

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсового та дипломного проектування
**«ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК УТИЛІЗАТОРА
ДИМОВИХ ГАЗІВ КОНТАКТНОГО ТИПУ»**

за курсом «Енергоефективні теплотехнології та використання ВЕР»
для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»
усіх форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 25.06.2020 р.

Харків
НТУ «ХП»
2020

Методичні вказівки до курсового та дипломного проектування «Тепловий розрахунок утилізатора димових газів контактного типу» за курсом «Енергоефективні теплотехнології та використання ВЕР» для студентів спеціальностей 144 «Теплоенергетика» усіх форм навчання / уклад. : О. В. Кошельнік, О. В. Долобовська. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 25 с.

Укладачі: О. В. Кошельнік,
О. В. Долобовська

Рецензент Круглякова О. В.

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

ВСТУП

Опалювальні та виробничо-опалювальні котельні, що працюють на природному газі, втрачають із продуктами згоряння палива значну кількість теплоти. Одним із найбільш ефективних напрямів економії органічного палива є використання теплоти продуктів згоряння для технологічних потреб підприємства та теплопостачання.

Відсутність у продуктах згоряння природного газу сполук сірки дає можливість застосовувати в якості теплоутилізаторів теплообмінні апарати контактного типу. При відносно невисоких температурах продуктів згоряння за теплотехнологічними агрегатами при використанні контактних теплообмінників досягається глибока утилізація теплоти як за рахунок зниження температури газів, що йдуть, так і за рахунок використання додаткової кількості теплоти конденсації водяної пари, що міститься в димових газах. Це дозволяє підвищити коефіцієнт використання палива в котельному агрегаті.

Методичні вказівки призначені для виконання розрахункових завдань студентами усіх форм навчання спеціальності 144 «Теплоенергетика» за курсом «Енергоефективні теплотехнології та використання ВЕР», а також для виконання бакалаврських робіт та дипломних проєктів магістрів.

1. МЕТА І ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

Метою виконання роботи є закріплення теоретичних знань і отримання практичних навичок у проведенні теплотехнічних розрахунків теплообмінників контактного типу з активною насадкою (КТАНів).

Основними завданнями роботи є:

- визначення об'ємних характеристик продуктів згоряння на вході в теплообмінник;
- вибір теплообмінника зі стандартного типового ряду за потужністю;
- проведення тепlobалансового розрахунку КТАНа;
- розрахунок коефіцієнта використання палива в котельному агрегаті;
- визначення умов конденсації водяної пари в димарі при використанні теплообмінників.

2. ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ КОНТАКТНИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ З АКТИВНОЮ НАСАДКОЮ

2.1. Конструкція КТАНів-теплоутилізаторів

Контактний економайзер з активною насадкою є апаратом рекуперативно-змішувального типу, який призначений для нагрівання води в діапазоні температур від 5 до 50 °С для систем хімічного очищення води або для технологічних потреб підприємств і котельень. Конструкція КТАНів-утилізаторів складається з трьох основних елементів: зрошуючої камери; активної насадки з трубного пучка; сепараційного пристрою (рис. 2.1).

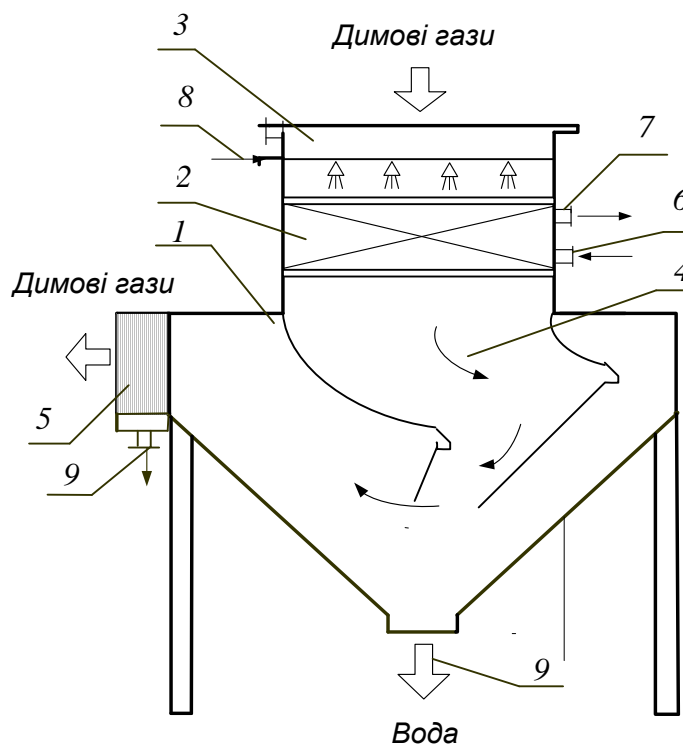


Рисунок 2.1 – Принципова схема КТАНа-теплоутилізатора:
1 – корпус; 2 – активна насадка; 3 – зрошуюча камера з форсунками;
4 – відцентровий сепаратор; 5 – жалюзійний сепаратор; 6, 7 – підведення та відведення води, що нагрівається; 8, 9 – підведення та відведення зрошуючої води

У контактному теплообміннику організуються два незалежних потоки води чистої, що нагрівається, – через активну насадку, та води, що нагрівається при безпосередньому контакті з димовими газами. Потік чистої води протікає усередині трубок активної насадки. Через систему зрошення, що являє собою блок форсунок, розпилюється вода. Потік зрошуючої води використовується для інтенсифікації передачі теплоти від димових газів до потоку чистої води. Теплота димових газів у насадці КТАНа передається воді, що нагрівається, двома способами: за рахунок безпосередньої передачі теплоти димових газів і зрошуючої води, а також за рахунок конденсації водяної пари, що міститься в димових газах, на поверхні насадки.

Пучок труб виконує роль насадки, призначеної для створення розвиненої поверхні контакту зрошуючої води і димових газів. Одночасно така поверхня, у середині якої циркулює вода, бере участь у теплообміні, і щодо цього вона є активною порівняно із традиційними насадками, які використовуються в контактних теплообмінниках інших конструкцій.

Вхід димових газів у КТАН здійснюється через зрошуючу камеру 3, в якій за допомогою механічних форсунок розпилюється в об'єм димових газів вода. Потім димові гази надходять в активну насадку 2, в якій відбувається їх охолодження та нагрівання одного або декількох потоків води, що проходить у середині трубок. Відділення від димових газів краплинної вологи, що сконденсувалася на поверхні труб, а також відведення їх з теплообмінника здійснюється за допомогою сепараційних пристроїв 4 і 5, встановлених у нижній частині апарата.

Блок активної насадки являє собою трубний пучок із шаховим розташуванням труб. Активна насадка є одноходовою з боку димових газів і багатогодовою з боку води, що нагрівається. Кількість ходів по воді, що нагрівається, в одному блоці, залежно від його розмірів, становить від 10 до 22. Для максимальної уніфікації окремих вузлів різних апаратів з метою спрощення технології виготовлення зрошуючої камери активну насадку КТАНів розбито на блоки.

Розмір крапель води, які містяться в димових газах, коливається в широкому діапазоні, що пов'язано зі складним механізмом тепломасообміну в КТАНі. З одного боку, відбувається часткове випаровування води, яка розпилюється форсунками, з іншого боку – конденсація водяної пари з димових газів. Одноступінчастий сепаратор не забезпечує необхідну ефектив-

ність роботи. Тому для відділення краплинної вологи від димових газів у КТАНах використано двоступінчастий сепараційний пристрій. Перший ступінь сепаратора – для грубого відділення крапель, в другому ступені вловлюються краплі менших розмірів.

Як перший ступінь використовується колінчастий сепаратор, у якому краплі вологи з газу сепаруються під дією відцентрових сил і, рухаючись по ввігнутих поверхнях лопаток, стікають у лотоки, звідки відводяться у зливний патрубок.

Другий ступінь – це вертикальний жалюзійний сепаратор, в якому використовується інерційний принцип краплеуловлювання (рис. 2.2). Цей сепаратор являє собою вигнуті жалюзійні канали з кутом розкриття 120° . При зміні напрямку руху димових газів краплі води під впливом інерційної сили прагнуть рухатися в колишньому напрямку, що дозволяє виділити їх із газового потоку. У вертикальних жалюзійних сепараторах відведення вологи, що осідає, є плівковим.

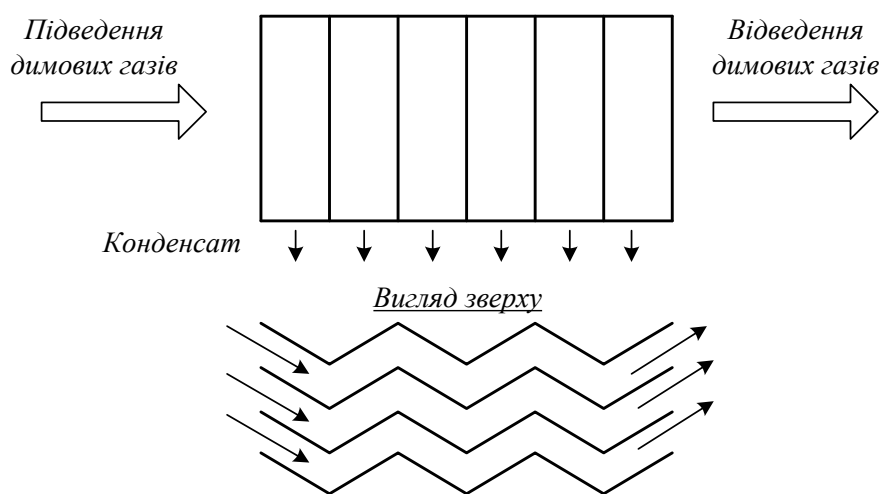


Рисунок 2.2 – Жалюзійний сепаратор теплообмінника

2.2. Опис типоряду КТАНів

Контактні апарати з активною насадкою призначені для роботи з котельними агрегатами теплопродуктивністю від 0,23 до 116 МВт. Схему підключення КТАНа-утилізатора у котельні з централізованою системою гаря-

чого водопостачання наведено на рис. 2.3, а, у котельні з відкритою або закритою системою теплопостачання – на рис. 2.3, б.

У табл. Д.1 і Д.2 додатка наведено основні характеристики контактних теплообмінників для нагрівання води в діапазоні температур 5–50 °С. Блоковий принцип конструкції КТАНів дозволяє за необхідності нарощувати поверхню нагрівання активної насадки понад розрахункову більш ніж у два рази при теплопродуктивності до 1,5 МВт включно та в 1,5 раза – для КТАНів теплопродуктивністю 2,3 МВт і вище шляхом встановлення додаткового горизонтального ряду блоків насадки. В КТАНі-0,05 УГ через малу теплопродуктивність активну насадку виконано одним блоком без розбивки її на дві частини.

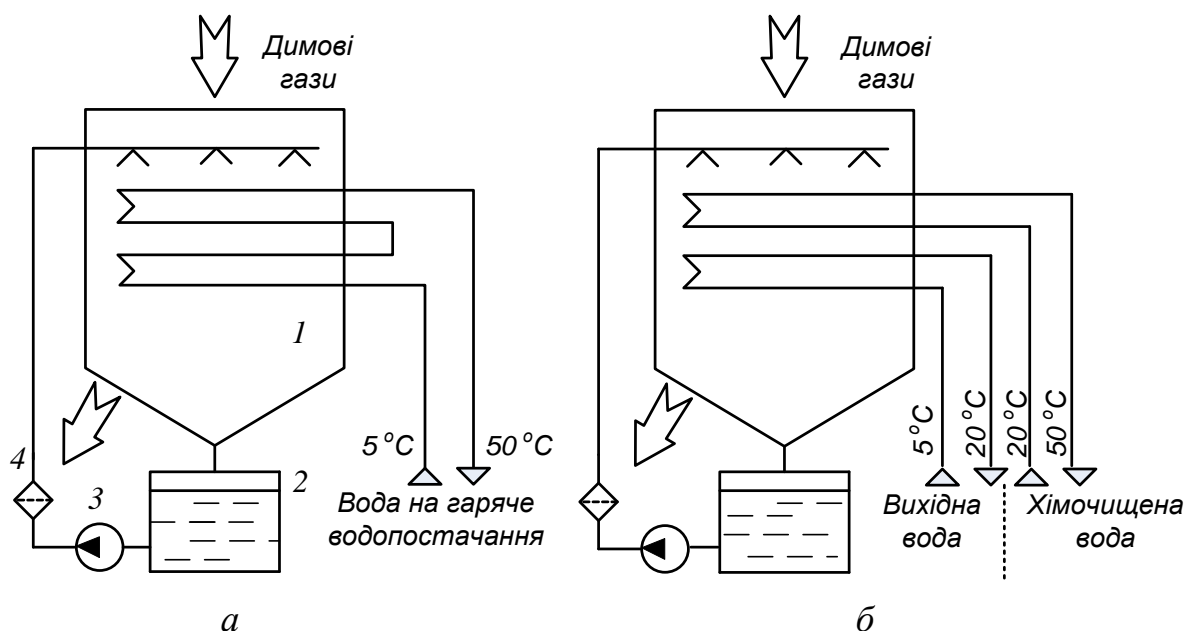


Рисунок 2.3 – Схеми підключення КТАНа-утилізатора:

- 1 – КТАН-утилізатор; 2 – бак-акумулятор;
- 3 – насос системи зрошування; 4 – фільтр

Для зрошуючих камер і активних насадок розроблено п'ять типових блоків. По два блоки із цієї кількості є індивідуальними конструкціями для КТАН-0,05 УГ і КТАН-0,1 УГ. Блоки типу КТАН-0,25 УГ і КТАН-0,8 УГ використовуються відповідно в апаратах КТАН-0,5 УГ і КТАН-1,5 УГ. Починаючи з теплопродуктивності 2,3 МВт і вище, зрошуючі камери та активні насадки складаються з одного базового блока. Він має такі характеристики: ширина – 582 мм; висота – 576 мм; довжина – 2380 мм; кількість трубок

– 100 шт.; діаметр і товщина стінок трубок – $32 \cdot 2$ мм; поверхня нагрівання – $22,6 \text{ м}^2$.

Розміри зрошуючої камери у плані мають бути погоджені з розмірами активної насадки. У верхній частині камери розташовані водяні колектори з форсунками. Для можливості контролю якості розпилу та працездатності форсунок у бічні стінки камери вбудовані ілюмінатори. Для блока системи зрошення застосовуються кутові форсунки з тангенціальним підведенням води типу В-1. Ці форсунки при діаметрі вихідного отвору $d = 6,0$ мм, залежно від тиску води, дають середнє або грубе розпилювання рідини.

3. ПЕРЕВІРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК КТАНІВ-УТИЛІЗАТОРІВ

3.1. Вихідні дані для розрахунку

Вихідними даними для проведення розрахунків є:

- склад природного газу;
- теплова потужність котельного агрегату, після якого встановлений КТАН;
- температура димових газів перед теплообмінником t'_r , °С;
- коефіцієнт надлишку повітря на виході з котельного агрегату $\alpha_{\text{вих}}$;
- витрата палива в котлоагрегаті B , $\text{м}^3/\text{с}$;
- ККД котельного агрегату $\eta_{\text{ка}}$;
- коефіцієнт обводу $\eta_{\text{об}}$ – доля димових газів, що проходять через КТАН;
- температура води, що нагрівається, на вході t'_b і виході t''_b з теплообмінника, °С.

3.2. Розрахунок параметрів димових газів на вході в КТАН

Нижча теплота згоряння газоподібного палива, $Q_{\text{н}}^c$, кДж/м³, визначається за формулою:

$$Q_{\text{н}}^c = 126\text{CO} + 358\text{CH}_4 + 638\text{C}_2\text{H}_6 + 913\text{C}_3\text{H}_8 + 1187\text{C}_4\text{H}_{10} + 1460\text{C}_5\text{H}_{12} + 108\text{H}_2$$

Теоретичний об'єм повітря V^0 , $\text{м}^3/\text{м}^3$, при спалюванні 1 нм^3 газоподібного палива:

$$V^0 = 0,0476 \left[\sum (m + n/4) C_m H_n + 0,5(\text{CO} + \text{H}_2) - \text{O}_2 \right]$$

Теоретичні об'єми продуктів згоряння триатомних газів, V_{RO_2} азоту $V_{\text{N}_2}^0$ та водяної пари $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$, $\text{м}^3/\text{м}^3$, розраховуються за такими формулами:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01(\sum m C_m H_n + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S});$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,01 \cdot (\sum \frac{n}{2} C_m H_n + \text{H}_2 + 0,124d_r + 1,61 \cdot V^0),$$

де d_r – вологовміст газоподібного палива (враховується за умови $d_r > 10$ г/кг сухого газу). У розрахунках узяти $d_r < 10$ г/кг сух. газу.

Дійсна кількість повітря горіння, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{пов}} = \alpha_{\text{вих}} V^0,$$

де $\alpha_{\text{вих}}$ – коефіцієнт надлишку повітря на виході з котельного агрегату (з вихідних даних).

Дійсні кількості продуктів згоряння при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha_{\text{вих}}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha_{\text{вих}} - 1)V^0; \quad V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^0 + (\alpha_{\text{вих}} - 1)V^0.$$

Об'єм триатомних газів V_{RO_2} не залежить від значення коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_{\text{вих}}$.

Тоді дійсний об'єм димових газів на вході в КТАН можна визначити за формулою:

$$V_r = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}.$$

Склад продуктів горіння (в об'ємних частках):

$$r_{\text{RO}_2} = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_r}; \quad r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_r}; \quad r_{\text{N}_2} = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_r}.$$

Масова витрата сухих димових газів $G_{\text{сг}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$, на 1 м^3 палива визначається як :

$$G_{\text{сг}} = V_{\text{RO}_2} \cdot \rho_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 \cdot \rho_{\text{N}_2} + V^0 \rho_{\text{пов}} (\alpha_{\text{вих}} - 1).$$

Масова витрата вологих димових газів G_r , $\text{кг}/\text{м}^3$, на 1 м^3 палива розраховується за формулою:

$$G_{\Gamma} = \rho_{\text{пал}} + V^0 \rho_{0\text{пов}} \alpha_{\text{вих}},$$

де $\rho_{0\text{RO}_2}$, $\rho_{0\text{N}_2}$, $\rho_{0\text{пов}}$ – густини триатомних газів, азоту та повітря, кг/м^3 ($\rho_{0\text{RO}_2} = 1,96 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{0\text{N}_2} = 1,25 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{0\text{пов}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$); $\rho_{\text{пал}}$ – густина природного газу, кг/м^3 .

Вологовміст димових газів d' , кг/кг сухих газів, на вході в КТАН становить :

$$d' = \frac{G_{\Gamma} - G_{\text{с.г.}}}{G_{\text{с.г.}}}.$$

Ентальпія димових газів I' , кДж/кг , на вході в КТАН при температурі t'_{Γ} становить:

$$I' = C_{\Gamma 1} t'_{\Gamma} + d' \cdot (C_{\text{п}} t'_{\Gamma} + r),$$

де $C_{\Gamma 1}$ – масова теплоємність димових газів, що розраховується при температурі t'_{Γ} : $C_{\Gamma 1} = C_{\text{RO}_2} r_{\text{RO}_2} + C_{\text{N}_2} r_{\text{N}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}} r_{\text{H}_2\text{O}}$ $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Значення теплоємностей газів C_{RO_2} , C_{N_2} , $C_{\text{H}_2\text{O}}$ залежно від температури наведені в табл. Д.3 додатка; $C_{\text{п}}$ – теплоємність пари: $C_{\text{п}} = 1,968 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; r – внутрішня теплота пароутворення: $r = 2360 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

3.3. Теплобалансовий розрахунок

Для проведення теплобалансового розрахунку КТАНа необхідно попередньо задатися температурою димових газів після контактного теплообмінника t''_{Γ} . Рекомендується на першому кроці розрахунку взяти $t''_{\Gamma} = 40 - 42 \text{ }^{\circ}\text{C}$. За взятою температурою газів визначається їх ентальпія I'' , кДж/кг , за формулою :

$$I'' = C_{\Gamma 2} t''_{\Gamma} + d'' \cdot (C_{\text{п}} t''_{\Gamma} + r),$$

де $C_{\Gamma 2}$ – масова теплоємність димових газів, що розраховується при температурі після теплообмінника t''_{Γ} , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; d'' – вологовміст газів на виході з КТАНа, кг/кг сухих газів. Ця величина наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вологовміст димових газів на виході з КТАНа

Температура димових газів $t''_г, \text{ }^\circ\text{C}$	Вологовміст $d'', \text{ кг/кг сухих газів}$
30	0,024
35	0,032
40	0,044
45	0,056
50	0,078
55	0,102

Далі розраховується теплопродуктивність контактного теплообмінника з боку димових газів, кВт:

$$Q_{\text{кт}} = B \cdot G_{\text{с.г}} \cdot \Delta I \cdot \eta_{\text{об}},$$

де B – витрата палива в котлі, $\text{м}^3/\text{с}$; ΔI – різниця ентальпій димових газів на вході та виході з теплоутилізатора: $\Delta I = (I' - I'')$, кДж/кг.

У випадку якщо теплопродуктивність котла зменшується за рахунок покриття частини навантаження самого котла КТАНОм, розрахунок ведеться за формулою, кВт:

$$Q_{\text{кт}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{с}} \cdot \eta_{\text{ка}}}{Q_{\text{н}}^{\text{с}} \cdot \eta_{\text{ка}} + \eta_{\text{об}} \cdot \Delta I \cdot G_{\text{с.г}}} B G_{\text{с.г}} \Delta I,$$

де $\eta_{\text{к.а}}$ – ККД котельного агрегату (з вихідних даних).

Виходячи з отриманих значень $Q_{\text{кт}}$, обирають найближчий за теплопродуктивністю теплообмінник зі стандартного типоряду (див. табл. Д.1 додатка). При цьому фактична теплопродуктивність теплообмінника $Q_{\text{кт ном}}$ повинна перевищувати або бути рівною значенню $Q_{\text{кт}}$, що було отримано при розрахунку.

Якщо в КТАНі здійснюється нагрівання одного потоку води (див. рис. 2.3, а), то витрата води, що нагрівається $G_{\text{в}}$, $\text{м}^3/\text{с}$, з урахуванням величини теплових втрат становить:

$$G_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{кт}} \cdot 0,98}{C_{\text{в}} (t''_{\text{в}} - t'_{\text{в}}) \cdot \rho_{\text{в}}},$$

де $t'_{\text{в}}$, $t''_{\text{в}}$ – температури води, що гріється, на вході й виході із КТАНа відповідно, $^\circ\text{C}$; $C_{\text{в}}$ – теплоємність води: $C_{\text{в}} = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\rho_{\text{в}}$ – густина води: $\rho_{\text{в}} = 996 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Якщо в теплообміннику нагрівається кілька потоків води (див. рис. 2.3, б), то необхідно визначити середньозважені значення температури води та її еквівалентну витрату. При цьому потоки води з меншою температурою спрямовуються в нижні блоки насадки, а з більшою температурою – у верхні блоки. Можлива кількість потоків води, що нагрівається в КТАНі, визначається кількістю блоків активної насадки (див. табл. Д.1 додатка).

Середньозважена температура води, °С:

– на вході в КТАН

$$t'_{\text{ср.в}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=j} G_i^H \cdot t_i'^H}{\sum_{i=1}^{i=j} G_i^H};$$

– на виході з КТАНа

$$t''_{\text{ср.в}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} G_i^H \cdot t_i''^B}{\sum_{i=1}^{i=k} G_i^B},$$

де j – кількість потоків води, що нагріваються в нижніх блоках насадки; k – кількість потоків води, що нагріваються у верхніх блоках насадки; G_i – витрата i -го потоку води, що нагрівається; t_i' , t_i'' – температури i -го потоку води, що нагрівається, на вході та виході. Індекси «н» і «в» належать до нижніх і верхніх блоків насадки.

Еквівалентна витрата води, що нагрівається в КТАНі, м³/с:

$$G_B = \frac{Q_{\text{КТ}} \cdot 0,98}{C_B (t''_{\text{ср.в}} - t'_{\text{ср.в}}) \cdot \rho_B}.$$

3.4. Розрахунок поверхні теплообміну

Визначається об'ємна витрата димових газів $V_{\text{Г}}^{\text{нас}}$, м³/с, в активній насадці за формулою:

$$V_{\text{Г}}^{\text{нас}} = V_{\text{Г}} \cdot B \cdot \eta_{\text{об}} \frac{273 + \bar{t}_{\text{Г.н}}}{273},$$

де $\bar{t}_{\text{Г.н}}$ – середня температура газів у насадці. Тут її рекомендується брати

близькою до температури мокрого термометра $\bar{t}_r = 70^\circ\text{C}$.

Швидкість димових газів W_r , м/с, в активній насадці розраховується як

$$W_r = \frac{V_r^{\text{нас}}}{S_r},$$

де S_r – прохідний перетин активної насадки, м^2 (див. табл. Д. 2).

Аналогічно визначається швидкість води, що нагрівається в КТАНі, м/с:

$$W_b = \frac{G_b}{S_b},$$

де S_b – прохідний перетин по воді, що нагрівається, м^2 (див. табл. Д. 2).

Коефіцієнт тепловіддачі з боку димових газів до насадки α_r , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, розраховується за емпіричною формулою:

$$\alpha_r = 110,5 W_r^{0,8} \cdot W_b^{0,2}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі α_b від трубок насадки до води, що нагрівається, знаходиться за критеріальною залежністю для вимушеного руху води в трубах при середній температурі води $\bar{t}_b = (t'_b + t''_b) / 2$. Теплофізичні властивості води ν , λ і число Прандтля Pr визначаються за табл. Д. 5.

Значення числа Рейнольдса буде дорівнювати

$$Re = W_b d_{\text{вн}} / \nu,$$

де $d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр трубок активної насадки: $d_{\text{вн}} = (d_{\text{зов}} - 2s)$ м (див. табл. Д. 2).

Для турбулентного режиму критеріальне рівняння має вигляд :

$$Nu = 0,021 \cdot Re_p^{0,8} Pr_p^{0,43} (Pr_p / Pr_{\text{ст}})^{0,25}.$$

Оскільки температура стінки труби, при якій визначають число Прандтля $Pr_{\text{ст}}$, є невідомою, то попередньо задаємося співвідношенням $Pr_p / Pr_{\text{ст}} = 1$. Тоді число Нуссельта можна визначити за формулою:

$$Nu = 0,021 \cdot Re_p^{0,8} Pr_p^{0,43}.$$

Значення коефіцієнта тепловіддачі α_b , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, знаходиться за формулою:

$$\alpha_b = Nu \cdot \lambda / d_{\text{вн}}.$$

Величина коефіцієнта теплопередачі K , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, від димових газів

ДО ВОДИ:

$$K = \frac{C_3}{\frac{1}{\alpha_r} + \frac{s}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_b}},$$

де C_3 – коефіцієнт, що враховує забруднення трубок: для технічної води $C_3 = 0,8 - 0,9$, для хімічно очищеної води $C_3 = 0,9 - 1,0$; s – товщина стінок трубок насадки, м (див. табл. Д.2 додатка); $\lambda_{ст}$ – коефіцієнт теплопровідності сталі, з якої виготовлені трубки насадки: $\lambda_{ст} = 55 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Середньологарифмічна різниця температур Δt , °С, дорівнює:

$$\Delta t = \frac{(t'_r - t''_b) - (t''_r - t'_b)}{\ln \frac{(t'_r - t''_b)}{(t''_r - t'_b)}}.$$

Величина питомого теплового потоку q_1 , Вт/м², через стінку трубки від димових газів до води становитиме

$$q_1 = K \cdot \Delta t.$$

Тоді температура внутрішньої поверхні трубки $t_{ст}$, °С, буде дорівнювати

$$t_{ст} = t_b + q_1 / \alpha_b.$$

За знайденою температурою стінки визначається число Прандтля $Pr_{ст}$ (див. табл. Д. 4), після чого розраховується критерій Нуссельта Nu з урахуванням множника $(Pr_p / Pr_{ст})^{0,25}$. Уточнюються значення коефіцієнтів тепловіддачі α_b і теплопередачі K .

Необхідна поверхня активної насадки F , м², знаходиться за формулою

$$F = \frac{Q_{кт}}{K \cdot \Delta t}.$$

Отриману поверхню порівнюють із фактичною поверхнею $F_{кт}$ (див. табл. Д.2) за формулою

$$\left| \frac{F - F_{кт}}{F_{кт}} \right| \leq 0,05.$$

Якщо ця умова виконується, то розрахунок вважається закінченим. У противному випадку необхідно змінювати параметри теплоносіїв і знову виконати тепловий розрахунок, тим самим досягаючи виконання нерівності. Якщо розраховане значення перевищує фактичне $F > F_{кт}$, то необхідно підвищити температуру димових газів на виході із КТАНа t''_r . Оскільки охолодження димових газів має відбуватися в КТАНі з конденсацією водяної па-

ри, то температура t''_r не повинна перевищувати $55\text{ }^\circ\text{C}$. У випадку коли розраховане значення менше від фактичного $F < F_{кт}$, то необхідно знизити температуру димових газів після КТАНа.

У разі коли теплове навантаження споживачів нижче від можливої теплопродуктивності КТАНа, необхідно змінювати коефіцієнт обводу $\eta_{об}$. При

$F > F_{кт}$ коефіцієнт збільшується, а при $F < F_{кт}$ – зменшується.

Для другого наближення перерахунок ведеться за наведеними вище формулами, починаючи з теплопродуктивності КТАНа $Q_{кт}$ при знов прийнятих значеннях t''_r або $\eta_{об}$. У випадку невиконання нерівності необхідно виконати ще одне наближення.

Підвищення коефіцієнта використання палива $\Delta\eta_{вп}$, %, в котельній установці при використанні контактного економайзера складе

$$\Delta\eta_{вп} = G_B \cdot \rho_B \cdot C_B (t''_B - t'_B) \cdot 100 / (B \cdot Q_H^c).$$

Всі величини, що входять у цю формулу, обираються з розрахунку горіння палива та теплового розрахунку КТАНа.

4. ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ В ДИМАРІ

При глибокому охолодженні димових газів можлива конденсація водяної пари на стінках газоходів і димаря, якщо температура їх внутрішніх стінок буде нижчою від температури точки роси димових газів $t_{рс}$ (її можна визначити за $I-d$ діаграмою за вологовмістом і температурою газів). Для того щоб не відбувалася конденсація вологи, необхідна температура на внутрішніх поверхнях має бути більшою за температуру точки роси $t_{рс}$ на $5\text{ }^\circ\text{C}$.

Вологовміст $d_{зм}$, кг/кг сухих газів, і температура димових газів перед димарем $t_{зм}$, $^\circ\text{C}$, за умов байпасування частини димових газів у обхід КТАНа визначаються за формулами

$$d_{зм} = (V_r \cdot \eta_{об} \cdot d'' + V_r \cdot (1 - \eta_{об}) \cdot d') / V_r,$$

$$t_{зм} = (V_r \cdot \eta_{об} \cdot t''_r + V_r \cdot (1 - \eta_{об}) \cdot t'_r) / V_r.$$

Гази з температурою $t_{зм}$ надходять у димар. При просуванні нагору по трубі гази охолоджуються, їх температура зменшується. Найбільш низька температура стінки буде на виході з димаря. У зв'язку з цим доцільним є визначати

густину теплового потоку за температурою газів саме на виході з димаря.

Зниження температури газів, що відходять, на 1 м димаря, °С/м:

$$\delta t = \frac{B_{\text{тр}}}{\sqrt{Q_{\text{к}}}},$$

де $B_{\text{тр}}$ – коефіцієнт, що враховує темп падіння температури: для ізольованої труби $B_{\text{тр}} = 0,34$; для неізольованої $B_{\text{тр}} = 0,85$; $Q_{\text{к}}$ – теплова потужність котельної установки, МВт.

Температура димових газів на виході з димаря, °С:

$$t_{\text{г}}^{\text{д}} = t_{\text{зм}} - \delta t \cdot H,$$

де H – висота димаря, м (з вихідних даних).

В інженерних розрахунках при співвідношенні зовнішнього та внутрішнього діаметрів $d_{\text{зов}}/d_{\text{вн}} \leq 1,8$ коефіцієнт теплопередачі через циліндричну стінку можна розраховувати за формулою для плоскої стінки.

Коефіцієнт теплопередачі для плоскої стінки K , Вт/(м·К), визначається як

$$K = \frac{1}{R_1 + R_{\text{ст}} + R_{\text{із}} + R_2}.$$

Термічний опір R_1 , (м²·К)/Вт, при переході тепла від димових газів до димової труби:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha^{\text{д}}}.$$

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі від димових газів до димової труби використовується формула :

$$\alpha^{\text{д}} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d_{\text{вн}}^{\text{д}}}.$$

Число Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,032 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,3} \cdot \left(\frac{d_{\text{вн}}^{\text{д}}}{H} \right)^{0,054},$$

де Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля: $\text{Pr} = 0,69$; $d_{\text{вн}}^{\text{д}}$ – внутрішній діаметр димаря, м.

Теплофізичні властивості димових газів знаходяться за температурою на виході із димової труби за табл. Д. 3.

Швидкість димових газів визначається з рівняння нерозривності по-

току, м/с:

$$W^{\text{д}} = \frac{4 \cdot V_{\text{г}} \cdot B}{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}$$

Термічний опір стінки димаря та ізоляції, (м²·К)/Вт:

$$R_{\text{ст}} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}; \quad R_{\text{із}} = \frac{\delta_{\text{із}}}{\lambda_{\text{із}}},$$

де $\delta_{\text{ст}}$ – товщина стінки димаря, м. Товщина несучого стовпа залежить від висоти і діаметра та знаходиться в діапазоні від 4 до 10 мм для сталевих димарів; $\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності металеві стінки димаря, Вт/(м·К), залежить від типу сталі; $\delta_{\text{із}}$ – товщина ізоляції труби: $\delta_{\text{із}} = 0,05 - 0,1$ м. Цей шар захищає димохід від швидкого остигання, запобігає утворенню конденсату.

Найчастіше для ізоляції димоходів котелень застосовується мінеральна базальтова вата з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{\text{із}} = 0,035-0,039$ Вт/(м·К).

Термічний опір R_2 , (м²·К)/Вт, при переході тепла від димової труби до зовнішнього повітря:

$$R_2 = \frac{1}{\alpha^{\text{пов}}},$$

де $\alpha^{\text{пов}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від димаря до зовнішнього повітря. При висоті димаря $H \leq 20$ м середній за висотою коефіцієнт тепловіддачі $\alpha^{\text{пов}}$ береться рівним 23 Вт/(м²·К), при $H > 20$ м – $\alpha^{\text{пов}} = 35$ Вт/(м²·К), при висоті $H > 80$ м – $\alpha^{\text{пов}} = 46,5$ Вт/(м²·К).

Густина теплового потоку $q^{\text{д}}$, Вт/м², при теплообміні внутрішньої поверхні труби з димовими газами, а зовнішньої – з повітрям, можна визначити за формулою

$$q^{\text{д}} = K \cdot (\bar{t}_{\text{г}}^{\text{д}} - t_{\text{пов}}),$$

де $\bar{t}_{\text{г}}^{\text{д}}$ – середня температура газів у димарі: $\bar{t}_{\text{г}}^{\text{д}} = (t_{\text{г}}^{\text{д}} + t_{\text{зм}}) / 2$, °С; $t_{\text{пов}}$ – температура зовнішнього повітря; K – коефіцієнт теплопередачі через циліндричну стінку, Вт/(м²·К).

Температура на внутрішній поверхні димаря $t_{\text{ст}}^{\text{д}}$, °С, розраховується за формулою

$$t_{\text{ст}}^{\text{д}} = \bar{t}_{\text{г}}^{\text{д}} - \frac{q^{\text{д}}}{\alpha^{\text{д}}},$$

де $q^{\text{д}}$ – густина теплового потоку через димову трубу; $\alpha^{\text{д}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від димових газів до стінки димової труби.

Мінімальна температура на внутрішній поверхні димаря має бути $t_{\text{ст}}^{\text{д}} > t_{\text{рс}} + 5$. Температура точки роси $t_{\text{рс}}$ при вологості димових газів після КТАНа 30–60 г/кг становить 30–40 °С. Якщо водяна пара, що входить до складу продуктів згоряння палива, буде конденсуватися, то в цьому випадку потрібно нанести теплову ізоляцію на поверхню труби та обладнати димар пристроями з видалення конденсату.

5. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОНТАКТНОГО ЕКОНОМАЙЗЕРА

Вихідними даними для розрахунку економічної ефективності при установці КТАНа є:

- теплопродуктивність КТАНа $Q_{\text{кт}}$, МВт (з теплового розрахунку);
- температура води, що нагрівається, на вході $t'_{\text{в}}$ і виході $t''_{\text{в}}$ із КТАНу, °С;
- ККД котельної установки $\eta_{\text{к}}$;
- теплота згоряння природного газу $Q_{\text{н}}^{\text{с}}$, МДж/м³ (з розрахунку горіння палива);
- потужність димососа $N_{\text{д}}$, кВт (з аеродинамічного розрахунку);
- потужність насоса зрошення $N_{\text{зр}}$ і насоса технологічної води $N_{\text{т.в}}$, кВт;
- кількість годин роботи споживачів гарячої води τ , год /рік;
- кількість годин роботи насоса зрошення $\tau_{\text{зр}}$ і насоса технологічної води $\tau_{\text{т.в}}$, год /рік.

Метою техніко-економічного розрахунку є визначення кількості зекономленого природного газу в котельному агрегаті за рахунок установки КТАНа, а також розрахунок величини отриманого прибутку.

Годинна кількість теплоти, утилізованої в КТАНі, $Q_{\text{год}}$, МДж/год, складе

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{кт}} \cdot 3,6.$$

Річна кількість утилізованої теплоти буде дорівнювати, МДж/рік

$$Q_{\text{річ}} = Q_{\text{год}} \cdot \tau.$$

Річна економія умовного палива складе, т.у.п. /рік:

$$\Delta B_{\text{уп}} = \frac{Q_{\text{річ}} \cdot 10^{-3}}{Q_{\text{н.у.п}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}},$$

де $Q_{\text{н.у.п}}^{\text{р}} = 29,33$ МДж/кг – теплотворна здатність умовного палива.

Економія природного газу, тис. м³/рік:

$$\Delta B_{\text{г}} = \Delta B_{\text{уп}} \frac{Q_{\text{н.у.п}}^{\text{р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{с}}},$$

де $Q_{\text{н}}^{\text{с}}$ – нижча теплота згоряння природного газу, МДж/м³.

Вартість зекономленого природного газу, грн/рік:

$$S_{\text{г}} = \text{Ц}_{\text{г}} \cdot \Delta B_{\text{г}},$$

де $\text{Ц}_{\text{г}}$ – вартість 1000 м³ природного газу, грн/тис. м³.

При використанні вторинних енергоресурсів – теплоти димових газів котельного агрегату, що відходять, – витрати на паливо беруться рівними нулю. Додатковий технічний персонал для обслуговування КТАНа не потрібен, тобто витрати на заробітну платню $S_{\text{зр}} = 0$.

Додаткова витрата електроенергії при роботі утилізаційної установки складається з витрати на привід димососа для подолання додаткового опору, викликаного установкою КТАНа; витрати на привід насоса системи зрошення; витрати на привід насоса технологічної води.

Додаткова витрата електроенергії, кВт·год /рік:

$$W_{\text{ел}} = N_{\text{д}} \cdot \tau + N_{\text{зр}} \cdot \tau_{\text{зр}} + N_{\text{тв}} \cdot \tau_{\text{тв}}.$$

Витрати на електроенергію визначаються за формулою, грн/рік:

$$S_{\text{ел}} = \text{Ц}_{\text{ел}} \cdot W_{\text{ел}},$$

де $\text{Ц}_{\text{ел}}$ – вартість 1 кВт·год електроенергії, грн /кВт·год.

Річний валовий прибуток за рахунок використання КТАНа складе, грн/рік:

$$\text{П}_{\text{вал}} = S_{\text{г}} - S_{\text{ел}}.$$

Розрахунок чистого прибутку за рік, $\text{П}_{\text{чист}}$, грн./рік, виконується за формулою:

$$\text{П}_{\text{чист}} = \text{П}_{\text{вал}} \cdot (1 - \text{Н}_{\text{пр}}),$$

де $\text{П}_{\text{вал}}$ – валовий прибуток; $\text{Н}_{\text{пр}}$ – податок на прибуток: $\text{Н}_{\text{пр}} = 0,18$ (18 %).

Додаток

Довідкові дані для розрахунків контактного теплообмінника

Таблиця Д.1 – Технічні характеристики КТАНів-теплоутилізаторів

Тип КТАНа	Теплопродуктивність КТАНа $Q_{\text{КТ ном}}$, МВт	Кількість форсунок	Кількість рядів трубок у блоці насадки z_2	Кількість блоків насадки в горизонтальному ряду
0,05 УГ	0,05	2	18	1
0,1 УГ	0,1	2	14	1
0,25 УГ	0,25	6	14	1
0,5 УГ	0,5	12	14	2
0,8 УГ	0,8	24	10	1
1,5 УГ	1,5	12	10	2
2,3 УГ	2,3	28	10	2
4,5 УГ	4,5	42	10	3
6 УГ	6	56	10	4
12 УГ	12	112	10	8

Таблиця Д.2 – Геометричні характеристики КТАНів-теплоутилізаторів

Тип КТАНа	Прохідний перетин теплоносія		Поверхня теплообміну $F_{\text{КТ}}$, м^2	Активна насадка		Габаритні розміри (довжина, ширина, висота), м		
	по воді $S_{\text{в}} \cdot 10^{-2}$, м^2	по газах $S_{\text{г}}$, м^2		кількість трубок n , шт.	$d_{\text{зов}} \cdot S^*$, мм	L	B	H
0,05 УГ	0,039	0,0304	1,84	72	14×2	0,49	0,48	1,882
0,1 УГ	0,055	0,0425	2,57	144	14×2	0,92	0,48	2,194
0,25 УГ	0,154	0,18	12,5	240	18×2	1,305	1,344	2,596
0,5 УГ	0,31	0,36	25,0	480	18×2	1,704	1,344	3,30
0,8 УГ	0,55	0,39	31,2	256	25×2	2,57	0,99	4,113
1,5 УГ	1,11	0,78	52,4	512	25×2	2,662	1,75	4,153
2,3 УГ	1,31	1,15	90,5	400	32×2	3,785	1,824	4,74
4,5 УГ	1,86	1,73	135,8	600	32×2	3,785	2,404	5,24
6 УГ	2,46	2,30	181	800	32×2	3,785	3,478	5,52
12 УГ	4,93	4,61	362	1600	32×2	3,785	5,792	5,52

* Діаметр і товщина трубок насадки.

Продовження додатка

Таблиця Д.3 – Середня масова теплоємність газів при постійному тиску C_{pm} , кДж/(кг·К)

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO ₂ (RO ₂)	H ₂ O	Повітря (сухе)
25	0,9169	1,0395	0,8276	1,8628	1,0042
50	0,9190	1,0398	0,8403	1,8661	1,0049
75	0,9211	1,0401	0,8531	1,8695	1,0055
100	0,9232	1,0404	0,8658	1,8728	1,0061
150	0,9295	1,0419	0,888	1,8833	1,0088
200	0,9358	1,0434	0,9102	1,8937	1,0115

Таблиця Д. 4 – Теплофізичні властивості води

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr	C_{pm} кДж/(кг·К)
0	0,551	1,795	13,5	4,212
10	0,574	1,306	9,52	4,191
20	0,597	1,006	7,03	4,183
30	0,618	0,805	5,42	4,174
40	0,632	0,659	4,31	4,174
50	0,648	0,556	3,54	4,174
60	0,659	0,478	3,98	4,179

Таблиця Д. 5 – Теплофізичні властивості димових газів середнього складу

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
0	0,0228	12,2	0,72	1,295
100	0,0313	21,54	0,69	0,95
200	0,0401	32,8	0,67	0,748

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод) / под ред. С. И. Мочана. – С. Пб. : ВТИ-НПО ЦКТИ, 1998. – 259 с.
2. Комплексное энерготехнологическое использование газа и охрана воздушного бассейна // Е. Е. Новгородский, В. А. Широков, Б. В. Шанин, В. А. Дятлов. – М. : Дело, 1997. – С. 151–161.
3. Рекомендации для проектирования котельных и промышленных ТЭЦ с применением КТАНов-утилизаторов. – Рига : Латгипропром-РПИ, 1987. – 187 с.
4. Теплотехнологические установки, системы, оборудование : учеб. пособ. в 3 ч. Ч.3 / под. ред. Б. А. Левченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – 728 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. МЕТА І ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ.....	4
2. ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ КОНТАКТНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ З АКТИВНОЮ НАСАДКОЮ.....	5
2.1. Конструкція КТАНів-теплоутилізаторів.....	5
2.2. Опис типоряду КТАНів.....	7
3. ПЕРЕВІРНИЙ ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК КТАНІВУТИЛІЗАТОРІВ.....	9
3.1. Вихідні дані для розрахунку.....	9
3.2. Розрахунок параметрів димових газів на вході в КТАН.....	9
3.3. Теплобалансовий розрахунок.....	11
3.4. Розрахунок поверхні теплообміну.....	13
4. ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ В ДИМАРІ.....	16
5. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОНТАКТНОГО ЕКОНОМАЙЗЕРА.....	19
Додаток.....	21
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	23

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсового та дипломного проектування
**«ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК УТИЛІЗАТОРА ДИМОВИХ
ГАЗІВ КОНТАКТНОГО ТИПУ»**

за курсом «Енергоефективні теплотехнології та використання ВЕР»
для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»
усіх форм навчання

Укладачі: КОШЕЛЬНИК Олександр Вадимович
ДОЛОБОВСЬКА Ольга Вікторівна

Відповідальний за випуск А. М. Ганжа
Роботу рекомендувала до видання О. В. Круглякова
Редактор О. В. Козюк

План 2020 р., поз. 283

Підписано до друку 21.12.2020. Формат 60x84 1/16. Папір Могра.
Riso- друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. . Наклад 50 прим.
Зам. № . Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Самостійне електронне видання