

ЗМІСТ	
Вступ	3
1. Програма дисципліни	4
2. Контрольна робота	8
3. Методичні вказівки до контрольної роботи	24
4. Приклад виконання контрольної роботи	35
Додаток	45
Рекомендована література	47

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

О.А. Єпіфанов, В.В. Кузнецов

УТИЛІЗАЦІЙНІ КОТЛИ

Методичні вказівки, програма і контрольні завдання
для студентів заочної форми навчання
спеціальності 8.090210 "Двигуни внутрішнього згоряння"

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2008

3

ментів.
матеріалів утилізаційних котлів та розрахунок на міцність їх еле-
ментами обробки води, області використання конструкційних
котлів, методи отримання чистої пари, передкотлової та внутріш-
печення економічної, надійної та безпечної роботи утилізаційних
гідродинамічного розрахунку утилізаційних котлів, методи забез-
печення теплового, аеродинамічного, методик теплового, аеродинамічного та
ко-хімічну сутність процесів, що протікають у їх газівому та па-
утилізаційних установок, конструкції утилізаційних котлів та фізи-
Студент повинен знати — схеми сучасних та перспективних
міцність, методів отримання чистої пари та водопідготовки.
хунків утилізаційних котлів, норм розрахунку елементів котлів на
методик теплового, аеродинамічного та гідродинамічного розра-
газів ДВЗ, а також конструкціями утилізаційних котлів, вивчення
та перспективними схемами утилізаційних установок випускних
Завдання дисципліни — ознайомлення студентів з сучасними
роблення практичних навичок, необхідних для їх проектування
Мета вивчення дисципліни — засвоєння базових знань з судно-
вих утилізаційних установок та утилізаційних котлів (УК) та ви-
роботи.

чення дисципліни "Утилізаційні котли" з виконанням контрольної
механіка" для студентів заочної форми навчання передбачено вив-
нього згоряння" напрямку бакалаврської підготовки "Інженерна
Навчальним планом спеціальності 8.090210 "Двигуни внутріш-

ВСТУП

0,9	175,4	742,6	2773,0
0,8	170,4	720,9	2768,4
0,7	165,0	697,1	2762,9
0,6	158,8	670,4	2756,4
0,5	151,9	640,1	2748,5
<i>p</i>	<i>t</i>	<i>t</i> ¹	<i>t</i> ¹
		Вода	Пара

Таблиця 5Д. Тиск *p*, МПа, температура *t*, °С, ентальпія *i*, кДж/кг,
води і пари на лінії насичення

Таблиця 6Д. Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К), коефіцієнт кіне-
матичної в'язкості ν , м²/с, та число Прандтля Pr випускних газів в
залежності від температури

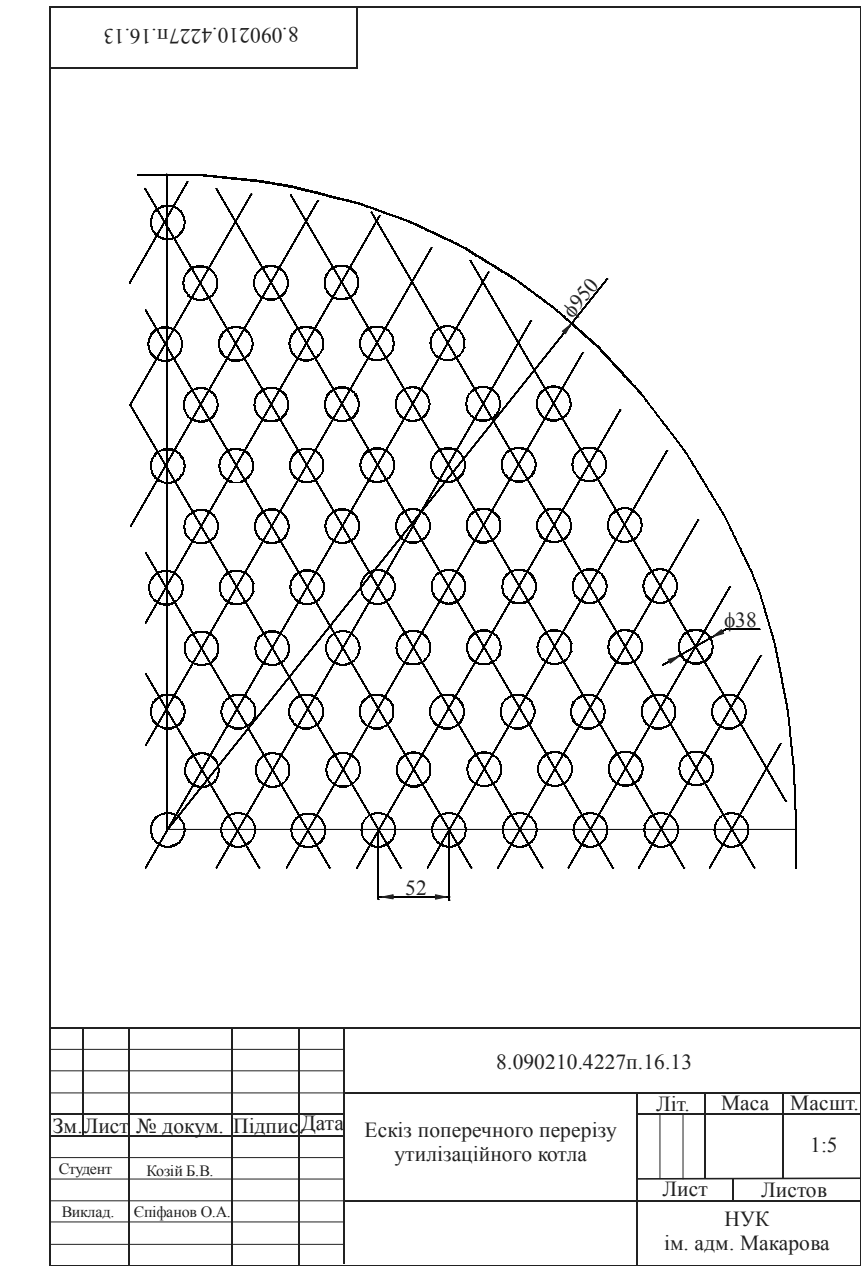


Рис. 6. Ескіз поперечного перерізу утилізаційного котла

Тема 9. Методика теплового розрахунку утилізаційних котлів та komponування поверхонь нагріву

Методика теплового розрахунку утилізаційного котла. Рівняння теплопередачі та теплового балансу з газової та парової сторін. Конструктивний та перевернутий теплові розрахунки. Компонування поверхонь нагріву V_K . Вибір конструктивної схеми поперечного перерізу. Вибір швидкості газів та розрахунок живого перерізу. Визначення теплових потужностей окремих по-верхонь нагріву V_K та температур теплоносіїв з газової та парово-ляної сторін. Опінка komponувальної схеми утилізаційного котла. Побудова komponувального ескізу.

Порядок та особливості теплового розрахунку окремих повер-хонь нагріву утилізаційного котла: пароперівинка, паротвірної поверхні та економайзера.

Тема 8. Основні положення при проектуванні утилізаційних котлів

Завдання на проектування утилізаційного котла. Визначення можливості паропроductивності V_K та вибір температури відхідних газів.

Вибір параметрів пари. Вплив параметрів пари на паропо-ductивність і компактість V_K . Вплив встановлення економайзе-ра на паропроductивність і компактість V_K . Низькотемператур-на корозія і забезпечення надійності економайзера. Схеми вклюд-чення економайзера. Вибір кратності циркуляції та визначення температури циркуляційної води. Максимально допустимий аеро-динамічний опір V_K .

Література: [8], с. 231–239.

Тема 7. Методика теплових розрахунків утилізаційних котлів та їх конструкції

Конструкція сепараторів утилізаційних котлів та їх розрахунок. Редукційна обробка живильної та додаткової води. Пек-кості живильної та котлової води для утилізаційних котлів. Пек-кості живильної та котлової води для утилізаційних котлів. Пек-кості живильної та котлової води для утилізаційних котлів.

Література: [8], с. 5–6, 25–31; [1], с. 5–23, 47–53, 87–95; [5], с. 9–56, 98–101; [6], с. 10–35; 60–72; 88–112; [7], с. 168–170.

Тема 2. Класифікація утилізаційних котлів, їх характеристики та конструкції

Класифікація судових утилізаційних котлів та їх характери-стики. Вимоги до УК. Робочі процеси в утилізаційних котлах. Зобра-ження термодинамічних процесів отримання водяної пари в $T-s$ діаграмі.

Конструкції та принцип дії основних типів УК: водотрубних з природною циркуляцією (типу КУП 135); водотрубних з багато-разовою примусовою циркуляцією (типу КУП 80, КУП 170, КУП 1100); газотрубних (типу КАУ, КУВ). Особливості конст-рукцій комбінованих котлів (типу КВКА 6/5). Області викорис-тання різних типів УК. Конструкції УК зарубіжних фірм (Ольборг, Кохран, Санрод).

Література: [8], с. 16–23, 187–209; [9], с. 3–50; [1], с. 23–44; [2], с. 163–171.

Тема 3. Ефективність використання теплоти випускних газів ДВЗ в утилізаційних котлах

Елементарний склад палива та його теплота згоряння. Реакції горіння. Визначення об'єму випускних газів ДВЗ та їх ентальпії. Побудова $I-\vartheta$ діаграми.

Тепловий баланс утилізаційного котла. Втрати теплоти. Ко-ефіцієнт збереження теплоти. Корисно використана теплота в УК. Коефіцієнт використання теплоти випускних газів.

Література: [8], с. 31–52, 78–79; [1], с. 60–61; [2], с. 21–31, 52–54; [3], с. 10–13.

Тема 4. Теплообмін в утилізаційних котлах

Особливості теплообміну в утилізаційних котлах. Рівняння теплопередачі. Коефіцієнт теплопередачі. Коефіцієнт забруднен-

Тема 4. Теплообмін в утилізаційних котлах

Особливості теплообміну в утилізаційних котлах. Рівняння теплопередачі. Коефіцієнт теплопередачі. Коефіцієнт забруднен-

Внутрішній діаметр труби $d_{\text{вн}} = d - 2\delta = 0,038 - 2 \cdot 0,003 = 0,032 \text{ м}$.

Коефіцієнт теплопровідності конвекцією від газів до труби $\alpha_k = 0,023 \cdot \lambda_{270}^{d_{\text{вн}}} \cdot \left(\frac{d_{\text{вн}}}{w_{\text{т}}} \right)^{0,4} \cdot \text{Pr}_{270}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_l = 83,88 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Коефіцієнт теплопередачі (приймаємо $\psi = 0,7$) $k = \psi \alpha_k = 0,7 \cdot 83,88 = 58,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Середній температурний напір $\Delta t = \frac{\vartheta_{\text{д}} - \vartheta_{\text{вн}}}{315 - 225} = \frac{\ln \frac{\vartheta_{\text{д}} - t_{\text{н.п}}}{\vartheta_{\text{вн}} - t_{\text{н.п}}}}{315 - 225} = 103 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

де температуру насиченої пари $t_{\text{н.п}}$ знаходимо з табл. 5.1 за зада-ним тиском пари $p = 0,6 \text{ МПа}$: $t_{\text{н.п}} = 158,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Поверхня нагріву паротвірної поверхні утилізаційного котла $H = \frac{\bar{Q}}{\bar{Q}} = \frac{k \cdot \Delta t}{326,2 \cdot 10^3} = 54 \text{ м}^2$.

Площа живого перерізу для проходу газів $F_{\text{т}} = \frac{g_e N_e I_{\text{т}}}{\vartheta + 273} \left(\frac{3600 w_{\text{т}}}{273} \right) = \frac{0,196 \cdot 2000 \cdot 25,84}{270 + 273} \cdot \left(\frac{273}{273} \right) = 0,2 \text{ м}^2$.

Кількість труб одного ходу $z = \frac{4 F_{\text{т}}}{\pi d_{\text{вн}}^2} = \frac{4 \cdot 0,2}{\pi \cdot 0,032^2} = 248,9$.

ня та повноти омивання трубних пучків. Коефіцієнт теплової ефек- тивності поверхонь нагріву. Формули для визначення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією при поперечному омиванні гладкотруб- них пучків та при поздовжньому омиванні поверхонь нагріву. Фак- тори, які впливають на коефіцієнт тепловіддачі конвекцією. Ко- ефіцієнт тепловіддачі випромінюванням продуктів згоряння. Фак- тори, які впливають на тепловіддачу випромінюванням. Схеми руху теплоносіїв та визначення температурного напору. Методи інтен- сифікації теплообміну в суднових утилізаційних котлах.

Література: [8], с. 85–99; [2], с. 54–88; [3], с. 16–24.

Тема 5. Аеродинаміка утилізаційних котлів

Особливості аеродинаміки утилізаційних котлів. Допустимий газовий опір. Визначення опору газового тракту УК. Опори тертя, впоперек омиваємих пучків труб та місцеві. Самотяга.

Література: [8], с. 100–109; [2], с. 105–115; [3] , с. 29–37.

Тема 6. Циркуляція в утилізаційних котлах

Гідродинаміка паротвірних труб з примусовою циркуляцією. Схеми омивання змійовиків УК газовим потоком. Теплова та гідравлічна нерівномірність поверхонь нагріву. Гідравлічна харак- теристика змійовика. Заходи щодо ліквідації багатозначності гідравлічної характеристики. Міжвиткова пульсація потоку.

Фізична сутність природної циркуляції. Контур циркуляції. Кратність циркуляції. Основи розрахунку природної циркуляції. Забезпечення надійності природної циркуляції.

Література: [8], с. 112–129; [2], с. 115–125.

Тема 7. Водний режим, водопідготовка та якість пари

Основні показники якості води. Накипо- і шламоутворення. Корозія пароводяного тракту котла. Забруднення пари та методи отримаання чистої пари. Вплив забруднення пари на надійність та ефективність роботи обладнання котельної установки. Водний режим та забезпечення необхідної якості котлової води. Норми

6

41

$$\begin{aligned} P_{T270} &= \left(\frac{100}{0,65 - 0,67} \right) 70 + 0,67 = 0,656. \\ \lambda_{270} &= \left(\frac{100}{4,84 \cdot 10^{-2} - 4,12 \cdot 10^{-2}} \right) 70 + 4,12 \cdot 10^{-2} = 4,62 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \\ v_{270} &= \left(\frac{100}{43,9 \cdot 10^{-6} - 31,6 \cdot 10^{-6}} \right) 70 + 31,6 \cdot 10^{-6} = 40,21 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \end{aligned}$$

Теплофізичні властивості газів при 200 °С і 300 °С вибираємо з табл. 6Л, а для середньої температури газів у пучку 270 °С розра- ховуємо методом лінійної інтерполяції:

$$\vartheta = 0,5(\vartheta_{\text{г}} + \vartheta_{\text{в.д}}) = 0,5(315 + 225) = 270 \text{ }^{\circ}\text{С}.$$

Середня температура випускних газів у пучку

$$\begin{aligned} \tilde{Q} &= D(i_{\text{в.п.}} - i_{\text{ж.в.}}) = 0,126 \cdot (2735,5 - 167,9) = 326,2 \text{ кВт} \\ \text{Теплова потужність паротвірної поверхні:} \\ \text{Повищення пари } w_{\text{г}} &= 28 \text{ м/с.} \\ \text{Повищення пари } \delta &= 0,003 \text{ мм; крок труб } s = 0,052 \text{ мм;} \\ \text{Геометрія трубного пучка: зовнішній діаметр труб } d &= 0,038 \text{ мм;} \\ \text{Кутника;} \\ \text{Розміщення труб у пучку} &\text{ – за вершинами рівнобічного три-} \\ \text{кутника;} \\ \text{Форма поперечного перерізу} &\text{ – циліндрична;} \\ \text{Тип утилізаційного котла} &\text{ – вертикально-газотрубний;} \\ \text{Початкові дані до розрахунку вибираємо з табл. 3:} \end{aligned}$$

2. Визначення розмірів поперечного перерізу та площі паротвірної поверхні нагріву утилізаційного котла.

Побудова ескізу поперечного перерізу утилізаційного котла

Приймаємо $z = 250$.
Довжина труб (приймаємо кількість ходів газів $i = 1$)

$$l = \frac{H}{\pi d_{\text{вн}} z i} = \frac{54}{3,14 \cdot 0,032 \cdot 250 \cdot 1} = 2,15 \text{ м.}$$

З урахуванням висоти парового простору приймаємо $l = 2,5$ м.
Внутрішній діаметр циліндричного кожуху газотрубного котла

$$D_{\text{к}} = s \sqrt{\frac{z i}{0,75}} = 0,052 \sqrt{\frac{250 \cdot 1}{0,75}} = 0,95 \text{ м.}$$

Ескіз поперечного перерізу котла наведений на рис. 6.

3. Визначення газового опору трубного пучка утилізаційного котла

Коефіцієнт опору тертя (приймаємо середнє значення абсолют- ної шорсткості внутрішньої поверхні труб $k = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м)

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \cdot \lg \left(\frac{d_{\text{вн}}}{k} \right) + 1,14 \right)^2} = \frac{1}{\left(2 \cdot \lg \left(\frac{0,032}{0,2 \cdot 10^{-3}} \right) + 1,14 \right)^2} = 0,032.$$

Густина газів при їх середньоарифметичній температурі ϑ

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1 - 0,01 A^p + 1,306 \alpha V^o}{V_{\text{г}}} \left(\frac{273}{\vartheta + 273} \right) = \\ &= \frac{1 - 0,01 \cdot 0,01 + 1,306 \cdot 2,2 \cdot 11,23}{25,84} \left(\frac{273}{270 + 273} \right) = 0,65 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Опір тертя труб котла

$$\Delta h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d_{\text{вн}}} \left(\frac{\rho w_{\text{г}}^2}{2} \right) = 0,032 \cdot \frac{2,5}{0,032} \cdot \left(\frac{0,65 \cdot 28^2}{2} \right) = 637 \text{ Па.}$$

43

Згідно з наведеним планом студенти заочної форми навчання виконують контрольну роботу з дисципліни "Утилізаційні котли", яка складається з відповідей на три питання та двох завдань. Но- мера питань вибираються з табл. 1, а умови завдань – з табл. 2, 3 та 4 за номером варіанту. Номер варіанту відповідає порядковому номеру студента у списку групи. Виконуючи завдання, студент має

2.1. Загальні методичні вказівки

2. КОНТРОЛЬНА РОБОТА

Задані автоматизації утилізаційних установо. Методи управлін- ня паропродуктивністю УК. Системи автоматичного регулюван- ня, сигналізації та захисту УК. Регулювання рівня води в сепара- торх.

Література: [8], с. 209–214; [1], с. 62–87; [2], с. 193–200.

Тема 11. Автоматизація та регулювання утилізаційних установок

Вибір та розрахунок арматури котла.

Матеріал елементів УК, що працюють під тиском. Допустиме напруження. Розрахунок міцності основних елементів УК. Фор- мули для розрахунку товщини стінок колекторів, труб та днищ.

Тема 10. Розрахунок міцності елементів утилізаційних котлів. Розрахунок арматури

Тепловий баланс УК за результатами теплового розрахунку.

Література: [8], с. 221–222, 239–245; [2], с. 87–90; [3], с. 13–15, 25–28.

Методи визначення оптимального варіанту компоновання УК (послідовних наближень та графічний).

Методика перевіреного теплового розрахунку поверхонь на- гріву утилізаційного котла.

Контрольне завдання 2

1. Визначення паропродуктивності та коефіцієнта використання теплоти утилізаційного котла

Початкові дані до розрахунку вибираємо з табл. 2:
тиск насиченої пари $p = 0,6$ МПа;
температура живильної води $t_{ж.в} = 40$ °С;
ефективна потужність ДВЗ $N_e = 2000$ кВт;
питома витрата палива $g_e = 0,196$ кг/(кВт·год);
температура газів на вході до УК $\vartheta_d = 315$ °С;
температура газів на виході з УК $\vartheta_{від} = 225$ °С

Знаходимо за допомогою діаграми $I_T - \vartheta$ (див. рис. 5) ентальпію продуктів згоряння I_d і $I_{від}$ при заданих температурах ϑ_d і $\vartheta_{від}$:
 $I_d = 10900$ кДж/кг; $I_{від} = 7800$ кДж/кг.

Вибираємо з табл. 4Д ентальпію живильної води при заданих температурі живильної води $t_{ж.в}$ та тиску пари p : $i_{ж.в} = 167,9$ кДж/кг.

Вибираємо з табл. 5Д ентальпії води та сухої пари на лінії насичення при заданому тиску p : $i' = 670,4$ кДж/кг, $i'' = 2756,4$ кДж/кг.

Визначаємо ентальпію вологої пари, що відбирається від УК до споживачів (ступінь сухості пари приймаємо $x = 0,99$),

$$i_{в.п} = i'(1 - x) + i''x = 670,4(1 - 0,99) + 2756,4 \cdot 0,99 = 2735,5 \text{ кДж/кг.}$$

Приймаємо коефіцієнт збереження теплоти $\phi = 0,97$.
Визначаємо паропродуктивність утилізаційного котла

$$D = \frac{\phi g_e N_e (I_d - I_{від})}{3600(i_{в.п} - i_{ж.в})} = \frac{0,97 \cdot 0,196 \cdot 2000 \cdot (10900 - 7800)}{3600 \cdot (2735,5 - 167,9)} = 0,126 \text{ кг/с.}$$

Розраховуємо коефіцієнт використання теплоти

$$\eta_{ут} = \frac{\phi(I_d - I_{від})}{I_d} = \frac{0,97 \cdot (10900 - 7800)}{10900} = 0,28.$$

Таблиця 3. Початкові дані до контрольного завдання 2 (пункт 1)									
№ варіанта	Тиск насиченої пари (абсолют.) p, МПа	Температура живильної води t _{ж.в} , °С	Температура води на вході до УК t' _в , °С	Температура води на виході з УК t'' _в , °С	Ефективна потужність ДВЗ N _e , кВт	Питома ефективна витрата палива g _e , кг/(кВт·год)	Температура газів на вході до УК ϑ _д , °С	Температура газів на виході з УК ϑ _{від} , °С	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
01	0,5	40	-	-	2000	0,195	320	230	
02	0,5	45	-	-	3000	0,190	310	220	
03	0,6	50	-	-	4000	0,185	300	210	
04	0,6	55	-	-	5000	0,180	290	200	
05	0,7	60	-	-	6000	0,175	280	190	
06	0,7	50	-	-	1500	0,205	315	225	
07	0,8	45	-	-	5500	0,185	285	190	
08	0,8	50	-	-	6500	0,180	280	185	
09	0,9	55	-	-	7500	0,175	275	180	
10	0,9	60	-	-	8500	0,170	270	180	
11	0,5	50	-	-	9500	0,165	265	180	
12	0,5	60	-	-	4500	0,195	295	205	
13	-	-	65	95	800	0,190	290	205	
14	-	-	60	90	500	0,200	310	215	
15	0,8	60	-	-	5000	0,190	270	195	
16	0,6	45	-	-	2500	0,190	310	210	
17	0,8	45	-	-	3500	0,185	300	200	
18	0,8	55	-	-	4500	0,180	290	190	

дотримуватись свого варіанту. Питання та умови завдань повинні бути переписані повністю. Розрахунки слід супроводжувати стислими поясненнями. Необхідно вказувати одиниці всіх величин. При виконанні завдань можна використовувати спеціальні математичні програми для ЕОМ (*MathCad*, *MathLab*, *Excel* та інші).

Таблиця 1. Вибір контрольних питань

№ варіанта	Номера питань	№ варіанта	Номера питань
01	1, 28, 58	16	16, 43, 73
02	2, 29, 59	17	17, 44, 74
03	3, 30, 60	18	18, 45, 75
04	4, 31, 61	19	19, 46, 76
05	5, 32, 62	20	20, 47, 77
06	6, 33, 63	21	21, 48, 78
07	7, 34, 64	22	22, 49, 79
08	8, 35, 65	23	23, 50, 80
09	9, 36, 66	24	24, 51, 64
10	10, 37, 67	25	25, 52, 65
11	11, 38, 68	26	26, 53, 66
12	12, 39, 69	27	27, 54, 67
13	13, 40, 70	28	1, 55, 68
14	14, 41, 71	29	2, 56, 69
15	15, 42, 72	30	3, 57, 70

При виборі розрахункових формул та додаткових величин (наприклад фізичних властивостей випускних газів, води та пари) слід робити посилання на літературні джерела, а в кінці контрольної роботи навести повний список використаних джерел.

Таблиця 2. Початкові дані до контрольного завдання 1

№ варіанта	Марка або тип утилізаційного котла	Література	Паливо	Коефіцієнт надлишку повітря
1	2	3	4	5
01	КУП-40	[2], рис. 9.12	дизельне	2,30
02	КУП-55	[9], рис. 10	дизельне	2,40
03	КУП-80	[8], рис. 11.1	дизельне	2,50

3. Визначення ентальпій випускних газів ДВЗ і побудова діаграми $I_T - \vartheta$

Ентальпію випускних газів ДВЗ розраховуємо за формулою

$$I_T = (V^{Ro_2} c_{Ro_2} + V^{N_2} c_{N_2} + V^{H_2O} c_{H_2O}) \vartheta + (\alpha - 1) V^0 c_{пов} \vartheta,$$

де c_{Ro_2} , c_{N_2} , c_{H_2O} , $c_{пов}$ – середні в інтервалі температур від 0 до ϑ ізобарні об'ємні теплоємності триатомних газів, азоту, водяної пари та повітря, кДж/(м³·К), які вибираємо з табл. 3Д.

При $\vartheta = 0$ ентальпія випускних газів I_T^0 °С = 0 кДж/кг.

При $\vartheta = 200$ °С середні об'ємні ізобарні теплоємності, кДж/(м³·К): $c_{Ro_2} = 1,79$; $c_{N_2} = 1,3$; $c_{H_2O} = 1,52$; $c_{пов} = 1,33$;

ентальпія випускних газів, кДж/кг:

$$I_{200}^T = (1,62 \cdot 1,79 + 8,87 \cdot 1,3 + 1,66 \cdot 1,52) \cdot 200 + (2,2 - 1) \cdot 11,23 \cdot 1,33 \cdot 200 \approx 6976.$$

При $\vartheta = 400$ °С середні об'ємні ізобарні теплоємності, кДж/(м³·К): $c_{Ro_2} = 1,93$; $c_{N_2} = 1,32$; $c_{H_2O} = 1,57$; $c_{пов} = 1,35$;

38

№ варіанта	Марка або тип утилізаційного котла	Література	Паливо	Коефіцієнт надлишку повітря
1	2	3	4	5
04	КУП-140	[9], рис. 11	дизельне	2,60
05	КУП-160	[9], рис. 12	дизельне	2,70
06	КУП-40	[2], рис. 9.12	моторне	2,80
07	КУП-170	[9], рис. 13	дизельне	2,90
08	КУП-900	[9], рис. 15	моторне	3,00
09	КУП-660	[9], рис. 16	моторне	3,10
10	КУП-700	[9], рис. 17	моторне	3,20
11	КУП-1100	[8], рис. 11.3	моторне	3,30
12	КУП-170	[9], рис. 13	моторне	2,90
13	КУВ-100	[8], рис. 11.8	дизельне	2,65
14	КАУ-4,5	[8], рис. 11.9	дизельне	2,45
15	газотрубний	[7], рис. Y.6	дизельне	2,55
16	КУП 40	[2], рис.9.12	моторне	2,30
17	КУП 55	[9], рис. 10	моторне	2,40
18	КУП 80	[8], рис. 11.1	моторне	2,50
19	КУП 140	[9], рис. 11	моторне	2,60
20	КУП 160	[9], рис. 12	моторне	2,70
21	КУП 80	[8], рис. 11.1	дизельне	2,80
22	КУП-170	[9], рис. 13	моторне	3,05
23	КУП-900	[9], рис. 15	моторне	3,15
24	КУП-660	[9], рис. 16	моторне	3,25
25	КУП-700	[9], рис. 17	моторне	3,35
26	КУП-1100	[8], рис. 11.3	моторне	3,45
27	КУП-170	[9], рис. 13	дизельне	2,75
28	КУВ-100	[8], рис. 11.8	моторне	2,45
29	КАУ-4,5	[8], рис. 11.9	моторне	2,75
30	газотрубний	[7], рис. Y.6	моторне	2,55

ентальпія випускних газів, кДж/кг

$$I_{\Gamma}^{400} = (1,62 \cdot 1,93 + 8,87 \cdot 1,32 + 1,66 \cdot 1,57) \cdot 400 + (2,2 - 1) \cdot 11,23 \cdot 1,35 \cdot 400 \approx 14257.$$

Будуємо діаграму $I_{\Gamma} - \vartheta$ (рис. 5).

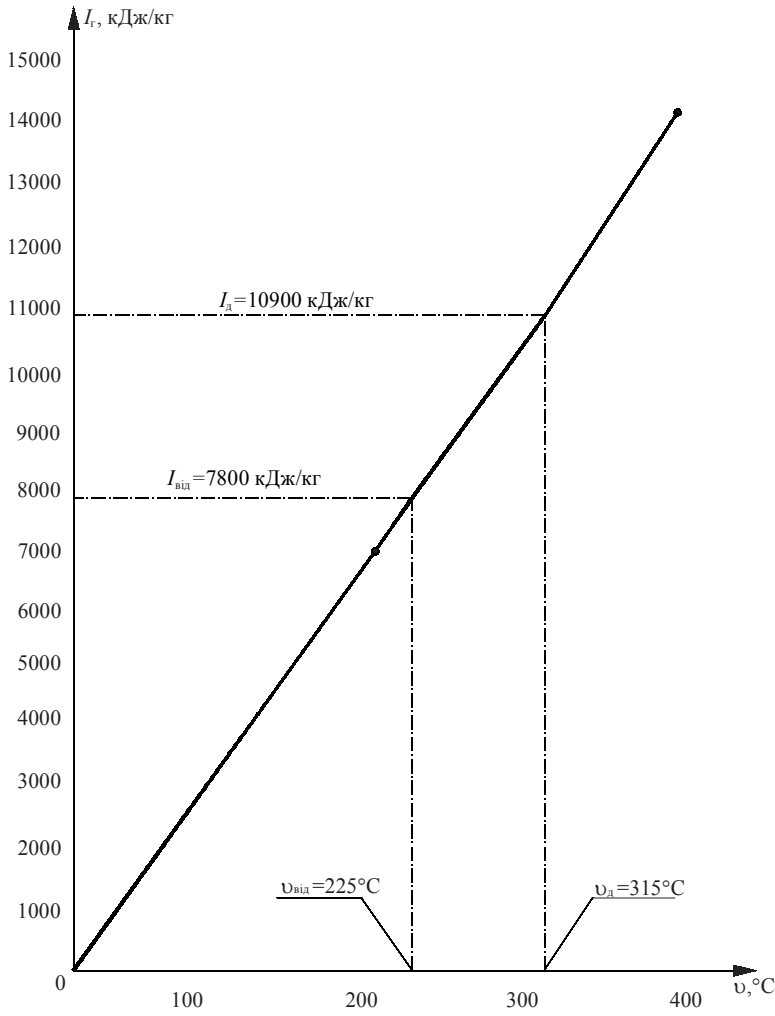


Рис. 5. Діаграма $I_{\Gamma} - \vartheta$

живильним насосом 2. Насичена пара, що генерується котлом, спрямовується до споживачів. Конденсат відпрацьованої пари повертається до теплого ящика після охолодження 4.

2. Визначення об'єму випускних газів ДВЗ при повному спалюванні

Початкові дані до розрахунку вибираємо з табл. 1: паливо – дизельне; коефіцієнт надлишку повітря – $\alpha = 2,2$.

Елементарний склад палива, %, вибираємо з табл. 1Д: $C^r = 86,3$; $H^r = 13,3$; $(N^r + O^r) = 0,1$; $S^r = 0,3$; $A^r = 0,01$; $W^r = 0$.

Перевірний коефіцієнт для перерахунку з горючої маси палива на роботу (вибираємо з табл. 2Д)

$$K = \frac{100 - A^r - W^r}{100 - 0,01 - 0} = \frac{100}{100} = 0,999.$$

Склад робочої маси палива, %

$$C^p = C^r \cdot K = 86,3 \cdot 0,999 = 86,29;$$
$$H^p = H^r \cdot K = 13,3 \cdot 0,999 = 13,29;$$
$$(N^p + O^p) = (N^r + O^r) \cdot K = 0,1 \cdot 0,999 = 0,099;$$
$$S^p = S^r \cdot K = 0,3 \cdot 0,999 = 0,29.$$

Перевірка: $C^p + H^p + (N^p + O^p) + S^p + A^p + W^p = 86,29 + 13,29 + 0,099 + 0 = 100$ %.

Теоретично необхідний об'єм сухого повітря V^0 , м³/кг:

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,267 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p = 0,0889 \cdot (86,29 + 0,375 \cdot 0,29) + 0,267 \cdot 13,29 - 0,0333 \cdot 0,099 = 11,23.$$

Об'єм триатомних газів, м³/кг:

$$V^{Ro_2} = 0,0187 \cdot (C^p + 0,375 S^p) = 0,0187 \cdot (86,29 + 0,375 \cdot 0,29) = 1,62.$$

Продовж. табл. 3

№ варіанта	Тиск насиченої пари (абсолют.) p, МПа	Температура живильної води t _{жв} , °С	Температура води на вході до УК t'в, °С	Температура води на виході з УК t''в, °С	Ефективна потужність ДВЗ N _e , кВт	Питома ефективна витрата палива g _e , кг/(кВт·год)	Температура газів на вході до УК ϑ_d , °С	Температура газів на виході з УК $\vartheta_{від}$, °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9
19	0,9	50	-	-	5500	0,175	275	185
20	0,9	40	-	-	6500	0,170	270	180
21	0,7	55	-	-	3700	0,190	295	200
22	0,7	45	-	-	5000	0,185	285	190
23	0,6	40	-	-	7000	0,180	270	185
24	0,6	60	-	-	8000	0,175	265	180
25	0,5	55	-	-	9000	0,165	260	180
26	0,5	45	-	-	10000	0,160	255	175
27	0,7	40	-	-	6000	0,160	260	180
28	-	-	60	90	900	0,185	280	195
29	-	-	65	95	600	0,195	300	215
30	0,9	45	-	-	3000	0,185	280	200

ефіцієнт опору ζ_0 , віднесений до одного ряду труб, визначається в залежності від величин σ_1 , Re та $\varphi = (s_1 - d)/(s_2' - d)$, де $s_2' = \sqrt{0,25s_2^2 + s_2^2}$ – діагональний крок. Величину ζ_0 при $0,14 \leq \varphi \leq 1,7$ можна знайти з формул: при $\sigma_1 < 2$ $\zeta_0 = (3,2 + (4,6 - 2,7\varphi)(2 - \sigma_1))Re^{-0,27}$; при $\sigma_1 \geq 2$ $\zeta_0 = 3,2Re^{-0,27}$. Для шахових пучків при $1,7 \leq \varphi \leq 5,2$ $\zeta_0 = 0,44(\varphi + 1)^2 Re^{-0,2}$.

Опір тертя труб газотрубних УК визначається за формулою

$$\Delta h_{tr} = \lambda \frac{l}{d_{вн}} \left(\frac{P_{w_t}^2}{2} \right), \text{ Па,}$$

де λ – коефіцієнт опору тертя; $\lambda = 1/(2 \lg(d_{вн}/k) + 1,14)^2$, де k – середнє значення абсолютної шорсткості внутрішньої поверхні труби ($k = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м); λ і $d_{вн}$ – відповідно довжина і внутрішній діаметр труби, м; $d_{вн} = d - 2\delta$, де d і δ – відповідно задані зовнішній діаметр труб та їх товщина; ρ – густина газів при їх середньо-арифметичній температурі, $кг/м^3$; w_t – задана швидкість газів, м/с. У формулах для розрахунку опору густина газів при їх середньо-арифметичній температурі 1 $кг$ палива з табл. $1Д$, %; α – заданий коефіцієнт надлишку повітря; V^0 – теоретична кількість сухого повітря для згоряння 1 $кг$ палива, $м^3/кг$; V_t – об'єм випускних газів, $м^3/кг$.

$$\rho = \frac{1 - 0,01A^p + 1,306\alpha V^0}{273} \left(\frac{V_t}{\vartheta + 273} \right), \text{ кг/м}^3,$$

де A^p – зольність палива з табл. $1Д$, %; α – заданий коефіцієнт надлишку повітря; V^0 – теоретична кількість сухого повітря для згоряння 1 $кг$ палива, $м^3/кг$; V_t – об'єм випускних газів, $м^3/кг$.

Таблиця 4. Початкові дані до контрольного завдання 2 (пункт 2)

№ варіанта	Тип утилізаційного котла	Форма поперечного перізу котла	Геометрія трубного пучка				Швидкість газів w_t , м/с
			Розміщення труб у пучку (рис. 2)	Зовнішній діаметр і товщина труб $d \times \delta$, мм	Крок труб, мм	Крок труб, мм	
1	2	3	4	5	6	7	8
10	Водотрубний з примусовою циркуляцією (спіралеподібними змійовиками)	Циліндрична, рис. 1, а	Коридорне	29×2,5	44	44	20
20	Теж	Теж	Теж	32×3,0	46	46	11
30	Теж	Теж	Теж	29×2,5	43	43	22
40	Теж	Теж	Теж	29×2,5	42	42	23
50	Теж	Теж	Теж	38×3,0	52	52	24
90	Теж	Теж	Теж	32×3,0	45	45	25
40	Водотрубний з примусовою циркуляцією	Прямокутна, рис. 1, б	Шахове	29×2,5	50	44	13
80	Теж	Теж	Коридорне	29×2,5	50	44	14
90	Теж	Теж	Шахове	29×2,5	48	43	15
10	Теж	Теж	Коридорне	22×2,5	46	40	16

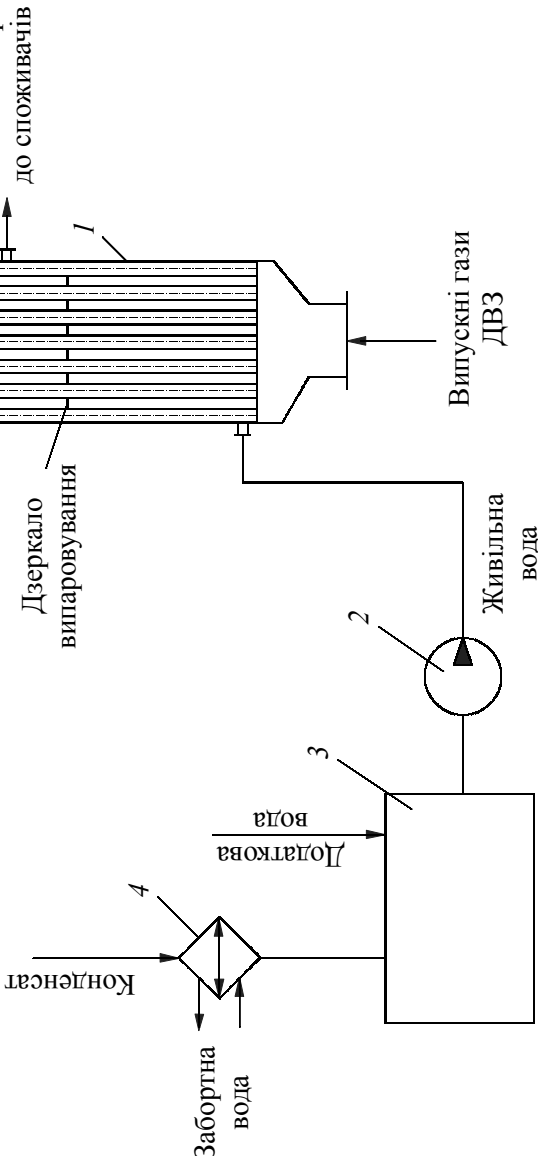


Рис. 4. Принципова схема системи утилізації теплоти випускних газів ДВЗ

20	Теж	Теж	Теж	38×3,0	53	51	25
21	Теж	Теж	Теж	29×2,5	44	43	26
22	Водотрубний з примусовою циркуляцією	Прямокутна, рис. 1, б	Коридорне	29×2,5	55	43	15
23	Теж	Теж	Коридорне	22×2,5	44	40	16
24	Теж	Теж	Шахове	22×2,5	42	40	17
25	Теж	Теж	Шахове	22×2,5	40	40	18
26	Теж	Теж	Шахове	22×2,5	44	38	19
27	Теж	Теж	Шахове	22×2,5	40	38	20
28	Вертикально-газотрубний	Циліндрична, рис. 1, в	За вершинами рівнобічного трикутника	38×3,0	53		26
29	Теж	Теж	Теж	32×3,0	46		25
30	Теж	Теж	Теж	38×3,0	52		29

№ варіанта	Тип утилізаційного котла	Форма поперечного перізу котла	Геометрія трубного пучка				Швидкість газів w_T , м/с
			Розміщення труб у пучку (рис. 2)	Зовнішній діаметр і товщина труб $d \times \delta$, мм	Крок труб, мм	Крок труб, мм	
					поперечний s_1	поздовжній s_2	
1	2	3	4	5	6	7	8
11	Теж	Теж	Шахове	22×2,5	46	40	17
12	Теж	Теж	Шахове	22×2,5	40	38	18
13	Вертикально-газотрубний	Циліндрична, рис. 1, в	За вершинами рівнобічного трикутника	32×3,0	46		28
14	Теж	Теж	Теж	29×2,5	43		27
15	Теж	Теж	Теж	38×3,0	53		30
16	Водотрубний з примусовою циркуляцією (спіралеподібними змійовиками)	Циліндрична, рис. 1, а	Коридорне	32×3,0	47	46	21
17	Теж	Теж	Теж	29×2,5	43	42	22
18	Теж	Теж	Теж	38×3,0	51	51	23
19	Теж	Теж	Теж	32×3,0	46	45	24

де ζ – коефіцієнт опору пучка, величина якого залежить від будови пучка, кількості рядів труб у пучку z_2 та числа Re , p – густина газів при їх середньарифметичній температурі у пучку, $кг/м^3$; w_T – задана швидкість газів, м/с.

При коридорній будові гладкотрубних пучків $\zeta = \zeta_0 z_2$, де ζ_0 – коефіцієнт опору, віднесений до одного ряду труб, визначається в залежності від величин $Re = (w_T d) / \nu$. При $Re \leq 0,06 \leq \psi \leq 1$ $\zeta_0 = 2(\sigma_1 - 1)^{-0,5} Re^{-0,2}$; при $\sigma_1 > \sigma_2$ та $1 \leq \psi \leq 8$ $\zeta_0 = 0,38(\sigma_1 - 1)^{-0,5} (\psi - 0,94)^{-0,59} Re^{-0,2/\psi^2}$.

При шаховій будові гладкотрубних пучків $\zeta = \zeta_0 (z_2 + 1)$; ко-

Після визначення усіх геометричних характеристик утилізаційного котла (розмірів поперечного перерізу, кількості труб у ряді та кількості рядів труб для водотрубних котлів, загальної кількості труб та їх довжини нини (будується ескіз його поперечного перерізу.

Опір пучків труб водотрубних УК при поперечному омиванні визначається за формулою

$$\Delta h_{пуч} = \zeta \left(\frac{\rho w_T^2}{2} \right), \text{ Па,}$$

Внутрішній діаметр циліндричного кожуху газотрубного котла німи отворами має бути не менше 14 мм.

Вались за вершинами рівнобічного трикутника. Відстань між сусід-сід виконувати так, щоб центри трьох сусідніх отворів розмішу-Розбиття отворів для труб у трубній дощі газотрубного УК няти 0,3...0,5 м.

ну l слід збільшити на висоту парового простору, яку можна прий-

4. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Контрольне завдання 1

1. Опис конструкції утилізаційного котла та схеми системи утилізації теплоти випускних газів ДВЗ

На рис. 3 наведена конструкція одноходового парового вертикально-газотрубного утилізаційного котла типу "Джуро Джакович", встановленого на танкерах типу "Спліт" [1]. Паропродуктивність котла становить 3,7 т/год при температурі випускних газів перед котлом 350 °С (робочий тиск насиченої пари 1,25 МПа), а поверхня нагріву – 450 м². Температура живильної води 60 °С. Маса сухого котла 25500 кг, його розміри 4,2 × 2,91 м.

Котел складається з циліндричної частини 2, верхньої 3 та нижньої 1 трубних дошок, в яких за допомогою зварення закріплені труби 4. Для внутрішнього огляду і очищення котла передбачені лючки 5. Котел встановлений на випускному газопроводі головного двигуна і газ, що проходять по трубах, передають теплоту воді, яка омиває труби ззовні, забезпечуючи її нагрівання та випаровування.

Принципова схема системи утилізації теплоти випускних газів ДВЗ з паровим газотрубним котлом зображена на рис. 4. Утилізаційний котел 1 розміщений на випускному газопроводі двигуна. Подача живильної води до котла здійснюється з теплового ящика 3

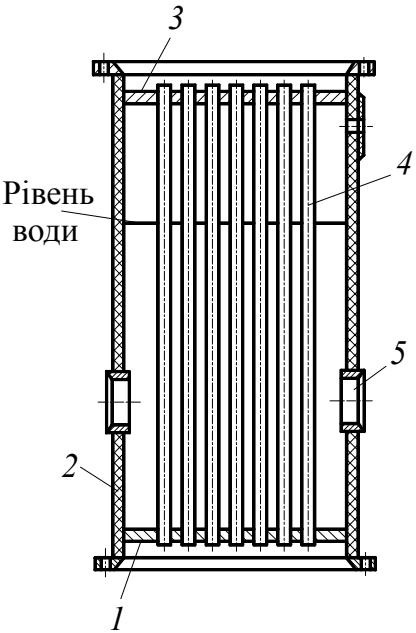
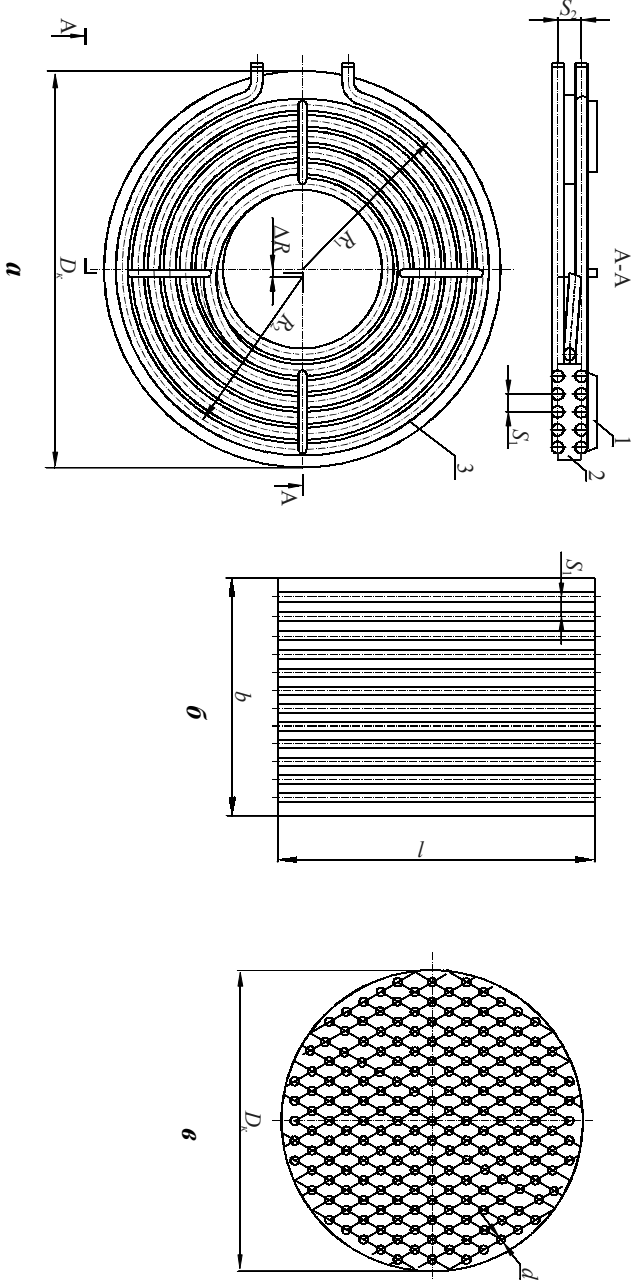


Рис. 3. Вертикально-газотрубний утилізаційний котел

Рис. 1. Схеми поперечних перерізів утилізаційних котлів:
 a – водотрубного з примусовою циркуляцією з циліндричною формою кожуха (спіралеподібними змійовиками); b – водотрубного з примусовою циркуляцією з прямокутною формою кожуха (вертикальними змійовиками); $в$ – вертикально-газотрубного з розміщенням труб за вершинами рівнобічного трикутника



Площа живого перерізу для проходу газів визначається з рівняння зв'язку між витратою газів та їх швидкістю w_r

$$F_r = \frac{g_e N_e V_r}{\vartheta + 273} \left(\frac{3600 w_r}{273} \right), \text{ м}^2,$$

де ϑ – середньозарифметична температура газів, °С.

Розраховавши площу живого перерізу для проходу газів та маючи геометричні характеристики трубного пучка (діаметр труб та їх крок), визначаються розміри поперечного перерізу утилізації-

ного котла.

На схемі поперечного перерізу водотрубного УК з примусо-

вою циркуляцією з циліндричною формою кожуха (див. рис. 1, а) кожен виток змійовика спіралеподібної форми складається з двох напівкіл з радіусами R_1 та R_2 , які вирізняються на величину $\Delta R = 20 \dots 22$ мм.

Попереднє визначення внутрішнього діаметру циліндричного кожуху D_k може бути зроблено за допомогою емпіричної залеж-

ності

$$D_k = 0,0014 \sqrt{N_{e \text{ ном}}}, \text{ м},$$

де A – емпіричний коефіцієнт, для швидкохідних двигунів $A = 30 \dots 37$, для тихохідних двигунів $A = 26 \dots 29$, N_e – задана ефек-

тивна потужність двигуна, кВт.

Якщо УК має внутрішню газоперепускну трубу для регулю-

вання паропродуктивності, діаметр внутрішнього витка спіралі

визначається діаметром цієї труби:

$$D_{\text{п.т.}} = \sqrt{\frac{4 g_e N_e V_r}{\vartheta_d + 273} \left(\frac{\pi 3600 w_{\text{п.т.}}}{273} \right)}, \text{ м},$$

де $w_{\text{п.т.}}$ – швидкість руху газів у газоперепускній трубі, яка прий-

мається в межах $50 \dots 60$ м/с.

Кільцеві зазори між внутрішнім витком спіралі та стінкою та-

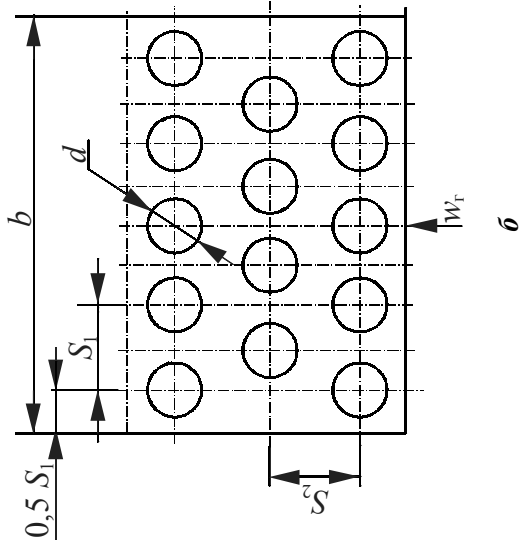
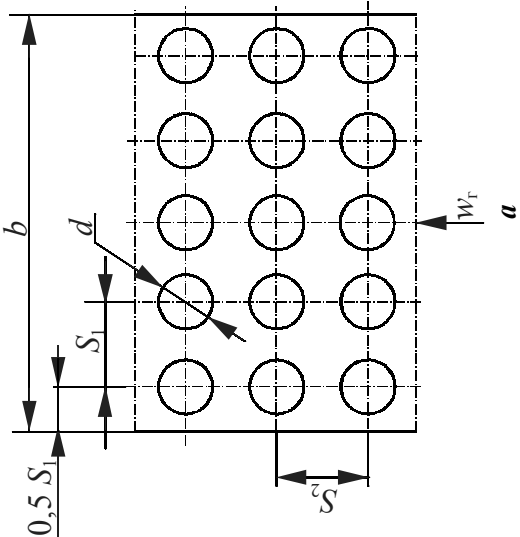


Рис.2. Схеми компоновання пучків труб при поперечному омиванні їх газами:

a – коридорна будова; *б* – шахова будова

$$b = \sqrt{F_r / \omega}, \text{ м},$$

де ω – коефіцієнт вільного проходу газів; $\omega = (s_1 - d) / s_1$.

Кількість труб в ряду z_1

$$z_1 = b / s_1.$$

Розрахункове значення z_1 округлюється до найближчого цілого числа.

Визначається площа поверхні одного ряду

$$H_p = \pi d b z_1, \text{ м}^2,$$

та загальна кількість рядів труб z_2

$$z_2 = H / H_p.$$

Розрахункове значення z_2 округлюється до найближчого цілого числа.

Для вертикально-газотрубних котлів (див. рис. 1, б) кількість труб одного ходу

$$z = \frac{4 F_r}{\pi (d - 2 \delta)^2}.$$

Розрахункове значення z округлюється до найближчого цілого числа.

Довжина труб газотрубного УК розраховується за формулою

$$l = \frac{H}{\pi (d - 2 \delta) z i}, \text{ м}.$$

де i – число ходів газів: $i = 1$ для одноходового та $i = 2$ для двоходового компоновання газотрубного котла. Двоходове компоновання приймається для зменшення довжини труб, а отже висоти котла.

Для парового вертикально-газотрубного УК отриману довжи-

як визначається їх об'єм?

29. Які компоненти входять до складу випускних газів ДВЗ та на іншу.

робочу та горючу масу та формули для перерахунку з одиниці маси

28. Запишіть елементарний склад рідкого палива для ДВЗ на пари утилізаційних котлів.

27. Зобразіть конструкцію та поясніть принцип дії сепаратора сування.

тикальних та горизонтальних сепараторів пари та області їх засто-

з примусовою циркуляцією? Вкажіть особливості конструкцій вер-

26. Яке призначення сепараторів пари утилізаційних котлів виробництва.

25. Які основні напрямки розвитку конструкцій утилізаційних котлів? Наведіть приклад конструкції сучасних УК зарубіжного

використання різних типів УК?

24. Вкажіть переваги та недоліки конструкцій різних типів утилізаційних котлів та порівняйте їх характеристики. Які області

нованих парових котлів.

23. Зобразіть схему і поясніть принцип дії допоміжних комбі-

кальних утилізаційних парових котлів з природною циркуляцією.

22. Зобразіть схему і поясніть принцип дії водотрубних верти-

заційних котлів.

21. Зобразіть схему і поясніть принцип дії газотрубних утилі-

котла. Які переваги та недоліки конструкцій таких котлів?

20. Наведіть приклад конструкції компактного утилізаційного

мою кожуха).

цією і вертикальним розміщенням змійовиків (прямокутною фор-

заційних парових котлів з багаторазовою примусовою циркуля-

19. Зобразіть схему і поясніть принцип дії водотрубних утилі-

формою кожуха).

цією і горизонтальним розміщенням змійовиків (циліндричною

заційних парових котлів з багаторазовою примусовою циркуля-

18. Зобразіть схему і поясніть принцип дії водотрубних утилі-

котлів? Покажіть процеси отримання водяної пари в Т-с діаграмі.

17. Які роботи процеси відбуваються в елементі утилізаційних котлів.

16. Наведіть основні характеристики утилізаційних котлів.

2.2. Контрольні питання

- 1. Яке призначання суднової допоміжної котельної установки?
- 2. Які системи входять до суднової допоміжної котельної установки? Вкажіть їх призначення та склад.
- 3. Наведіть схему суднової допоміжної котельної установки для тепло- та електропостачання (з сепаратором пари) та опис її роботи.
- 4. Наведіть схему суднової допоміжної котельної установки для тепло- та електропостачання (без сепаратора пари) та опис її роботи.
- 5. Наведіть схему суднової допоміжної котельної установки для тепlopостачання (з сепаратором пари) та опис її роботи.
- 6. Наведіть схему водогрійної котельної установки та опис її роботи.
- 7. Вкажіть особливості котельних установок промислових суден та наведіть схеми утилізація теплоти випускних газів дизель-генераторів.
- 8. Запишіть рівняння теплового балансу ДВЗ та дайте характеристику його складових. Які особливості теплового балансу сучасних судових ДВЗ?
- 9. Які напрямки використання вторинних енергоресурсів ДВЗ на судах?
- 10. Наведіть схему системи малої утилізації теплоти та вкажіть її призначення.
- 11. Наведіть схему системи глибокої утилізації теплоти та вкажіть її призначення.
- 12. Наведіть схему системи комплексної утилізації теплоти та вкажіть її призначення.
- 13. Наведіть схему двоконтурної утилізаційної установки (двох тисків). Які переваги та недоліки таких установок?
- 14. Які основні напрямки розвитку судових утилізаційних установок? Наведіть схеми перспективних систем утилізації теплоти.
- 15. Як класифікують утилізаційні котли? Вкажіть вимоги, які висувають до утилізаційних котлів.

де t_b – середня температура води, $^{\circ}\text{C}$: $t_b = 0,5(t'_b + t''_b)$.

$$\Delta t = \frac{(\vartheta_{\text{д}} - t_b) - (\vartheta_{\text{влд}} - t_b)}{(\vartheta_{\text{д}} - t_b) - (\vartheta_{\text{влд}} - t_b)}, ^{\circ}\text{C}, \ln \frac{\vartheta_{\text{влд}} - t_b}{\vartheta_{\text{д}} - t_b}$$

для поверхні нагріву водогрійного утилізаційного котла табл. 5.11.

де $t_{\text{нл}}$ – температура насичення при заданому тиску, вибирається

$$\Delta t = \frac{\vartheta_{\text{д}} - \vartheta_{\text{влд}}}{\vartheta_{\text{д}} - t_{\text{нл}}}, ^{\circ}\text{C}, \ln \frac{\vartheta_{\text{влд}} - t_{\text{нл}}}{\vartheta_{\text{д}} - t_{\text{нл}}}$$

для паротвірної поверхні нагріву

Температурний напір Δt розраховується за формулами:

середньозваженою температурою газів $\vartheta = 0,5(\vartheta_{\text{д}} + \vartheta_{\text{влд}})$.

число Прандтля випускних газів, які визначаються з табл. 6.11 за провідності, Вт/(м·К), коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с, та дана швидкість газів, м/с; λ , ν , Pr – відповідно коефіцієнт тепло- ν формулах для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі w_t – за-
ють $C_l = 1$.

охолодження газів $C_l = 1$; при довжині труби котла $l \geq 50d$ прийма-
ження або нагрівання середовища) та відносну довжину труби; при
– поправки, які ураховують напрямки теплового потоку (охолод-
відповідно задані зовнішній діаметр труби та їх товщина, м; C_l і C_l
де $d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр труби, м; $d_{\text{вн}} = d - 2\delta$, де d і δ –
 $\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_{\text{вн}}} \cdot \left(\frac{d_{\text{вн}}}{w_t} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot C_l \cdot C_l$, Вт/(м²·К),

При русі газів усередині труби газотрубних котлів коефіцієнт
тепловіддачі конвекцією визначається за формулою

зоперепускної труби, а також зовнішнім витком спіралі і стінкою корпусу мають бути 5...10 мм. У разі відсутності внутрішньої га-
зоперепускної труби радіуси внутрішнього витка спіралі з техно-
логічних міркувань повинні бути не менш 80...100 мм. Отвір, що
утворюється у пучку, перекривається диском зверху і знизу, і його
площа до живого перерізу не входить.

Загальна довжина спіралі змійовика дорівнює сумарній дов-

жині напівкіл усіх її витків $l_{\text{сп}} = \pi \sum_1^n (R_1 + R_2)_i$, де n – кількість

витків спіралі, і розраховується зі співвідношення

$$l_{\text{сп}} = \frac{1}{d} \left(\frac{\pi(D_{\kappa}^2 - D_{\text{п.т}}^2)}{4} - F_{\Gamma} \right), \text{ м.}$$

Тоді загальна площа поверхні змійовика, який складається з двох спіралей,

$$H_{\text{зм}} = 2\pi d l_{\text{сп}}, \text{ м}^2.$$

Зазор між спіралями і змійовиками по висоті приймається рівним 13...15 мм, чого досягають за допомогою дистанційних гребінок 2 та стрічок 1 (див. рис. 1,а). Кількість витків 3 однієї спіралі визначається методом підбору; можливо, що при цьому виникне необхідність змінити задану швидкість газів.

Кількість спіралеподібних змійовиків

$$z_{\text{зм}} = H/H_{\text{зм}}.$$

Розрахункова величина $z_{\text{зм}}$ може бути цілим або дробовим чис-
лом. В останньому випадку $z_{\text{зм}}$ необхідно округлити до найближ-
чого цілого, після чого знайти уточнену поверхню нагріву H .

Розміри поперечного перерізу водотрубного УК з примусовою циркуляцією з прямокутною формою кожуха (див. рис. 1,б) визна-
чаються за формулою (поперечний переріз приймається квадрат-
ної форми, тобто $b = l$)

Як визначають температурний напір в них?

42. Зобразіть схеми руху теплоносіїв в поверхнях нагріву УК?

41. Які методи використовують для інтенсифікації конвектив-
ного теплообміну у судових утилізаційних котлах?

40. Наведіть формулу для визначення коефіцієнта тепловіддачі
випромінюванням газів в УК. Від яких факторів залежить ко-
ефіцієнт тепловіддачі випромінюванням? Коли враховують теп-
лообмін випромінюванням?

39. Наведіть формулу для визначення коефіцієнта тепловіддачі
конвекцією при русі газів у трубах газотрубних УК. Що врахову-
ють поправки до цієї формули?

38. Наведіть формули для визначення коефіцієнтів тепловіддачі
конвекцією при поперечному омиванні гладкотрубних пучків УК.
Які фактори впливають на коефіцієнт тепловіддачі конвекцією?

37. Які особливості теплообміну в паротвірних поверхнях,
пароперівинку та економайзері УК? Напишіть формули для роз-
рахунку коефіцієнта теплопередатчі у цих поверхнях.

36. Як враховують при розрахунку теплообміну зовнішнє за-
бруднення та неповноту омивання поверхонь нагріву УК? Від яких
факторів залежить коефіцієнт забруднення? Що таке коефіцієнт
тепловій ефективності поверхонь нагріву?

35. Як у загальному виді записується рівняння для розрахунку
верхні нагріву УК?

34. Вкажіть особливості теплообміну в утилізаційних котлах.
Як розраховується кількість теплоти, що передається через по-
верхні нагріву УК?

33. Наведіть формули для визначення ефективності викори-
стання теплоти випускних газів ДВЗ в утилізаційних котлах.

32. Запишіть рівняння теплового балансу утилізаційного кот-
ла. Як визначають складові теплового балансу УК? Яке числове
значення має коефіцієнт збереження теплоти?

31. Наведіть формули для визначення ентальпії випускних газів
ДВЗ. Як будується $I - \vartheta$ діаграма продуктів згоряння?

30. Наведіть формулу для розрахунку об'єму продуктів згоря-
ння 1 кг рідкого палива. Що таке коефіцієнт надлишку повітря?

Вкажіть значення цього коефіцієнта для ДВЗ.

Паропродуктивність D утилізаційного котла, що генерує на-

сичену пару, визначається з рівняння теплового балансу

$$D = \frac{g^e N^e \phi(I_d - I_{в.п})}{3600 (t_{в.п} - t_{ж.в})}, \text{ кг/с,}$$

де g^e – питома ефективна витрата палива, кг/(кВт·год); N^e – ефек-

тивна потужність ДБЗ, кВт; ϕ – коефіцієнт збереження теплоти

(приймається $\phi = 0,95 \dots 0,98$); I_d , $I_{в.п}$ – ентальпії випускних

газів, кДж/кг, відповідно на вході до УК та виході з нього (визна-

чаються за допомогою побудованої діаграми I_p – v випускних

газів за температурами v_d і $v_{в.п}$); $t_{ж.в}$ – ентальпія живильної

води, кДж/кг, яка вибирається з табл. 4Д за заданими тиском пари

p і температурою живильної води $t_{ж.в}$; $t_{в.п}$ – ентальпія вологої

пари, кДж/кг, яка відбирається з котла або сепаратора пари, розра-

ховується за формулою

$$t_{в.п} = t'(1 - x) + t''x,$$

де x – ступінь сухості пари, яка приймається у межах $0,99 \dots 0,995$;

t' та t'' – ентальпії відповідно води на лінії насичення та сухої наси-

ченої пари, кДж/кг, які вибираються з табл. 5Д за тиском пари p .

Витрата води G водогрійного утилізаційного котла

$$G = \frac{g^e N^e \phi(I_d - I_{в.п})}{3600 (t_{в.п} - t_{ж.в})}, \text{ кг/с,}$$

де $t_{ж.в}$ та $t_{в.п}$ – відповідно задані температури води на вході до ути-

лізаційного котла та виході з нього, $^{\circ}\text{C}$; c_p – середня теплоємність

води в діапазоні температур $t_{ж.в}$ та $t_{в.п}$, кДж/(кг·К); приймається

43. Які види опорів виникають під час руху газів в УК та як їх розраховують? Вкажіть особливості аеродинаміки утилізаційних котлів.

44. Поясніть зв'язок між газовим опором УК, тепловіддачею та економічністю роботи котельної установки. Як визначають швидкість газів, при якій аеродинамічний опір УК не буде перевищувати максимально допустимий?

45. Назвіть види корозії зовнішньої сторони поверхонь нагріву УК, поясніть механізм протікання корозійних процесів та методи боротьби з ними.

46. В чому полягає фізична сутність природної циркуляції. Що таке кратність циркуляції води, рушійний та корисний напір циркуляції? Поясніть мету та принцип розрахунку природної циркуляції.

47. Зобразіть схеми з паралельним та послідовним омиванням зміювиків УК газовим потоком. Яка особливість гідродинаміки зміювиків з примусовою циркуляцією? Що таке теплова та гідравлічна нерівномірність поверхонь нагріву.

48. Запишіть рівняння гідравлічної характеристики зміювика. Що таке багатозначність гідравлічної характеристики зміювика та міжвиткова пульсація потоку? Вкажіть способи їх ліквідації.

49. Вкажіть основні показники якості води. Як якість води впливає на економічність і надійність роботи УК?

50. Поясніть механізм процесів накипо- і шламоутворення. Які фактори впливають на ці процеси? Що таке добуток розчинності?

51. Назвіть види корозії внутрішньої сторони поверхонь нагріву УК, поясніть механізм протікання корозійних процесів та методи боротьби з ними. Як оцінюють швидкість корозії?

52. Як відбувається забруднення пари? Що таке коефіцієнт виносу солей? Поясніть механізм краплинного виносу. Які фактори впливають на якість пари?

53. Поясніть вплив чистоти пари на надійність та ефективність роботи обладнання суднової котельної установки. Вкажіть норми граничного солемісту пари утилізаційних котлів. Як забезпечується нормативний солеміст пари?

ної води на вході до економайзера. Що таке кратність циркуляції та як її вибирають?

69. Які розрахунки вкляючає проектування УК? В чому полягають мета та особливості конструктивного та перевірконого тепло-

вих розрахунків поверхонь нагріву УК?

70. Що вкляючає компонування поверхонь нагріву УК? Запишіть формулу для визначення площі живого перерізу для про-

ходу газів в УК. Як вибирають швидкість газів в УК?

71. Зобразіть основні конструктивні схеми поперечного перерізу утилізаційних котлів. З яких міркувань виходять при виборі

схеми?

72. Які основні рівняння використовують при тепловому розрахунку поверхонь нагріву УК?

73. Як визначають температуру газів за окремими поверхнями нагріву УК: пароперегрівником, паротвірною поверхнею та економайзером? Запишіть рівняння теплового балансу з пароводяної та газової сторін для цих поверхонь нагріву.

74. Які порядок і особливості теплового розрахунку та компонування пароперегрівника УК?

75. Які порядок і особливості теплового розрахунку та компонування паротвірної поверхні УК?

76. Які порядок і особливості теплового розрахунку та компонування економайзера УК?

77. Яка мета складання теплового балансу УК за результатами теплового розрахунку?

78. Як визначають допустиме напруження матеріалу стінок елементів УК та в чому полягає мета їх розрахунку на міцність?

79. Яку арматуру встановлюють на УК та сепараторах пари? Наведіть формули для розрахунку арматури.

80. В чому полягають задачі автоматизації суднових утилізаційних установок. Наведіть методи управління паропродуктивністю УК.

23

C_s – поправка на компоновку пучка труб, яка визначається в залежності від відносного поперечного кроку σ_1 та параметра $\phi_{\sigma} = (\sigma_1 - 1)/(\sigma'_2 - 1)$, де відносний діагональний крок $\sigma'_2 = \sqrt{\sigma_1^2 / 4 + \sigma_2^2}$,

$$C_s = 0,34\phi_{\sigma}^{0,1} \text{ при } 0,1 < \phi_{\sigma} \leq 1,7;$$

$$C_s = 0,275\phi_{\sigma}^{0,5} \text{ при } 1,7 < \phi_{\sigma} \leq 4,5 \text{ для } \sigma_1 < 3;$$

$$C_s = 0,34\phi_{\sigma}^{0,1} \text{ при } 1,7 < \phi_{\sigma} \leq 4,5 \text{ для } \sigma_1 \geq 3.$$

$$C_z = 1 \text{ при } z_2 \geq 10;$$

$$C_z = 3,12z_2^{0,05} - 2,5 \text{ при } z_2 < 10 \text{ та } \sigma_1 < 3;$$

$$C_z = 4z_2^{0,02} - 3,2 \text{ при } z_2 < 10 \text{ та } \sigma_1 \geq 3;$$

де d – заданий зовнішній діаметр труб, м; C_z – поправка на кількість рядів труб за рухом газів z_2

$$\alpha_k = \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_r \cdot d}{v} \right)^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot C_z \cdot C_s, \text{ Вт/(м}^2\text{·К)},$$

де $\sigma_1 = s_1/d$, а $\sigma_2 = s_2/d$; s_1 та s_2 – задані поперечний та поздовжній кроки труб, м; при $\sigma_2 \geq 2$ або $\sigma_1 \leq 1,5$ $C_s = 1$.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією при поперечному омиванні газами шахових гладкотрубних пучків труб (див. рис. 2,б) визначається за формулою

$$Cs = [1 + (2\sigma_1 - 3)(1 - 0,5\sigma_2)^3]^{-2},$$

рядів труб за рухом газів z_2 ; при $z_2 < 10$ $C_z = 0,91 + 0,0125(z_2 - 2)$, а при $z_2 \geq 10$ $C_z = 1$; C_s – поправка на компоновку пучка труб, яка визначається в залежності від відносних поперечного σ_1 та поздовжнього σ_2 кроків,

54. Як вибирають сепаратори пари УК та в чому полягає мета їх розрахунку?
55. Що називають водним режимом котла? Вкажіть норми якості живильної та котлової води для утилізаційних котлів. Як забезпечується необхідний водний режим?
56. Яка мета внутрішньокотлової обробки води? Поясніть особливості лужно-фосфатного та фосфатно-нітратного режимів обробки котлової води.
57. З якою метою та як здійснюється продувка утилізаційного котла? Що таке коефіцієнт продувки?
58. Яка мета передкотлової обробки живильної води? Зобразіть схему теплового ящика та поясніть механізм очищення живильної води в ньому.
59. Які методи застосовують на судах для видалення кисню та вуглекислоти з живильної води?
60. Які методи отримання та обробки додаткової води використовують на судах? Зобразіть схему та поясніть принцип дії випарної установки.
61. Поясніть сутність методу зм'якшення води за допомогою іонообмінних фільтрів. Покажіть схему установки для обробки живильної води в іонообмінних фільтрах.
62. Які початкові дані входять до завдання на проектування утилізаційних котлів?
63. Запишіть рівняння для розрахунку паропроодуктивності утилізаційного котла. Від яких величин залежить кількість пари, яку можна отримати в УК?
64. З яких міркувань виходять при виборі температури відхідних газів УК?
65. Як впливає тиск пари УК на його паропроодуктивність та компактність?
66. Як впливає встановлення економайзера на паропроодуктивність і компактність УК?
67. Як забезпечується надійність роботи економайзерів УК? Зобразіть схеми включення економайзера УК до циркуляційної та живильної магістралей.
68. Запишіть формулу для розрахунку температури циркуляцій-
- 22

25

осі $I^r - I^m - 100 \text{ кДж/кг}$, по осі $\vartheta - 1 \text{ мм} - 5^\circ \text{C}$.

му папері. Для побудови рекомендованого наступної масштаби: по

Діаграма $I^r - \vartheta$ випускних газів ДБЗ будується на міліметрово-

ної пари та вологого повітря, $\text{кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$, які вибираються з табл. 3Д.

до ϑ ізобарні об'ємні теплоспоживності триатомних газів, азоту, водя-

де c_{RO_2} , c_{N_2} , $c_{\text{H}_2\text{O}}$, $c_{\text{пов}}$ – середні в інтервалі температур від 0

$$I^r = (I^{\text{RO}_2} c_{\text{RO}_2} + I^{\text{N}_2} c_{\text{N}_2} + I^{\text{H}_2\text{O}} c_{\text{H}_2\text{O}}) (\vartheta + (\alpha - 1) V^0 c_{\text{пов}} \vartheta, \text{кДж/кг},$$

за формулою

Ентальпія випускних газів ДБЗ на 1 кг палива розраховується

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,3755H^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p, \text{м}^3/\text{кг};$$

V^0 – теоретично необхідний об'єм сухого повітря:

$$V^0_{\text{H}_2\text{O}} = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^0, \text{м}^3/\text{кг};$$

$V^0_{\text{H}_2\text{O}}$ – теоретичний об'єм водяної пари:

$$V^0_{\text{N}_2} = 0,79V^0, \text{м}^3/\text{кг};$$

$V^0_{\text{N}_2}$ – теоретичний об'єм азоту:

$$V^{\text{RO}_2} = 0,0187 \cdot (C^p + 0,3755H^p), \text{м}^3/\text{кг};$$

де V^{RO_2} – об'єм триатомних газів:

$$V^r = V^{\text{RO}_2} + V^{\text{N}_2} + V^{\text{H}_2\text{O}} (\alpha - 1) V^0, \text{м}^3/\text{кг},$$

Коефіцієнт використання теплоти визначається за формулою

$$\eta_{\text{ут}} = \frac{\Phi(I_{\text{д}} - I_{\text{від}})}{I_{\text{д}}}.$$

Поверхня нагріву утилізаційного котла розраховується за рівнянням теплопередачі

$$H = \frac{Q}{k\Delta t}, \text{м}^2,$$

де k – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; Δt – температурний напір, $^\circ\text{C}$; Q – теплова потужність поверхні нагріву: для парового утилізаційного котла

$$Q = D(i_{\text{в.п}} - i_{\text{ж.в}}), \text{кВт},$$

для водогрійного утилізаційного котла

$$Q = Gc_p(t''_{\text{в}} - t'_{\text{в}}), \text{кВт}.$$

Коефіцієнт теплопередачі k визначається за формулою

$$k = \psi\alpha_{\text{к}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

де ψ – коефіцієнт теплової ефективності поверхні нагріву: для утилізаційних газотрубних котлів приймається у межах 0,70 ... 0,75, а водотрубних – 0,60 ... 0,65, $\alpha_{\text{к}}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією при поперечному оми-ванні газами коридорних гладкотрубних пучків труб (див. рис. 2,а) визначається за формулою

$$\alpha_{\text{к}} = 0,2 \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \left(\frac{w_{\text{г}} \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot C_z \cdot C_s, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

де d – заданий зовнішній діаметр труб, м; C_z – поправка на кількість

27

24

розраховується наступним чином:

Об'єм випускних газів ДБЗ при повному згорянні 1 кг палива

2Д.

ієнти для перерахунку з горючої маси палива на роботу – з табл.

Елементарний склад палива вибирається з табл. 1Д, а коефіц-

Контрольне завдання 1

3. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

труб газотрубного УК.

пункті завдання трубоного пучка водотрубного УК або опір тертя

3. Визначити газований опір розрахованого у попередньому попереднього періоду утилізаційного котла.

грівання води, за даними, наведеними в табл. 4. Побудувати ескіз хованої у попередньому пункті завдання кількості пари або на- нагріву H утилізаційного котла, необхідної для отримання розра- 2. Визначити розміри попереднього періоду та площу поверхні ефіцієнт використання теплоти $\eta_{\text{ут}}$ за даними, наведеними в табл. 3. витрату води G водогрійного утилізаційного котла, а також ко- генерує насичену пару (без економайзера та пароперегрівника), або 1. Визначити паропроодуктивність D утилізаційного котла, що

2.4. Контрольне завдання 2

ти діаграму $I^r - \vartheta$.

випускних газів ДБЗ при температурі 200°C та 400°C і побудува-

3. Визначити за даними попередніх розрахунків ентальпію ванні палива за даними, наведеними в табл. 2.

2. Визначити об'єм випускних газів ДБЗ при повному спалю- лоти випускних газів ДБЗ з вибраним котлом.

якого вибрати з табл. 2, та зобразити схему системи утилізації теп- 1. Описати конструкцію утилізаційного котла, марку або тип

2.3. Контрольне завдання 1