K)

$$k =$$

[1, с.37, пп.7-10, 7-11; 2, с.91, текст; 3, с.79, текст; 4, с.39, текст].

1.1.34 Підрахувати теплосприйняття поверхні нагрівання, що розраховується, за умовами теплопередачі, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{\text{к.п. т}} =$$

[1, с.35, п.7-01; 2, с.89, текст; 3, с.78, текст; 4, с.38, текст].

1.1.35 Визначити розбіжність між значеннями теплосприйняття, підрахованими по балансу і по теплопередачі, %

$$\Delta q =$$

Дати висновок про вірогідність виконаних розрахунків.

Наведена послідовність викладу застосована до розрахунків теплообміну в поверхнях нагрівання пучків із шаховим

розташуванням труб і при спалюванні твердого палива (визначення коефіцієнта теплопередачі через коефіцієнт забруднення).

У поверхнях нагрівання з коридорним розташуванням труб при спалюванні всіх видів палива (твердого, рідкого та газоподібного) і в поверхнях із шаховим розташуванням труб при спалюванні рідкого і газового палива коефіцієнт теплопередачі підраховують за коефіцієнтом теплової ефективності. Тому опис розрахунків трохи змінюється.

Після підрахунку коефіцієнта тепловіддачі від газів до стінки (α_1 , п.1.1.29) приймають коефіцієнт теплової ефективності

$$\psi =$$

[1, с.47, пп.7-53, 7-54, 7-55; 2, с.94, текст; 3, с.105, текст; 4, с.39, текст].

Підраховують коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К)

$$k =$$

[1, с.37, п.7-10; 2, с.91, текст; 3, с.79, текст; 4, с.39, текст].

Підрахунки по пп.(1.1.30...1.1.32) (визначення ε_0 , C_d , $C_{фр}$, $\Delta\varepsilon$) опускаються.

1.2 Особливості конструкції і розрахунку теплообміну в котельних пучках котельних установок ДКВР

Котельний пучок котельних установок продуктивністю від 1,11 кг/с до 2,78 кг/с (ДКВР-4; ДКВР-6,5; ДКВР-10) виконаний із гнутих труб, кінці яких розвальцьовані у двох барабанах із внутрішнім діаметром 1000 мм. Він розміщений за камерою догорання та відділений від неї перегородкою із шамотної цегли. Всередині пучка встановлена металева перегородка, що перекриває більшу частину поперечного перетину. В результаті в поверхні нагрівання встановлюється складний рух продуктів згорання від місця входу до виходу.

Збоку пучка (у поздовжніх стін котельної установки) є коридори шириною 315 мм. Це дає підставу прийняти, що продукти згорання в першій частині пучка рухаються в напрямку, перпендикулярному до осі котельної установки, потім уздовж правої стіни по вільному від труб коридору, після чого перетинають другу частину пучка (за чавунною перегородкою) також у перпендикулярному напрямку і до

виходу з котельної установки рухаються по коридору уздовж лівої стіни. Інакше кажучи, можна прийняти, що в поверхні нагрівання котельного пучка котельних установок ДКВР продукти згоряння роблять два ходи в площинах, перпендикулярних до вісей барабанів, як показано на рисунках (1.6...1.8).

Висота газоходу (а отже і його перетин) по ходу газів не однакова. Ліворуч і праворуч від барабанів вона близька до 2750 мм, а в просторі між барабанами становить 1750 мм. У розрахунках слід визначити середнє значення висоти газоходу в окремих перетинах, а потім усереднити його по площах поверхонь, розміщених у цих перетинах, використовуючи формулу

$$F_{\text{ср}} = \frac{H_1 + H_2 + \dots}{\frac{H_1}{F_1} + \frac{H_2}{F_2} + \dots}$$

При підрахунку площ поверхонь нагрівання ділянок площі поверхонь труб, розміщених у стін газоходу (у тому числі і у перегородок), слід підраховувати по півпериметру, тобто враховувати лише ту частину поверхні нагрівання, яка омивається потоком газів.

Котельні установки ДКВР виготовляються для виробництва як насиченої, так і перегрітої пари. В останньому випадку поверхня нагрівання пароперегрівача розміщується на вході газів у котельний пучок, в об'ємі, утвореному вилученням частини труб пучка. Частина пучка, що залишається, працює паралельно з пароперегрівачем і теплообмін в ній визначається разом з розрахунками теплообміну в пароперегрівачі. Отже, в котельних установках ДКВР із пароперегрівачами поверхню нагрівання котельного пучка слід визначати з першого ряду за пароперегрівачем.

Приклад розрахунку теплообміну в котельному пучку котельної установки ДКВР-6,5-13 наведений в підрозділі 1.3.

1.2.1 Примітки до розділу 1

1.2.1.1 Поперечний крок фестона визначають кроком труб заднього екрана і прийнятим числом рядів труб у фестоні. Для трирядного фестона $S_{1\phi} = 3S_{3.e.}$; для чотирирядного $S_{1\phi} = 4S_{3.e.}$

В котельних установках К-50-40; К-50-40/14 і інших аналогічних конструкціях труби заднього екрана трійниками об'єднані

попарно, а потім розведені в чотирирядний фестон. Поперечний крок такого фестона $S_{1ф}=(2 \times 4) S_{з.с.}$.

Поздовжній крок фестонів, утворених із труб діаметром $\varnothing 60 \times 3$, звичайно приймають $S_2=250$ мм, але можуть бути і меншими (ГМ-50/14; $S_{2ф}=120$ мм).

Поперечний і поздовжній кроки труб котельних пучків по рекомендаціях, зазначених у тексті джерел, приймаються при конструктивному розрахунку. При перевірочних розрахунках S_1 і S_2 приймаються по кресленнях заводу-виробника.

1.2.1.2 При розрахунках фестона температура і ентальпія продуктів згоряння на вході в пучок дорівнюють температурі і ентальпії на виході з топки. Для котельних установок типів К-50-40/14; Е-25-14ГМ; ДКВР ними будуть температура і ентальпія після виходу з пароперегрівача.

1.2.1.3 Оптичну щільність газового потоку підраховують як добуток $\tau_r = k_r p S = k_r r_p p S = k_r p_n S$, де k_r - коефіцієнт ослаблення променів газовим середовищем, $1/(м \cdot МПа)$, підрахований по формулі

$$k_r = \left(\frac{7,8 + 16 r_{H_2O}}{3,16 \sqrt{p_n S}} - 1 \right) (1 - 0,37 \cdot T_{к.п.} \cdot 10^{-3}),$$

у якій $T_{к.п.} = \vartheta_{к.п.} + 273$ – середня температура продуктів згоряння в градусах абсолютної шкали.

1.2.1.4 Оптична щільність золових часток у потоці продуктів згоряння підраховується по формулі $\tau_{зл} = k_{зл} \mu_{зл} p S$, у якій, $1/(м \cdot МПа)$

$$k_{зл} = \frac{44}{\sqrt[3]{T_{к.п.}^2 d_{зл}^2}}.$$

Діаметр золових часток $d_{зл}$, мкм, приймається залежно від прийнятої системи пилоприготування [1, с.25, п.6-08; 4, с.31, табл.5-4].

При спалюванні газу і мазуту значення $\tau_{зл}$ не підраховується і записи по пп.1.1.19 і 1.1.24 у розрахункову записку не вносять.

1.3 Розрахунки теплообміну в котельному пучку котельної установки ДКВР-6,5-13 при спалюванні природного газу

1.3.1 Геометричні характеристики поверхні нагрівання

Котельний пучок котельної установки, що розраховується, являє собою поверхню нагрівання, утворену гнутими трубами, кінці яких розвальцьовані у верхньому і нижньому барабанах. Поверхня має складне омивання газами. Однак наявність вільних просторів з боків

пучка дозволяє прийняти омивання, що здійснюється у два поперечні ходи.

Уздовж ходу газу висота газоходу змінна. В розрахунку визначені середні розміри висот по ділянках і прийнято, що труби, що розміщені у стін і перегородок, у конвективному теплообміні беруть участь лише половиною периметра поперечного перетину.

Ширина газоходу в межах вісей крайніх труб ряду, мм:

- першого ходу газів $a_1=1330$;

- другого ходу газів $a_2=800$.

Число труб у ряді, шт.:

- першого ходу $n_1=14$;

- другого ходу $n_2=9$.

Число рядів труб (включно пристінні), шт.:

- першого ходу $z_1=16$;

- другого ходу $z_2=22$.

Діаметр труб зовнішній $d=51$ мм.

Крок труб поперечний у першому і другому ході газів $S_1=100$ мм.

Відносний поперечний крок $S_1/d=100/51=2$.

Поздовжній крок $S_2=110$ мм.

Відносний поздовжній крок $S_2/d=110/51=2,2$.

Довжина труб по рядах (див. рис.1.6), мм:

$l_1=1777$; $l_5=2096$; $l_9=2963$;

$l_2=1809$; $l_6=2260$; $l_{10}=3256$;

$l_3=1874$; $l_7=2457$; $l_{11}=3872$.

$l_4=1969$; $l_8=2696$;

Поверхня нагрівання частини пучка в границях крайніх утворюючих барабанів, m^2 :

- по першому ходу

$$H_1' = 2 \cdot (n_1 - 1) (2 \sum l_{1-5}) \pi d = 2(14-1)(1777+1809+1874+1969+2096) \cdot 3,14 \cdot 51 \cdot 10^{-6} = 39,66;$$

- праворуч від крайніх утворюючих барабанів

$$H_1'' = (n_1 - 1) (\sum l_{6-10} + 0,5 l_{11}) \pi d = (14-1)(2260+2457+2696+2963+3256+0,5 \cdot 3872) \cdot 3,14 \cdot 51 \cdot 10^{-6} = 32,41.$$

Поверхня нагрівання в границях крайніх утворюючих, m^2 :

- по другому ходу газів

$$H_2' = [H_1'' / (n_1 - 1)] (n_2 - 1) = [39,66 / (14-1)] (9-1) = 24,41;$$

- праворуч і ліворуч від крайніх утворюючих барабанів у другому ході

$$H_2'' = 2[H_1''/(n_1-1)](n_2-1) = 2[32,4/(14-1)](9-1) = 39,9.$$

Сумарна поверхня нагрівання котельного пучка, м²

$$H_{к.п.} = H_1' + H_1'' + H_2' + H_2'' = 39,66 + 32,41 + 24,41 + 39,9 = 136,38.$$

Середня висота газоходу в об'ємі між барабанами, мм

$$h_1' = h_2' = 1770.$$

Середня висота газоходу праворуч і ліворуч від барабанів, мм

$$h_1'' = h_2'' = 2330.$$

Живий перетин газоходу, м²:

- у першому ході в об'ємі меншої висоти

$$F_1' = a_1 h_1' - (n_1 - 1) d h_1' = [1330 \cdot 1770 - (14 - 1) \cdot 51 \cdot 1770] \cdot 10^{-6} = 1,18;$$

- праворуч від барабанів

$$F_1'' = (F_1' / h_1') \cdot h_1'' = (1,18 / 1770) \cdot 2330 = 1,55;$$

- у другому ході в об'ємі меншої висоти

$$F_2' = [F_1' / (n_1 - 1)](n_2 - 1) = [1,18 / (14 - 1)](9 - 1) = 0,73;$$

- праворуч і ліворуч від барабанів

$$F_2'' = [F_1'' / (n_1 - 1)](n_2 - 1) = [1,55 / (14 - 1)](9 - 1) = 0,95.$$

Усереднений живий перетин газоходу, м²

$$F_{к.п.} = \frac{H_{к.п.}}{136,38} = \frac{136,38}{\frac{H_1'}{F_1'} + \frac{H_1''}{F_1''} + \frac{H_2'}{F_2'} + \frac{H_2''}{F_2''}} = \frac{39,66}{1,18} + \frac{32,41}{1,55} + \frac{24,41}{0,73} + \frac{39,9}{0,95} = 1,05.$$

1.3.2 Розрахунки теплообміну в котельному пучку

Температура продуктів згоряння на вході в газохід котельного пучка, °С

$$g'_{к.п.} = g''_T = 961.$$

Ентальпія продуктів згоряння при цій температурі, МДж/м³

$$I'_{к.п.} = I''_T = 22,6.$$

Температура продуктів згоряння на виході з котельного пучка приймається, °С

$$g''_{к.п.} = 260.$$

Ентальпія газів при цій температурі, МДж/м³

$$I''_{к.п.} = 3,77.$$

Коефіцієнт збереження тепла

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{\eta_{к.у.} + q_5} = 1 - \frac{1,4}{94,2 + 1,4} = 0,986.$$

Присос повітря в газоході $\Delta\alpha_{к.п.} = 0,10$.

Температура повітря присосів $t_{прис} = t_{х.в} = 30^\circ\text{C}$.

Ентальпія теоретичного об'єму холодного повітря, МДж/м³
 $I_{х.в}^0 = 0,392$.

Кількість тепла, переданого в котельному пучку по балансу, МДж/м³

$$Q_{к.п. б.} = \varphi(I'_{к.п.} - I''_{к.п.} + \Delta\alpha_{к.п.} I^0_{х.в.}) = 0,986(22,6 - 3,77 + 0,10 \cdot 0,392) = 18,61.$$

Середня температура продуктів згоряння, $^\circ\text{C}$

$$\vartheta_{к.п.} = 0,5(\vartheta'_{к.п.} + \vartheta''_{к.п.}) = 0,5(961 + 260) = 611.$$

Температура насичення при тиску в барабані $t_{нас} = 197^\circ\text{C}$.

Температурний напір у поверхні нагрівання, $^\circ\text{C}$

$$\Delta t_{к.п.} = \vartheta_{к.п.} - t_{нас} = 611 - 197 = 414.$$

Об'єм газів, що приходить на одиницю об'єму палива при надлишку повітря $\alpha''_{к.п.} = 1,23$; $V_f = 12,809 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Витрата палива $B_p = 0,149 \text{ м}^3/\text{с}$.

Середня швидкість газів у поверхні нагрівання, що розраховується, м/с

$$w_{з.к.п.} = \frac{B_p V_z}{F_{к.п.}} \cdot \frac{\vartheta_{к.п.} + 273}{273} = \frac{0,149 \cdot 12,809(611 + 273)}{1,05 \cdot 273} = 5,89.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від газу до стінки, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{к.к.п.} = \alpha_n c_z c_{\phi} c_s = 45,3 \cdot 1 \cdot 1,02 \cdot 1 = 46,2.$$

Об'ємна частка водяної пари у продуктах згоряння $r_{H_2O} = 0,182$. Об'ємна частка водяної пари і трьохатомних газів $r_n = 0,210$.

Товщина випромінюючого газового шару в міжтрубному просторі пучка, м

$$S_{к.п.} = 0,9 \cdot d \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{S_1 \cdot S_2}{d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 51 \left(\frac{4}{3,14} \cdot \frac{100 \cdot 110}{2601} - 1 \right) \cdot 10^{-3} = 0,201.$$

Тиск у газоході $p = 0,1 \text{ МПа}$.

Парціальний тиск трьохатомних газів і водяної пари, МПа

$$p_n = r_n p = 0,021.$$

Оптична щільність потоку газів у пучку

$$\tau_{з.к.п.} = \left(\frac{7,8 + 16 r_{H_2O}}{3,16 \sqrt{p_n s}} - 1 \right) (1 - 0,37 \cdot T_{к.п.} \cdot 10^{-3}) p_n s =$$

$$= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,182}{3,16\sqrt{0,021 \cdot 0,201}} - 1 \right) (1 - 0,37 \cdot 884 \cdot 10^{-3}) 0,021 \cdot 0,201 = 0,145.$$

Міра чорноти газового потоку

$$a_{\varepsilon, K, n} = 1 - e^{-\tau_{\varepsilon, K, n}} = 1 - e^{-0,145} = 0,135.$$

Температура забруднень на трубах $t_3 = t_{nac} + 60 = 257^\circ \text{C}$.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$

$$\alpha_{\text{л.к.п.}} = \alpha_{\text{н ас.г.}} = 91 \cdot 0,135 \cdot 0,99 = 12,2.$$

Коефіцієнт теплової ефективності [1] $\Psi = 0,85$.

Коефіцієнт теплопередачі в котельному пучку, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$

$$k_{\text{к.п.}} = \Psi(\alpha_{\text{к.к.п.}} + \alpha_{\text{л.к.п.}}) = 0,85(46,2 + 12,2) = 49,64.$$

Кількість тепла, переданого в пучку теплопередачею, $\text{МДж}/\text{м}^3$

$$Q_{\text{к.п. т.}} = (k_{\text{к.п.}} \Delta t_{\text{к.п.}} H_{\text{к.п.}}) / B_p = (49,64 \cdot 414 \cdot 136,38) / 0,149 \cdot 10^{-6} = 18,81.$$

Розбіжність результатів визначень тепла, %

$$\Delta q = \frac{Q_{\text{к.п.т.}} - Q_{\text{к.п.б.}}}{Q_{\text{к.п.б.}}} \cdot 100 = \frac{18,81 - 18,61}{18,61} \cdot 100 = 1,1.$$

Тепло, підраховане по прийнятій різниці ентальпій і за умовами теплопередачі, мало різнитися і уточнення розрахунків не потрібно.

2 РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ В ПАРОПЕРЕГРІВАЧАХ

Розрахунок теплообміну в пароперегрівачах здійснюють зазвичай перевірочним методом. У тому випадку, коли створюється нова конструкція поверхні нагріву, її геометричні характеристики конструктор уточнює розрахунком. При перевірочному розрахунку готової конструкції всі необхідні розміри приймають по кресленнях заводу - виробника.

В котельних установках промислових підприємств застосовуються декілька типів пароперегрівачів, що відрізняються схемою взаємної течії середовищ і конструктивним виконанням. Для перегріву пари до 250 °С застосовуються пароперегрівачі, що складаються з паралельно включених змійовиків з вертикальним розташуванням петель, які працюють за протитоковою схемою (котельні установки Б-25/15 ГМ; Е-25-14 ГМ; К-50-40/14) або за схемою з перехресним током (ДКВР-4-13-250; ДКВР-6,5-13-250; ДКВР-10-13-250). Вони, як правило, не мають регуляторів, що забезпечують стабільність температури перегріву при зміні навантаження котельної установки. Конструкція і теплообмін в пароперегрівачі котельної установки ДКВР-10-13-250 приведені в підрозділі 2.6.

В котельних установках з перегрівом пари до (350...370) °С пароперегрівачі виконуються з вертикальних змійовиків, включених за схемою протитоку, з регуляторами перегріву поверхневого типу, що встановлюються у вхідному колекторі пароперегрівача (котельні установки Б-25/15 ГМ; Е-25/24ГМ). Котельні установки типу ДКВР (ДКВР-6,5-23-370; ДКВР-10-23-370) регуляторів перегріву не мають.

В котельних установках з перегрівом пари до 440 °С поверхні нагріву пароперегрівачів komponуються по схемі послідовно-змішаного (котельні установки БКЗ-75-39ГМА; БМ-35М) або паралельно-змішаного току (котельні установки ГМ-50-1; К-50-40-1; К-35-40). В котельних установках БКЗ-75-39ФБ; Е-75-40К застосовані складніші схеми взаємної течії середовищ. Вони працюють з регуляторами перегріву поверхневого типу, що встановлюються на стороні насиченої пари або в проміжку між ступенями (в розсічці).

У більшості конструкцій котельних установок змійовики пароперегрівачів мають вертикальне розташування петель. В котельних установках К-35-40; ГМ-50-1; К-50-40-1 вони мають горизонтальне розташування, що забезпечує дренаж конденсату пари із змійовиків після зупинки котельної установки на ремонт або в холодний резерв.

Поверхні нагріву пароперегрівачів виготовляються з труб діаметром від 28 мм до 42 мм з коридорним розташуванням. При спалюванні твердих палив чотири перші ряди роблять розрідженими з шаховим розташуванням труб. Діаметр труб і число змійовиків вибирають з урахуванням того, що швидкість пари в пароперегрівачі знаходиться в межах (20...25) м/с, а просвіт між сусідніми змійовиками - не менше 50 мм [2]. Типові конструкції пароперегрівачів дійсних котельних установок промислового призначення показані на рисунках (2.1...2.14).

В котельних установках з перегрівом пари до 440 °С поверхні нагріву пароперегрівачів при вертикальному розташуванні змійовиків виконують з двох окремих пакетів, часто названих ступенями, включених послідовно по ходу пари. В котельних установках БГ-20 ці пакети доповнені радіаційною частиною, розміщеною на похилій стелі топки.

Розрахунок теплообміну в пароперегрівачах включає підрахунок деяких величин, обумовлених конструкцією, і визначення тепла, що реалізується на поверхні, по різниці ентальпій і за умовами теплопередачі. На початку розрахунку дається опис схеми компоновки і конструкції пароперегрівача. В ньому вказуються: характер теплообміну в поверхні (чисто радіаційний, напіврадіаційний, конвективний з радіаційною частиною, конвективний з долею тепла, що випромінюється з топки через фєстон, чисто конвективний); тип регулятора перегріву; місце його установки по ходу пари (на стороні насиченої пари або в розсічці між ступенями); конструктивний тип змійовиків і їх розташування в просторі (одинарні, подвійні, з паралельними прямими ділянками або ущільнені по глибині газоходу, з горизонтальним розташуванням змійовиків); обумовлюється методика розрахунку, що приймається (вказується, чи ведеться розрахунок всього пароперегрівача в цілому, або по окремих ступенях).

Нижче приведений виклад послідовності розрахунків стосовно до пароперегрівача котельних установок БКЗ-75-39 ФБ; (ГМ-75-40; Е-75-40К), показаного на рисунках 2.1, 2.2.

Пароперегрівач складається з двох ступеней, змонтованих з подвійних змійовиків. Взаємна течія середовищ в ступенях здійснюється за схемою паралельно-змішаного току. Перша по ходу пари ступень розміщена за фестоном. Щоб уникнути шлакування, перші чотири ряди ступені розріджені.

Регулятор перегріву пари поверхневого типу встановлений після першої ступені в розсічку. Розрахунок теплообміну в таких пароперегрівачах виконується окремо для кожної ступені. Опис геометричних характеристик поверхні нагріву ступеней розміщують в окремих підрозділах.

2.1 Геометричні характеристики поверхонь нагріву пароперегрівача

Вихідним для підрахунку геометричних характеристик є ескіз газоподу пароперегрівача з необхідною кількістю розмірів. Останні приймають по кресленнях заводу - виробника котельної установки. Найважливіші характеристики записують в тексті розрахункової записки в такій послідовності.

2.1.1 Приймають зовнішній діаметр труб і товщину стінки, мм:

- в першій ступені $d_{I \times S} =$

- в другій ступені $d_{II \times S} =$

[1, с. 74, п. 5; 2, с. 118; 3, с. 125].

2.1.2 Приймають поперечний крок в основній частині поверхні,

м:

- в першій ступені $S_{I \perp} =$

- в другій ступені $S_{II \perp} =$

[1, с. 74, табл. II-13; 2, с. 118; 3, с. 125].

2.1.3 Підраховують поперечний крок в розрідженій частині першої ступені, м

$$S_{I \perp} =$$

2.1.4 Вказують (або підраховують) число змійовиків, в тому числі непарних і парних, шт. ^{/2.1}

$$Z =$$

$$Z_{\text{неп}} =$$

$$z_{\text{пар}} =$$

(По кресленнях заводу-виробника).

2.1.5 Приймають радіуси вигину труб, м: ^{/2.2}

- зовнішнього змійовика $R =$

- внутрішнього змійовика $r =$

2.1.6 Приймають число петель, встановлюють глибину (відстань від вісі труби першого ряду до вісі труби останнього ряду) ступені, м:

- першої ступені $\ell_{\text{Іст}} =$

- другої ступені $\ell_{\text{ІІст}} =$

2.1.7 Визначають розрахунковий крок по ходу газів (по глибині), м: ^{/2.3}

- першої ступені $S_{2\text{I}} =$

- другої ступені $S_{2\text{II}} =$

2.1.8 Знаходять глибину газового об'єму, м:

- перед першою ступенню $\ell_{\text{обI}} =$

- перед другою ступенню $\ell_{\text{обII}} =$

2.1.9 Підраховують довжину змійовика в межах розрідженої частини (з шаховим розташуванням труб), м:

- непарного $\ell_{\text{Інеп}} =$

- парного $\ell_{\text{Іпар}} =$

2.1.10. Підраховують довжину змійовика у межах коридорного розташування труб, м:

- першої ступені $\ell_{\text{I}} =$

- другої ступені $\ell_{\text{II}} =$

2.1.11 Підраховують площу поверхні частини ступені з шаховим розташуванням труб, м^2

$$H_{\text{шах}} = \pi d (\ell_{\text{Інеп}} z_{\text{неп}} + \ell_{\text{Іпар}} z_{\text{пар}})$$

2.1.12 Підраховують площу поверхні ступені з коридорним розташуванням труб, м^2 :

- першої ступені

$$H_{\text{Ікор}} = \pi d \ell_{\text{I}} z =$$

- другої ступені

$$H_{\text{ІІкор}} = \pi d \ell_{\text{II}} z =$$

2.1.13 Вказують довжину стельових труб, м, що відносяться до:

- першої ступені $\ell_{\text{Істел}} =$

- другої ступені $\ell_{\text{Істел}} =$

2.1.14. Підраховують відносний крок стельових труб $^{2.4}$
 $S_{\text{стел}}/d =$

2.1.15. Визначають кутовий коефіцієнт стельових труб
 $\chi_{\text{стел}} =$

[1, с. 23, п. 6-04].

2.1.16 Підраховують площу стелі, закриту стельовими трубами, м^2 , включеними послідовно:

з першою ступеню $F_{\text{Істел}} =$

з другою ступеню $F_{\text{ІІстел}} =$

2.1.17 Визначають розрахункову площу поверхні стельових труб, м^2 , включених $^{2.5}$:

з першою ступеню

$$H_{\text{Істел}} =$$

з другою ступеню

$$H_{\text{ІІстел}} =$$

[1, с. 55, п. 8-07; 3, с. 116, (10-5)].

2.1.18. Підраховують сумарну поверхню нагріву, м^2 :

- першої ступені

$$H_{\text{I}} = H_{\text{Ішах}} + H_{\text{Ікор}} + H_{\text{Істел}} =$$

- другої ступені

$$H_{\text{II}} = H_{\text{ІІст}} + H_{\text{ІІстел}} =$$

2.1.19. Підраховують живий перетин газоходу першої ступені, м^2 :

- в межах шахового розташування труб $F_{\text{Ішах}} =$

- в межах частини з коридорним розташуванням труб $F_{\text{Ікор}} =$

- середнє для ступені $F_{\text{I}} =$

[1, с. 38-39, п. 7-17; 2, с. 95; 3, с. 81; 4, с. 46].

2.1.20. Підраховують живий перетин газоходу другої ступені, м^2
 $F_{\text{II}} =$

(Те ж, що і в п. 2.1.19).

2.2 Розрахунок теплообміну в першій ступені пароперегрівача

2.2.1 Вказують площу поверхні, що проходить через перший ряд котельного пучка (фестона), м²

$$F_{\phi} =$$

(3 розрахунку теплообміну в топці, [7]).

2.2.2 Підраховують кутовий коефіцієнт фестона

$$\chi_{\phi} =$$

[1, с. 59, п. 8-35, 3, с. 122; 4, с. 26, рис.5-1].

2.2.3 Визначають коефіцієнт розподілу теплового навантаження по висоті топки

$$\eta_v =$$

[1, с. 35, п.6-42; 3, с. 119, 127; 4, с. 36, рис.5-9].

2.2.4 Підраховують теплоту, що передана поверхні нагріву пароперегрівача випромінюванням з топки, МДж/кг (МДж/м³) /^{2.6}

$$Q_{л.п.п} =$$

[1, с. 35, п. 6-42, с. 59, п. 8-35; 3, с. 127; 4, с. 57].

2.2.5 Вказують температуру насиченої пари при тиску в барабані, °С

$$t_n =$$

[5, таблиця I-II].

2.2.6 Визначають ентальпію пари при цьому тиску, кДж/кг

$$i'' =$$

[5, таблиця I-II].

2.2.7 Приймають тиск пари на виході з першої ступені пароперегрівача, МПа /^{2.7}

$$P_{пр} =$$

[1, с. 56, пп. 8-15, 8-26; 4, с. 55].

2.2.8 Вказують очікувану температуру перегріву на виході з першої ступені, °С /^{2.7}

$$t_1'' =$$

2.2.9 Знаходять ентальпію пари на виході з першої ступені, кДж/кг

$$i_{1cm}'' =$$

[5, таблиця III].

2.2.10 Підраховують кількість тепла, сприйняту парою в першій ступені, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{\text{Iст. 6}} =$$

[1, с. 35, п. 7-03; 2, с. 90; 3, с. 126; 4, с. 56, (8-1)].

2.2.11 Вказують температуру продуктів згоряння на вході в ступень, °С

$$\vartheta'_{\text{Iст}} =$$

(Приймається рівній температурі на виході з фестонона).

2.2.12 Записується ентальпія продуктів згоряння на вході в ступень, МДж/кг (МДж/м³)

$$I'_{\text{Iст}} =$$

(Приймається рівній ентальпії газів за фестоном).

2.2.13 Вказують присос повітря в ступені ^{/2.8}

$$\Delta\alpha_{\text{Iст}} =$$

2.2.14 Вказують ентальпію повітря присосів, МДж/кг (МДж/м³) ^{/2.9}

$$I'_{\text{прс}} =$$

[6, таблиця 1.2].

2.2.15 Вказують коефіцієнт збереження тепла

$$\varphi =$$

(З розрахунку теплообміну в топці, [7]).

2.2.16 Підраховують ентальпію продуктів згоряння на виході з ступені пароперегрівача, що розраховується, МДж/кг (МДж/м³)

$$I'_{\text{Iст}} =$$

[1, с. 35, п. 7-02; 2, с. 90; 3, с. 127, 4, с. 57].

2.2.17 Визначають температуру продуктів згоряння, що відповідає цієї ентальпії, °С

$$\vartheta''_{\text{Iст}} =$$

[6, таблиця 1.2].

2.2.18 Підраховують середню температуру продуктів згоряння в ступені, що розраховується, °С

$$\vartheta_{\text{Icm}} =$$

[1, с. 39, п. 7-18; 2, с. 97; 3, с. 81; 4, с. 46].

2.2.19 Виписують об'єм газів при надлишку повітря в газоході пароперегрівача, м³/кг (м³/м³)

$$V_{\text{г}} =$$

[6, таблиця 1.1].

2.2.20 Підраховують середню швидкість газів в ступені, м/с

$$W_{г.Іст} =$$

[1, с. 38, п. 7-16.; 2, с. 95; 3, с. 81; 4, с. 44-45].

2.2.21 Визначають коефіцієнт тепловіддачі конвекцією з поправками до нього в частині поверхні з шаховим розташуванням труб, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{клшах} =$$

[1, с. 39, п. 7-21; 2, с. 98; 3, с. 83; 4, с. 42-43].

2.2.22 Визначають коефіцієнт тепловіддачі конвекцією з поправками до нього в частині поверхні ступені з коридорним розташуванням труб, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{клкор} =$$

[1, с. 39, п. 7-20; 2, с. 98; 3 с. 82; 4, с. 42-43].

2.2.23 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі в ступені, усереднений по поверхнях, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{клст} =$$

[1, с. 40, п. 7-24; 2, с. 99; 3, с. 84; 4, с. 44].

2.2.24 Підраховують середню температуру пари в ступені, °С

$$t_{Іст} =$$

2.2.25 Знаходять середній питомий об'єм пари в ступені, м³/кг

$$v_{Іст} ==$$

[5, таблиця ІІІ].

2.2.26 Підраховують середню швидкість пари в ступені, м/с

$$W_{п.Іст} =$$

[1, с. 38, п. 7-16; 2, с. 95; 3, с. 81; 4, с. 44-45].

2.2.27 Знаходять коефіцієнт тепловіддачі від стінки до пари, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{2Іст} =$$

[1, с. 44, п. 7-36, с.41, п.7-27; 2, с. 102; 3, с. 100, 85; 4, с. 44].

2.2.28 Знаходять вихідний коефіцієнт забруднення і поправки до нього, (м²·К)/Вт

$$\varepsilon_0 =$$

$$C_d =$$

$$C_\phi =$$

$$\Delta\varepsilon =$$

[1, с. 47, п. 7-52; 2, с. 93; 3, с. 103; 4, с. 39].

2.2.29 Підраховують коефіцієнт забруднення зовнішньої поверхні труб, (м²·К)/Вт

$$\varepsilon_{\text{Iст}} =$$

[1, с. 47, п. 7-52; 2, с. 93; 3, с. 103; 4, с. 39].

2.2.30 Підраховують температуру на поверхні забруднених труб,
°C

$$t_{3.\text{Iст}} =$$

[1, с. 44, п. 7-36; 2, с. 97; 3, с. 99; 4, с. 48].

2.2.31 Визначають номограмне значення коефіцієнта випромінювання, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{л.н Iст}} =$$

[1, с. 43, п. 7-32; 2, с. 109; 3, с. 97; 4, с. 48].

2.2.32 Виписують об'ємні долі водяної пари і сумарну долю водяної пари і трьохатомних газів при надлишку повітря в пароперегрівачі ^{/2.10}

$$r_{\text{H}_2\text{O}} =$$

$$r_{\text{п}} =$$

[6, таблиця 1.1].

2.2.33 Вказують тиск, прийнятий в газоході, що розраховується,
МПа

$$P =$$

[1, с. 24, п. 6-06; 2, с. 109; 3, с. 99; 4, с. 48].

2.2.34 Підраховують парціальний тиск трьохатомних газів і водяної пари, МПа

$$P_{\text{п}} = r_{\text{п}} \cdot P.$$

2.2.35 Визначають товщину випромінюючого газового об'єму в міжтрубному просторі ступені, м

$$S_{\text{Iст}} =$$

[1, с. 43, п. 7-35; 2, с. 110; 3, с. 99; 4, с. 48].

2.2.36 Підраховують оптичну щільність потоку продуктів згоряння ^{/1.3}

$$\tau_{\text{г. Iст}} =$$

2.2.37 Виписують концентрацію золи в продуктах згоряння в газоході пароперегрівача, г/м³

$$\mu_{\text{зл}} =$$

[6, таблиця 1.1].

2.2.38 Підраховують оптичну щільність часток золи в потоці продуктів згоряння ^{/1.4}

$$\tau_{\text{зл Iст}} =$$

2.2.39 Підраховують міру чорноти запиленого потоку газів

$$a_{\text{Ict}} =$$

[1, с. 43, п. 7-32; 2, с. 109; 3, с. 97; 4, с. 48].

2.2.40 Знаходять коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням в міжтрубному просторі, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{л.Ict}} =$$

[1, с. 43, п. 7-32; 2, с. 109; 3, с. 97; 4, с. 47].

2.2.41 Вказують середню глибину газового об'єму, розташованого перед ступенню, м

$$\ell_{\text{об. Ict}} =$$

2.2.42 Підраховують коефіцієнт випромінювання потоку газів на першу ступень пароперегрівача з урахуванням випромінювання об'єму, Вт/(м²·К)

$$\alpha'_{\text{л.Icm}} =$$

[1, с. 44, п. 7-37; 3, с. 102; 4, с. 49].

2.2.43 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі від газового потоку до стінки, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{I Ict}} =$$

[1, с. 37, п. 7-07; 2, с. 109; 3, с. 97; 4, с. 48].

2.2.44 Підраховують коефіцієнт теплопередачі в першій ступені, Вт/(м²·К)

$$K_{\text{Ict}} =$$

[1, с. 37, пп. 7-10, 7-11; 2, с. 91; 3, с. 79; 4, с. 39].

2.2.45 Визначають температурний напір на вході і виході газів при протитоку, °С

$$\Delta t'_{\text{Ict}} = \vartheta'_{\text{Ict}} - t''_{\text{Ict}} =$$

$$\Delta t''_{\text{Ict}} = \vartheta''_{\text{Ict}} - t_n =$$

2.2.46 Підраховують температурний напір в ступені при протитоку, °С

$$\Delta t_{\text{Ict.прт}} =$$

[1, с. 49, п. 7-62; 2, с. 111; 3, с. 107; 4, с. 49].

2.2.47 Підраховують параметри

$$P =$$

$$R =$$

[1, с. 51, п. 7-65; 2, с. 112; 3, с. 108; 4, с. 50].

2.2.48 Визначають коефіцієнт ^{/2.11}

$$\psi =$$

[1, с. 51, п. 7-65; 2, с. 112; 3, с. 109; 4, с. 50].

2.2.49 Підраховують температурний напір для схеми ступені, що розраховується (для схеми паралельно-змішаного току), °C

$$\Delta t_{\text{Iст.}} =$$

[1, с. 50, п. 7-64; 2, с. 111; 3, с. 107; 4, с. 50].

2.2.50 Підраховують кількість теплоти, яка може бути передана за умовами теплопередачі, МДж/кг (МДж /м³)

$$Q_{\text{Iст.т}} =$$

[1, с. 35, п. 7-01; 2, с. 89; 3, с. 78; 4, с. 38].

2.2.51 Підраховують розбіжність результатів визначення теплоти по балансу і по теплопередачі, %

$$\Delta q_{\text{Iст}} = \frac{Q_{\text{Iст.б}} - Q_{\text{Iст.т}}}{Q_{\text{Iст.б}}} \cdot 100 =$$

Знайдене значення не повинно перевищувати 2%.

Якщо $\Delta q_{\text{Iст}} > 2\%$ і її значення позитивне, слідує зменшити $Q_{\text{Iст.б}}$ або, що теж саме, зменшити заздалегідь прийняту температуру пари на виході з першої ступені і уточнити розрахунок.

При негативному значенні $\Delta q_{\text{Iст}}$ слід збільшити температуру пари, що виходить з першої ступені, збільшити тим самим значення $Q_{\text{Iст.б}}$. При уточненні розрахунків слід керуватися рекомендаціями, викладеними в Нормативному методі розрахунку котельних установок [1, с. 58, п. 8-04; с. 57, п. 8-23].

2.3 Розрахунок теплообміну в другій ступені пароперегрівача

Розрахунок теплообміну в другій ступені пароперегрівача багато в чому схожий на розрахунок першої ступені з тією різницею, що в ступені відсутня частина поверхні з шаховим розташуванням труб та відсутня передача теплоти випромінюванням з топки.

Розрахунок здійснюють в такій послідовності.

2.3.1 Вказують температуру перегрітої пари, °C

$$t_{\text{п.п.}} =$$

(З завдання на проектування).

2.3.2 Знаходять ентальпію пари, кДж/кг

$$i_{\text{п.п.}} =$$

[5, таблиця III].

2.3.3 Приймають зниження ентальпії пари в регуляторі перегріву, кДж/кг ^{/2.12}

$$\Delta i_{п.о.} =$$

[1, с. 74, п. 11; 2, с. 122; 3, с. 115; 4, с. 56].

2.3.4 Підраховують ентальпію пари на вході в ступень, кДж/кг

$$i'_{IIст} = i''_{Iст} - \Delta i_{п.о.} =$$

2.3.5 Визначають температуру пари на вході в ступень, °C

$$t'_{IIст} =$$

[5, таблиця III].

2.3.6 Підраховують теплоту, необхідну для перегріву пари в ступені, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{IIст.б} =$$

[1, с. 35, п. 7-03; 3, с. 126; 4, с. 56, (8-1)].

2.3.7 Записують температуру і ентальпію продуктів згоряння на вході в ступень, °C; МДж/кг (МДж/м³)

$$\vartheta'_{IIст} =$$

$$I'_{IIст} =$$

(3 розрахунку першої ступені пароперегрівача).

2.3.8 Вказують величину присоса повітря в ступені

$$\Delta \alpha_{IIст} =$$

2.3.9 Вказують ентальпію повітря присосів, МДж/кг (МДж/м³)

$$I^o_{прс} =$$

2.3.10 Підраховують ентальпію продуктів згоряння на виході з ступені, МДж/кг (МДж/м³)

$$I''_{IIст} =$$

[1, с. 35, п. 7-02; 2, с. 90; 3, с. 127, (10)-(48); 4, с. 57].

2.3.11 Визначають температуру продуктів згоряння на виході з ступені, °C

$$\vartheta''_{IIст} =$$

[6, таблиця 1.2].

2.3.12 Підраховують середню температуру продуктів згоряння в ступені, °C

$$\vartheta_{IIст} =$$

[1, с. 39, п. 7-18; 2, с. 97; 3, с. 81; 4, с. 46].

2.3.13 Виписують об'єм газів при надлишку повітря в газоході пароперегрівача, м³/кг (м³/м³)

$$V_{г} =$$

[6, таблиця 1.1].

2.3.14 Підраховують середню швидкість газів в ступені, м/с

$$W_{г. II ст} =$$

[1, с. 38, п. 7-16; 2, с. 95; 3, с. 81; 4, с. 44-45].

2.3.15 Визначають коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки конвекцією, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{кп ст} =$$

[1, с. 39, п. 7-20; 2, с. 98; 3, с. 82; 4, с. 42-43].

2.3.16 Підраховують середню температуру пари в ступені, °С

$$t_{II ст} =$$

2.3.17 Знаходять середній питомий об'єм пари в ступені, м³/кг

$$V_{II ст} =$$

[5, таблиця III].

2.3.18 Підраховують середню швидкість пари в ступені, м/с

$$W_{п. II ст} =$$

[1, с. 38, п. 7-16; 2, с. 95; 3, с. 81; 4, с. 44-45].

2.3.19 Наводять коефіцієнт тепловіддачі від стінки до пари, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{2 II ст} =$$

[1, с. 44, п. 7-36, с. 41, п. 7-27; 2, с. 102; 3, с. 87; 4, с. 44].

2.3.20 Приймають коефіцієнт забруднення, (м²·К)/Вт

$$\varepsilon_{II ст} =$$

[1, с. 44, п. 7-36; 3, с. 99-100; 4, с. 48].

2.3.21 Підраховують температуру забруднень на поверхні труб, °С

$$t_{3 II ст} =$$

[1, с. 44, п. 7-36; 2, с. 97; 3, с. 99; 4, с. 48].

2.3.22 Знаходять номограмне значення коефіцієнта випромінювання, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{лн. II ст} =$$

[1, с. 43, п. 7-32; 2, с. 109; 3, с. 97, 102; 4, с. 47].

2.3.23 Визначають товщину випромінюючого газового об'єму в міжтрубному просторі, м

$$S_{II ст} =$$

[1, с. 43, п. 7-35; 2, с. 110; 3, с. 99; 4, с. 48].

2.3.24 Підраховують оптичну щільність потоку продуктів згоряння^{/1.3}

$$\tau_{г. II ст} =$$

2.3.25 Виписують концентрацію золи в продуктах згоряння,
г/м³

$$\mu_{\text{зл}} =$$

[6, таблиця 1.1].

2.3.26 Підраховують оптичну щільність золових часток в потоку продуктів згоряння ^{/1.4}

$$\tau_{\text{зл.Пст}} =$$

2.3.27 Підраховують міру чорноти потоку газів

$$a_{\text{Пст}} =$$

[1, с. 43, п. 7-32; 2, с. 109; 3, с. 97; 4, с. 48].

2.3.28 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням в міжтрубному просторі ступені, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{л.Пст}} = a_{\text{Пст}} \cdot \alpha_{\text{л.н.Пст}} =$$

2.3.29 Вказують глибину газового об'єму перед ступеню (відстань між крайніми рядами ступеней), м

$$l_{\text{об.Пст}} =$$

(По кресленнях заводу-виробника).

2.3.30 Підраховують коефіцієнт випромінювання потоку газів в ступені з урахуванням випромінювання об'єму, Вт/(м²·К)

$$\alpha'_{\text{л.Пст}} =$$

[1, с. 44, п. 7-37; 3, с. 102; 4, с. 49].

2.3.31 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{I Пст}} =$$

[1, с. 37, п. 7-07; 2, с. 91; 3, с. 80; 4, с. 41].

2.3.32 Приймають коефіцієнт теплової ефективності

$$\psi_{\text{Пст}} =$$

[1, с. 47, п. 7-51, с. 48, п. 7-54; 2, с. 94; 3, с. 105; 4, с. 40].

2.3.33 Підраховують коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К)

$$K_{\text{Пст}} =$$

[1, с. 37, пп. 7-10, 7-11; 2, с. 91; 3, с. 79; 4, с. 39].

2.3.34 Підраховують температурний напір на вході і на виході газів при протитоку, °С

$$\Delta t'_{\text{Пст}} = \vartheta'_{\text{Пст}} - t''_{\text{Пст}} =$$

$$\Delta t''_{\text{Пст}} = \vartheta''_{\text{Пст}} - t'_{\text{Пст}} =$$

2.3.35 Підраховують температурний напір в ступені при протитоку, °С

$$\Delta t_{\text{Iст.прг}} =$$

[1, с. 49, п. 7-62; 2, с. 111; 3, с. 107; 4, с. 49].

2.3.36 Підраховують параметри

$$P =$$

$$R =$$

[1, с. 51, п. 7-65; 2, с. 112; 3, с. 109; 4, с. 50].

2.3.37 Визначають коефіцієнт перерахунку температурного напору

$$\psi =$$

[1, с. 51, п. 7-65; 2, с. 112; 3, с. 109; 4, с. 50].

2.3.38 Підраховують температурний напір для схеми ступені, що розраховується (для паралельно-змішаного току), °C

$$\Delta t_{\text{Iст}} =$$

[1, с. 50, п. 7-64; 2, с. 111; 3, с. 107; 4, с. 50].

2.3.39 Підраховують кількість теплоти, яка може бути передана за умовами теплопередачі, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{\text{Iст.т}} =$$

[1, с. 35, п. 7-01; 2, с. 89; 3, с. 78, (9-1); 4, с. 38].

2.3.40 Підраховують розбіжність результатів визначення теплоти по балансу і по теплопередачі, %

$$\Delta q_{\text{Iст.}} = \frac{Q_{\text{Iст.б}} - Q_{\text{Iст.т}}}{Q_{\text{Iст.б}}} \cdot 100$$

Знайдене значення не повинно перевищувати 2%.

Якщо $\Delta q_{\text{Iст}}$ більше вказаної допустимої розбіжності і при тому позитивно, слід збільшити поверхню нагріву, додавши до поверхні, що розраховується, одну або дві петлі.

При негативній величині $\Delta q_{\text{Iст}}$ слід зменшити поверхню нагріву.

По викладених в підрозділах (2.1...2.3) схемах здійснюють підрахунок геометричних характеристик і розрахунок теплообміну в пароперегрівачах котельних установок БКЗ-75-39 ГМА; БМ-35М, показаних на рисунках 2.3 і 2.4. Деяка відмінність в розрахунку обумовлена іншим розташуванням ступеней пароперегрівача. У вказаних котельних установках перша по ходу пари ступень розміщена в області нижчих температур потоку газів, а друга по ходу пари ступень розміщена за фестоном, регулятор перегріву

розташований в розсічці між ступенями, і розрахунок теплообміну виконують для кожної ступені окремо.

2.4 Конструкції і розрахунок теплообміну в пароперегрівачах з горизонтальним розташуванням петель змішувиків

В котельних установках К-50-40 (Б-50-40; Т-50-40) пароперегрівач блочного виконання, змонтований на підвісних трубах, охолоджуваних парою і розміщений за чотирирядним фестонем. Його конструкція показана на рисунку 2.5, а компоновка при використанні різних видів палива - на рисунку 2.6.

Загальна схема взаємної течії середовищ - паралельно-змішаний ток. Проте установка регулятора перегріву між протитоковою і прямоотоковою частинами не дозволяє використовувати формулу

$$\Delta t = \psi \Delta t_{\text{прт}}$$

для підрахунку температурного напору в поверхні, що розраховується. Немоżliвий і розрахунок по частинах, оскільки і протитокова, і прямоотокова частини омиваються одним і тим же газовим потоком. Тому пропонується наступна послідовність розрахунку.

2.4.1 Описують принцип роботи конструкції пароперегрівача і його геометричні характеристики приблизно в тій послідовності, що надана в підрозділі 2.1 дійсних методичних вказівок.

2.4.2 Здійснюють визначення теплоти, що сприймається парою в пароперегрівачі. Розрахунки записують в такій послідовності.

2.4.3 Вказують витрату палива котельною установкою при номінальному навантаженні, кг/с ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$B_p =$$

(З розрахунку палива, [6]).

2.4.4 Вказують площу поверхні, що проходить через перший ряд фестона, м^2

$$F_\phi =$$

(З розрахунку теплообміну в топці, [7]).

2.4.5 Визначають кутовий коефіцієнт фестона

$$\chi_\phi =$$

[1, с.59, п. 8-35; 3, с.122; 4, с.26, рис.5-1].

2.4.6 Визначають коефіцієнт розподілу теплового навантаження по висоті топки

$$\eta_b =$$

[1, с. 35, п. 6-42; 3, с. 119; 4, с. 36, рис.5-9].

2.4.7 Підраховують теплоту, передану поверхні нагріву пароперегрівача випромінюванням з топки, МДж/кг (МДж/м³)^{/2.6}

$$Q_{л.п.п} =$$

[1, с. 59, п. 8-35; 3, с. 119, 127; 4, с. 57].

2.4.8 Записують витрату пари котельною установкою при номінальному навантаженні, кг/с

$$D =$$

(З завдання на проектування).

2.4.9 Вказують тиск в барабані, МПа

$$P_6 =$$

(З завдання на проектування).

2.4.10 Знаходять температуру насичення, °С, і ентальпію сухої насиченої пари при цьому тиску, кДж/кг

$$t_n =$$

$$i'' =$$

[5, таблиця I-II].

2.4.11 Вказують тиск, МПа, і температуру, °С, перегрітої пари

$$P_{п.п} =$$

$$t_{п.п} =$$

(З завдання на проектування).

2.4.12 Знаходять ентальпію перегрітої пари, кДж/кг

$$i_{п.п} =$$

[5, таблиця III].

2.4.13 Приймають зниження ентальпії в регуляторі перегріву, кДж/кг^{/2.12}

$$\Delta i_{п.о} =$$

[1, с. 74 п.11; 2, с. 122; 3, с. 115; 4, с. 56].

2.4.14 Підраховують теплоту, яку необхідно передати конвекцією для перегріву пари до заданої температури, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{п.п.6} =$$

[1, с.35, п. 7-03; 4, с 57].

Подальші розрахунки, аж до визначення коефіцієнта теплопередачі, виконують аналогічно викладеному в підрозділі 2.3, в пп.(2.3.7...2.3.40) (відповідні їм пункти матимуть номери 2.4.15, 2.4.16, ... ,2.4.41).

Розрахунок зазвичай закінчують таким чином.

2.4.42 Підраховують температурні напори на вході і на виході пароперегрівача при протитоку, °C

$$\Delta t_{б.прт} =$$

$$\Delta t_{м.прт} =$$

2.4.43 Підраховують температурний напір при протитоку, °C

$$\Delta t_{прт} =$$

[1, с. 49, п. 7-60-7-62; 2, с. 111; 3, с. 107; 4, с. 49].

2.4.44 Підраховують температурні напори на вході і виході пароперегрівача при прямотоку, °C

$$\Delta t_{б.прм} =$$

$$\Delta t_{м.прм} =$$

2.4.45 Підраховують температурний напір при прямотоку, °C

$$\Delta t_{прм} =$$

[1, с. 49, п. 7-60-7-62; 2, с. 111; 3, с. 107; 4, с. 49].

2.4.46 Перевіряють наявність нерівності, °C ^{/2.13}

$$\Delta t_{прм} \geq 0,92 \Delta t_{прт}$$

Якщо ця нерівність є, підраховують середній температурний напір в пароперегрівачі, °C

$$\Delta t_{п.п} =$$

[1, с. 50, п. 7-64; 2, с.115; 3, с.107; 4, с.50].

Якщо надана нерівність не виконується, розрахунок ведуть так, як описано в п. 2.13 приміток до дійсного розділу.

Викладена послідовність розрахунку повністю прийнятна для розрахунку теплообміну в пароперегрівачах котельних установок ГМ-50-1; К-35-40 (Б-35-40;Т-35-40), показаних на рисунках (2.7...2.9).

Ця ж послідовність розрахунку повністю прийнятна для розрахунку теплообміну в пароперегрівачах котельних установок К-50-40/14 і ГМ-50/14, зображених на рисунках 2.10 і 2.11, а також котельних установок Е-25-14; Е-25-24 ГМ; Б-25/15 ГМ. Відмінність полягає лише в тому, що, залежно від взаємної течії середовищ, підраховують температурний напір при протитоку (по пп. 2.4.42, 2.4.43) при протитоківій схемі включення, або при прямотоку

(по пп. 2.4.44, 2.4.45) при прямотоківій схемі взаємної течії середовищ. Температурний напір в пароперегрівачі (підсушиваючій петлі) котельної установки К-50-40/14 підраховують за схемою перехресного току.

Після визначення температурного напору в пароперегрівачі виконують наступне.

2.4.47 Підраховують кількість теплоти, що реалізується в поверхні пароперегрівача за умовами теплопередачі, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{п.п.т} =$$

[1, с. 35, п. 7-01; 2, с. 89; 3, с. 78; 4, с. 38].

2.4.48 Підраховують розбіжність в підрахунках теплоти по балансу і по теплопередачі, %

$$\Delta q_{п.п.} = \frac{Q_{п.п.б} - Q_{п.п.т}}{Q_{п.п.б}} \cdot 100 =$$

Якщо $\Delta q_{п.п.}$ не перевищує 2%, розрахунок вважається закінченим.

При значній розбіжності приймають рішення про зміну поверхні нагріву пароперегрівача, підраховують необхідність зменшення або збільшення поверхні пароперегрівача, надають конструктивне рішення.

На кресленнях котельної установки зображають поверхню, що забезпечує заданий перегрів пари.

2.5 Розрахунок теплообміну в пароперегрівачах котельних установок типу ДКВР

Зі всієї номенклатури котельних установок найбільшого поширення в промисловості набули ДКВР-4; ДКВР-6,5 і ДКВР-10. Вони виготовляються для виробництва насиченої і перегрітої пари. Котельні установки ДКВР-4 монтуються з пароперегрівачами, що забезпечують перегрів пари до 250 °С. Котельні установки ДКВР-6,5 і ДКВР-10 виготовляються з пароперегрівачами, що забезпечують перегрів до 250 °С або до 370 °С.

Пароперегрівачі, що призначені забезпечувати перегрів до 250 °С, виконуються у вигляді блоків, що складаються з однопетльових змійовиків зі здвоєними трубами. Необхідна поверхня нагріву

забезпечується набором змійовиків. В котельних установках ДКВР-4 їх вісім, в котельних установках ДКВР-6,5 - десять, в котельних установках ДКВР-10 - шістнадцять. Форма змійовиків і місце їх установки показані на рисунках 2.12 і 2.13.

В котельних установках з перегрівом пари до 370 °С встановлюється така ж кількість змійовиків, але кожен змійовик має три петлі. Форма змійовика зображена на рисунку 2.14.

Пароперегрівачі встановлюються після камери догоряння, на вході газів в котельний пучок, в просторі, вільному від труб пучка. У газоході залишена частина випарної поверхні, омивана долею потоку газів, що проходять через пароперегрівач. Це робить розрахунок пароперегрівача декілька відмінним від наданих вище.

Як і в інших пароперегрівачах, до виконання розрахунків теплообміну мають бути приведені або підраховані геометричні характеристики поверхонь нагріву, розміщених в газоході. Мають бути вказані:

- розміри газоходу - ширина і висота;
- діаметр труб, їх кроки упоперек і уздовж потоку газів;
- число петель пароперегрівача і їх розміри, по яких можна підрахувати поверхню нагріву;
- число труб, діаметри і довжини труб залишеної частини котельного пучка для підрахунку їх сумарної поверхні.

Рекомендується на початку розрахунку привести основні характеристики потоку газу і пари: витрату палива, паропроодуктивність, тиск в барабані, тиск і температуру перегрітої пари, температуру і ентальпію продуктів згоряння на вході в газохід, що розраховується. Ці дані і подальші розрахунки розташовують в такій послідовності.

2.5.1 Вказують ширину і висоту газоходу, мм

$$a =$$

$$h =$$

2.5.2 Вказують діаметр труб (зовнішній) і товщину стінок, мм

$$d \times S =$$

2.5.3 Надають поперечні кроки труб пароперегрівача, конструктивні і розрахункові, мм

$$S_1' =$$

$$S_1'' =$$

$$S_1 =$$

2.5.4 Вказують глибину ступені пароперегрівача, мм

$$\ell_{\text{п}} =$$

2.5.5 Вказують число рядів труб, шт.

$$z =$$

2.5.6 Підраховують поздовжній крок (розрахунковий), мм

$$S_2 =$$

2.5.7 Вказують радіуси вигину змійовиків (внутрішнього та зовнішнього), мм

$$r =$$

$$R =$$

2.5.8 Підраховують довжину труб в змійовику (в межах частини, що обігривається), мм

$$\ell_{\text{зм}} =$$

2.5.9 Вказують число змійовиків в пароперегрівачі, шт.

$$n_{\text{зм}} =$$

2.5.10 Підраховують поверхню пароперегрівача, м²

$$H_{\text{п.п}} =$$

2.5.11 Підраховують живий перетин для проходу пари, м²

$$f_{\text{п.п}} =$$

2.5.12 Вказують діаметр труб випарної поверхні, розташованої в газоході пароперегрівача, мм

$$d_{\text{вип}} =$$

2.5.13 Вказують число рядів труб випарної поверхні і число труб в ряду, шт.

$$z_{\text{вип}} =$$

$$n_{\text{вип}} =$$

2.5.14 Надають довжину труб цієї поверхні, мм

$$\ell_6 = \quad ; \ell_7 = \quad ; \ell_8 = \quad ; \ell_9 = \quad \text{і так далі.}$$

2.5.15 Вказують кількість пристінних труб, шт., і їх довжину, мм

$$n_{\text{пр}} =$$

$$\ell_{\text{пр}} =$$

2.5.16 Підраховують поверхню труб частини пучка, розміщеної в газоході пароперегрівача, м²

$$H_{\text{вип}} =$$

2.5.17 Підраховують живий перетин газоходу, м²

$$F_{\text{г.вип}} =$$

2.5.18. Вказують витрату палива, кг/с (м³/с)

$$B_p =$$

(З розрахунку палива, [6]).

2.5.19 Вказують паропроодуктивність при номінальному навантаженні, кг/с

$$D =$$

(З завдання на проектування).

2.5.20 Вказують тиск в барабані котельної установки, МПа

$$P_6 =$$

(З завдання на проектування).

2.5.21 Знаходять температуру насичення, відповідну цьому тиску °С, і ентальпію насиченої пари, кДж/кг

$$t_n =$$

$$i'' =$$

[5, таблиця I-II].

2.5.22 Вказують тиск, МПа, і температуру перегрітої пари, °С

$$P_{п.п.} =$$

$$t_{п.п.} =$$

(З завдання на проектування).

2.5.23 Знаходять ентальпію перегрітої пари, кДж/кг

$$i_{п.п.} =$$

[5, таблиця III].

2.5.24 Підраховують теплоту, що сприймається парою в пароперегрівачі, МВт

$$Q_{пер.б} = D (i_{п.п.} - i'') =$$

2.5.25 Приймають кількість теплоти, необхідну для передачі у випарну поверхню, МВт

$$Q_{вип.б} =$$

[4, с. 57, (8-11)].

2.5.26 Підраховують теплоту, що передбачувана і реалізована в газоході, віднесено до одиниці витрати палива, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{п.п.б} = (Q_{пер.б} + Q_{вип.б}) / B_p =$$

2.5.27 Вказують температуру, °С, і ентальпію, МДж/кг (МДж/м³), продуктів згоряння на вході в поверхню

$$\vartheta'_{п.п.} =$$

$$I_{п.п.} =$$

(З розрахунку теплообміну в топці, [7]).

2.5.28 Наводять коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi =$$

(З розрахунку теплообміну в топці, [7]).

2.5.29 Вказують присос повітря в газоході і ентальпію повітря, що становить присос, МДж/кг (МДж/м³)

$$\Delta \alpha_{п.п} =$$

$$I_{прс}^{\circ} =$$

[6, таблиці 1.1 і 1.2].

2.5.30 Підраховують ентальпію продуктів згоряння на виході з поверхні, що розраховується, МДж/кг (МДж/м³)

$$I_{п.п}'' =$$

[1, с. 35, п. 7-02; 2, с. 90; 3, с. 127; 4, с. 57].

2.5.31 Знаходять температуру продуктів згоряння, що відповідає цієї ентальпії, °С

$$\vartheta_{п.п}'' =$$

[6, таблиця 1.2].

2.5.32 Підраховують середню температуру продуктів згоряння, °С

$$\vartheta_{п.п} = 0,5 \cdot (\vartheta_{п.п}' + \vartheta_{п.п}'')$$

2.5.33 Вказують об'єм газів при надлишку повітря в газоході, м³/кг (м³/м³)

$$V_{г} =$$

[6, таблиця 1.1].

2.5.34 Підраховують швидкість газів в газоході, м/с

$$W_{г.п.п} =$$

[1, с. 38, п. 7-16; 2, с. 95; 3, с. 81; 4, с. 44-45].

2.5.35 Визначають коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м² · К)

$$\alpha_{к} =$$

[1, с. 39, п. 7-20; 2, с. 98; 2, с. 82; 4, с. 43].

2.5.36 Підраховують середню температуру пари, °С

$$t_{п} = 0,5 (t_{н} + t_{пп}) =$$

2.5.37 Визначають питомий об'єм пари при цій температурі, м³/кг ^{/2.14}

$$v =$$

[5, таблиця III].

2.5.38 Підраховують швидкість пари, м/с

$$W_{п} =$$

[1, с. 38, п. 7-16; 2, с. 95; 3, с. 81; 4, с. 44-45].

2.5.39 Знаходять коефіцієнт тепловіддачі від стінки до пари,
Вт/(м²·К)

$$\alpha_2 =$$

[1, с. 41, п. 7-27; 2, с. 102; 3, с. 85-87; 4, с. 44].

2.5.40 Приймають коефіцієнт забруднення поверхні нагріву,
(м²·К)/Вт

$$\varepsilon =$$

[1, с. 44, п. 7-36; 2, с. 94; 3, с. 99; 4, с. 48].

2.5.41 Підраховують температуру забруднень на зовнішній
поверхні стінок, °С^{/2.15}

$$t_3 =$$

[1, с. 44, п. 7-36; 2, с. 97; 3, с. 99; 4, с. 48].

2.5.42 Знаходять номограмне значення коефіцієнта тепловіддачі
випромінюванням, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{л.н}} =$$

[1, с. 43, пп. 7-31, 7-32; 2, с. 109; 3, с. 97, 102; 4, с. 47-48].

2.5.43 Вказують тиск в газоході, МПа

$$P_1 =$$

[1, с. 24, п. 6-06; 2, с. 109; 3, с. 99; 4, с. 48].

2.5.44 Вказують об'ємні долі водяної пари в продуктах згоряння
і сумарну їх долю разом з трьохатомними газами

$$r_{H_2O} =$$

$$r_{\text{п}} =$$

[6, таблиця 1.1].

2.5.45 Підраховують парціальний тиск трьохатомних газів і
водяної пари, МПа

$$P_{\text{п}} =$$

[1, с. 25, п. 6-07; 3, с. 97; 4, с. 31].

2.5.46 Підраховують товщину газового об'єму, що
випромінюється в міжтрубному просторі, м

$$S =$$

[1, с. 43, п. 7-35; 2, с. 110; 3, с. 99; 4, с. 48].

2.5.47. Підраховують оптичну щільність газового потоку^{/1.3}

$$\tau_{\text{г}} =$$

2.5.48 Вказують концентрацію золи в продуктах згоряння, г/м³

$$\mu_{\text{зл}} =$$

[6, таблиця 1.1].

2.5.49 Підраховують оптичну щільність золових часток в потоку газів /1.4; 2.16

$$\tau_{зп} =$$

2.5.50 Підраховують міру чорноти запиленого потоку газів

$$a =$$

[1, с. 43, п. 7-32; 2, с. 109; 3, с. 97; 4, с. 48].

2.5.51 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням в міжтрубному просторі, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{л} = a \cdot \alpha_{л,н}$$

[1, с. 43, п. 7-32; 2, с.108; рис. 8-22; 3, с. 102].

2.5.52 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки, Вт/(м²·К)

$$\alpha_1 =$$

[1, с. 37, п. 7-07; 2, с. 91; 3, с. 80, підр. 9-2; 4, с. 41].

2.5.53 Приймають коефіцієнт теплової ефективності

$$\psi =$$

[1, с. 47, п. 7-51, с.48, пп. 7-54, 7-55; 2, с. 94; 3, с. 105-106; 4, с. 40, табл. 6-2].

2.5.54 Підраховують коефіцієнт теплопередачі в пароперегрівачі, Вт/(м²·К)

$$K =$$

[1, с. 37, пп. 7-10, 7-11; 2, с. 91; 3, с. 79; 4, с. 39].

2.5.55 Підраховують температурні напори на кінцях поверхні нагріву пароперегрівача при протитоку, °С

$$\Delta t' = \vartheta'_{п,п} - t_{п,п} =$$

$$\Delta t'' = \vartheta''_{п,п} - t_n =$$

2.5.56 Підраховують температурний напір при протитоку, °С

$$\Delta t_{прт} =$$

[1, с. 49, пп. 7-60, 7-61, 7-62; 2, с. 111; 3, с. 107; 4, с. 49].

2.5.57 Підраховують перепади температур середовищ, що гріє і обігрівається, °С /2.17

$$\tau_6 =$$

$$\tau_m =$$

[1, с. 51, пп. 7-68, 7-66; 2, с. 112; 3, с. 109; 4, с. 50].

2.5.58 Підраховують параметри

$$P =$$

$$R =$$

[1, с. 51, п. 7-68; 2, с. 112; 3, с. 109; 4, с. 50].

2.5.59 Визначають коефіцієнт, що приводить температурний напір протитоку до схеми включення поверхні, що розраховується

$$\psi =$$

[1, с. 51, п. 7-68; 2, с. 112; 3, с. 107; 4, с. 50].

2.5.60 Підраховують температурний напір в поверхні, що розраховується

$$\Delta t_{п.п.} =$$

[1, с. 50, п. 7-64; 2, с. 111; 3, с. 107; 4, с. 50].

2.5.61 Підраховують температурний напір у випарній поверхні, що працює паралельно з пароперегрівачем

$$\Delta t_{вип} =$$

[1, с. 49, п. 7-62; 2, с. 111; 3, с. 107; 4, с. 49-50].

2.5.62 Підраховують теплоту, що забезпечується теплопередачею в пароперегрівачі, МВт

$$Q_{п.п.т} = K \cdot \Delta t_{п.п.} \cdot H_{п.п.} =$$

2.5.63 Те ж у випарній поверхні, МВт

$$Q_{вип.т} = K \cdot \Delta t_{вип.} \cdot H_{вип.} =$$

2.5.64 Знаходять розбіжність результатів розрахунку, %

$$\Delta q_{п.п.} = \frac{Q_{п.п.б} - Q_{п.п.т}}{Q_{п.п.б}} \cdot 100 =$$

$$\Delta q_{вип} = \frac{Q_{вип.б} - Q_{вип.т}}{Q_{вип.б}} \cdot 100 =$$

Перше не повинно перевершувати 3%, друге – 10%.

[1, с. 55, п. 8-07, с. 57, п. 8-23].

2.6 Примітки до розділу 2

2.6.1 При визначенні числа змійовиків по прийнятому поперечному кроку слід брати ширину газоходу в світлі. При цьому відстань крайніх змійовиків від стін повинна бути близькою до половини кроку S_1 .

2.6.2 Радіус вигину змійовиків вибирають по кресленнях конструкції. Якщо зробити це неможливо, його приймають наступним:

- $r \geq 2d$ – для труб $\varnothing(28...32)$ мм;
- $r \geq 3d$ – для труб $\varnothing(38...42)$ мм.

Якщо змійовики подвійні, радіус вигину зовнішнього беруть на (50...60) мм більше радіусу внутрішнього змійовика, тобто

$$R = r + (50 \dots 60) \text{ мм.}$$

2.6.3 Крок труб по глибині визначають діленням глибини ступені $\ell_{\text{ст}}$ на число проміжків між трубами від першого до останнього ряду.

2.6.4 Кількість стельових труб в більшості конструкцій котельних установок дорівнює числу змійовиків, отже, і крок стельових труб буде $S_{\text{стел.}} = S_{\text{лкор.}}$.

Відносна відстань стельових труб від стелі для визначення кутового коефіцієнта $\chi_{\text{стел}}$ можна приймати $e/d = 0,8$.

2.6.5 Площу поверхні, зайнятої стельовими трубами, підраховують як добуток ширини газоходу пароперегрівача (в світлі) на глибину, рівну довжині стельових труб, включених послідовно з ступеню пароперегрівача, що розраховується.

2.6.6 З [1, формули (6.74) і (8.10)] отримують розрахункову формулу для підрахунку кількості теплоти, переданої випромінюванням з топки, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{\text{л.п.п.}} = \frac{B_p Q_{\text{л}}}{(\psi F)_{\text{ст}}} \cdot \frac{(\psi F)_{\text{кл}}}{B_p} (1 - \chi_{\text{кл}}) \eta_{\text{в}} =$$

де B_p - розрахункова витрата палива, кг/с; $Q_{\text{л}}$ - кількість теплоти, що віддається продуктами згоряння в топці випромінюванням, МДж/кг (МДж/м³); $(\psi F)_{\text{ст}}$, $(\psi F)_{\text{кл}}$ - ефективна променесприймаюча поверхня відповідно в топці і площині, що проходить через перший ряд котельного пучка (фестона), м²; $\chi_{\text{кл}}$ - кутовий коефіцієнт котельного пучка; $\eta_{\text{в}}$ - коефіцієнт розподілу теплоти по висоті топки.

2.6.7 Тиск пари і його температуру в розрахунку ступеней для першого наближеного розрахунку розраховують пропорційними величині поверхонь нагріву ступеней. Оскільки ці поверхні самі підлягають уточненню, допустимо тиск і температуру в розсічці ступеней брати середніми на вході в пароперегрівач і на виході з нього, тобто приймати

$$P_{\text{пр}} = 0,5 (P_6 + P_{\text{п.п.}});$$

$$t_{\text{пр}} = 0,5 (t_{\text{н}} + t_{\text{п.п.}}).$$

2.6.8 Присос повітря в ступені, що розраховується, можна брати рівним половині присоса в пароперегрівачі, тобто

$$\Delta a_{\text{I ст.}} = 0,5 \Delta a_{\text{п.п.}}$$

2.6.9 Ентальпію повітря присосів в газохід пароперегрівача підраховують при температурі холодного повітря $t_{х.в.} = 30^{\circ}\text{C}$.

2.6.10 Об'ємні долі водяної пари r_{H_2O} і суми водяних парів та трьохатомних газів $r_{п.}$, а також парціальний тиск трьохатомних газів, такі ж, як і при розрахунку першої ступені. Розрахунок другої ступені можна не наводити.

2.6.11 Коефіцієнт використання поверхні пароперегрівачів сучасних котельних установок можна приймати рівним одиниці.

2.6.12 Зниження ентальпії в поверхневому пароохолоджувачі (регуляторі перегріву) може бути задане і вологістю пари $(1-\chi)$. У цьому випадку необхідно знайти теплоту випару r при тиску в барабані і підрахувати зниження ентальпії, кДж/кг

$$\Delta i_{n.o} = (1 - \chi) \cdot r$$

2.6.13 Якщо нерівність $\Delta t_{\text{прм}} \geq 0,92 \Delta t_{\text{прт}}$ не виконується, поступають таким чином. Приймають кількість теплоти, сприйнятої в протитоківій частині ступені (біля $0,55 Q_{\text{п.п.}}$, підрахованого по п. 2.4.14), знаходять ентальпію пари на виході з протитоківій частини по формулі, кДж/кг

$$i''_{\text{прм.ч}} = i'' + \frac{B \cdot Q_{\text{прм.ч}}}{D} \cdot 10^3$$

де i'' - ентальпія насиченої пари на вході в пароперегрівач, кДж/кг; $Q_{\text{прм.ч}}$ -теплота, що сприймається парою в протитоківій частині пароперегрівача, МДж/кг (МДж/м³).

Знаходять температуру, відповідну знайдений ентальпії, $i''_{\text{прм.ч}}$ [5, таблиця III] і підраховують температурний напір при протитоку, $^{\circ}\text{C}$

$$\Delta t_{\text{прт}}$$

Підраховують ентальпію пари на вході в прямотоківу частину як різницю, кДж/кг

$$i'_{\text{прм.ч}} = i''_{\text{прм.ч}} - \Delta i_{n.o}$$

Знаходять відповідну ентальпії температуру і підраховують температурний напір при прямотоку, $^{\circ}\text{C}$

$$\Delta t_{\text{прм}}$$

Температурний напір в пароперегрівачі підраховують по формулі, $^{\circ}\text{C}$

$$\Delta t = \frac{t_{\text{прм}} H_{\text{прм}} + t_{\text{нрм}} H_{\text{нрм}}}{H_{\text{н.н.}}}$$

де $H_{\text{прт}}, H_{\text{прм}}$ - величини частин поверхні пароперегрівача відповідно з протитоковою і прямотоковою течією середовищ, м^2 ;

$H_{\text{п.л.}}$ - повна поверхня пароперегрівача, м^2 .

2.6.14 У зв'язку з незначним падінням тиску в пароперегрівачах котельних установок ДКВР питомий об'єм пари допустимо визначати при тиску перегрітої пари.

2.6.15 У розрахунковій формулі для визначення t_3 замість $\frac{B_p Q_L}{H}$ слід поставити $Q_{\text{пер}}/H_{\text{п.л.}}$.

2.6.16 При спалюванні газу і мазуту оптична щільність золи відсутня. Нею можна нехтувати і при шаровому спалюванні твердого палива [1, с. 43, п. 7-38].

2.6.17 Розрахунки по пп. (2.5.57...2.5.60) виконуються лише для пароперегрівачів з перегрівом до 250°C (перехресний ток). При перегріві пари до 370°C після визначення $\Delta t_{\text{прт}}$ пароперегрівача підраховують температурний напір у випарній поверхні.

2.7 Конструкція і теплообмін в пароперегрівачі котельної установки ДКВР-10-13-250

2.7.1 Опис конструкції і робота пароперегрівача

Пароперегрівач котельної установки, що розраховується, представляє конструкцію, виконану з шістнадцяти здвоєних однопетльових змійовиків з вертикальним положенням петель. Він розміщений за камерою догоряння в просторі, утвореному вилученням частини труб в п'яти рядах котельного пучка. Вхідні кінці труб розвальцьовані у верхньому барабані, вихідні - приварені до колектора з труби $\text{Ø}159 \times 7$ мм. Регулювання температури перегріву пари не передбачене.

Пароперегрівач працює спільно з випарною поверхнею, що залишилася в газозоді котельного пучка, і пристінних труб. Для спрощення розрахунку прийнято, що труби, розміщені у стін і чавунної перегородки, в конвективному теплообміні беруть участь половиною периметра. Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією визначений по середній швидкості продуктів згоряння в газозоді, підрахований при середній температурі. Остання підрахована по сумарному теплосприйняттю пароперегрівача і випарної поверхні, що працюють паралельно.

У розрахунку прийнято, що питоме теплосприйняття випарної поверхні на 25 % більше теплосприйняття в пароперегрівачі. Правильність прийнятого теплосприйняття перевірена в кінці розрахунку.

При підрахунку теплоти, переданої теплопередачею у випарній поверхні, коефіцієнт теплопередачі прийнятий таким же, як і в пароперегрівачі.

2.7.2 Конструктивні характеристики

Розміри елементів пароперегрівача і випарної поверхні узяті з креслень Бійського котельного заводу К-13153.

Ширина газоходу пароперегрівача, мм

$$a = 1530.$$

Висота газоходу, мм

$$h = 2750.$$

Діаметр труб і товщина стінок, мм

$$d \times S = 32 \times 3.$$

Крок труб поперечний (конструктивний), мм

$$S_1' = 60; S_1'' = 90.$$

Поперечний крок розрахунковий, мм

$$S_1 = 0,5(S_1' + S_1'') = 0,5(60 + 90) = 75.$$

Відносний поперечний шаг

$$(S_1/d) = 75/32 = 2,3.$$

Глибина ступені пароперегрівача, мм

$$\ell_n = 200.$$

Число рядів труб в ступені, шт.

$$z = 4.$$

Поздовжній розрахунковий крок, мм

$$S_2 = \ell_n/(z - 1) = 200/(4 - 1) = 70.$$

Відносний поздовжній крок

$$(S_2/d) = 70/32 = 2,3.$$

Радіуси вигину змійовиків, мм:

- внутрішнього $r = 50,5$;
- зовнішнього $R = 102,5$.

Довжина прямолінійних ділянок змійовика, мм

$$\ell_{пр} = 2640.$$

Довжина змійовика в межах обігріву, м

$$\ell_{зм} = z \ell_{пр} + \pi (R+r) = [4 \cdot 2640 + 3,14(102,5 + 50,5)] \cdot 10^{-3} = 11,04.$$

Число зміювиків в пароперегрівачі, шт.

$$n_{зм} = 16.$$

Поверхня нагріву пароперегрівача, м²

$$H_{п.п.} = \pi d \ell_{зм} n_{зм} = 3,14 \cdot 32 \cdot 11,04 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 17,75.$$

Перетин для проходу пари, м²

$$f_{п.п.} = 0,785 d_{вн}^2 \cdot n_{зм} \cdot 2 = 0,785 \cdot 26^2 \cdot 16 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0,017.$$

Діаметр труб випарної поверхні, мм

$$d_{вип} = 51.$$

Число рядів труб випарної поверхні, шт.

$$z_{вип} = 5.$$

Число труб в ряду, шт.

$$n_{вип.} = 5.$$

Довжини труб випарної поверхні, мм:

$$\ell_6 = 2260; \quad \ell_9 = 2963;$$

$$\ell_7 = 2457; \quad \ell_{10} = 3256.$$

$$\ell_8 = 2696;$$

Кількість пристінних труб, шт.

$$n_{пр} = 12.$$

Довжина пристінних труб, мм

$$\ell_{пр} = 4130.$$

Площа випарної поверхні, сприймаючою тепло конвекцією, м²

$$H_{вип.} = \pi d_{вип.} (\ell_6 + \ell_7 + \ell_8 + \ell_9) (n_{вип.} - 0,5) + 0,5 \pi d_{вип.} \ell_{пр} n_{пр} = \\ [3,14 \cdot 51 (2260 + 2475 + 2690 + 2963 + 3256) (5 - 0,5) + 0,5 \cdot 3,14 \cdot 51 \cdot 4130 \cdot 12] \cdot 10^{-6} \\ = 13,80$$

Живий перетин газопроводу, м²

$$F_{г.п.} = a \cdot h - (\ell_{пр} + R) \cdot d \cdot n_{зм} - h \cdot d_{вип.} (n_{вип.} - 1) = [1530 \cdot 2750 - \\ (2640 + 102) \cdot 32 \cdot 16 - 2750 \cdot 51 \cdot (5 - 1)] \cdot 10^{-6} = 2,24$$

2.7.3 Розрахунок теплообміну

Витрата палива котельною установкою при номінальному навантаженні, кг/с

$$B = 0,27.$$

Паропроодуктивність, кг/с

$$D = 2,78.$$

Тиск в барабані, МПа

$$P_6 = 1,47.$$

Температура насиченої пари [5], °С.

$$t_n = 197.$$

Ентальпія насиченої пари, кДж/кг [5]

$$i'' = 2789.$$

Тиск, МПа, і температура, °С, перегрітої пари

$$P_{п.п.} = 1,37;$$

$$t_{п.п.} = 250.$$

Ентальпія перегрітої пари, кДж/кг

$$i_{п.п.} = 2927.$$

Теплота, що сприймається парою в пароперегрівачі, МВт

$$Q_{пер} = D (i_{п.п.} - i'') = 2,78(2927-2789) \cdot 10^{-3} = 0,384.$$

Теплота, що сприймається у випарній поверхні, МВт

$$Q_{вин} = 1,25 \frac{Q_{пер}}{H_{п.п.}} \cdot H_{вин} = 1,25 \frac{0,384}{17,75} \cdot 13,80 = 0,373.$$

Сумарна теплота, що сприймається поверхнями нагріву в газоході, МВт

$$Q_{сум} = Q_{пер} + Q_{вин} = 0,384 + 0,373 = 0,757.$$

Те ж на одиницю палива, що витрачається, МДж/кг

$$Q_{п.п.б} = Q_{сум} / B_p = 0,757 / 0,27 = 2,8.$$

Температура продуктів згоряння на вході, °С

$$\vartheta'_{п.п.} = 980.$$

Ентальпія при цій температурі, МДж/кг

$$I'_{п.п.} = 16,68.$$

Коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi = 0,98.$$

Присос повітря в газоході

$$\Delta \alpha_{п.п.} = 0,03.$$

Ентальпія повітря присосів, МДж/кг

$$I^o_{прс} = 0,27.$$

Ентальпія газів на виході з поверхні, МДж/кг

$$I''_{п.п.} = I'_{п.п.} - \left(\frac{Q_{п.п.б}}{\varphi} \right) + \Delta \alpha_{п.п.} \cdot I^o_{прс} = 16,68 - \left(\frac{2,8}{0,98} \right) + 0,03 \cdot 0,27 = 13,83$$

Температура газів на виході, °С

$$\vartheta''_{п.п.} = 820.$$

Середня температура газів, °С

$$\vartheta_{п.п.} = 0,5(\vartheta'_{п.п.} + \vartheta''_{п.п.}) = 0,5(980 + 820) = 900.$$

Об'єм газів при надлишку повітря в газоході, м³/кг

$$V_r = 12,02.$$

Швидкість газів в газоході, м/с

$$W_{г.п.п.} = \frac{BV_r}{F_{г.п.п.}} \cdot \frac{273 + \vartheta_{п.п.}}{273} = \frac{0,27 \cdot 12,02}{2,24} \cdot \frac{273 + 900}{273} = 6,2.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·К)

$$\alpha_k = \alpha_n C_z C_s C_\phi = 58,0 \cdot 0,93 \cdot 0,9 \cdot 1,0 = 48,5.$$

Середня температура пари, °С

$$t_n = 0,5(t_n + t_{п.п.}) = 0,5(197 + 250) = 224.$$

Питомий об'єм пари при цій температурі [5], м³/кг

$$v = 0,1527.$$

Швидкість пари, м/с

$$W_n = \frac{(D \cdot v)}{f_{п.п.}} = \frac{2,78 \cdot 0,1527}{0,017} = 25,0.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до пари, Вт/(м²·К)

$$\alpha_2 = 620.$$

Коефіцієнт забруднення [1], (м²·К)/Вт

$$\varepsilon = 0,004.$$

Температура забруднень на зовнішній поверхні труб, °С

$$t_3 = 0,5(t_n + t_{п.п.}) + (\varepsilon + 1/\alpha_2) Q_{пер}/H_{п.п.} = \\ = 0,5(197 + 250) + (0,004 + 1/620) 0,384 \cdot 10^6 / 17,75 = 345.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням номограмний, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{л.н} = 167.$$

Тиск в газоході, МПа

$$P = 0,1.$$

Об'ємна доля водяної пари і сумарна доля водяної пари і трьохатомних газів

$$r_{H_2O} = 0,046;$$

$$r_n = 0,158.$$

Парціальний тиск трьохатомних газів і водяної пари, МПа

$$P_n = r_n \cdot P = 0,158 \cdot 0,1 = 0,0158.$$

Товщина випромінюючого газового об'єму в міжтрубному просторі, м

$$s = 0,9d \left(\frac{4s_1s_2}{\pi d^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 32 \left(\frac{4 \cdot 75 \cdot 70}{3,14 \cdot 32^2} - 1 \right) \cdot 10^{-3} = 0,159.$$

Оптична щільність газового потоку

$$\begin{aligned}\tau_r &= \left(\frac{7,8 + 16r_{\text{H}_2\text{O}}}{3,16\sqrt{P_{\text{п}}S}} - 1 \right) (1 - 0,37 T_{\text{п.п.}} \cdot 10^{-3}) P_{\text{п}} S = \\ &= \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,046}{3,16\sqrt{0,0158 \cdot 0,159}} - 1 \right) (1 - 0,37 \cdot 1173 \cdot 10^{-3}) \cdot \\ &\quad \cdot 0,0158 \cdot 0,159 = 0,075.\end{aligned}$$

Міра чорноти потоку газів в газоході

$$a = 1 - e^{-\tau_r} = 1 - e^{-0,075} = 0,072.$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням в міжтрубному просторі, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha_{\text{л.н}} a = 167 \cdot 0,072 = 12,0.$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від газів до стінки, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{к}} = 48,5.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки, Вт/(м²·К)

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}} = 48,5 + 12,0 = 60,5.$$

Коефіцієнт теплової ефективності [1]

$$\psi = 0,6.$$

Коефіцієнт теплопередачі в пароперегрівачі, Вт/(м²·К)

$$K = \psi \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = 0,6 \frac{60,5 \cdot 620}{60,5 + 620} = 33,1.$$

Температурний напір на вході газів в пароперегрівач при протитоку, °С

$$\Delta t_{\delta} = \vartheta'_{\text{н.н.}} - t_{\text{н.н.}} = 980 - 250 = 730.$$

То ж на виході газів, °С

$$\Delta t_{\text{м}} = \vartheta''_{\text{н.н.}} - t_{\text{н}} = 820 - 197 = 623.$$

Температурний напір в пароперегрівачі при протитоку

$$\Delta t_{\text{нрм}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}} \right)} = \frac{730 - 623}{\ln \left(\frac{730}{623} \right)} = 675.$$

Перепад температур гріючого середовища, °С

$$\tau_6 = \vartheta'_{\text{п.п.}} - \vartheta''_{\text{п.п.}} = 980 - 820 = 160.$$

Те ж обігріваного середовища, °С

$$\tau_{\text{м}} = t_{\text{н.н.}} - t_{\text{н}} = 250 - 197 = 53.$$

Параметри

$$P = \frac{\tau_m}{\vartheta'_{п.п} - t_n} = \frac{53}{980 - 197} = 0,068;$$

$$R = \frac{\tau_m}{\tau_{\delta}} = \frac{53}{160} = 0,33.$$

Корегувальний коефіцієнт

$$\psi = 1.$$

Температурний напір в пароперегрівачі, °C

$$\Delta t_{п.п.} = \psi \Delta t_{прг} = 1 \cdot 675 = 675.$$

Температурний напір у випарній поверхні, °C

$$\Delta t_{вип} = \vartheta_{п.п.} - t_n = 900 - 197 = 703.$$

Кількість теплоти, відданої газами в газоході пароперегрівача,

МДж/кг

$$Q_{т.п.п} = K \cdot \frac{\Delta t_{п.п.} H_{п.п.} + \Delta t_{вип} H_{вип}}{B_p} = 33,1 \cdot \frac{675 \cdot 17,75 + 703 \cdot 13,80}{0,27 \cdot 10^6} = 2,66.$$

Розбіжність результатів підрахунків теплоти, %

$$\Delta q_{п.п} = \frac{Q_{п.п.б} - Q_{п.п.т}}{Q_{п.п.б}} \cdot 100 = \frac{2,8 - 2,66}{2,8} \cdot 100 = 5,0,$$

що нижче гранично допустимого.

3 ПРИЗНАЧЕННЯ І ПРИНЦИП КОМПОНОВКИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ КОТЛІВ

Поверхні нагріву котлів, що виконуються у вигляді конструктивно закінчених блоків і розміщені в газоходах з температурою продуктів згоряння нижче (500...550) °С, прийнято називати низькотемпературними поверхнями. Вони є останніми на шляху руху газів через котел, тому їх часто називають хвостовими поверхнями. У більшості промислових котлів ці поверхні розміщуються в опускному газоході.

Низькотемпературні поверхні нагріву призначені для зниження температури продуктів згоряння на виході з котла до величини, що відповідає економічно обґрунтованій втраті теплоти з відхідними газами. В конструкціях котлів, що виробляють пару високих і середніх параметрів, низькотемпературні поверхні включають економайзер і повітропідігрівач. В котлах низьких параметрів встановлюють або лише економайзер, або лише повітропідігрівач.

В котлах середніх параметрів, де не потрібне підігрівання повітря вище (200...250) °С (при спалюванні газового палива і мазуту) першим на шляху продуктів згоряння розміщують водяний економайзер, після нього (зазвичай нижче його в опускній шахті) розміщується повітропідігрівач. Така ж компоновка приймається і при факельному спалюванні маловологого кам'яного вугілля і горючих сланців.

В котлах тих же параметрів при факельному спалюванні антрациту і тощого вугілля, бурого вугілля і торфу, коли температура гарячого повітря має бути (350...400) °С [1], повітропідігрівач komponують в дві ступені. Нумерацію ступеней призначають по ходу повітря. Перша по повітрю ступень є останньою ступенню по ходу газів.

Другу ступень повітропідігрівача розміщують в області більш високих температур продуктів згоряння, а між ступенями повітропідігрівача розміщують частину поверхні водяного економайзера.

Температура продуктів згоряння перед другою ступенню повітропідігрівача не повинна перевищувати (520...530) °С [2]. Для

забезпечення такої температури перед другою ступеню повітропідігрівача розміщують другу частину водяного економайзера. Таким чином, двоступінчата компоновка повітропідігрівача визначає і двоступінчатую компоновку водяного економайзера. Нумерацію ступеней приймають по ходу води, вважаючи першою ступеню ту, що розташована між ступенями повітропідігрівача. В котлах низьких параметрів, зокрема в котлах ДКВР, при спалюванні мазуту, кам'яного і бурого вугілля помірної вологості (марки Б1) зазвичай встановлюють водяні економайзери із чавунних ребристих труб, що виготовляються підприємствами енергетичного машинобудування і що поставляються блоками. При спалюванні природного газу і промислових газів, що не містять сірки, допускається встановлювати сталеві водяні економайзери.

При спалюванні в котлах тих же параметрів високовологого бурого вугілля, деревинних відходів і торфу рекомендується встановлювати рекуперативні трубчасті повітропідігрівачі.

Розрахунок теплообміну виконується для кожного виду конвективної поверхні нагріву, а при двоступінчатій компоновці - для кожної ступені.

Залежно від поставленої задачі розрахунок теплообміну в елементах низькотемпературних поверхонь нагріву може бути здійснений перевірочним або конструкторським методами. У першому випадку за вихідне приймають геометричні характеристики і значення площі поверхні нагріву, що розраховується. Розрахунком встановлюють параметри теплообмінних середовищ на вході в поверхню нагріву і на виході з неї, визначають кількість переданої теплоти. При конструкторському розрахунку за вихідне приймають кількість теплоти, яка має бути передана від одного середовища до іншого, а розрахунком встановлюють необхідну для цього площу поверхні нагріву.

Викладені далі рекомендації надані стосовно перевірочного методу розрахунку як найбільш вірогідному для використання в практичній діяльності інженера, що займається експлуатацією обладнання.

3.1 Конструкції водяних економайзерів

3.1.1 Економайзери котлів середніх параметрів

Водяні економайзери котлів середніх параметрів виконуються зі сталевих труб із зовнішнім діаметром в межах (28...38) мм і товщиною стінок (3...3,5) мм, що згинаються в пласкі або просторові змійовики. Радіус вигину труб Ø 28 мм приймають 50 мм, а труб Ø 38 мм - 60 мм. Кінці змійовиків приварюють в отворах вхідного, що роздає, і вихідного, що збирає, колекторів, а самі змійовики закріплюють на стійках. Після збірки змійовики утворюють монтажний блок економайзера.

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики блочних водяних економайзерів (БВЕС)

Параметр	Тип економайзера				
	БВЕС-I-2	БВЕС-II-2	БВЕС-III-2	БВЕС-IV-1	БВЕС-V-1
Кількість колонок	2	2	2	1	1
Зовнішній діаметр і товщина стінок труб змійовиків, мм	28x3	28x3	28x3	28x3	28x3
Розташування труб	Коридорне	Коридорне	Коридорне	Коридорне	Коридорне
Крок труб, мм:					
впоперек потоку, S_1	70	70	70	70	70
по ходу газів, S_2	50	50	50	50	50
Кількість змійовиків в одній колонці	3	6	9	12	21
Площа поверхні нагріву економайзера, m^2	28	57	85	113	239
Площа живого перетину, m^2 :					
для проходу газів F	0,239	0,492	0,743	0,932	1,710
для проходу води $f \cdot 10^2$	0,228	0,456	0,684	0,912	1,590
Тип котельного агрегату, за яким встановлюється економайзер	ДКВР-2,5	ДКВР-4	ДКВР-6,5	ДКВР-10	ДКВР-20

При монтажі змійовиків в блок сусідні змійовики (всі парні або непарні) зміщують у напрямі потоку газів на величину радіусу вигину. В результаті утворюється поверхня з шаховим розташуванням труб. Прикладом може служити блок другої ступені водяного економайзера котла Б-50-40, показаного на рисунку 3.1.

В котлах продуктивністю понад 20 кг/с (більше 75 т/год) економайзери виконуються двопотоковими (рис. 3.2).

Сталеві економайзери котлів ДКВР випускають блоками, не зв'язаними з конструкціями котла. В потік продуктів згоряння вони включаються коробом, що сполучає вихідне вікно котла і вхід економайзера. Для всіх котлів економайзери виготовляються з труб із зовнішнім діаметром 28 мм і товщиною стінки 3 мм. Радіус вигину труб 50 мм. Дві заготовки зварюють в єдиний плаский змійовик з двома паралельними потоками води. В огорожуючих поверхнях економайзера змійовики розміщуються так, що утворюють дві колонки або одну. Геометричні розміри змійовиків при двох- і одноколонковій компоновках показані на рисунках 3.3 і 3.4. Інші дані про економайзери наведені в таблиці 3.1.

3.1.2 Економайзери з чавунних труб

Економайзери з чавунних ребристих труб встановлюються в котлах (точніше за котлами) низьких параметрів (до 2,5 МПа).

Для котлів типа ДКВР вони виготовляються у вигляді транспортабельних блоків, що доставляються до місця монтажу як самостійний вид постачань. Економайзери котельних агрегатів вмонтовуються як складові частини котлів.

Випускають сім типорозмірів живильних економайзерів. Їх технічні характеристики надані в таблиці 3.2.

Основа конструкції економайзерів - литі чавунні труби з ребрами на зовнішній поверхні і квадратними фланцями на кінцях. В єдину конструкцію вони вмонтовуються на металевому каркасі із швелерів. Кінці труб з'єднуються литими відведеннями з фланцями. В результаті забезпечується рух води через економайзери за схемами, зображеними на рисунку 3.5.

Чавунні економайзери котлів вмонтовуються за аналогічним принципом. Труби завдовжки 3000 мм збираються в транспортабельні

блоки, що встановлені з розривом 650 мм для розміщення обдувальних апаратів.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики чавунних економайзерів для котлів ДКВР

Параметр	Тип економайзера						
	ЕП-2-94	ЕП-2-142	ЕП-2-236	ЕП-1-236	ЕП-1-330	ЕП-1-646	ЕП-1-808
Кількість колонок	2	2	2	1	1	1	1
Діаметр труб зовнішній і товщина стінки, мм	76x8	76x8	76x8	76x8	76x8	76x8	76x8
Довжина труб, мм	2000	2000	2000	2000	2000	3000	3000
Кількість труб в ряду колонки	2	3	5	5	7	9	9
Кількість рядів труб	16	16	16	16	16	16	20
Площа поверхні нагріву економайзера, м ²	94	142	236	236	330	646	808
Площа живого перетину, м ² :							
для проходу газів	0,24	0,36	0,60	0,60	0,84	1,08	2,4
для проходу води	$0,28 \cdot 10^{-2}$	$0,28 \cdot 10^{-2}$	$0,28 \cdot 10^{-2}$	$0,28 \cdot 10^{-2}$	$0,57 \cdot 10^{-2}$	$0,85 \cdot 10^{-2}$	$0,85 \cdot 10^{-2}$
Кількість підводів води до економайзера	1	1	1	1	2	3	3
Тип котельного агрегату, за яким встановлюється економайзер	ДКВР-2,5	ДКВР-4	ДКВР-6,5	ДКВР-6,5	ДКВР-10	ДКВР-20	ДКВР-20
Паливо, на якому працює котельний агрегат	Газ, мазут, тверде паливо	Газ, мазут, тверде паливо	Газ, мазут, тверде паливо	Тверде паливо	Газ, мазут, тверде паливо	Тверде паливо	Газ, мазут, тверде паливо

3.2 Конструкції повітропідігрівачів

Повітропідігрівачі промислових котельних установок виготовляються із сталевих труб із зовнішнім діаметром 40 мм і товщиною стінок 1,5 мм. Кінці труб приварюються в отворах трубних дощок, що обмежують розмір повітропідігрівача по висоті. Продукти згоряння протікають усередині труб, повітря омиває труби ззовні.

В котлах паропродуктивністю до 10 кг/с повітропідігрівачі виконуються у вигляді одного-двох монтажних блоків без ділення на секції. В котлах більшої продуктивності кожна ступень складається з чотирьох - шести секцій, що представляють окремі монтажні блоки.

Розташування труб в секціях шахове. Поперечний крок більшості котлів (56...60) мм, поздовжній (42...44) мм. Декілька більші кроки в котлах БКЗ-75-39 ФБ і подібних до нього Е-75-40 і БКЗ-75-39 ГМА (відповідно 70 мм і 45 мм).

Повітропідігрівачі, що змонтовані із чавунних ребристозубчастих труб, не знайшли широкого вживання, тому їх конструкції тут не розглядаються. Крім того, не розглядаються регенеративні повітропідігрівачі, які не використовуються в котельних установках промислових підприємств.

3.3 Теплообмін в економайзерах

Вихідні дані до розрахунків теплообміну в економайзері, як і місце цих розрахунків в розрахунках теплообміну в котлі, залежать від прийнятої компоновки хвостових поверхонь нагріву. При одноступінчатій компоновці розрахунок теплообміну в економайзері може бути виконаний після розрахунку теплообміну в пароперегрівачі. В цьому випадку відомі температура і ентальпія продуктів згоряння перед економайзером, температура і ентальпія води на вході в економайзер. З балансу теплоти в котлі визначають кількість теплоти, сприйнятою водою в економайзері, потім знаходять ентальпію і температуру води на виході з економайзера. З балансу теплоти в економайзері визначають ентальпію і температуру продуктів згоряння на виході з економайзера.

Всі подальші розрахунки виконують для визначення площі поверхні нагріву, яка забезпечить передачу розрахункової кількості теплоти.

Розрахунок теплообміну в економайзерах котлів ДКВР простіший. З розрахунку теплообміну в котельному пучку відомі температура і ентальпія продуктів згоряння при вході в економайзер, а також ентальпія і температура відхідних газів, температура і ентальпія води на вході в економайзер. З балансу теплоти визначають ентальпію і температуру води на виході з економайзера. Після цього розраховують температурний напір, коефіцієнт теплопередачі і по рівнянню теплопередачі визначають необхідну площу поверхні нагріву.

При двоступінчатій компоновці низькотемпературних поверхонь нагріву після розрахунку теплообміну в пароперегрівачі розрахунки доцільно продовжувати, починаючи з першої ступені повітропідігрівача, переходячи потім до першої ступені водяного економайзера, другої ступені повітропідігрівача і закінчуючи розрахунок другою ступенню водяного економайзера. У цьому випадку уточнення площі поверхні нагріву обмежується лише другою ступенню економайзера.

3.4 Послідовність виконання розрахунків теплообміну в економайзері при одноступінчатій компоновці

На початку розрахунку наводять усі дані про розміри газоходу і геометричні характеристики поверхні нагріву. Послідовність записів може бути такою.

3.4.1 Приймають ширину газоходу для розміщення поверхні нагріву, м

$$a =$$

(По кресленнях заводу-виробника).

3.4.2 Приймають глибину газоходу (відстань між передньою і задньою стінками), м

$$b =$$

(По кресленнях заводу-виробника).

3.4.3 Приймають діаметр труб проектного економайзера і товщину стінок, мм

$$dxs =$$

[1, с.75, п.18].

3.4.4 Приймають відстань між сусідніми змійовиками, мм /3.1

$$m =$$

3.4.5 Підраховують поперечний крок, мм

$$s_1 = 2 m$$

3.4.6 Підраховують відносний поперечний крок

$$s_1/d =$$

3.4.7 Приймають радіус вигину труб в змійовиках, мм ^{/3.2}

$$r =$$

3.4.8 Знаходять поздовжній крок, мм

$$s_2 = r =$$

3.4.9 Визначають відносний поздовжній крок

$$s_2/d =$$

3.4.10 Підраховують кількість змійовиків, розміщених в газоході, шт.

$$z =$$

3.4.11 Вказують прийняте число прямолінійних ділянок в одному змійовику, шт.

$$n =$$

3.4.12 Підраховують довжину змійовика в межах обігріву, м ^{/3.3}

$$l_{зм} =$$

3.4.13 Визначають площу поверхні економайзера, м²

$$H_{ек} =$$

3.4.14 Знаходять площу живого перетину газоходу для проходу газів, м²

$$F_{ек} =$$

[1, с.38, п. 7-17].

3.4.15 Підраховують площу живого перетину для проходу води в економайзері, м²

$$f_{ек} =$$

[1, с38, п. 7- 17]

3.4.16 Підраховують тиск живильної води на вході в економайзер, МПа ^{/3.4}

$$P'_{ек} =$$

[1, с.75, п.23].

3.4.17 Виписують температуру живильної води, °С

$$t_{ж.в} =$$

(З завдання на проектування).

3.4.18 Знаходять ентальпію живильної води, кДж/кг

$$i_{ж.в} =$$

[5, таблиця III].

3.4.19 Вказують ентальпію, отриману водою в регуляторі перегріву, кДж/кг

$$\Delta i_{п.о} =$$

(3 розрахунку теплообміну в пароперегрівачі).

3.4.20 Підраховують витрату води на продування, кг/с

$$D_{пр} =$$

[2, с.60; 4, с.18, (3-15)].

3.4.21 Підраховують витрату води через економайзер, кг/с

$$D_{ек} =$$

[1, с.59, п. 8-41; 4, с.62, (9-5)].

3.4.22 Визначають ентальпію води на вході в економайзер кДж/кг, $/^{3.10}$

$$i'_{ек} =$$

[1, с.59, п. 8-41; 2, с.130, (10-60), 4, с.62, (9-6)].

3.4.23 Підраховують температуру води на вході в економайзер, °C

$$t'_{ек} =$$

[5, таблиця III].

3.4.24 Визначають кількість теплоти, що віддається в економайзері, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{ек.б} =$$

[1, с.59, п. 8-40; 2, с.129, (10-57)].

3.4.25 Підраховують ентальпію води на виході з економайзера, кДж/кг

$$i''_{ек} =$$

[2, с. 130, (10-59), (10-60); 4, с.62, (9-4)].

3.4.26 Вказують тиск води на виході з економайзера, МПа $/^{3.5}$

$$P''_{ек} =$$

3.4.27 Знаходять ентальпію, відповідну насиченню при тиску води на виході з економайзера, кДж/кг

$$(i_n)''_{ек} =$$

[5, таблиця I-II].

3.4.28 Визначають температуру води на виході з економайзера, °C $/^{3.6}$

$$t''_{ек} =$$

[5, таблиця III].

3.4.29 Вибирають коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi =$$

[1, с.21, п. 5-10; 2, с.62, (8-11) 4, с.18].

3.4.30 Виписують ентальпію холодного повітря, МДж/кг (МДж/м³)

$$I_{\text{х.п}}^{\circ} =$$

[6, таблиця 1.2].

3.4.31 Виписують присос повітря в газохід поверхні, що розраховується

$$\Delta \alpha_{\text{в.с}} =$$

[6,таблиця 1.1].

3.4.32 Підраховують ентальпію продуктів згоряння на виході з економайзера, МДж/кг (МДж/м³)

$$I''_{\text{ек}} =$$

[1, с.35, п. 7-02; 2, с.129, (10-58); 4, с.38, (6-1)].

3.4.33 Знаходять температуру продуктів згоряння на виході з економайзера, °C

$$\vartheta''_{\text{ек}} =$$

[6,таблиця 1.2].

3.4.34 Підраховують різницю температур гріючого і обігріваемого середовищ на вході газів в економайзер і на виході з нього, °C

$$\Delta t'_{\text{ек}} =$$

$$\Delta t''_{\text{ек}} =$$

3.4.35 Визначають температурний напір в поверхні нагріву економайзера, °C

$$\Delta t_{\text{ек}} =$$

[1, с.49-50, пп. 7-60, 7-63; 2, с.107, (9-63); 4, с.49, (6-37)].

3.4.36 Підраховують середню температуру продуктів згоряння, °C

$$\vartheta_{\text{ек}} =$$

[1, с.39, п. 7- 18; 2, с.81, (9-14)].

3.4.37 Знаходять середню швидкість продуктів згоряння, м/с

$$w_{\text{ек}} =$$

[1, с.38, п. 7-16; 2, с.81, (9-14); 4, с.44, (6-16), с. 45, (6-17)].

3.4.38 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{к.ек}} =$$

[1, с.39, п. 7-21; 2, с.83, (9-26), рис. 9-5; 4, с.42, (6-14), рис. 6-5].

3.4.39. Підраховують середню температуру води, °C

$$t_{\text{ек}} =$$

3.4.40 Визначають температуру забруднень на зовнішній поверхні труб, °C

$$t_3 =$$

[1, с.44, п. 7-36; 2, с.100, (9-56); 4, с.48, (6-34)].

3.4.41 Виписують об'ємну долю водяної пари і трьохатомних газів

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = \quad r_{\text{RO}_2} =$$

[6, таблиця 1.1]

3.4.42 Підраховують парціальний тиск трьохатомних газів і водяної пари, МПа

$$P_{\text{п}} =$$

[1, с.25, п.6-07; 2, с.65, прим. до (8-22); 4, с.31].

3.4.43 Визначають товщину випромінюючого шару газів в міжтрубному просторі, м

$$s =$$

[1, с.43, п. 7-35; 2, с.99, (9-53); 4, с.48, (6-33)].

3.4.44 Підраховують оптичну щільність випромінюючого газового об'єму ^{/3.7}

$$\tau_{\text{г.ек}} =$$

[1, с.25, п. 6-07; 2, с.97, (9-50); 4, с.31, (5-26)].

3.4.45 Підраховують оптичну щільність часток золи в потоці газів ^{/3.8}

$$\tau_{\text{зл.ек}} =$$

[1, с.25, п. 6-08; 2, с.97, (9-51); 4, с.31, (5-27)].

3.4.46 Підраховують міру чорноти газового потоку

$$a =$$

[1, с.43, п. 7-32; 2, с.97, (9-48); 4, с.30, (5-22)].

3.4.47 Знаходять коефіцієнт тепловіддачі газів випромінюванням в міжтрубному просторі, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{д}} =$$

[1, с.43, п. 7-31; 2, с.97, (9-46); 4, с.47, (6-28)].

3.4.48 Приймають коефіцієнт, що враховує випромінювання газів з об'єму перед економайзером

$$A =$$

[1, с.44, п. 7-37; 2, с.102; 4, с.49].

3.4.49 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням з урахуванням випромінювання газів з об'єму перед економайзером, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$$\alpha'_{\text{л}} =$$

[1, с.44, п. 7-37; 2, с.102, (9-60); 4, с.49, (6-36)].

3.4.50 Визначають коефіцієнт забруднення поверхні нагріву, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ /3.9

$$\varepsilon =$$

[1, с.47, п. 7-52; 2, с.103, (9-61); 4, с.48].

3.4.51 Підраховують коефіцієнт теплопередачі в поверхні нагріву економайзера, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$$K_{\text{ек}} =$$

[1, с.37, пп. 7-10, 7-11; 2, с.19; 4, с.39, (6-7)].

3.4.52 Визначають кількість теплоти, яка може бути передана в поверхні економайзера за умовами теплопередачі, $\text{МДж}/\text{кг}$ ($\text{МДж}/\text{м}^3$)

$$Q_{\text{ек.т}} =$$

[1, с.35, п. 7-01; 2, с.78, (9-1); 4, с.38, (6-2)].

Отримана величина порівнюється із значенням теплоти, визначеної балансом, %

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{ек.б}} - Q_{\text{ек.т}}}{Q_{\text{ек.б}}} \cdot 100$$

Ця величина не має бути більше 2 %.

Якщо розбіжність перевищує вказану величину, необхідно змінити площу поверхні нагріву. При $Q_{\text{ек.т}} > Q_{\text{ек.б}}$ її необхідно зменшити. Це можливо за рахунок зменшення петель у всіх змійовиках або зменшення числа змійовиків. При цьому швидкість продуктів згоряння в економайзері не повинна значно відрізнятись від значень, що рекомендуються [1, с.73, п. 3]. При $Q_{\text{ек.т}} < Q_{\text{ек.б}}$ необхідно збільшити площу поверхні.

3.5 Розрахунок теплообміну в економайзері при двоступінчатій компоновці низькотемпературних поверхонь нагріву

При двоступінчатій компоновці розрахунок теплообміну в економайзері починають з першої його ступені після компоновки і розрахунку повітропідігрівача. В тексті розрахункової записки

наводять дані про геометричні характеристики поверхні нагріву ступені в послідовності, викладений в пп. (3.4.1...3.4.15).

Якщо розрахунок ведеться стосовно економайзера котла, в якому встановлений регулятор перегріву пари поверхневого типа (пароохолоджувач), і вода повертається на вхід економайзера, виклад продовжують в послідовності пп.(3.4.16...3.4.23). Подальші розрахунки можливі по двох варіантах.

Перший варіант. Розрахунок теплообміну в економайзері передують закінчені розрахунки теплообміну в першій і другій ступенях повітропідігрівача. В цьому випадку з розрахунку теплообміну в першій ступені повітропідігрівача відомі температура і ентальпія продуктів згорання на виході з першої ступені економайзера. З розрахунку другої ступені повітропідігрівача відомі ті ж параметри на вході в ступень. По їх різниці визначається кількість теплоти, що передається в економайзері. Запис в тексті розрахунків продовжують в такій послідовності.

3.5.1 Виписують значення температури продуктів згорання на вході в ступень, °C

$$\vartheta'_{\text{Iст.ек}} =$$

(З розрахунку другої ступені повітропідігрівача).

3.5.2 Виписують ентальпію продуктів згорання, відповідну цій температурі, МДж/кг (МДж/м³)

$$I_{\text{Iст.ек}} =$$

(З розрахунку другої ступені повітропідігрівача).

3.5.3 Виписують температуру продуктів згорання на виході з ступені, що розраховується, °C

$$\vartheta''_{\text{Iст.ек}} =$$

(З розрахунку першої ступені повітропідігрівача).

3.5.4 Виписують ентальпію продуктів згорання, відповідну цій температурі, МДж/кг (МДж/м³)

$$I''_{\text{Iст.ек}} =$$

(З розрахунку першої ступені повітропідігрівача).

3.5.5 Виписують коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi =$$

[1, с.21, п. 5-10; 2, с.62, (8-11); 4, с.18].

3.5.6 Виписують величину присоса повітря в газохід

$$\Delta\alpha_{\text{Iст.ек}} =$$

[6, таблиця 1.1].

3.5.7 Випишують ентальпію повітря при температурі 30°C, МДж/кг (МДж/м³)

$$I_{x,п}^o =$$

[6, таблиця 1.2].

3.5.8 Підраховують кількість теплоти, відданої продуктами згоряння в газоході першої ступені економайзера, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{Iст.ек.б} =$$

[1, с.35, п. 7-02; 2, с.131,(10-67); 4, с.38].

3.5.9 Підраховують ентальпію води на виході з першої ступені економайзера, кДж/кг

$$i''_{Iст.ек} =$$

[1, с.35, п. 7-03; 2, с.130, (10-59); 4, с.62, (9-4)].

3.5.10 Визначають тиск води на виході з ступені, що розраховується, МПа /^{3.11}

$$P''_{Iст.ек} =$$

3.5.11 Знаходять температуру води на виході з ступені, °C

$$t''_{Iст.ек} =$$

[5, таблиця III].

3.5.12 Знаходять температуру насичення при тиску на виході з економайзера, °C

$$(t_n)''_{Iст.ек} =$$

[5, таблиця I-II].

3.5.13 Визначають недогрівання води до кипіння в ступені, що розраховується, °C

$$\Delta t_{нед} = (t_n)''_{Iст.ек} - t''_{Iст.ек} =$$

Недогрів більше 40°C [I] гарантує відсутність вскипання при перепусканні води в другу ступень. Подальші розрахунки проводяться в послідовності пп. (3.4.34...3.4.52) попереднього підрозділу, тобто починаються з визначення температурних напорів на кінцях поверхні і закінчуються розрахунком кількості теплоти, що забезпечується теплопередачею.

Якщо недогрів виявиться менше 40°C, необхідно понизити температуру продуктів згоряння перед ступеню, що розраховується, і повторити розрахунок.

Після визначення кількості теплоти, забезпеченої теплопередачею, її зіставляють із значенням теплоти, визначеної балансом. При цьому розбіжність, %

$$\Delta Q = \frac{Q_{I_{\text{ст.ек.б}}} - Q_{I_{\text{ст.ек.т}}}}{Q_{I_{\text{ст.ек.б}}}} \cdot 100$$

не повинна перевищувати 2% [1]. Якщо розбіжність більше вказаної величини, необхідно уточнити виконаний розрахунок.

При конструкторському розрахунку уточнення здійснюють зміною площі поверхні нагріву, збільшуючи або зменшуючи її значення в залежності від співвідношення $Q_{I_{\text{ст.ек.б}}}$ і $Q_{I_{\text{ст.ек.т}}}$. При повірочному розрахунку уточнення здійснюють зміною температури продуктів згоряння або на вході в поверхню нагріву, що розраховується, або на виході з неї. Після цього необхідно уточнити розрахунок повітропідігрівача.

Другий варіант. Розрахунку теплообміну в першій ступені економайзера передує розрахунок першої ступені повітропідігрівача. Як і в першому варіанті, розрахунок ведуть в послідовності пп. (3.4.16...3.4.23) аж до визначення ентальпії і температури води на вході в економайзер. Подальша послідовність розрахунків така.

3.5.14 Підраховують тиск води на виході з першої ступені економайзера, МПа

$$P''_{I_{\text{ст.ек}}} =$$

3.5.15 Знаходять температуру насичення при цьому тиску, °С

$$(t_n)''_{I_{\text{ст.ек}}} =$$

[5, таблиця I-II].

3.5.16 Приймають величину недогріву води до кипіння, °С

$$\Delta t_{\text{нед}} =$$

[1, с.75, п.21; 2, с.131].

3.5.17 Визначають температуру води на виході з ступені економайзера, що розраховується, °С ^{/3.12}

$$t''_{I_{\text{ст.ек}}} =$$

3.5.18 Підраховують ентальпію води на виході з ступені, кДж/кг

$$i''_{I_{\text{ст.ек}}} =$$

[5, таблиця III].

3.5.19 Підраховують кількість теплоти, що сприймається в першій ступені водяного економайзера, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{I_{\text{ст.ек.б}}} =$$

[1, с.35, п.7-03; 4, с.62, (9-4)] .

3.5.20 Виписують значення температури продуктів згоряння на виході з ступені, °C

$$\vartheta''_{\text{Іст.ек}} =$$

(3 розрахунку першої ступені повітропідігрівача).

3.5.21 Виписують ентальпію продуктів згоряння при цій температурі, МДж/кг (МДж/м³)

$$I''_{\text{Іст.ек}} =$$

(3 розрахунку першої ступені повітропідігрівача).

3.5.22 Виписують коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi =$$

[1, с.21, п. 5-10; 2, с.62, (8-11); 4, с.18].

3.5.23 Вказують ентальпію холодного повітря, МДж/кг (МДж/м³)

$$I^o_{\text{х.п}} =$$

[6, таблиця 1.2]

3.5.24 Вказують присос повітря в газоході, що розраховується

$$\Delta a_{\text{Іст.ек}} =$$

[6, таблиця 1.1]

3.5.25 Розраховують ентальпію продуктів згоряння на вході в ступень економайзера, що розраховується, МДж/кг (МДж/м³)

$$I_{\text{Іст.ек}} =$$

[1, с.35, п.7-02; 2, с.129, (10-58); 4, с.38,(6-1)].

3.5.26 Знаходять температуру продуктів згоряння на вході в ступень, °C

$$\vartheta'_{\text{Іст.ек}} =$$

[6,таблиця 1.2]

Подальші підрахунки викладають в послідовності, вказаній в підрозділі 3.4, починаючи з п.3.4.34 (розрахунок температурних напорів).

Закінченням розрахунку буде визначення кількості теплоти, що забезпечується теплопередачею ($Q_{\text{Іст.ек.т}}$). Вона порівнюється з кількістю теплоти, розрахованої по різниці ентальпій ($Q_{\text{Іст.ек.б}}$). Якщо розбіжність виявиться більше допустимої, уточнюють ентальпію продуктів згоряння на вході в поверхню нагріву. При конструкторському розрахунку зменшення різниці між $Q_{\text{Іст.ек.б}}$ і $Q_{\text{Іст.ек.т}}$ можна за рахунок зміни площі поверхні нагріву.

3.6 Розрахунок теплообміну в другій ступені водяного економайзера

Розрахунок теплообміну в другій ступені економайзера при двоступінчатій компоновці поверхонь нагріву в опускному газоході котла мало чим відрізняється від приведеного в підрозділі 3.4.

3.6.1 Виписують значення температури продуктів згоряння на вході в ступень, що розраховується, °C

$$\vartheta'_{\text{Пст.ек}} =$$

(3 розрахунку пароперегрівача).

3.6.2 Виписують ентальпію продуктів згоряння на вході в ступень, МДж/кг (МДж/м³)

$$I'_{\text{Пст.ек}} =$$

(3 розрахунку пароперегрівача).

3.6.3 Вказують температуру продуктів згоряння на виході з ступені, °C

$$\vartheta''_{\text{Пст.ек}} =$$

(3 розрахунку другої ступені повітропідігрівача).

3.6.4 Виписують ентальпію продуктів згоряння на виході з ступені, МДж/кг (МДж/м³)

$$I''_{\text{Пст.ек}} =$$

(3 розрахунку другої ступені повітропідігрівача).

3.6.5 Розраховують коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi =$$

[1, с.21, п. 5-10; 2, с.52, (8-11); 4, с.18].

3.6.6 Вказують ентальпію холодного повітря, МДж/кг (МДж/м³)

$$I^0_{\text{х.п}} =$$

[6, таблиця 1.2]

3.6.7 Вказують величину присоса повітря в газоході, що розраховується

$$\Delta\alpha_{\text{Пст.ек}} =$$

[6, таблиця 1.1]

3.6.8 Розраховують кількість теплоти, що віддається газами в ступені, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{\text{Пст.ек.б}} =$$

[1, с.35, п. 7-02; 2, с. 131, (10-68); 4, с.38, (6-1)].

3.6.9 Виписують значення температури води на вході в ступень, що розраховується, °C

$$t''_{\text{Пст.ек}} =$$

(З розрахунку першої ступені економайзера).

3.6.10 Випишують ентальпію води на вході в ступень, кДж/кг

$$i''_{\text{Пст.ек}} =$$

(З розрахунку першої ступені водяного економайзера).

3.6.11 Вказують витрату води через економайзер, кг/с

$$D_{\text{ек}} =$$

(З розрахунку першої ступені економайзера).

3.6.12 Розраховують ентальпію води на виході з економайзера, кДж/кг

$$i''_{\text{Пст.ек}} =$$

[1, с.35, п.7-03; 2, с.130, (10-59); 4, с.62, (9-4)].

3.6.13 Вказують тиск води на виході з ступені економайзера, що розраховується, МПа ^{/3.5}

$$P''_{\text{Пст.ек}} =$$

3.6.14 Визначають ентальпію насичення при цьому тиску, кДж/кг

$$(i_{\text{н}})''_{\text{Пст.ек}} =$$

[5, таблиця I-II].

3.6.15 Порівнюють числові значення ентальпій $i''_{\text{Пст.ек}}$ і $(i_{\text{н}})''_{\text{Пст.ек}}$.

Вони визначають порядок записів наступних декількох пунктів.

Так, якщо $i''_{\text{Пст.ек}} < (i_{\text{н}})''_{\text{Пст.ек}}$, то по ентальпії $i''_{\text{Пст.ек}}$ і тиску $P''_{\text{Пст.ек}}$ визначають температуру води на виході з ступені економайзера, що розраховується, °C

$$t''_{\text{Пст.ек}} =$$

[5, таблиця III].

Якщо $i''_{\text{Пст.ек}} > (i_{\text{н}})''_{\text{Пст.ек}}$, то знаходять зміну ентальпії за рахунок паротворення, кДж/кг

$$\Delta i_{\text{п}} =$$

[1, с.52, п. 7-73; 2, с.112, (9-74)].

3.6.16 Підраховують умовну температуру води на виході з економайзера, °C ^{/3.13}

$$t_{\text{ум}} =$$

[1, с.52, п. 7-73; 2, с.112, (9-74); 4, с.52, (6-40)].

Подальший розрахунок виконують в послідовності пп.(3.4.34...3.4.52) підрозділу 3.4, тобто починаючи з визначення температурного напору і закінчуючи визначенням теплоти $Q_{\text{Пст.ек.т}}$, що забезпечується теплопередачею. При порівнянні з кількістю теплоти,

підрахованою по різниці ентальпій продуктів згоряння $Q_{\text{Пст.ек.б}}$, розбіжність не повинна перевищувати 2%. При більшій розбіжності необхідно змінити прийняту в розрахунку площу поверхні нагріву: збільшити, якщо $Q_{\text{Пст.ек.т}} < Q_{\text{Пст.ек.б}}$, і зменшити, якщо $Q_{\text{Пст.ек.т}} > Q_{\text{Пст.ек.б}}$.

3.7 Розрахунок теплообміну в сталевих блочних економайзерах

Сталеві блочні економайзери встановлюються за котлами типа ДКВР. Вони є останньою поверхнею на шляху руху продуктів згоряння. Площа поверхні економайзера, прийнятого до установки, не може бути змінена. Задачею розрахунку, отже, може бути уточнення температури продуктів згоряння на виході з економайзера (температури відхідних газів).

Вихідними в розрахунках є значення температури і ентальпії продуктів згоряння на вході в економайзер (з розрахунку теплообміну в котельному пучку) і на виході з нього (відхідних газів). Відомі також температура і ентальпія води на вході в економайзер, витрата води через економайзер. З балансу теплоти в економайзері визначається ентальпія і температура води на виході з економайзера, після чого розрахунок ведеться за схемою розрахунку одноступінчатого водяного економайзера.

Середня температура газового потоку в економайзерах за котлами ДКВР не перевищує 300 °С. Випромінювання газів при таких температурах невелике і його допустимо не враховувати [4, с.47-48].

Розрахунки рекомендується виконувати в такій послідовності.

3.7.1 Вказують тип економайзера, прийнятого до установки (по таблиці 3.1)

3.7.2 Вказують ширину газоходу мм, $/^{3.14}$

$a =$

3.7.3 Глибина газоходу, мм

$b =$

[4, с.165, рис. IV-12].

3.7.4 Вказують число змійовиків, встановлених в економайзері (в двоколонкових економайзерах число змійовиків в одній колонці), шт.

$z =$

(По кресленнях заводу-виробника, [4, с.165, рис. IV-12]).

3.7.5 Вказують число прямолінійних ділянок в одному змійовику, шт.

$$n =$$

(По кресленнях заводу - виробника).

3.7.6 Вказують довжину прямолінійних ділянок, мм

$$l =$$

(По кресленнях заводу – виробника).

3.7.7 Вказують діаметр труб (зовнішній) і товщину стінок, мм

$$d_{xs} =$$

(По таблиці 3.1).

3.7.8 Вказують поперечний крок труб, мм

$$s_1 =$$

3.7.9 Розраховують відносний поперечний крок

$$s_1/d =$$

3.7.10 Вказують радіус вигину труби в змійовиках, мм

$$r =$$

(По кресленнях заводу – виробника).

3.7.11 Вказують поздовжній крок труб, мм/^{3.15}

$$s_2 =$$

3.7.12 Підраховують відносний поздовжній крок

$$s_2/d =$$

3.7.13 Підраховують площу поверхні нагріву економайзера, м²

$$H_{ек} =$$

3.7.14 Визначають площу живого перетину газоходу, м²

$$F_{ек} =$$

3.7.15 Підраховують площу живого перетину для проходу води в економайзері, м²

$$f_{ек} =$$

3.7.16 Вказують температуру, °С, і ентальпію продуктів згоряння на вході в економайзер, МДж/кг (МДж/м³)

$$\vartheta'_{ек} = I_{ек} =$$

(З розрахунку теплообміну в котельному пучку).

3.7.17 Вказують температуру відхідних газів, °С

$$\vartheta_{відх} =$$

(З завдання на проектування).

3.7.18 Знаходять ентальпію продуктів згоряння на виході з економайзера (відхідних газів), МДж/кг (МДж/м³)

$$I_{відх} =$$

[6, таблиця 1.2].

3.7.19 Наводять значення коефіцієнта збереження теплоти

$$\varphi =$$

(За попередніми розрахунками або по [1, с.21, п. 5-10]).

3.7.20 Вказують долю повітря, що становить присос в газоході

$$\Delta\alpha_{ек} =$$

[6, таблиця 1.1].

3.7.21 Виписують значення ентальпії холодного повітря при температурі 30°C, МДж/кг (МДж/м³)

$$I_{х.п}^0 =$$

[6, таблиця 1.2].

3.7.22 Визначають кількість теплоти, що віддається газами воді, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{ек.б} =$$

[1, с. 35, п.7-02; 4, с. 62,(9-4)].

3.7.23 Розраховують тиск живильної води на вході в економайзер, МПа

$$p'_{ек} =$$

3.7.24 Вказують температуру живильної води, °С

$$t_{ж.в} =$$

(З завдання на проектування).

3.7.25 Знаходять ентальпію води на вході в економайзер, кДж/кг

$$i'_{ек} =$$

[5, таблиця III].

3.7.26 Розраховують витрату води на продування, кг/с

$$D_{пр} =$$

[2, с.60; 4, с.18, (3-15)].

3.7.27 Визначають витрату води через економайзер, кг/с

$$D_{ек} =$$

[1, с.59, п.8-41; 4, с.62, (9-5)].

3.7.28 Розраховують ентальпію води на виході з економайзера, кДж/кг

$$i''_{ек} =$$

[1, с.35, п. 7-03; 2, с.130, (10-59); 4, с.62, (9-4)].

3.7.29 Знаходять температуру води на виході з економайзера, °С

$$t''_{ек} =$$

[5, таблиця III].

3.7.30 Визначають різницю температур теплообмінних середовищ на вході в економайзер і на виході з нього, °C

$$\Delta t'_{\text{ек}} =$$

$$\Delta t''_{\text{ек}} =$$

3.7.31 Підраховують температурний напір в поверхні нагріву, °C

$$\Delta t_{\text{ек}} =$$

[1, с.49-50, пп. 7-60, 7-63; 2, с. 107, (9-63); 4, с.49, 6-37].

3.7.32 Знаходять середню температуру продуктів згоряння, °C

$$\vartheta_{\text{ек}} =$$

[1, с.39, п. 7.18; 2, с.81, (9-14)].

3.7.33 Визначають середню швидкість продуктів згоряння, м/с

$$w_{\text{ек}} =$$

[1, с.38, п.7-16; 2, с.81, (9-14), 4, с.44,(6-16)].

3.7.34 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки, Вт/(м²·K)

$$\alpha_{\text{к,ек}} =$$

[1, с.39, п. 7-21; 2, с.83 (9-26), рис.9-5; 4, с.42, (6-14), рис. 6-5].

3.7.35 Вказують величину коефіцієнта використання поверхні

$$\zeta =$$

[1, с.37, п. 7-07; 2, с.80; 4, с.41,(6-13)].

3.7.36 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки, Вт/(м²·K)

$$\alpha_{1\text{ек}} =$$

[1, с.37, п. 7-07; 2, с.80; 4, с.41,(6-13)].

3.7.37 Знаходять коефіцієнт теплової ефективності

$$\psi =$$

[1, с.47, п.7-53, с.48, пп.7-54, 7-55; 2, с.105-106; 4, с.40, табл. 6-2].

3.7.38 Розраховують коефіцієнт теплопередачі в економайзері, Вт/(м²·K)

$$k_{\text{ек}} =$$

[1, с.37, пп.7-10, 7-11; 2, с.79, (9-7); 4, с.39,(6-7)].

3.7.39 Розраховують кількість теплоти, яка може бути передана в поверхні економайзера, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{\text{ек.м}} =$$

[1, с.35, п.7-01; 2, с.78, (9-1); 4, с.38, (6-2)].

3.7.40 Порівнюють набуте значення із значенням теплоти, розрахованої по різниці ентальпія, $Q_{\text{ек.б}}$ (п.3.7.22).

Якщо різниця $Q_{ек.б}$ і $Q_{ек.т}$ менше 2%, розрахунок закінчують. Якщо більше 2 %, зменшують значення температури і ентальпії на виході з економайзера (якщо $Q_{ек.т} > Q_{ек.б}$) або збільшують ці параметри (якщо $Q_{ек.т} < Q_{ек.б}$). Приймаючи нове значення, повторюють розрахунок починаючи з вказівки нового значення температури і ентальпії відхідних газів (п. 3.7.17; 3.7.18). Знаходять нове значення теплоти, визначене різницею ентальпій газів $Q_{ек.б}$ (п. 3.7.22) і далі до температурного напору (п. 3.7.31). Уточнення по пп. (3.7.33...3.7.38) не здійснюють. В уточнюючому розрахунку приймають колишнє значення коефіцієнта теплопередачі.

У розрахунковій записці наводять лише уточнені величини.

3.8 Розрахунок теплообміну в блочних економайзерах з чавунних ребристих труб

Блочні економайзери з чавунних ребристих труб (економайзери живильні ЕП) встановлюються за котлами ДКВР в тих випадках, коли є підстава передбачати значну корозію металу поверхні нагріву при спалюванні мазуту, сірчистих і високовологих твердих палив. Короткий опис конструкції і схеми компоновки економайзерів цього типу приведені в підрозділі 3.1.2.

Розрахунок теплообміну в економайзерах ЕП аналогічний викладеному в підрозділі 3.7, але дещо простіше. Послідовність викладу тексту може бути такою.

3.8.1 Вказують тип водяного економайзера, прийнятого до установки (По таблиці 3.2).

3.8.2 Вказують довжину ребристих труб в конструкції прийнятого економайзера, м

$$l_{р.т} =$$

[1, с.262; 4, с.163, табл. IV-2; ДСТУ 24.03.002].

3.8.3 Визначають площу поверхні нагріву однієї труби, м²

$$H_{р.т} =$$

[1, с.262].

3.8.4 Знаходять площу живого перетину однієї труби для проходу газів, м²

$$F_{р.т} =$$

[1, с.262].

3.8.5 Вказують кількість труб в ряду в газоході економайзера (або в ряду одного ходу в двоколонкових економайзерах)

$$n_{p.t} =$$

(По таблиці 3.2).

3.8.6 Підраховують площу живого перетину газоходу економайзера, m^2

$$F_{ек} = F_{p.t} \cdot n_{p.t}$$

3.8.7 Вказують кількість рядів труб, послідовно омиваних продуктами згоряння, шт.

[4, с.163, табл. IV-2; табл. 3.2].

3.8.8 Визначають площу поверхні нагріву економайзера, m^2

$$H_{ек} = H_{p.t} \cdot n_{p.t} \cdot z_{p.t} =$$

3.8.9 Вказують діаметр ребристих труб (внутрішній), м

$$d_{p.t.v} =$$

[1, с.262; ДСТУ 24.03.002].

3.8.10 Вказують число паралельних потоків води в економайзері, шт. $\sqrt[3]{16}$

$$n_{пот} =$$

3.8.11 Підраховують площу перетину для проходу води в економайзері, m^2

$$f_{ек} = 0,785(d_{p.t.v})^2 \cdot n_{пот} =$$

Далі виписують або підраховують дані до розрахунку теплообміну. Послідовність їх викладу така ж, як і в підрозділах 3.7, починаючи з п. 3.7.16 і продовжуючи до п.3.7.33 включно, тобто до визначення швидкості продуктів згоряння. У даному підрозділі - це пп.(3.8.12 ...3.8.33).

3.8.34 Знаходять номограмне значення коефіцієнта теплопередачі, Вт /($m^2 \cdot K$)

$$k_n =$$

[1, с.262, номогр. 20; 4, с.42, рис.6-4].

3.8.35 Приймають поправочний коефіцієнт, який визначається температурою газового потоку

$$C_v =$$

[1, с.262, номогр. 20; 4, с.42, рис.6-4].

3.8.36 Розраховують коефіцієнт теплопередачі, Вт /($m^2 \cdot K$)

$$k_{ек} = k_n \cdot C_v =$$

3.8.37 Визначають кількість теплоти, яка може бути передана в поверхні економайзера, МДж/кг (МДж/ m^3)

$$Q_{\text{ек.т}} =$$

Далі поступають так, як описано в п.3.7.40 попереднього підрозділу, тобто порівнюють $Q_{\text{ек.т}}$ і $Q_{\text{ек.б.}}$.

3.8.38 Знаходять густину води при середній температурі і тиску в економайзері, кг/м^3

$$\rho =$$

[5, таблиця III].

3.8.39 Розраховують масову швидкість води в економайзері, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ^{/3.17}

$$w_m =$$

3.8.40 Порівнюють набуте значення з масовою швидкістю, що допускається, і роблять висновок про придатність компоновки труб в економайзері

[1, с.75, п.22].

Чавунні економайзери не можуть працювати в режимі киплячих економайзерів. Тому в кінці розрахунку необхідно визначити недогрів води до кипіння, тобто різницю, $^{\circ}\text{C}$

$$\Delta t_{\text{нед}} = t_{\text{ек}} - t_{\text{н}},$$

де $t_{\text{н}}$ - температура насичення, $^{\circ}\text{C}$, при тиску на виході з економайзера, рівному тиску в барабані котла.

Недогрів води до кипіння в блочних економайзерах, що не відключаються, не має бути менше 20°C [1].

3.9 Розрахунок теплообміну в поверхнях нагріву повітропідігрівачів

Розрахунок теплообміну в поверхні нагріву повітропідігрівача може виконуватися або після розрахунку теплообміну в економайзері або перед ним. Перший варіант переважний при одноступінчатій, другий - при двоступінчатій компоновці поверхонь нагріву.

При одноступінчатій компоновці хвостових поверхонь нагріву до початку розрахунку відомі температура і ентальпія продуктів згоряння на вході в поверхню повітропідігрівача (з розрахунку водяного економайзера), температура і ентальпія продуктів згоряння на виході з поверхні (температура і ентальпія відхідних газів, передбачені завданням на проектування). Відомі також температура (а отже, і ентальпія) повітря на вході у повітропідігрівач і відносна

величина перетікання повітря в потік продуктів згоряння (присос $\Delta\alpha_{в.п}$).

Задачею розрахунку є визначення кількості теплоти, що передається повітрю, площі необхідної поверхні нагріву та її компоновка, температура повітря на виході з повітропідігрівача.

На початку розрахунку наводять відомості про геометричні характеристики, що використовуються в розрахунках. Потім викладається розрахунок теплообміну, після чого вносяться уточнення розмірів і компоновки, якщо це виявиться необхідним. Послідовність викладу може бути такою.

3.9.1 Приймають ширину простору для розміщення повітропідігрівача, мм

$$a =$$

(По кресленнях заводу-виробника).

3.9.2 Приймають глибину простору, мм $/^{3.18}$

$$b =$$

(По кресленнях заводу-виробника).

3.9.3 Приймають число секцій повітропідігрівача, шт.

$$n_c =$$

3.9.4 Приймають діаметр труб і товщину стінок, мм

$$d_{xs} =$$

[1, с.75, п.25; 2, с. 131].

3.9.5 Приймають поперечний крок труб в секції, мм

$$s_1 =$$

[1, с.75, п.26а; 2, с.131].

3.9.6 Підраховують відносний поперечний крок

$$s_1/d =$$

3.9.7 Приймають поздовжній крок, мм

$$s_2 =$$

[2, с131].

3.9.8 Підраховують відносний поздовжній крок

$$s_2/d =$$

Викреслюють ескіз секції, труби розміщують з урахуванням опорних поверхонь трубної дошки.

3.9.9 Вказують ширину секції, мм $/^{3.19}$

$$a_c =$$

3.9.10 Вказують глибину секції, мм $/^{3.19}$

$$v_c =$$

3.9.11 Вказують кількість труб, що розміщуються в непарних і парних рядах секції, шт.

$$n_{\text{неп}} = \quad n_{\text{пар}} =$$

3.9.12 Вказують число рядів труб в секції, шт.

$$z_c =$$

у тому числі:

- непарних $z_{\text{неп}} =$

- парних $z_{\text{пар}} =$

3.9.13 Підраховують число труб в одній секції, шт.

$$N_c =$$

3.9.14 Приймають число ходів повітря через повітропідігрівач

$$m_x =$$

3.9.15 Приймають висоту ходу, мм $/^{3.20}$

$$h_x =$$

3.9.16 Розраховують площу поверхні нагріву повітропідігрівача, м^2

$$H_{\text{в.п}} =$$

[1 с.60, п.8-57; 4, с.38] .

3.9.17 Розраховують площу живого перетину для проходу газу в поверхні нагріву, що розраховується, м^2

$$F_{\text{г.в.п}} =$$

[1, с.38, п.7-17; 2, с.82, (9-19); 4, с.46, (6-22)].

3.9.18 Визначають площу живого перетину для проходу повітря, $\text{м}^2 /^{3.21}$

$$F_{\text{в.в.п}} =$$

[1. с.38, п.7-17; 2, с.81, (9-18); 4, с.46, (6-20)].

3.9.19 Виписують температуру, $^{\circ}\text{C}$, і ентальпію продуктів згоряння, МДж/кг (МДж/м^3), на вході в поверхню повітропідігрівача

$$\vartheta'_{\text{в.п}} = \quad I'_{\text{в.п}} =$$

(3 розрахунку економайзера)

3.9.20 Вказують температуру, $^{\circ}\text{C}$, і ентальпію продуктів згоряння, МДж/кг (МДж/м^3), на виході з поверхні повітропідігрівача

$$\vartheta''_{\text{в.п}} = \quad I''_{\text{в.п}} =$$

(3 розрахунку теплового балансу котла, [6]).

3.9.21 Виписують відносну величину присоса повітря в газоході

$$\Delta\alpha_{\text{в.п}} =$$

[6, таблиця 1.1]

3.9.22 Вказують температуру повітря на вході в повітропідігрівач (температура холодного повітря), °C

$$t'_{в.п}=$$

3.9.23 Вказують очікувану температуру повітря на виході з повітропідігрівача, °C /^{3.22}

$$t''_{в.п.о}=$$

3.9.24 Розраховують середню очікувану температуру повітря, що підігрівається в поверхні нагріву, °C

$$t_{в.п.о}=$$

[1, с. 35, п.7-02; 2, с.81; 4, с.38].

3.9.25 Знаходять ентальпію теоретичного об'єму повітря при середній температурі, МДж/кг (МДж/м³)

$$I^o_{прс}=$$

[6, таблиця 1.2].

3.9.26 З попередніх розрахунків виписують коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi=$$

3.9.27 Підраховують кількість теплоти, що віддається газами в поверхні нагріву, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{в.п.б}=$$

[1, с.35, п.7-02; 4, с.38].

3.9.28 Виписують величину надлишку повітря в продуктах згоряння в кінці топки

$$\alpha_т=$$

[6, таблиця 1.1].

3.9.29 Виписують величину присосів повітря в топці і в системі пилоприготування

$$\Delta\alpha_т=$$

$$\Delta\alpha_{плу}=$$

[1, с.198-199; 2, с.52, табл. 6-1, с.61, табл. 8-1; 4, с. 12, табл. 2-1, 2-2].

3.9.30 Підраховують коефіцієнт надлишку повітря на виході з повітропідігрівача

$$\beta''_{в.п}=$$

[1, с.60, п.8-48; 2, с.59,(7-9); 4, с.62,(9-2)].

3.9.31 Визначають долю повітря, що відбирається на рециркуляцію /^{3.23}

$$\beta_{рц}=$$

[1, с.60, п.8-49; 2, с.133,(10-74)].

3.9.32 Розраховують ентальпію повітря на виході з повітропідігрівача (гарячого повітря), МДж/кг (МДж/м³)

$$I''_{\text{в.п}} =$$

[1, с.35, п.7-03; 2, с.133,(10-75); 4, с.61,(9-1)].

3.9.33 Знаходять температуру повітря на виході з повітропідігрівача, °С

$$t''_{\text{в.п}} =$$

[6, таблиця 1.2].

Отриману в результаті розрахунку температуру нагрітого (гарячого) повітря порівнюють з температурою продуктів згоряння на вході в поверхню нагріву. Якщо температурний напір на гарячому кінці повітропідігрівача $\Delta t_{\text{гар}} = (\vartheta'_{\text{в.п}} - t''_{\text{в.п}})$ буде нижче (30...50) °С, необхідно перейти до двоступінчатої компоновки хвостових поверхонь.

При задовільному співвідношенні температур ($\Delta t_{\text{гар}} > 30^\circ\text{C}$) продовжують розрахунок [2, с.133; 4, с.65].

3.9.34 Визначають середню температуру продуктів згоряння в поверхні, що розраховується, °С

$$\vartheta_{\text{в.п}} =$$

[1, с.39, п.7-18; 2, с.81; 4, с.46].

3.9.35 Вказують об'єм газів при середньому надлишку повітря, м³/кг (м³/м³)

$$V_{\text{г.в.п}} =$$

[6,таблиця 1.1].

3.9.36 Вказують розрахункову витрату палива котлом, кг/с (м³/с)

$$B_p =$$

3.9.37 Визначають швидкість продуктів згоряння в поверхні, що розраховується, м/с

$$W_{\text{г.в.п}} =$$

[1, с.38, п.7-16; 2, с.81,(9-14); 4, с.45,(6-17)].

3.9.38 Знаходять номограмне значення коефіцієнта тепловіддачі від газів до стінки, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{к.п}} =$$

[1, с.41, п.7-27; 2, с.85; 4, с.43].

3.9.39 Знаходять поправку на фізичні характеристики потоку C_f (за допоміжною номограмою).

3.9.40 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згоряння до стінки, Вт/(м²·К)

$$\alpha_k =$$

[1, с.41, п.7-27; 2, с.89, (9-37); 4, с.43].

3.9.41 Вказують, що коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням в поверхні нагріву, що розраховується, не врахований/^{3.24}.

3.9.42 Визначають розрахункове значення коефіцієнта тепловіддачі від газів до стінки поверхні повітропідігрівача, Вт/(м²·К)

$$\alpha_1 =$$

[1, с.37, п.7-07; 2, с.80, (9-11); 4, с.41, (6-13)].

3.9.43 Підраховують середню температуру повітря, °С

$$t_{в.п} =$$

[1, с.35, п.7-02; 2, с.81; 4, с.46].

3.9.44 Вказують об'єм повітря, теоретично необхідного для горіння, м³/кг (м³/м³)

$$V_B^0 =$$

(З розрахунку палива, [6]).

3.9.45 Визначають швидкість повітря в ступені, м/с

$$W_{в.в.п} =$$

[1, с.38, п.7-16; 2, с.81, (9-15)].

3.9.46 Визначають номограмне значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією від стінки до повітря, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{к.н} =$$

[1, с.39, п.7-21; 2, с.83, (9-26); 4, с.42, (6-14)].

3.9.47 Знаходять поправочні коефіцієнти

$$C_z = \quad C_s = \quad C_\phi =$$

[1, с.252, номогр. 13; 2, с.88-89, рис. 9-5; 4, с.43, рис.6-5].

3.9.48 Підраховують коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря, що нагрівається, Вт/(м²·К)^{3.25}

$$\alpha_2 = \alpha_k =$$

[1, с.252, номогр. 13; 2, с.84, (9-27); 4, с.42- 43].

3.9.49 Визначають коефіцієнт використання поверхні повітропідігрівача

$$\xi =$$

[1, с.48, п.7-59; 2, с.105, табл. 9-3; 4, с.41, табл. 6-3].

3.9.50 Підраховують коефіцієнт теплопередачі в поверхні нагріву повітропідігрівача, Вт/(м²·К)

$$k =$$

[1, с.37, п.7-13; 2, с.80,(9-9); 4, с.40,(6-10)].

3.9.51 Розраховують температурні напори на вході в поверхню нагріву і на виході з неї, °C

$$\Delta t' = \vartheta'_{\text{в.п}} - t''_{\text{в.п}} =$$

$$\Delta t'' = \vartheta''_{\text{в.п}} - t'_{\text{в.п}} =$$

3.9.52 Визначають температурний напір у повітропідігрівачі при протитоку, °C

$$\Delta t_{\text{нрм}} =$$

[1, с.49, пп.7.60, 7.63; 2, с.107; 4, с.49,(6-37)].

3.9.53 Знаходять різницю температур (меншу і більшу) теплообмінювальних середовищ, °C

$$\Delta \tau_{\phi} = (\vartheta'_{\text{в.п}} - \vartheta''_{\text{в.п}}) \quad \text{або} \quad (t''_{\text{в.п}} - t'_{\text{в.п}}),$$

$$\Delta \tau_m = (t''_{\text{в.п}} - t'_{\text{в.п}}) \quad \text{або} \quad (\vartheta'_{\text{в.п}} - \vartheta''_{\text{в.п}}).$$

3.9.54 Підраховують параметри

$$p = \quad R =$$

[1, с.51, п.7-66; 2, с.109,(9-69); 4, с.50].

3.9.55 Знаходять коефіцієнт перерахунку температурного напору

$$\psi =$$

[1, с.51, п.7-68; 2, с.109, рис.9-41; 4, с.50, рис. 6-17].

3.9.56 Підраховують температурний напір у повітропідігрівачі, °C

$$\Delta t = \psi \Delta t_{\text{нрм}} =$$

3.9.57 Визначають кількість теплоти, переданої повітрю в поверхні нагріву повітропідігрівача за умовами теплопередачі, МДж/кг (МДж/м³)

$$Q_{\text{впт}} =$$

[1, с.35, п.7-01; 2, с.78,(9-1); 4, с.38,(6-2)].

3.9.58 Порівнюють результат з кількістю теплоти, підрахованої по різниці ентальпій (п. 3.9.27).

Якщо різниця

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{в.п.б}} - Q_{\text{в.п.т}}}{Q_{\text{в.п.б}}} \cdot 100$$

менша 2%, розрахунок повітропідігрівача закінчують. Інакше розрахунок корегують.

Розрахунок корегують зміною значення площі поверхні нагріву. Якщо $Q_{\text{в.п.т}} > Q_{\text{в.п.б}}$ необхідно зменшити площу поверхні, зменшуючи

висоту ходів, або число рядів труб в секціях. При цьому повинно зберігатися співвідношення між швидкостями повітря і газів (W_v / W_g), що рекомендується нормативним джерелом [1].

При двоступінчатій компоновці хвостових поверхонь нагріву розрахунок теплообміну в першій ступені повітропідігрівача аналогічний викладеному, але з деякою різницею. Суть її в тому, що температурою повітря на виході з ступені задаються, а ентальпію і температуру продуктів згоряння на вході в ступень визначають з балансу теплоти. В цьому випадку після обчислень в порядку пп.(3.9.1...3.9.18), тобто після підрахунку геометричних характеристик, послідовність викладу така.

3.9.59 Вказують температуру, °C, і ентальпію теоретичного об'єму повітря, МДж/кг (МДж/м³), на вході в поверхню нагріву (температуру і ентальпію холодного повітря)

$$t'_{в.п} =$$

$$I'_{в.п} =$$

3.9.60 Приймають температуру повітря на виході з першої ступені повітропідігрівача, °C

$$t''_{Ів.п} =$$

[2, с. 134, (10-80); 4, с.65, (9-12)].

3.9.61 Визначають ентальпію теоретичного об'єму повітря при цій температурі, МДж/кг (МДж/м³)

$$I''_{Ів.п} =$$

[6, таблиця 1.2].

3.9.62 Вказують величину надлишку повітря в кінці топки

$$\alpha_T =$$

[6, таблиця 1.1].

3.9.63 Вказують величину присосів повітря в топку і в систему пилоприготування

$$\Delta\alpha_T =$$

$$\Delta\alpha_{плу} =$$

[1, с.198-199; 2, с.52, табл. 6-1, с.61, табл. 8-1; 4, с. 12, табл. 2-1, 2-2].

3.9.64 Вказують величину присосів повітря в ступенях повітропідігрівача:

- в першій ступені $\Delta\alpha_{Ів.п} =$

- в другій ступені $\Delta\alpha_{ІІв.п} =$

[6, таблиця 1.1].

3.9.65 Підраховують коефіцієнт надлишку повітря на виході з визначеної ступені повітропідігрівача

$$\beta''_{\text{Ів.п}} =$$

[1, с.60, п.8-48; 2, с.59, (7-9); 4, с.62, (9-3)].

3.9.66 Визначають долю повітря, що відбирається на рециркуляцію ^{/3.23}

$$\beta_{\text{рп}} =$$

[1, с.60, п.8-49; 2, с.133, (10-74)].

3.9.67 Підраховують кількість теплоти, що сприймається повітрям у повітропідігрівачі, МДж/кг (МДж/м³),

$$Q_{\text{Ів.п.б}} =$$

[1, с.35, п.7-03; 2, с.133, (10-75)].

3.9.68 Знаходять середню температуру повітря в першій ступені повітропідігрівача, °С

$$t_{\text{Ів.п}} =$$

[1, с.35, п.7-02; 2, с.81; 4, с.38].

3.9.69 Визначають ентальпію теоретичного об'єму повітря при цій температурі, МДж/кг (МДж/м³),

$$I^{\circ}_{\text{прс Ів.п}} =$$

[6, таблиця 1.2].

3.9.70 Вказують коефіцієнт збереження теплоти

$$\varphi =$$

(З розрахунку топки, [7]).

3.9.71 Записують температуру, °С, і ентальпію продуктів згоряння, МДж/кг (МДж/м³), на виході з ступені

$$\vartheta''_{\text{Ів.п.}} =$$

$$I''_{\text{Ів.п.}} =$$

(З розрахунку першої ступені економайзера).

3.9.72 Підраховують ентальпію продуктів згоряння на вході в першу ступень повітропідігрівача, МДж/кг (МДж/м³)

$$I'_{\text{Ів.п.}} =$$

[1, с.35, п.7-02; 2, с.133, (10-77); 4, с.63, (9-9)].

3.9.73 Визначають температуру продуктів згоряння на вході в першу ступень, °С

$$\vartheta'_{\text{Ів.п.}} =$$

[6, таблиця 1.2].

3.9.74 Перевіряють умову, що температурний напір на вході газів в ступень, °С

$$(\vartheta'_{\text{Ів.п.}} - t''_{\text{Ів.п.}}) > 30$$

[2, с.133; 4, с.65].

Якщо нерівність не дотримується, необхідно прийняти меншу температуру повітря і уточнити розрахунок з п. 3.9.20 до даного пункту.

Подальший розрахунок першої ступені виконують аналогічно розрахунку одноступінчатого повітропідігрівача, викладаючи його в послідовності пп. (3.9.34...3.9.58), приведених на початку даного підрозділу (тобто від визначення середньої температури продуктів згоряння і до зіставлення значення теплоти, підрахованої по балансу і теплопередачі).

Розрахунок теплообміну в другій ступені повітропідігрівача багато в чому схожий з розрахунком одноступінчатого повітропідігрівача. З розрахунків водяного економайзера відомі значення температури і ентальпії продуктів згоряння на вході в другу ступень повітропідігрівача і на виході з неї. З розрахунку першої ступені відомі температура і ентальпія повітря на вході в поверхню нагріву другої ступені. Задача розрахунку - визначення температури повітря на виході з повітропідігрівача. Відмінність розрахунку полягає в тому, що при підрахунку коефіцієнта тепловіддачі від продуктів згоряння до стінки (при визначенні α_1) необхідно враховувати теплоту випромінювання.

Відсутня необхідність в підрахунку $\beta_{\text{рц}}$, оскільки в другій ступені її не застосовують.

Із сказаного виходить, що виклад тексту розрахунків теплообміну в другій ступені повітропідігрівача аж до визначення коефіцієнта тепловіддачі від газів до стінки конвенцією може бути надано в послідовності пп. (3.9.1...3.9.40), приведених на початку цього підрозділу (розрахунок повітропідігрівача при одноступінчатій компоновці).

3.9.75 Розраховують температуру стінки труби (температуру на поверхні золових відкладень), °C

$$t_3 =$$

[1, с.44, п. 7-36; 2, с.102].

3.9.76 Визначають номограмне значення коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{л.н}} =$$

[1, с.43, п. 7-32; 2, с.97, (9-46), рис. 9-12; 4, с.47, рис. 6-12].

3.9.77 Вказують долю водяної пари в продуктах згоряння і сумарну долю випромінюючих газів

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = r_{\text{п}} =$$

[6, таблиця 1.1].

3.9.78 Підраховують парціальний тиск трьохатомних газів, МПа

$$P_{\text{п}} =$$

[1, с.25, п. 6-07; 2, с.97; 4, с.31].

3.9.79. Вказують товщину випромінюючого шару, м

$$S_{\text{Пв.п}} =$$

[1, с.43, п. 7-35; 2, с.99].

3.9.80 Визначають оптичну густину потоку газу

$$\tau_{\text{гПв.п}} =$$

[1, с.24 п.6-07; 2, с.65, (8-22); 4, с.31, (5-26)].

3.9.81 Підраховують оптичну густину часток золи ^{/3.8}

$$\tau_{\text{зл}} =$$

[1, с.25, п. 6-08; 2, с.97, (9-51); 4, с.31,(5-27)].

3.9.82 Визначають міру чорноти газового потоку (потоку продуктів згоряння)

$$a_{\text{Пв.п}} =$$

[1, с.24, п. 6-06; 2, с.97, (9-48); 4, с.30, (5-22)].

3.9.83 Знаходять коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К)

$$\alpha_{\text{л}} =$$

[1, с.261, номогр. 19; 2, с.102, (9-57) або (9-58); 4, с.48, (6-29) або (6-30)].

3.9.84 Розраховують коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки, Вт/(м²·К)^{/3.26}

$$\alpha_1 =$$

[1, с.37, п. 7-07; 2, с.80, (9-11); 4, с.41, (6-13)].

Подальші розрахунки нічим не відрізняються від розрахунку теплообміну у повітропідігрівачі при одноступінчатій компоновці. Вжиті до дійсного варіанту обчислення рекомендується продовжувати в послідовності пп. (3.9.51...3.9.58) по схемі, приведений на початку підрозділу.

На початку розрахунку теплообміну в котлі (при складанні балансу) набувають орієнтовних можливих значень температури відхідних газів і температури гарячого повітря. Розрахунком

теплообміну в конвективних поверхнях нагріву ці температури уточнюються.

Розрахунок теплообміну в котлі вважається закінченим, якщо уточнена температура відхідних газів від заздалегідь прийнятої відрізняється не більше ніж на $\pm 10^{\circ}\text{C}$, а температура гарячого повітря - не більше ніж на $\pm 40^{\circ}\text{C}$. При більших розбіжностях задаються новим значенням температури і повторюють весь розрахунок [1, с.54, п.8-05].

3.10 Примітки до розділу 3

3.10.1 Відстань між змійовиками слід приймати виходячи з типа їх кріплення в пакеті. В випадку кріплення на стійках з кутового прокату його можна брати, мм

$$m = d + (7 - 10),$$

де d - зовнішній діаметр змійовиків, мм.

Бажано, аби відстань, що приймається, була кратною 5.

3.10.2 У більшості конструкцій промислових котельних установок економайзери виготовляють з труб діаметром 30 мм. Радіус вигину труб в змійовиках приймають $r = 55$ мм.

Для поверхонь, що виготовляються з труб $\varnothing 28$ мм, радіус вигину можна брати $r = 50$ мм.

3.10.3 Якщо вигини труб не омиваються продуктами згоряння (як в економайзері на рисунку 3.2), вони не повинні включатися в розрахункову довжину змійовика.

3.10.4 Тиск води на вході в економайзер, в тому числі і в першу ступень при двоступінчатій компоновці, не повинен перевищувати більш ніж на 8 % тиск в барабані котла [1]. Отже, можна вважати, що

$$P'_{\text{ек}} = 1,08 P_6,$$

де P_6 - тиск в барабані, МПа (надається в завданні на проектування).

3.10.5 Тиск води на виході з економайзера може бути прийнятий рівним тиску в барабані котла.

3.10.6 Якщо ентальпія $(i_n)''_{\text{ек}} > i''_{\text{ек}}$ температуру води на виході з економайзера знаходять по [5, таблиця III]. При $(i_n)''_{\text{ек}} < i''_{\text{ек}}$ визначають умовну температуру, $^{\circ}\text{C}$

$$t_{\text{ym}} = t_n + \Delta i / 2c,$$

де $\Delta i = i''_{\text{ек}} - (i_{\text{н}})''_{\text{ек}}$ перевищення ентальпії середовища над ентальпією кипіння води при тиску на виході з економайзера, кДж/кг;

c - теплоємність води при тому ж тиску, кДж/(кг·К).

Пункт з вказівкою значення $(i_{\text{н}})''_{\text{ек}}$ в тексті записують лише за умови, що $(i_{\text{н}})''_{\text{ек}} < i''_{\text{ек}}$.

3.10.7 Оптичною густиною газового потоку названо добуток

$$\tau_{\text{с}} = kps = k_{\text{Г}} \cdot r_{\text{п}} \cdot p \cdot s = k_{\text{Г}} \cdot p_{\text{п}} \cdot s$$

де $k = k_{\text{Г}} \cdot r_{\text{п}}$ - коефіцієнт послаблення променів трьохатомними газами; $r_{\text{п}} = r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{RO}_2}$ - сумарна об'ємна доля трьохатомних газів; $p_{\text{п}}, s$ - парціальний тиск трьохатомних газів і товщина випромінюючого шару газів.

3.10.8 Концентрацію золи і розрахунок оптичної щільності часток золи записують в текст і враховують лише при факельному спалюванні твердого палива. У всіх інших випадках, у тому числі при шаровому і факельно-шаровому спалюванні твердого палива $\mu_{\text{зл}}$ і $\tau_{\text{зл}}$ не враховують.

3.10.9 При спалюванні газу і мазуту коефіцієнт теплопередачі розраховують по коефіцієнту теплової ефективності. Його і записують в тексті замість коефіцієнта забруднення.

Коефіцієнт теплової ефективності приймають за нормативними джерелами.

[1, с. 48, табл. 7-3; 4, с. 40, табл. 6-2].

3.10.10 В котлах типа ДКВР і інших котлах з температурою перегріву пари до 250 °С температура перегріву не регулюється і тому немає величини $\Delta i_{\text{п.о}}$ - ентальпії, отриманої водою в регуляторі перегріву. Параметри живильної води є параметрами води на вході в економайзер.

3.10.11 Тиск води на виході з першої ступені економайзера можна приймати як тиск живильної води за вирахуванням половини допустимого падіння тиску в економайзері, що дорівнює

$$p''_{\text{Іст.ек}} = 1,04 p_{\text{б}}$$

де $p_{\text{б}}$ - тиск води в барабані котла, МПа.

3.10.12 Температуру води на виході з економайзера по недогріву розраховують таким чином, °С

$$t''_{\text{Іст.ек}} = (t_{\text{н}})''_{\text{Іст.ек}} - \Delta t_{\text{нед}} - \Delta t_{\text{нед Іст.ек}},$$

де $(t_{\text{н}})''_{\text{Іст.ек}}$ - температура насичення при тиску на виході з першої ступені економайзера, °С.

3.10.13 При підрахунку $t_{\text{ум}}$ слідє пам'ятати, що формула $t_{\text{ум}} = t_{\text{н}} + \Delta i/2$ [1] в повному записі має вигляд

$$t_{\text{ум}} = t_{\text{н}} + \Delta i/2c,$$

де c - теплоємність води; $c=4,19$ кДж/(кг·К).

3.10.14 Ширина газоходу всіх блочних водяних економайзерів БВЕС однакова і дорівнює $a = 1900$ мм.

3.10.15 Крок труб уздовж ходу продуктів згоряння в блочних економайзерах неоднаковий. У розрахунках теплообміну його можна приймати рівним радіусу вигину тобто $s_2=r$.

3.10.16 Число паралельних потоків води в економайзері дорівнює числу підведень води. В економайзерах ЕП-2-142, ЕП-2-236, ЕП-1-236 - по одному підведенню, в економайзері ЕП-1-330 - два, в економайзерах ЕП-1-646, ЕП-1-808 - по три підведення.

3.10.17 Масову швидкість знаходять по формулі, кг/(м²·с)

$$w_m = w \cdot \rho,$$

де w - середня швидкість потоку, м/с; ρ - густина води при середній температурі, кг/м³.

3.10.18 Глибиною газоходу повітропідігрівача вважається розмір спускової шахти котла по горизонталі уздовж вертикального перетину.

3.10.19 За розрахункову ширину секції приймають відстань між вісями крайніх труб в непарному ряду секції (в ряду з великою кількістю труб).

Глибиною секції є відстань між вісями труб першого і останнього рядів (по ходу повітря).

3.10.20 Висота ходу приймається за умови, що живий перетин повітропідігрівача відповідатиме швидкості повітря (4,5...6) м/с [1, с.75, п.25а; 2, с.42, підрозд. 4-5].

Значення висоти першого і другого (а можливо і третього) ходів найчастіше однакові. Проте вони можуть бути і різними. При підрахунку швидкості повітря приймають середню висоту ходу.

3.10.21 При визначенні площі живого перетину повітропідігрівача слід брати

$$a = a_c n_c \cdot 10^{-3}; \quad b = h_x \cdot 10^{-3}; \quad z_1 = 0,5(n_{\text{неп}} + n_{\text{пар}}) n_c, \quad l = h_x,$$

де a_c , h_x - ширина секції і висота ходу (середня), мм;

n_c , $n_{\text{неп}}$, $n_{\text{пар}}$ - відповідно кількість секцій в поверхні, що розраховується, число труб в непарних і парних рядах секції, шт..

3.10.22 Для одноступінчатих повітропідігрівачів очікувану температуру можна приймати (180...200) °С.

3.10.23 Рециркуляцію гарячого повітря для запобігання корозії поверхні нагріву повітропідігрівачів застосовують при спалюванні мазуту. При виконанні курсового проекту цю величину можна не враховувати. Про це робиться відповідний запис в п. 3.9.31 (3.9.66 при двоступінчатій компоновці).

3.10.24 При розрахунку теплообміну в одноступінчатому повітропідігрівачі і в першій ступені двоступінчатого повітропідігрівача випромінювання продуктів згоряння мало і їм нехтують [1, с.43; 4, с.42].

3.10.25 У повітропідігрівачах променистий потік від стінки до повітря дуже малий і в розрахунках теплообміну їм нехтують [4, с.42].

3.10.26. У нормативних джерелах коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки рекомендується розраховувати по формулі, Вт/ (м²·К)

$$\alpha_1 = \xi(\alpha_k + \alpha_l),$$

де ξ - коефіцієнт використання поверхні нагріву.

При розрахунку теплообміну у повітропідігрівачах коефіцієнт використання відносять до всього повітропідігрівача, коефіцієнт тепловіддачі до стінки підраховують по формулі, Вт/ (м²·К)

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_l.$$

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тепловой расчет котельных Нормативный метод / В.В. Митор, И.Е. Дубовский, Э.С. Карасина и др.; под общ. ред. Н.В. Кузнецова. – 2-е изд., перераб. - Москва: Энергия, 1973. - 296 с., илл.
2. Александров В.Г. Паровые котлы малой и средней мощности: учеб./В.Г. Александров. - 2-е изд., перераб. и доп. - Ленинград: Энергия, 1972. - 200 с., илл.
3. Липов Ю.М. Компоновка и тепловой расчет парогенератора : учеб. пособие/ Ю.М. Липов, Ю.Ф. Самойлов, З.Г. Модель. – Москва: Энергия, 1975. - 176 с., илл.
4. Тепловой расчет промышленных парогенераторов :учеб. пособие/ В.И. Частухин, Е.Л. Заречанский, С.М. Константинов и др.; под общ. ред. В.И. Частухина. - Киев: Вища школа, 1980. - 184 с.
5. Ривкин С.Л., Теплофизические свойства воды и водяного пара :таблицы/ С.Л. Ривкин, А.А. Александров. - Москва: Энергия, 1980. - 76 с., илл.
6. Кузьменко А.А., Каюков Ю.М., Назаренко І.А.. Методичні вказівки до самостійної роботи та виконання контрольної роботи з дисципліни «Паливо та основи теорії горіння» «Розрахунки горіння палива» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» (освітня програма «Промислова і комунальна теплоенергетика») усіх форм навчання. - Запоріжжя: НУЗП, 2022.- 50 с.
7. Трикашний М.В., Кузьменко А.А., Каюков Ю.М., Назаренко І.А., Методичні вказівки до самостійної роботи та виконання контрольної роботи з дисципліни «Котельні установки промислових підприємств» «Розрахунок топки» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» (освітня програма «Промислова і комунальна теплоенергетика») усіх форм навчання. -Запоріжжя: НУЗП, 2022. 54 с.
8. Трикашний М.В., Кузьменко А.А., Каюков Ю.М., Назаренко І.А. Методичні вказівки до самостійної роботи, курсового та дипломного проектувань з дисципліни «Котельні установки промислових підприємств» «Альбом креслень конструкцій поверхонь котельних установок промислових підприємств» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» (освітня програма «Промислова

і комунальна теплоенергетика») усіх форм навчання. - Запоріжжя: НУЗП, 2022. - 38 с.

9. Частухин В.И., Частухин В.В. Топливо и теория горения. Киев: Вища школа, 1989. - 223 с..

10. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. Москва: Энергия, 1990.- 488 с..

11. Прокоф'єв О.І., Шмаль Т.М. та ін. Посібник з теорії горіння. Львів: НУ «ЛП», 2002.-108 с..

12. Мисак І.С., Гнатишин Я.М., Івасик Я.Ф. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив. Львів: НУ «ЛП», 2002.- 98 с..

13. Костюк О.П. Паливо та обладнання для його спалювання: навч. посібн. Рівне: НУВГП, 2011.121 с..

14. Пономаренко С.М. Основи фізики горіння: навч.посібн. Київ: НТУУ «КПІ», 2016.- 85 с..

15. Павловський В.Г. Термодинаміка фізико-енергетичних процесів: навч. посібн. Харків: НТУ «ХПІ», 2009.- 332 с..