

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут
ім. акад. І.С. Гулого

Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту

_____ Сергій Блаженко
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2022 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Валентин Петренко
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

Зі спеціальності _____ 144 Теплоенергетика
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми

_____ Теплоенергетика та енергоефективні технології

на тему: Дослідження теплотехнічних параметрів теплоутилізаційних систем для димових газів від котлів

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ЗТЕ-2-5М

Плющенко Олександр Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

_____ (підпис)

Керівник д.т.н. Недбайло Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Рецензент к.т.н. Ігор Божко

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Я, як здобувач Національного університету харчових технологій, розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

_____ (підпис та прізвище здобувача)

Київ – 2022 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім.акад. І.С.Гулого
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 144 Теплоенергетика

Освітньо-професійна програма Теплоенергетика та енергоефективні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЕХТ

проф. Петренко В.П.

“01” листопада 2021 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Плющенко Олександра Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження теплотехнічних параметрів тепло-утилізаційних систем для димових газів від котлів.

керівник роботи д.т.н., проф. Недбайло Олександр Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “01” 11.2021 року № 860-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 06.02.2022 року

3. Вихідні дані до роботи тепло утилізатор вихідних димових газів з вологовмістом 0,1-0,25 кг/кг с.п, площа поверхні теплообміну до 50 м², теплопродуктивність котла 9,7 МВт; витрата відхідних газів 5,5 кг/с; температура газів на виході 173 С.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз технічних особливостей тепло утилізаційних технологій в котельних установках

2. Тепловологісні характеристики тепло утилізаторів для відхідних димових газів з підвищеним вологовмістом.

3. Визначення параметрів комплексних тепло утилізаційних систем.

4. Розроблення рекомендацій щодо впровадження тепло утилізаторів для котлів з підвищеним вологовмістом газів.

5. Перелік графічного матеріалу

Презентаційні матеріали Power Point - 13 слайдів .

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел щодо проблематики магістерської роботи	16.12-17.11.2021	Виконано
2	Визначення параметрів та тепловологісних характеристик тепло утилізаційних систем	18.11-15.12.2021	Виконано
3	Визначення показників теплової ефективності у різних режимах експлуатації котла	16.12-19.01.2022	Виконано
4	Розроблення рекомендацій щодо впровадження вище зазначеного обладнання для котлів з підвищеним вологовмістом відхідних газів	20.01-01.02.2022	Виконано
5	Формулювання висновків	02.02-04.02.2022	Виконано
6	Оформлення роботи, проходження рецензування	05.02-06.02.2022	Виконано

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

Плющенко О.С. _____
(прізвище та ініціали)

Недбайло О.М. _____
(прізвище та ініціали)
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В магістерській роботі наводяться дані зіставлення показників ефективності та характеристик тепловологісного стану відхідних газів двох зазначених систем.

Метою роботи є теплофізичне обґрунтування нових прогресивних теплоутилізаційних технологій з комплексним використанням утилізованої теплоти для котлів малої та середньої потужності підвищеної екологічної ефективності з введенням вологи в зону горіння та розроблення на цій основі відповідних технічних рішень і рекомендацій щодо їх впровадження.

Об'єкт дослідження – процеси тепломасопереносу в комплексних теплоутилізаційних системах котлів малої та середньої потужності.

Предмет дослідження – тепломасообмінні характеристики комплексних теплоутилізаційних систем при підвищених вологовмістах відхідних газів котла.

На основі виконаних досліджень стосовно розглянутих комплексних систем теплоутилізації водогрійних опалювальних котлів показано, що:

- приріст ККД котла $\Delta\eta$, зумовлений застосуванням досліджуваних теплоутилізаційних систем, в цілому підвищується при збільшенні вологовмісту X_1 . Так, для теплоутилізаційної системи з підігріванням вхідної котлової води і повітря на горіння при $X_1 = 0,14$ кг/кг с.г. величина $\Delta\eta$ досягає 9,5%, а при $X_1 = 0,2$ кг/кг с.г. максимальне значення $\Delta\eta$ становить 11,4%.

Ключові слова: теплоутилізаційні технології, вологовміст відхідних газів, котельна установка, ефективність теплоутилізатора, теплообмінна поверхня.

ANNOTATION

The master's thesis presents data comparing the efficiency and characteristics of the thermal and moisture state of the exhaust gases of these two systems.

The aim of the work is thermophysical substantiation of new advanced heat utilization technologies with complex use of utilized heat for low and medium power boilers of high ecological efficiency with introduction of moisture into the combustion zone and development on this basis of appropriate technical solutions and recommendations for their implementation.

The object of research - heat and mass transfer processes in complex heat recovery systems of low and medium power boilers.

The subject of research is heat and mass transfer characteristics of complex heat utilization systems at high moisture content of boiler exhaust gases.

On the basis of the performed researches concerning the considered complex systems of heat utilization of hot-water heating boilers it is shown that:

- the increase in boiler efficiency $\Delta\eta$, due to the use of the studied heat recovery systems, generally increases with increasing moisture content X_1 . Thus, for the heat recovery system with heating of the incoming boiler water and combustion air at $X_1 = 0.14$ kg/kg this year. the value of $\Delta\eta$ reaches 9.5%, and at $X_1 = 0.2$ kg / kg s.g. the maximum value of $\Delta\eta$ is 11.4%;

- these benefits are most significant at low ambient temperatures; so, for tns = - 20°C the value of $\Delta\eta$ is 5.8% and 8.9% for the first and second systems, respectively.

Key words: heat utilization technologies, moisture content of exhaust gases, boiler installation, efficiency of heat utilizer, heat exchange surface.

ЗМІСТ

ВСТУП . . . . .	.6
1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ . . . . .	.7
1.1 Способи зволоження відхідних димових газів котлів при застосуванні теплоутилізаційних технологій . . . . .	.7
1.2 Теплоутилізаційні технології при підвищеному вологовмісті відхідних газів котельних установок. Одноконтурні теплоутилізаційні системи . . . . .	.12
1.3 Аналіз досліджень теплообміну при глибокому охолодженні димових газів з підвищеним вологовмістом . . . . .	.18
1.4 Методи антикорозійного захисту газовідвідних трактів при глибокому охолодженні димових газів . . . . .	.21
2 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК З ПІДВИЩЕНИМ ВОЛОГОВМІСТОМ ВІДХІДНИХ ДИМОВИХ ГАЗІВ . . . . .	.24
2.1. Особливості застосування теплоутилізаційних систем для котлів з підвищеним вологовмістом відхідних газів . . . . .	.24
2.2 Тепловологісні характеристики теплоутилізаційних установок з глибоким охолодженням димових газів в установках для нагрівання вхідної котлової води . . . . .	.27
2.3 Тепловологісні характеристики теплоутилізаційних установок для нагрівання котлової води та дуттьового повітря . . . . .	.31

2.4 Показники теплової ефективності комплексних теплоутилізаційних систем при різних режимах роботи котла. . . . .	.32
2.5 Визначення впливу вологовмісту відхідних газів котла на оптимальне співвідношення площ поверхонь нагрівання водо- та повітрянагрівного устаткування теплоутилізаційних установок .	.42
3 ЗІСТАВЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ КОМПЛЕКСНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТРАДИЦІЙНИХ КОТЛІВ ТА КОТЛІВ З ПІДВИЩЕНИМ РІВНЕМ ВОЛОГОВМІСТУ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ . . . . .	.49
4 ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ УСТАНОВОК РІЗНОГО ТИПУ ПРИ ПІДВИЩЕНОМУ ВОЛОГОВМІСТІ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ КОТЛІВ . . . . .	.56
4.1 Різновиди комплексних теплоутилізаційних систем із сумісним використанням водо- та повітрянагрівного устаткування	.56
4.2 Загальні рекомендації щодо впровадження теплоутилізаційних технологій для котлів з підвищеним вологовмістом відхідних газів	.57
ВИСНОВКИ . . . . .	.63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ. . . . .	.65

ВСТУП

Стосовно напрямку енергозбереження в практиці виробництва теплової енергії котельними установками, то він реалізується шляхом застосування сучасних технологій глибокої утилізації теплоти відхідних газів котлів [1 - 7]. Теплоутилізаційні технології при введенні вологи в зону горіння мають характерні особливості, які пов'язані зі збільшенням вологовмістом відхідних димових газів відповідно до обсягів введення цієї вологи. Серед таких технологій особливо виділяються технології, пов'язані з підігрівом та зволоженням повітря котельних установок. В цих технологіях застосування підігріву дуттьового повітря призначене підвищити ККД котла, а його зволоження – забезпечити зниження температури в топковому просторі, а відтак, і відповідне зменшення утворення оксидів азоту. З огляду на це, дані технології характеризуються підвищеною екологічною ефективністю, насамперед, через вказане пригнічування утворення оксидів азоту та завдяки зменшенню шкідливих викидів, яке пов'язане зі зростанням ККД котла.

Теплоутилізаційні технології для котельних установок підвищеної екологічності можуть застосовуватись і при інших способах введення вологи в зону горіння. При цьому можуть використовуватись як традиційні, так і модернізовані теплоутилізаційні схеми.

Найпоширенішим напрямом теплоутилізації відхідних газів водогрійних опалювальних котлів, зокрема, є підігрівання у теплоутилізаційному устаткуванні зворотної води системи тепlopостачання перед надходженням її до котла. У цьому разі утилізована теплота використовується безпосередньо в котлі.

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

1.1 Способи зволоження відхідних димових газів котлів при застосуванні теплоутилізаційних технологій

Аналіз патентних та інформаційних матеріалів, які були розглянуті, показав, що теплоутилізаційні технології в котельних установках можуть бути систематизовані за способом зволоження димових газів:

- підмішуванням до димових газів водяної пари;
- контактуванням димових газів з водою;
- підмішуванням до дуттьового повітря водяної пари;
- контактуванням дуттьового повітря з водою;
- підмішуванням до димових газів і до дуттьового повітря водяної пари;
- контактуванням димових газів і дуттьового повітря з водою;
- контактуванням димових газів і дуттьового повітря з водою та підмішуванням до дуттьового повітря водяної пари;
- підігріванням та зволоженням дуттьового повітря у теплоутилізаційних системах з контактним водоповітряним тепломасообмінником (випарником) і газоводяним тепломасообмінником (конденсатором) при одноконтурному з'єднанні їхніх водяних трактів;
- підігріванням та зволоженням дуттьового повітря у теплоутилізаційних системах з контактним водоповітряним тепломасообмінником (випарником) і газоводяним тепломасообмінником (конденсатором) при двоконтурному з'єднанні їхніх водяних трактів через спільний проміжний поверхневий теплообмінник.

Вказані способи застосовуються відповідно до типу котла в котельній установці (водогрійний чи паровий), або незалежно від типу котла.

Такі технології використовуються в котельних установках з паровими котлоагрегатами. Випар атмосферного термічного деаератора подається в газохід відхідних димових газів котлоагрегату перед місцем розміщеного в газоході теплоутилізатора. В котельних установках функцію теплоутилізатора виконує контактний тепломасообмінник – поверхневий конденсаційний теплообмінник.

Теплоутилізаційна технологія для котельної установки з поверхневим конденсаційним теплоутилізатором дозволяє вилучити попередню дегазацію живильної води, яка застосовується в установках з контактним теплоутилізатором, тобто знизити капітальні вкладення в експлуатаційні витрати, утилізувати випар деаератора та інтенсифікувати теплообмін у теплоутилізаторі завдяки ефекту сукупності дій глибокого охолодження димових газів і додаткового зрошення зовнішньої поверхні теплообміну теплоутилізатора сконденсованим випаром, а також покращити умови роботи димососа, що підвищує економічність і надійність роботи котельні [1].

Підмішування до димових газів водяної пари використовуються в котельних установках з паровими котлоагрегатами. Випар атмосферного термічного деаератора

Контактування димових газів з водою застосовується в котельних установках з водогрійними або паровими котлами. Основні процеси технологій – це підігрівання води з її випаровуванням – зволоження димових газів у випарнику та наступне охолодження димових газів з конденсуванням водяної пари – утилізація теплоти зволжених димових газів у конденсаторі. При цьому в теплоутилізаційних системах «випарник-конденсатор» обидва основні елементи системи, як правило, мають свої незалежні, тобто не з'єднані між ними водяні контури або водяні (випарника) та повітряні (конденсатора), за винятком. В розглянутих теплоутилізаційних системах «випарник-конденсатор» має місце достатньо широкий набір їхніх варіантів.

У теплоутилізаційних системах у водяний рециркуляційний контур випарника включені і інші поверхневі теплообмінники – конденсатор і газопідігрівач, послідовно розміщені за напрямком руху димових газів після випарника. У конденсатор надходить холодна вода перед подаванням її до системи гарячого водопостачання; тут вона підігрівається, а далі – догрівається, проходячи через проміжний поверхневий двоступінчастий теплообмінник, включений між насосом і зрошувачем. В усіх зазначених системах процес охолодження у випарнику димових газів супроводжується конденсацією з них частини водяної пари. Далі насичені водяною парою димові гази у конденсаторі віддають теплоту воді контуру гарячого водопостачання з подальшою конденсацією водяної пари [2].

У технічних рішеннях теплоутилізаційних систем як випарник застосовується контактний газоводяний тепломасообмінник, а як конденсатор – поверхневий газоповітряний теплообмінник. Завдяки певним удосконаленням в технічних рішеннях цих систем досягається підвищення експлуатаційної надійності установки шляхом зменшення корозії димової труби, підвищення ефективності шляхом розширення діапазону змінення температурних потенціалів теплоносіїв, підвищення економічності та компактності, підвищення ефективності шляхом розширення діапазону теплопродуктивності.

Теплоутилізаційна технологія для котельної установки з поверхневим конденсаційним теплоутилізатором дозволяє вилучити попередню дегазацію живильної води, яка застосовується в установках з контактним теплоутилізатором, тобто знизити капітальні вкладення в експлуатаційні витрати, утилізувати випар деаератора та інтенсифікувати теплообмін у теплоутилізаторі завдяки ефекту сукупності дій глибокого охолодження димових газів і додаткового зрошення зовнішньої поверхні теплообміну теплоутилізатора сконденсованим випаром, а також покращити умови роботи димососа, що підвищує економічність і надійність роботи котельні. В системі

в газохід перед теплоутилізатором вводиться випар з сепаратора безперервної продувки котлоагрегату.

Теплообмінники розміщені співвісно між собою у вигляді циліндричних спіралей, причому витки спіралей одного теплообмінника розміщені між витками іншого.

Дані системи характеризуються тим, що теплоутилізаційні установки агрегатовані в одному корпусі з верхнім підведенням димових газів. Теплоутилізаційний агрегат містить встановлені в корпусі утилізаційний поверхневий теплообмінник (конденсатор) та проміжний поверхневий теплообмінник, який підігріває воду перед зрошувачем з оригінальним розміщенням сопел, встановленим над обома теплообмінниками. В даній системі завдяки збільшенню часу контактування димових газів з водою ця вода підігрівається до більш високої температури. Водяна пара з димових газів конденсується на теплообмінниках і збільшує коефіцієнт тепловіддачі з зовнішньої сторони поверхонь нагрівання. Підігріта в утилізаційному теплообміннику вода відводиться до споживача [3].

Підмішування до дуттьового повітря водяної пари передбачає використання отриманої у паровому котлі водяної пари після зниження її тиску в редуційно-охолоджувальній установці. Крім того, може використовуватися отримана у теплоутилізаторі котлоагрегату пара пониженого (нижче атмосферного) тиску, яка стискається в інжекторі до необхідного (вище атмосферного) тиску і подається у газопальниковий пристрій котлоагрегату.

У в енергетичних парових котлоагрегатах з багатосекційними повітропідігрівачами для зволоження димових газів застосовується отримання водяної пари за рахунок охолодження в одному з міжсекційних повітроводів підігрітого повітря. Для цього у повітроводі розміщується теплообмінник-водовипарник, в якому вода, що подається в нього, підігрівається і випаровується. Утворена водяна пара надходить у вхідний повітровід повітропідігрівача, де змішується з дуттьовим повітрям [4].

Контактування дуттьового повітря з водою застосовується зокрема в котельних установках, оснащених поверхневими повітропідігрівачами.

Контактування повітря з водою відбувається у повітроводі за напрямком руху повітря після повітропідігрівача, де розпилена форсункою вода зволожує підігріте повітря.

Контактування димових газів та дуттьового повітря з водою застосовується для теплоутилізаційних систем котельних установок, оснащених контактними газоводяним і водоповітряним тепломасообмінниками.

Теплоутилізаційна система котельної установки містить розміщений у відвідному газоході установки двоступінчастий контактний газоводяний тепломасообмінник і розміщений у повітроводі контактний водоповітряний тепломасообмінник. Система містить рециркуляційний водяний контур, у який паралельно включено грійними порожнинами два поверхневих теплообмінники. Охолоджені у першому ступіні контактного газоводяного тепломасообмінника димові гази надходять у другий за напрямком їхнього руху ступінь, де відбувається подальше їх охолодження з конденсацією з них водяної пари. У котельній установці забезпечується зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище завдяки зменшенню генерування оксидів азоту в топковій камері котлоагрегату при зволоженні дуттьового повітря та промиванні димових газів водою.

Контактування димових газів і дуттьового повітря з водою та підмішування до дуттьового повітря водяної пари в теплоутилізаційній системі скомпоновані в одному агрегаті. Димові гази після котлоагрегату за напрямком їхнього руху надходять у грійну порожнину газопідігрівача, після якого зрошуються водою безперервної та періодичної продувки і через верхній розподільний насадковий шар надходять у поверхневий газоповітряний теплообмінник (випарник). На поверхні випарника відбувається випаровування води (зволоження димових газів), завдяки чому значно збільшується коефіцієнт тепловіддачі з газової сторони у порівнянні з

конвективним теплообміном. Зволожені у випарнику димові гази проходять через нижній розподільний насадковий шар і додатково звожуються при контактуванні з конденсатом, що утворюється на теплообмінній поверхні газоповітряного конденсатора; передавання теплоти в ньому зі сторони димових газів таке ж ефективне, як і у випарнику, тому що має місце зворотний за напрямком фазовий перехід води – конденсація. Зневоднені димові гази проходять через нагрівну порожнину газопідігрівача і далі димососом через димову трубу викидаються в атмосферу.

Дуттьове повітря послідовно проходить газоповітряний конденсатор, охолоджувач конденсату – водоповітряний теплообмінник і газоповітряний випарник. На всмоктувальній стороні дуттьового вентилятора, який розміщується на вході в конденсатор, створюється понижений тиск, що забезпечує надходження випару з деаератора. Дозовані вприски води перед кожною теплообмінною поверхнею створюють всередині поверхні водяну плівку, яка випаровується внаслідок передавання теплоти від димових газів, завдяки чому має місце зволоження дуттьового повітря. Наявність підвищеної кількості водяної пари в дуттьовому повітрі забезпечує зниження концентрації оксидів азоту при згорянні природного газу в топковій камері котлоагрегату.

1.2 Теплоутилізаційні технології при підвищеному вологовмісті відхідних газів котельних установок. Одноконтурні теплоутилізаційні системи

Такі технології з контактним водоповітряним тепломасообмінником (випарником) і газоводяним тепломасообмінником (конденсатором) при одноконтурному з'єднанні їхніх водяних трактів застосовуються незалежно від типу котлів (парових або водогрійних), при цьому забезпечується зменшення концентрації оксидів азоту у відхідних газах котельної установки. Розглянуті системи включають такі типи основного устаткування:

- контактний випарник, контактний конденсатор;
- контактний випарник, зрошувальний конденсатор;
- зрошувальний випарник, зрошувальний конденсатор;
- контактний випарник, поверхневий конденсатор.

Здійснення контактного підігрівання дуттьового повітря і контактного охолодження димових газів рекомендується тільки з екологічних міркувань, тому що таке рішення супроводжується шкодою у три рази меншою, ніж при вприскуванні води в топку котлоагрегату [5]. Згідно ж з показниками теплового і матеріального балансів системи ефективність теплоутилізаційної технології забезпечується шляхом використання частини теплової енергії, отриманої у конденсаторі, яка є надлишковою для використання у випарнику.

У водопідготувальний контур котельної установки [6] між системою хімоводоочищення і деаератором включено конденсатор основного адіабатного випарника. У газовому тракті теплоутилізаційної системи установки за котлоагрегатом послідовно розміщені два контактні газоводяні тепломасообмінники. Через перший – циркулює вода в контурі з основним адіабатним випарником, через другий – вода в контурі з додатковим адіабатним випарником, через конденсатор якого проходить вода в циркуляційному контурі з контактним водоповітряним тепломасообмінником. Водяна пара, що утворюється у випарнику, конденсується на зовнішній поверхні теплообмінника конденсатора і віддає теплоту воді, що надходить у контактний водоповітряний тепломасообмінник. Конденсат зі збірника додаткового адіабатного випарника надходить у деаератор, тим самим додає відповідну кількість конденсату до утвореного в основному адіабатному випарнику і зменшує необхідну продуктивність системи хімоводоочищення.

Теплоутилізаційна система [7] містить теплоутилізаційний агрегат, в якому верхня частина – контактний водоповітряний тепломасообмінник. У агрегаті підігрівається хімічно очищена вода, яка циркулює в контурі

«агрегат -насос - поверхневий водоповітряний теплообмінник - водоводяний підігрівач сирової води - агрегат». Підігріта сирова вода надходить в систему хімоводоочищення, далі – в теплоутилізаційний агрегат, з якого частина хімічно очищеної води подається в деаератор. Частина дуттьового повітря підігрівається та зволожується у контактному водоповітряному тепломасообміннику і перед надходженням до газопальникового пристрою котлоагрегату змішується з іншою частиною повітря, підігрітого у поверхневому водоповітряному теплообміннику. Таке технологічне рішення забезпечує зменшення відносної вологості повітря перед вентилятором, а підключення поверхневого водоповітряного теплообмінника перед водоводяним підігрівачем сирової води запобігає замерзанню трубопроводу води циркуляційного контуру.

У паровій котельній установці у водяний циркуляційний контур теплоутилізаційної системи «випарник-конденсатор» між насосом конденсатора і водорозподільниками двоступінчастого випарника включено грійну порожнину поверхневого водоводяного теплообмінника, а в його нагрівній порожнині підігрівається сирова вода. Далі в пароводяному теплообміннику, у грійну порожнину якого подається водяна пара після споживача теплової енергії, сирова вода догрівається і надходить у систему хімоводоочищення. Така схема забезпечує доповнення підживлювальною водою системи тепlopостачання, підключеної до пароводяного бойлера.

Відмінність теплоутилізаційної технології в системі «випарник-конденсатор» [8] полягає в забезпеченні подавання такого обсягу циркуляційної води в контактний водоповітряний тепломасообмінник, який забезпечуватиме парціальний тиск водяної пари в димових газах 30...50 кПа. У теплоутилізаційній системі [9] частину води після водоповітряного тепломасообмінника відбирають і подають на рециркуляцію обминаючи контактний водоповітряний тепломасообмінник, що дозволяє підтримувати заданий оптимальний парціальний тиск водяної пари у дуттьовому повітрі і постійну його вологість, що підвищує ефективність спалювання газу.

Котельні установки також мають теплоутилізаційні системи, в яких застосовується зниження викидів оксидів азоту шляхом рециркуляції в топкову камеру частини охолоджених у котлоагрегаті димових газів, як правило, з зони конвективного газоходу, в якому їхня температура становить 300...400°C.

Завдяки тому, що гази рециркуляції надходять у топкову камеру охолодженими і насиченими вологою, знижуються максимальні локальні температури полум'я та зменшується утворення оксидів азоту.

Схема одноконтурного підключення водяних трактів контактного випарника та зрошувального конденсатора в котельних установках може бути доповнена паралельним підключенням у газовому тракті установки додаткового контактного конденсатора, з піддону якого спрямовується у контактний повітрозволожувач (випарник) вода для підігрівання та зволоження дуттьового повітря.

Завдяки розміщенню додаткового поверхневого теплообмінника, включеного грійною порожниною у відвідну лінію котлоагрегату під зрошувачем випарника, з'являється можливість додаткового підігрівання та зволоження дуттьового повітря в період низьких зовнішніх температур.

Реалізація контактної підігрівання дуттьового повітря та одночасного поверхневого охолодження димових газів у поєднанні з рядом експлуатаційних технологій забезпечує ефективну роботу котельних установок з системами теплоутилізації з відповідними типами основного устаткування.

При застосуванні теплоутилізаційної технології контактний водоповітряний тепломасообмінник (випарник) виконано за перехреснотоквою схемою, крім поверхневого газководяного теплообмінника (конденсатора), передбачено додатковий пристрій – газопідігрівач. У порівнянні з теплоутилізаційними системами, коли і випарник і конденсатор контактні, дана система має низку переваг:

- менша висота при компонуванні в агрегаті;

- більша температура підігріву циркуляційної води;
- менший аеродинамічний опір з газової та повітряної сторін;
- підвищена надійність роботи газовідвідного тракту котельної установки (запобігання конденсації у вихідному газопроводі та димовій трубі).

Удосконалена котельна установка з більш ефективною утилізаційною системою забезпечує:

- вилучення необхідності в підігрітій воді;
- осушування зволоженого повітря у повітроводі на ділянці від контактної камери теплоутилізатора до газопальникового пристрою котлоагрегату;
- заміну високопотенційного зовнішнього теплоносія, що виробляється котлоагрегатом, для обігрівання газопідігрівача, на теплоносій, отриманий у поверхневому теплообміннику теплоутилізатора (водопідігрівачі).

У двоконтурних теплоутилізаційних системах котельних установок з контактними тепломасообмінниками циркуляційні контури цих тепломасообмінників є окремими і безпосередньо не зв'язані. Використання теплоти води, підігрітої у контактному газоводяному тепломасообміннику, для підігрівання та зволоження дуттьового повітря в контактному водоповітряному тепломасообміннику здебільшого здійснюється при застосуванні поверхневого теплообмінника, який з'єднує обидва контури. У розроблених таким чином технологіях досягається вироблення такого обсягу конденсату з димових газів, який забезпечує поповнення нормованих втрат води в системах тепlopостачання.

У котельній установці теплоутилізаційна система оснащена або вбудованими у контактний газоводяний тепломасообмінник, або виносними, контактними декарбонізаторами. Тут також передбачено розміщення теплообмінника на трубопроводі подачі води до контактного водоповітряного тепломасообмінника та пропускання води через його піддон у систему гарячого водопостачання; це забезпечує вилучення накопичених

солей у його циркуляційному контурі і дозволяє поповнювати втрати води в контурі, яка випаровується при зволоженні дуттьового повітря.

У теплоутилізаційних системах котельних установок може бути застосовано додаткове зволоження дуттьового повітря – подаванням випару з декарбонізатора у повітровід перед контактним водоповітряним тепломасообмінником та димових газів – подаванням випара з деаератора у вихідний газохід між котлом і контактним газоводяним тепломасообмінником.

Контактний водоповітряний тепломасообмінник в котельній установці пропонується до розділення на два відсіки: в один з них подається конденсат, що утворюється в контактному газоводяному тепломасообміннику, конденсат декарбонізується і відводиться до деаератора. Така технологія забезпечує зменшення капітальних вкладень завдяки вилученню спеціального декарбонізатора, зменшує експлуатаційні витрати на деаерацію конденсату завдяки підвищенню ефективності його декарбонізації та збільшує теплопродуктивність установки за рахунок утилізації теплоти повітря, що використовується для декарбонізації конденсату.

Теплоутилізаційна система в газовому тракті котельної установки містить включені послідовно випарювальну контактну камеру, абсорбер та зрошувальний конденсатор, а у повітряному тракті – контактний водоповітряний тепломасообмінник (випарник). Кожний з перерахованих функціональних елементів системи оснащено своїм рециркуляційним контуром, що з'єднує їхні піддони зі зрошувачами. В установці також здійснюється ефективне підвищення економічності шляхом одночасного використання зволоження як дуттьового повітря, так і димових газів.

1.3 Аналіз досліджень теплообміну при глибокому охолодженні димових газів з підвищеним вологовмістом

Аналіз літературних та патентних джерел щодо розроблених теплоутилізаційних технологій для котельних установок з підвищеним вологовмістом відхідних димових газів показав, що конструкції відповідних теплообмінників для утилізації теплоти димових газів є різноманітними. В теплообмінниках поверхневого типу реалізується як «сухий», тобто суто конвективний теплообмін, так і «мокрый» теплообмін з конденсацією пари з димових газів.

Сучасні поверхневі водогрійні теплообмінники є досить компактними, що досягається за рахунок застосування оребрених поверхонь нагрівання та різноманітних інтенсифікаторів теплообміну. Теплова ефективність оребрених поверхонь значною мірою пов'язана з оптимальною геометрією та властивостями застосованих матеріалів. Пошукам раціональних форм поверхонь нагрівання при так званому «сухому» теплообміні (без зміни агрегатного стану теплоносіїв) присвячена значна кількість наукових робіт. Питання аналізу теплоаеродинамічних характеристик різноманітних видів розвинених і профільованих трубних поверхонь нагрівання з метою виявлення найбільш ефективних з них висвітлені в роботах.

Суттєвий внесок в дослідження теплоаеродинамічних характеристик поперечно оребрених поверхонь, створення методів їх теплового та аеродинамічного розрахунків внесли Мігай В.К., Зозуля Н.В., Хавін В.М., Юдін В.Ф., Письменний Є.М та інші. Авторами здійснено дослідження теплоаеродинамічних характеристик пучків поперечно оребрених труб та одержано основні співвідношення для середньоповерхневого теплообміну і аеродинамічного опору цих розвинутих поверхонь нагрівання.

При глибокому охолодженні відхідних газів котлів теплопередача здійснюється при зміні агрегатного стану частини теплоносія – водяної пари з димових газів. Для цього на теплообмінній поверхні, як відомо, повинні

бути створені певні умови, а саме її температура повинна бути нижча точки роси водяної пари. Загальний потік тепла від газів до стінки складається з потоку тепла, зумовленого градієнтом температур, та потоку тепла, пов'язаного з конденсацією пари за рахунок різниці парціальних тисків пари в газах і на поверхні стінки. Через стінку і далі сумарний тепловий потік проходить тільки за рахунок температурного градієнта.

За даними літературних джерел визначення коефіцієнта теплопередачі може базуватись на використанні зведеного коефіцієнта тепловіддачі α^* , який враховував би ефект конденсації

$$\alpha^* = \alpha[1+r/c_T \times (X_1 - X_2)/(t_1 - t_2)], \quad (1.1)$$

де X_1 , X_2 , t_1 , t_2 – вологовміст та температури газів на вході і виході з конденсаційного теплообмінника відповідно.

Для розрахунку теплотехнічних параметрів теплообмінників з таким вологовмістом користуються теорією Нусельта, розробленою для конденсації насиченої пари на горизонтальній гладкій трубі. Для одинокої горизонтальної труби результати розрахунків за рівнянням Нусельта добре узгоджуються з дослідними даними. Для пучків горизонтальних труб формула Нусельта дає занижені значення в порівнянні з дослідом. Проте теорія Нусельта є головним інструментом в розрахунках тепловіддачі при конденсації пари вже впродовж багатьох років. Для визначення коефіцієнтів теплообміну при конденсації відносно чистої пари на пучках труб з радіальними ребрами та в залежності від геометрії пучків застосовують різні поправки до формули та інші показники ступеня.

Теплообмін при глибокому охолодженні димових газів котлів протікає при значно меншій вологості. Кількість водяної пари в продуктах згоряння залежить, як вже зазначалось, від характеристик палива, а також від коефіцієнта надлишку повітря при його спалюванні. Вологовміст продуктів

згоряння природного газу в сучасних котлах, включаючи котли з введенням вологи в зону горіння, становить 90...250 г/кг сухих газів (с.г.).

Експериментальні дослідження процесу конденсації пари за наявності неконденсованих газів виконані Берманом Л.Д.. Дослідження здійснювались на пучках горизонтальних труб. За результатами досліджень встановлено, що вплив швидкості потоку v на теплообмін помітно зростає зі збільшенням вмісту неконденсованих газів у суміші. Берманом Л.Д. була запропонована система критеріїв подібності для масообміну при конденсації, так званих дифузійних чисел Nu_D , Pr_D та безрозмірної різниці парціальних тисків пари і парогазової суміші $\pi_g = \Delta p_{\text{п}}/p_{\text{сум}}$. Для узагальнення дослідних даних з масообміну у разі конденсації пари з рухомої парогазової суміші для першого ряду трубного пучка була запропонована критерійна залежність

$$Nu_D = a Re^{0,5} \pi_g^{(-0,33)} \varepsilon_{\Gamma}^{(-0,6)}, \quad (1.2)$$

де a – коефіцієнт, що залежить лише від ряду пучка горизонтальних труб;

ε_{Γ} – вміст інертного газу в суміші.

Відомі також дослідження Інституту технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України стосовно теплообміну з конденсацією водяної пари з димових газів в пучках поперечно оребрених труб при вологовмісті відхідних газів традиційних котлів та котлів із введенням вологи в зону горіння. Згідно з запропонованою в роботах методикою при розрахунку коефіцієнта тепловіддачі критерій Nu_{Γ} для димових газів визначається двома складовими

$$Nu_{\Gamma} = Nu_{\Gamma}^{\text{сух}} + Nu_{\Gamma}^{\text{кон}}, \quad (1.3)$$

де $Nu_{\Gamma}^{\text{сух}}$ – число Нусельта при, так званому, сухому теплообміні, що розраховується за відомими залежностями;

$Nu_r^{\text{кон}}$ – додаткова складова, що пов’язана з ефектом конденсації на оребрених поверхнях нагрівання.

В Інституті технічної теплофізики НАН України проведено експериментальні дослідження та одержано дані для $Nu_r^{\text{кон}}$ при теплообміні в пучках поперечно оребрених труб за умов глибокого охолодження відхідних димових газів котлів в діапазоні зміни їхнього вологовмісту 90...250 г/кг с.г.

1.4 Методи антикорозійного захисту газовідвідних трактів при глибокому охолодженні димових газів

Підвищення вологовмісту димових газів на вході в теплоутилізаційну систему зазвичай призводить до збільшення і вихідного вологовмісту цих газів. Залишкова волога у вихідних димових газах впливає на тепловологісний стан у газовідвідному тракті, що вимагає застосування посиленних заходів щодо захисту димових труб та подовження терміну їхньої експлуатації.

Основним чинником, що визначає утворення конденсату в димовій трубі, є співвідношення таких параметрів як: температура димових газів, точка роси, яка визначається вологовмістом цих газів, та температура внутрішньої поверхні стінки димової труби. Зниження температури газів спричиняє зниження температури внутрішньої поверхні стінки, наближаючи її до точки роси, значення якої зростає зі збільшенням вологовмісту димових газів. Тому при роботі котельних установок з підвищеним вологовмістом відхідних газів необхідно застосовувати посилені методи захисту від корозійного руйнування газовідвідних трактів, особливо – димової труби.

До ефективних заходів щодо збільшення довговічності газовідвідних каналів і димових труб, як відомо, відносяться різні теплові методи відвернення конденсатуутворення та застосування корозійностійких матеріалів (легованих сталей, полімерних та керамічних матеріалів тощо).

Серед теплових методів запобігання конденсації виділяються такі, що можуть бути застосовані лише при використанні теплоутилізаційних технологій котельних установок і які пов'язані зі зниженням вологості димових газів перед їхнім надходженням до газовідвідних каналів. Це метод часткового байпасування відхідних від котла газів повз теплоутилізатор, повітряний метод (підмішування сухого та нагрітого повітря до димових газів після теплоутилізатора) і метод підсушування димових газів у поверхневому теплообміннику-газопідігрівачі, встановленому за теплоутилізатором.

Окрім вказаних методів, у разі необхідності, застосовують метод зменшення теплових втрат з корпусу димової труби. Така необхідність, як показали дослідження, для традиційних котлів зазвичай виникає при комплектації котелень димовими трубами з низькими теплоізоляційними властивостями (металевих, залізобетонних без футерування).

Метод байпасування газів полягає у пропусканні частини χ гарячих димових газів від котла повз теплоутилізаційне устаткування з наступним їх змішуванням з газами, що охололи у цьому устаткуванні. За цих умов підвищується температура суміші газів $t_{\text{сум}}$, вологовміст X та точка роси t_p цієї суміші на вході у газовідвідний тракт. Збільшення температури $t_{\text{сум}}$ повинно здійснюватись до значення, що забезпечуватиме перевищення температури поверхні $t_{\text{пов}}$ над температурою точки роси t_p в усті димової труби.

Метод запобігання конденсації у відвідних газоходах котельних установок шляхом підсушування охолоджених в теплоутилізаторі димових газів реалізується при нагріванні цих газів у поверхневому теплообміннику, встановленому за теплоутилізатором. Застосування додаткової поверхні нагрівання (газопідігрівача) слугує збільшенню температури газів на виході з теплоутилізатора $t_{\text{гу}}$ до рівня, що забезпечує значення температури $t_{\text{пов}}$ в усті димової труби, яке відповідає перевищенню її над точкою роси t_p при сталому значенні абсолютної вологості димових газів X . Підвищення $t_{\text{гу}}$ може здійснюватись за рахунок теплоти прямої води

котла або димових газів, відібраних перед конвективною частиною чи економайзером котла.

Наступним методом, що забезпечує відвернення випадення конденсату в газовідвідних трактах, є повітряний метод, при застосуванні якого відбувається зниження вологості X і підвищення температури газоповітряної суміші за рахунок підмішування в димові гази після теплоутилізатора частини сухого та нагрітого повітря. Застосування даного методу, на відміну від методу байпасування, забезпечує не тільки підвищення $t_{\text{пов}}$, але і зниження точки роси t_p газоповітряної суміші завдяки відносно низьким значенням вологовмісту підмішуваного повітря ($X_p \approx 0,01$ кг/кг с.п.).

Три зазначені вище методи пов'язані зі зміною тепловологісних характеристик димових газів після теплоутилізаційного устаткування і можуть застосовуватись, як вже зазначалось, лише при застосуванні теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням димових газів.

Метод теплоізоляції димової труби полягає у нанесенні зовнішньої або внутрішньої теплоізоляції на корпус цієї труби без зміни характеристик димових газів. Даний метод може застосовуватись в комплексі з одним із наведених трьох методів.

Для захисту від конденсатоутворення повітроводів зазвичай використовуються метод підсушування зволоженого повітря у повітропідігрівачі та додаткова теплоізоляція цих повітроводів.

2 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК З ПІДВИЩЕНИМ ВОЛОГОВМІСТОМ ВІДХІДНИХ ДИМОВИХ ГАЗІВ

2.1. Особливості застосування теплоутилізаційних систем для котлів з підвищеним вологовмістом відхідних газів

Ефективність систем теплоутилізації димових газів котельних установок, як відомо, значною мірою визначається глибиною охолодження відхідних димових газів. При зниженні температури цих газів нижче температури точки роси водяної пари, що міститься в газах, відбувається конденсація частини пари і використовується її теплота конденсації, що суттєво підвищує теплові характеристики теплоутилізаційного устаткування. Для традиційних котлів без зволоження дугтьового повітря температура точки роси відхідних від котла газів коливається в межах $52...58^{\circ}\text{C}$ в залежності від коефіцієнта надлишку повітря α , що визначає вологовміст димових газів X_1 . При цьому в топку котла надходить повітря з вологовмістом приблизно 10 г/кг с.п. . У разі введення додаткової вологи в зону горіння котла зростає і вологовміст відхідних газів, що приводить до підвищення їхньої точки роси. За таких умов димові гази до теплоутилізації і після характеризуються широким спектром тепловологісних характеристик залежно від режимів роботи пальникових пристроїв, котлоагрегата і застосованої теплоутилізаційної схеми та відповідного устаткування. Визначення цих характеристик є досить важливим для аналізу теплової і екологічної ефективності систем теплоутилізації та організації безпечних умов експлуатації газовідвідних трактів.

Таким чином, особливості застосування теплоутилізаційних установок при підвищеній вологості відхідних газів котла пов'язані з рівнем цієї вологості.

У даному розділі наведено результати досліджень тепловологічних характеристик та теплової ефективності комплексних теплоутилізаційних установок для водогрійних опалювальних котлів середньої потужності при комплексному використанні утилізованої теплоти для нагрівання води різного призначення та дуттьового повітря. Відповідні схеми котельних установок наведено на рис. 2.1 та 2.2.

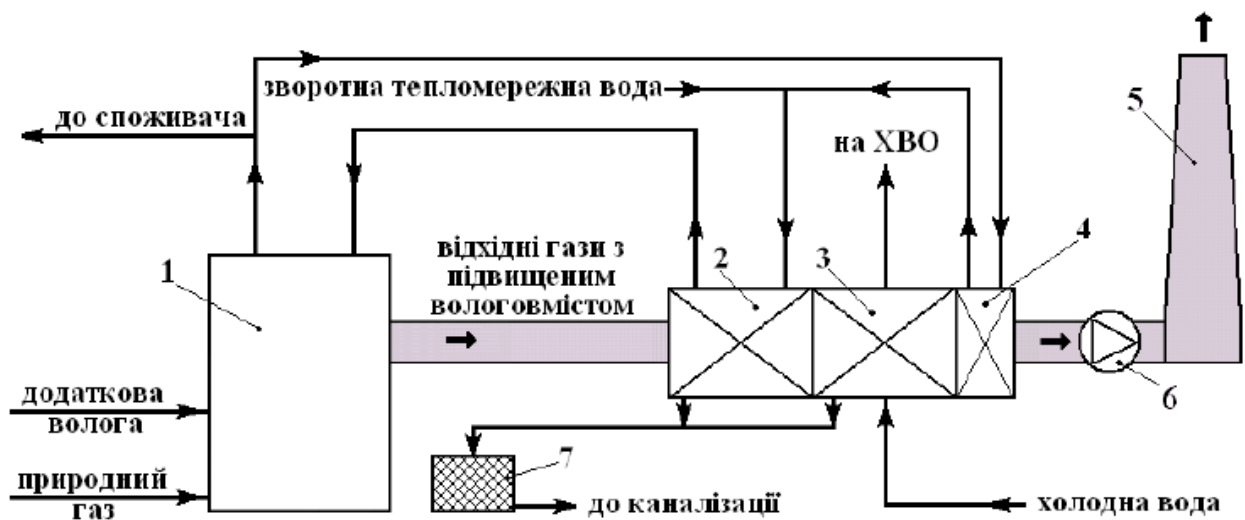


Рис. 2.1. Принципова схема котельної установки з комплексною теплоутилізаційною системою для підігрівання вхідної котлової води та холодної води на хімводоочищення:

1 – водогрійний котел; 2 – підігрівач вхідної котлової води (зворотної тепломережної) води; 3 – підігрівач води системи ХВО; 4 – газопідігрівач; 5 – димова труба; 6 – димосос; 7 – нейтралізатор конденсату.

У першій з наведених схем для доохолодження димових газів після теплоутилізатора, призначеного для нагрівання вхідної котлової води, встановлено ще один водогрійний теплоутилізатор, призначений для нагрівання холодної сирі води, що надходить в систему хімводоочищення

котельні. В другій схемі для більш глибокого охолодження димових газів використовується повітрогрійний теплообмінник, у якому нагрівається холодне повітря, що надходить на горіння в котел.

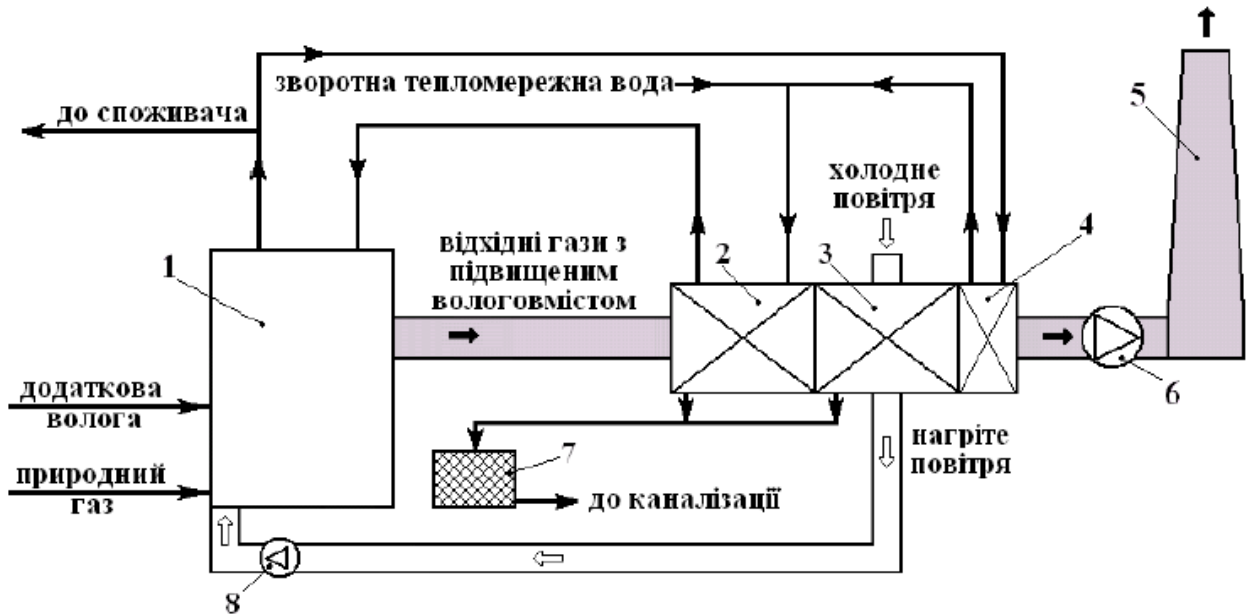


Рис. 2.2. Принципова схема котельної установки з комплексною теплоутилізаційною системою для підігрівання вхідної котлової води та повітря на горіння:

1 – водогрійний котел; 2 – підігрівач котлової води; 3 – повітропідігрівач; 4 – газопідігрівач; 5 – димова труба; 6 – димосос; 7 – нейтралізатор конденсату; 8 – вентилятор.

Проведено дослідження ефективності наведених комплексних теплоутилізаційних систем за умов підвищених рівнів вологовмісту відхідних газів котла X_1 .

Критерієм теплової ефективності теплоутилізаційної системи зазвичай слугує рівень підвищення ККД або коефіцієнта використання теплоти палива КВТП котла, який повинен відповідати розрахунку балансу котла та котельної установки з системою теплоутилізації за вищою теплотою згоряння палива, тобто з урахуванням теплоти конденсації водяної пари, що

міститься в відхідних димових газах. Очевидно, що чим нижча температура відхідних газів, а відповідно і вищий рівень конденсації водяної пари в теплоутилізаційному устаткуванні та менший вологовміст димових газів на виході із нього, тим вища ефективність теплоутилізації і величина приросту ККД (КВТП) котельної установки.

2.2 Тепловологісні характеристики теплоутилізаційних установок з глибоким охолодженням димових газів в установках для нагрівання вхідної котлової води

Для обох наведених схем теплоутилізації (див. рис. 2.1 та 2.2) спільним є теплообмінник-теплоутилізатор (підігрівач вхідної котлової води 2), встановлений першим у хвостовій частини котла за ходом димових газів. Дослідження тепловологісних характеристик цього теплообмінника в умовах підвищеного вологовмісту відхідних газів є дуже важливим для визначення його внеску у загальний приріст ККД (КВТП) котла в таких комплексних схемах.

На рис. 2.3 наведено дані щодо температури димових газів після підігрівача вхідної котлової води протягом опалювального періоду при різних значеннях вологовмісту димових газів на виході із котла X_1 в залежності від режиму його роботи згідно з тепловим графіком котельні. Значення вологовмісту димових газів на виході із котла коливалось в межах $X_1 = 0,14...0,25$ кг/кг с.г., що відповідає практичному діапазону значень вологовмісту для традиційних котлів та за умов введення вологи в зону горіння для досягнення необхідної екологічної ефективності котельної установки.

Дослідження виконувались для котла з номінальними значеннями: теплопродуктивності 2 МВт, температури відхідних газів 160°C та ККД котла без системи теплоутилізації 84 %, розрахованого за вищою теплотою згоряння палива.

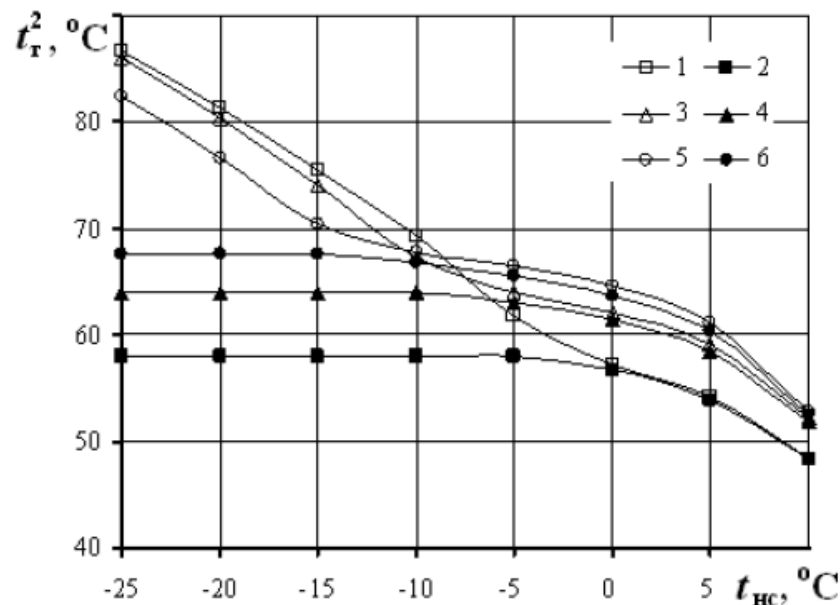


Рис. 3.3. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ температур точки роси t_p та димових газів t_{r2} після водогрійного теплоутилізатора при використанні утилізованої теплоти для нагрівання вхідної котлової води для різних значень вологовмісту X_1 відхідних газів: 1, 3, 5 – t_{r2} ; 2, 4, 6 – t_p ; 1,2 – $X_1 = 0,14$; 3, 4 – $X_1 = 0,2$; 5, 6 – $X_1 = 0,25$ кг/кг с.г.

Як видно з наведених даних, при зростанні вологовмісту газів від значень $X_1 = 0,14$ кг/кг с.г. до значень $X_1 = 0,2$ та $X_1 = 0,25$ кг/кг с.г. температура точки роси t_p відхідних від котла газів у номінальному режимі його роботи (при $t_{нс} = -25$ °C) підвищується від $t_p = 58$ °C до $t_p = 64$ °C та $t_p = 68$ °C відповідно. Тобто, конденсація водяної пари у теплоутилізаційному устаткуванні може починатись при більш високих значеннях температур нагріваної води у порівнянні з традиційними котлами.

Згідно з отриманими даними, зі збільшенням вхідного вологовмісту X_1 зменшується температура відхідних газів t_{r2} після теплоутилізатора у сухому режимі його роботи (без конденсації), а у конденсаційному режимі t_{r2} збільшується. Характер зміни температури газів t_{r2} на виході з теплоутилізатора зумовлений багатьма факторами, зокрема: у номінальному режимі - зниженням температури відхідних димових газів котла з огляду на зменшення температури у його топковому просторі згідно з величиною

введеної вологи в зону горіння, а відповідно і зниженням температурного напору в теплоутилізаційному устаткуванні через зменшення температури газів на вході. У конденсаційному режимі роботи теплоутилізатора при збільшенні X_1 збільшується t_2 через підвищення вихідного вологовмісту X_2 .

Дані на рис. 2.4 ілюструють характер зміни вологовмісту X_2 димових газів на виході із теплоутилізаційного устаткування протягом опалювального періоду також у залежності від рівня вологовмісту цих газів на виході із котла.

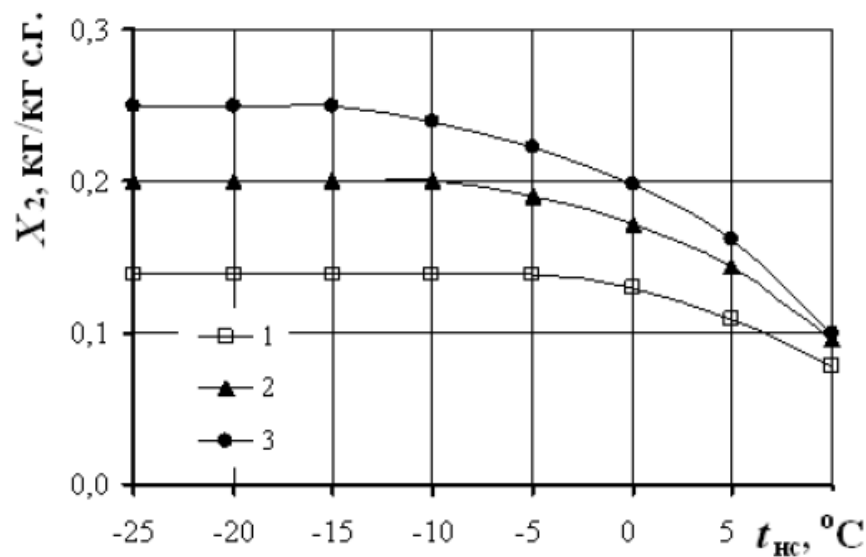


Рис. 2.4. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ вологовмісту димових газів X_2 після теплоутилізатора при використанні утилізованої теплоти для нагрівання вхідної котлової води для різних початкових значень вологовмісту відхідних газів котла X_1 :

1 – $X_1 = 0,14$; 2 – $X_1 = 0,2$; 3 – $X_1 = 0,25$ кг/кг с.г.

Отримані дані свідчать, що зростання величини початкового вологовмісту димових газів впливає на ефективність теплоутилізації і величина приросту ККД (КВТП) котельної установки.

Внесок у підвищення ККД (або КВТП) теплоутилізаторів, що входять до комбінованих систем теплоутилізації, є різним і залежить від режимних

характеристик котла, типу застосовуваної схеми теплоутилізації та теплоутилізаторів, потреби у воді на підживлення теплових мереж, кліматичних умов експлуатації котельної установки тощо.

Визначенню тепловологісних характеристик та ефективності вказаних теплоутилізаційних систем присвячені наступні підрозділи роботи.

Отримані дані свідчать, що зростання величини початкового вологовмісту димових газів X_1 призводить до підвищення кінцевого значення абсолютної вологості димових газів, що пояснюється недостатністю за величиною поверхні теплообміну для здійснення процесу глибшого охолодження димових газів з конденсацією більшого обсягу водяної пари.

На рис. 2.5 та 2.6 наведені дані щодо зміни в залежності від температури навколишнього середовища температури вихідних газів після теплоутилізатора, а також кінцевого вологовмісту X_2 при різних значеннях поверхонь нагрівання теплоутилізаційного устаткування F_1 та F_2 при початковому вологовмісті димових газів $X_1 = 0,2$ кг/кг с.г.

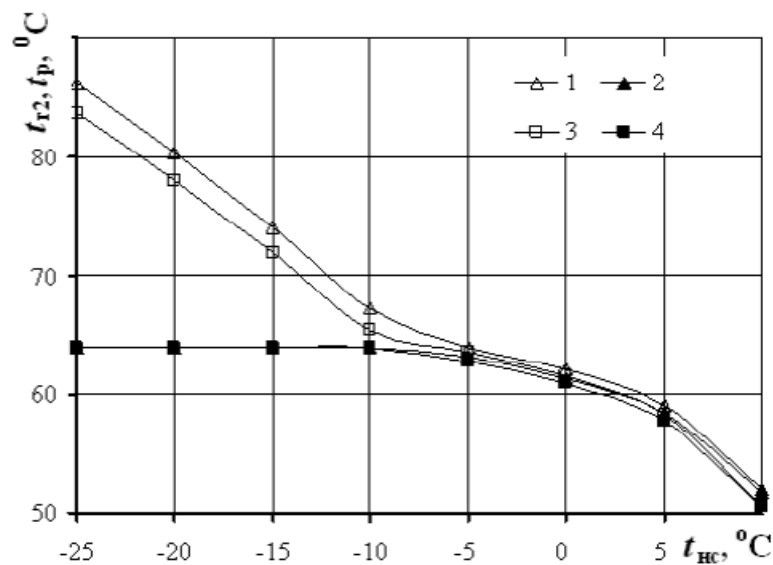


Рис. 2.5. Залежність від температури навколишнього середовища t_{nc} температури димових газів t_{r2} (1, 3) на виході з теплоутилізатора і точки роси t_p (2, 4) при $X_1 = 0,2$ кг/кг с.г. для різних значень поверхонь нагрівання F :

$$1, 2 - F_1 = 40 \text{ м}^2; 3, 4 - F_2 = 44 \text{ м}^2.$$

Наведені результати демонструють, що збільшення поверхні нагрівання в 1,1 рази забезпечує більш глибоке охолодження цих газів (на 2...3°C) та зниження їхнього вологовмісту на виході приблизно на 1,1%.

2.3 Тепловологісні характеристики теплоутилізаційних установок для нагрівання котлової води та дуттьового повітря

Подальше охолодження димових газів після підігрівача вхідної котлової води може здійснюватись і у повітрогрійному теплоутилізаторі, як це показано в схемі на рис. 2.2. При цьому температура нагріваного теплоносія – повітря з навколишнього середовища – у всіх режимах роботи котла значно нижча за температуру зворотної води.

Результати досліджень тепловологісних характеристик димових газів на виході з повітронагрівача 3 при комплексній теплоутилізаційній схемі з використанням водогрійного та повітрогрійного теплоутилізаторів наведено на рис. 2.5 та 2.7.

Одержані результати досліджень показують, що завдяки низькій температурі нагріваного повітря конденсаційний режим експлуатації теплоутилізаційної установки за даним котлом реалізується в холодну пору року з температурою навколишнього середовища $t_{нс} \geq -15^{\circ}\text{C}$ при $X_1 = 0,2$ кг/кг с.г. При зниженні температури цього середовища, $t_{нс} \geq -20^{\circ}\text{C}$, початок конденсаційного режиму роботи спостерігається при збільшенні початкового вологовмісту димових газів, $X_1 = 0,25$ кг/кг с.г. За умови $X_1 = 0,14$ кг/кг с.г глибоке охолодження димових газів можливе лише при $t_{нс} \geq -10^{\circ}\text{C}$. При цьому, чим вищий вологовміст димових газів після котла X_1 , тим суттєвіше збільшення рівня конденсації пари з димових газів, а відповідно і підвищення ефективності теплоутилізації цих газів.

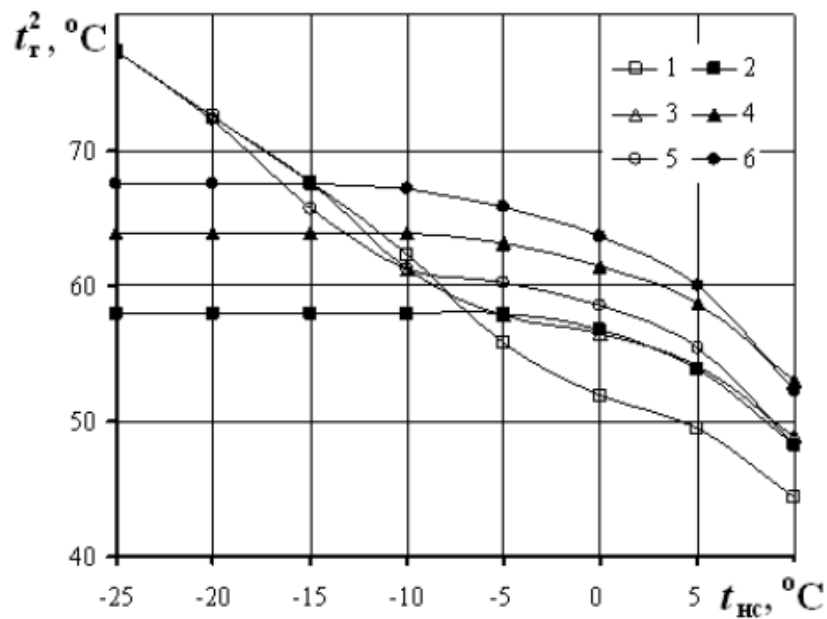


Рис. 2.5. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ точки роси t_p та температури димових газів t_{r2} після теплоутилізаторів при комплексному використанні утилізованої теплоти для нагрівання вхідної котлової води та повітря на горіння для різних значень вологовмісту відхідних газів X_1 :

1, 3, 5 – t_{r2} ; 2, 4, 6 – t_p ; 1, 2 – $X_1 = 0,14$; 3, 4 – $X_1 = 0,2$; 5, 6 – $X_1 = 0,25$ кг/кг с.г.

2.4 Показники теплової ефективності комплексних теплоутилізаційних систем при різних режимах роботи котла

За умов застосування сучасних теплоутилізаційних технологій, призначених для нагрівання вхідної котлової води, утилізована теплота використовується безпосередньо у котлі і її величина суттєво залежить від рівня охолодження димових газів і обсягів утвореного конденсату в теплоутилізаційному устаткуванні. Як показано в попередніх підрозділах, режимні характеристики котла в залежності від кліматичних умов суттєво впливають на глибину охолодження димових газів у вказаному устаткуванні, а отже і на обсяг сконденсованої водяної пари, що міститься в цих газах.

При створенні комплексних теплоутилізаційних систем (рис. 2.1 та рис. 2.2) доохолодження відхідних газів після теплоутилізатора для

нагрівання зворотної води системи теплопостачання (вхідної котлової води) здійснюється шляхом нагрівання більш холодного теплоносія: води системи ХВО або холодного повітря на горіння.

У разі доокомпонування теплоутилізаційної установки теплоутилізатором 3 для нагрівання холодної води системи ХВО (рис. 2.1) конструкційний розрахунок цього теплоутилізатора базується на даних щодо потреби цієї води для підживлення теплових мереж.

При застосуванні теплоутилізаційної системи з нагріванням вхідної котлової води та холодного повітря на горіння (рис. 2.2), при конструкційному розрахунку теплоутилізаторів необхідно враховувати режимні характеристики котла згідно з температурними показниками навколишнього середовища протягом опалювального періоду та співвідношення площ теплообміну водогрію та повітрогрію устаткування.

Для визначення максимальної теплової ефективності пропонує комплексних теплоутилізаційних систем для нагрівання вхідної котлової води та холодного повітря на горіння у даному розділі проведено розрахункові дослідження щодо теплопродуктивності Q і рівнів приросту ККД котла $\Delta\eta$ в залежності від різних факторів. Значення вказаних характеристик суттєво залежать від вологовмісту газів X_1 розрахункового температурного перепаду системи опалення, розрахункової температури навколишнього середовища, поточної температури навколишнього середовища протягом періоду опалення тощо. Вказані параметри визначають кліматичні умови експлуатації котельного устаткування та його режимні показники, а відповідно і експлуатаційні характеристики комплексних теплоутилізаційних установок. Окрім режимних показників котла та значення вологовмісту газів X_1 на теплові характеристики комплексних теплоутилізаційних систем суттєво впливає значення площ поверхонь нагрівання водопідігрівача $F_{вп}$ і повітропідігрівача $F_{пп}$.

З метою визначення оптимального значення $S_{\text{опт}}$ співвідношення площ теплообмінних поверхонь водопідігрівачів і повітропідігрівачів $S = F_{\text{вп}}/F_{\text{пп}}$ при підвищеному вологовмісті димових газів на виході з котла $X_1 = 140...200$ г/кг с.г. проведено розрахункові дослідження величини теплопродуктивності і рівнів приросту ККД в широкому діапазоні зміни значень S . В таблиці 2.1 наведено вихідні дані для проведення даних досліджень.

Таблиця 2.1. Вихідні дані для досліджень теплової ефективності теплоутилізаторів для підігрівання води та повітря в комплексній теплоутилізаційній системі і оптимізації їхніх конструкційних параметрів

Найменування	Значення										
<i>Параметри котла</i>											
Температура навколишнього середовища, °С	-20	-15	-10	-5	0	5	10				
Навантаження, %	100	87	75	62	49	36	24				
Теплопродуктивність, МВт	9,7	8,4	7,2	6,0	4,7	3,5	2,3				
Витрата відхідних газів, кг/с	5,5	4,8	4,1	3,4	2,7	2,0	1,3				
Температура газів на виході, °С	173	164	153	139	121	99	70				
Коефіцієнт надлишку повітря	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,33	1,33				
Вологовміст газів X_1 , г/кг с.г.	140; 160; 180; 200										
Витрата води, кг/с	17,3										
Витрата повітря, кг/с	4,9	4,3	3,7	3,0	2,4	1,8	1,2				
Температура зворотної води, °С	70	65,1	60,0	54,5	48,6	42,3	35,1				
ККД без теплоутилізаторів, %	90,8	90,9	91,0	91,2	91,3	91,5	91,6				
<i>Параметри системи опалення відповідно до кліматичних зон України</i>											
Розрахункова температура повітря для системи опалення, °С	південний регіон			північний регіон							
	-6...-16			-16...-20							
Тривалість опалювального періоду, доба	126...144			158...192							
Розрахунковий перепад температур мережної води, °С	45										
Розрахунковий перепад температур у системі опалення, °С	25										
<i>Параметри теплоутилізаційної установки</i>											
Співвідношення площ $S = F_{\text{вп}}/F_{\text{пп}}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Загальна площа теплообмінної поверхні ($F_{\text{вп}} + F_{\text{пп}}$), м ²	550...600										

Більшість параметрів задано такими, що відповідають режимним характеристикам котлоагрегата, нормованим параметрам системи теплопостачання та відповідним експлуатаційним та кліматичним умовам.

Для комплексної теплоутилізаційної установки з нагріванням вхідної котлової води та повітря на горіння, на рис. 2.6 та 2.7 для різних початкових вологовмістів димових газів X_1 наведено графіки залежності теплопродуктивності Q установки та приросту ККД котла $\Delta\eta$ від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ при різних значеннях співвідношень площ теплообмінних поверхонь S .

Аналізуючи результати досліджень, наведені на рис. 2.6 та 2.7, можна зробити висновок, що протягом усього опалювального періоду завдяки використанню утилізованої теплоти у комплексній системі для підігрівання котлової води та повітря на горіння досягається загальне збільшення теплопродуктивності системи Q та приросту ККД котлоагрегата $\Delta\eta$. При цьому, зростання цих показників тим більше, чим вищий вологовміст димових газів X_1 на виході з котла.

Очевидним є той факт, що величина Q як для окремих елементів системи, так і для всієї установки в цілому залежить від навантаження котлоагрегата, тобто потреб споживача у тепловій енергії, і є функцією монотонною, максимальне значення якої відповідає найбільш холодному періоду року, а мінімальне – теплому.

Значення теплопродуктивності Q та приросту ККД котла $\Delta\eta$ визначені за умови дотримання нормативного теплового графіка системи теплопостачання для відповідних температур $t_{нс}$.

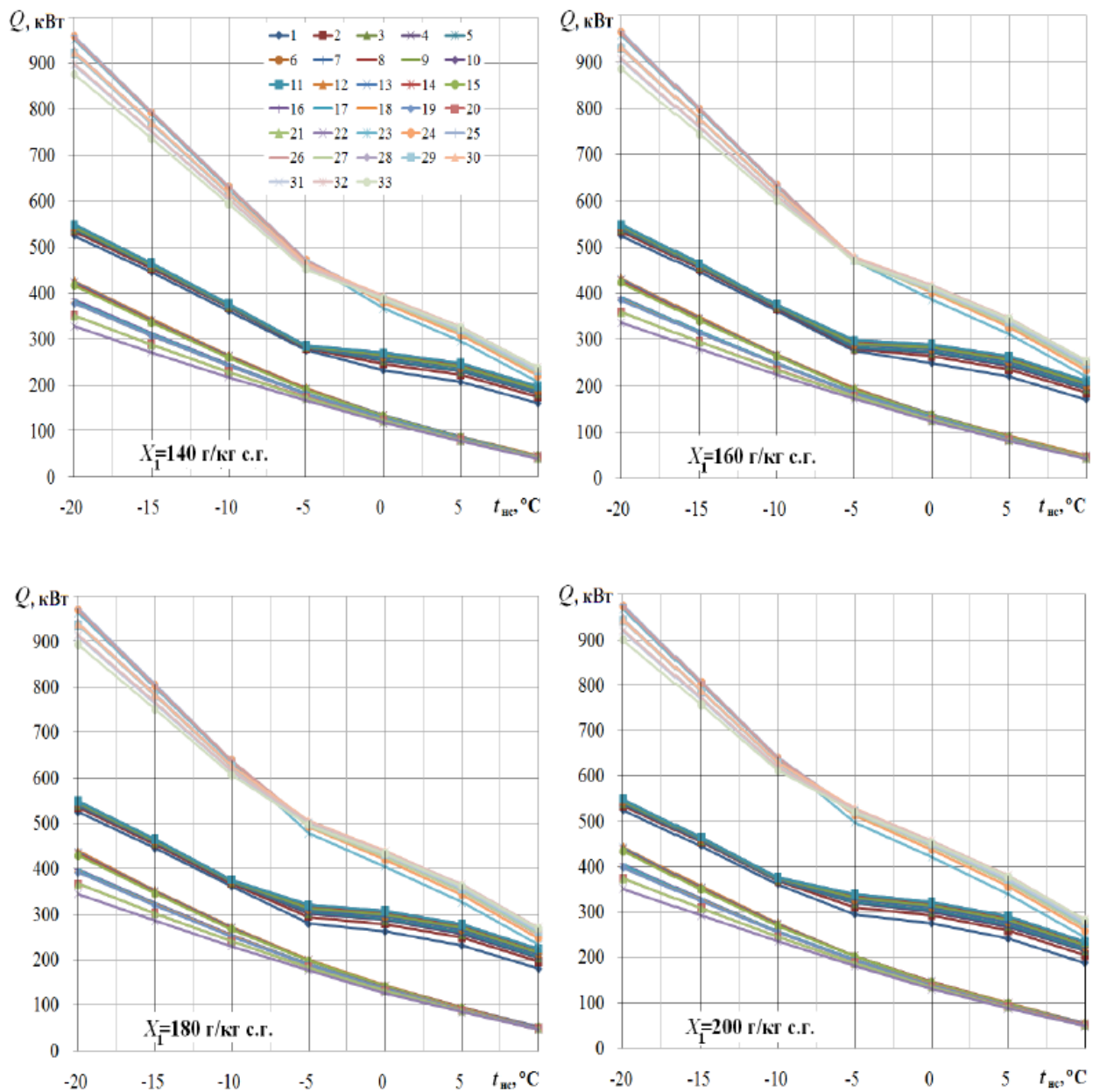


Рис. 2.6. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{вс}$ теплопродуктивності водогрійного підігрівача (1-11), повітрогрійного підігрівача (12-22) та їхньої сумарної (23-33) при різних співвідношеннях площ поверхонь теплообміну S для різних початкових вологовмістів X_1 димових газів:

1, 12, 23 – $S = 0,5$; 2, 13, 24 – 0,6; 3, 14, 25 – 0,7; 4, 15, 26 – 0,8; 5, 16, 27 – 0,9;
 6, 17, 28 – 1,0; 7, 18, 29 – 1,1; 8, 19, 30 – 1,2; 9, 20, 31 – 1,3; 10, 21, 32 – 1,4; 11,
 22, 33 – 1,5.

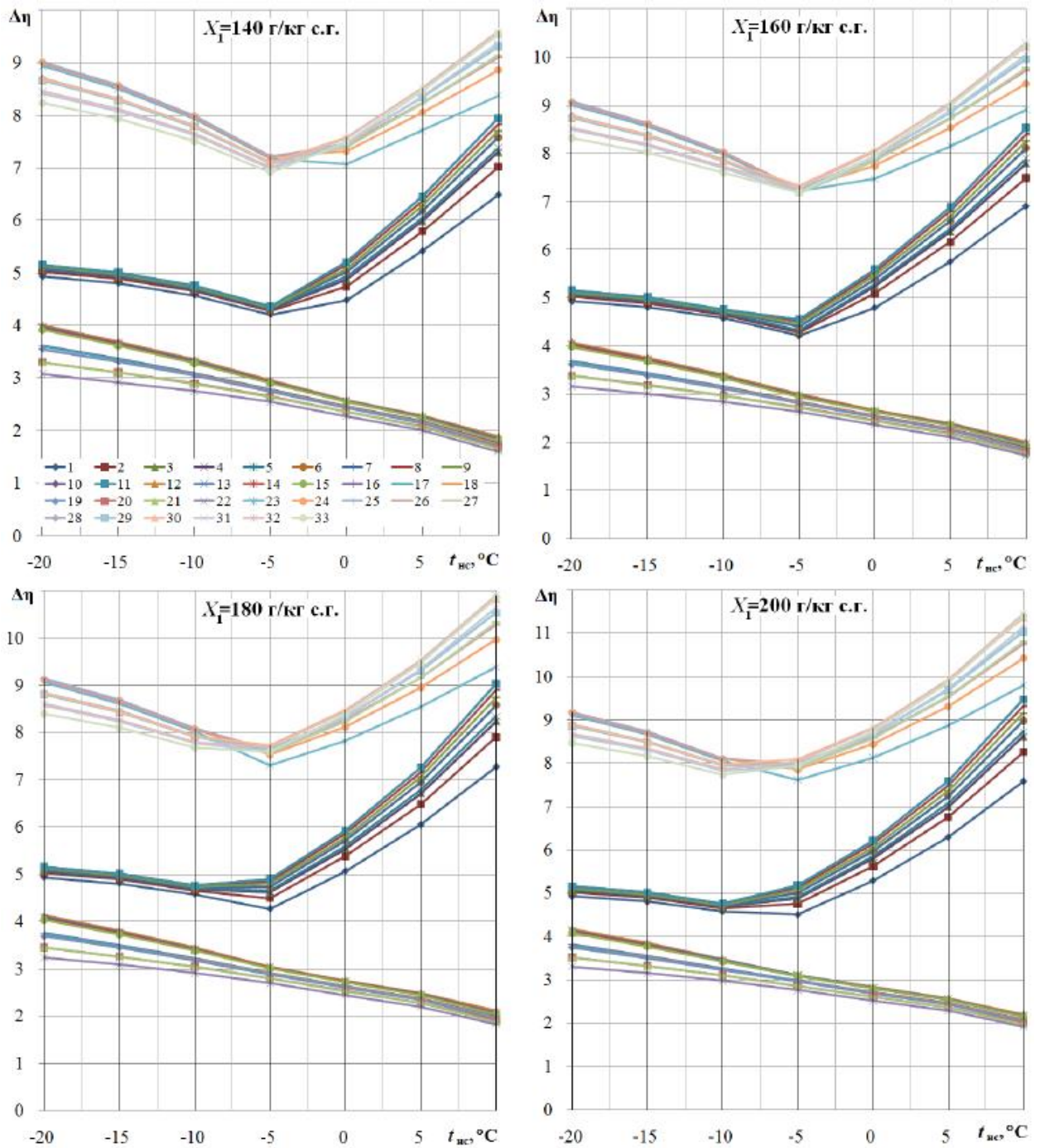


Рис. 2.7. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{вс}$ приросту ККД котла $\Delta\eta$ за рахунок водопідігрівача (1-11), повітропідігрівача (12-22) та сумарний комплексної системи (23-33) при різних співвідношеннях площ поверхонь теплообміну S для різних початкових вологовмістів X_1 димових газів:

1, 12, 23 – $S = 0,5$; 2, 13, 24 – $0,6$; 3, 14, 25 – $0,7$; 4, 15, 26 – $0,8$; 5, 16, 27 – $0,9$; 6, 17, 28 – $1,0$; 7, 18, 29 – $1,1$; 8, 19, 30 – $1,2$; 9, 20, 31 – $1,3$; 10, 21, 32 – $1,4$; 11, 22, 33 – $1,5$.

Щодо рівнів зростання ККД котлоагрегата $\Delta\eta$ (див. рис. 2.7) в даній комплексній теплоутилізаційній системі, то тут спостерігається монотонний спад величини $\Delta\eta$ для повітрогрійних теплоутилізаторів з ростом $t_{нс}$, при цьому приріст ККД спостерігається в межах 1,6...4,0% та 1,9...4,2% при $X_1 = 140$ г/кг с.г. та $X_1 = 200$ г/кг с.г. відповідно. Для водогрійних теплоутилізаторів різке зростання величини $\Delta\eta$ відбувається при $t_{нс} \geq -5^\circ\text{C}$. При $X_1 = 140$ г/кг с.г. приріст $\Delta\eta$ знаходиться в діапазоні значень 4,2...7,9%, а при $X_1 = 200$ г/кг с.г. – 4,5...9,5%.

За цих умов загальне підвищення ККД котла відповідає збільшенню величини $\Delta\eta$ в діапазоні 6,9...9,6% та 7,6...11,4% при тих самих початкових вологовмістах X_1 димових газів. Як видно, залежність величини $\Delta\eta$ для водогрійних теплоутилізаторів та для всієї теплоутилізаційної установки має області мінімальних значень $\Delta\eta_{\text{мін}}$ у діапазоні температур від мінус 10°C до 0°C . Для цього температурного діапазону значення $\Delta\eta_{\text{мін}}$ становлять 4,2...5,2% та 4,5...6,2% для водогрійного елемента системи і $\Delta\eta_{\text{мін}} = 6,9...8,0\%$ та $7,6...8,8\%$ для всієї комплексної установки при вологовмісті газів X_1 на виході з котла 140 та 200 г/кг с.г. відповідно.

Наявність областей мінімальних значень $\Delta\eta_{\text{мін}}$ пояснюється особливістю роботи водопідігрівача. Його теплова потужність істотно залежить від режиму роботи котлоагрегата і системи теплопостачання, а саме від температури зворотної води $t_{зв}$ у тепловій мережі. Наприклад, при температурах навколишнього середовища $t_{нс} \leq -10^\circ\text{C}$ теплопродуктивність котлоагрегата та водопідігрівача мають високі значення і без реалізації конденсаційного режиму, оскільки температура зворотної води $t_{зв} \geq 60^\circ\text{C}$. Відповідно до температурного графіка тепломережі, зі збільшенням температури навколишнього середовища (при $t_{нс} \geq -5^\circ\text{C}$) знижується навантаження котла, приблизно на 40 % і більше, а отже зменшується витрата відхідних димових газів і їхня температура.

Відповідно до температурного графіку тепломережі, зі збільшенням температури навколишнього середовища (при $t_{нс} \geq -5^\circ\text{C}$) знижується

навантаження котла, приблизно на 40% і більше, а отже зменшується витрата відхідних димових газів і їхня температура. Зменшується також і температура зворотної води ($t_{зв} < 55^{\circ}\text{C}$). При підвищеному вологовмісті димових газів на виході з котла X_1 створюються умови для початку конденсаційного режиму роботи водогрійного теплоутилізатора при нижчих температурах навколишнього середовища завдяки підвищенню точки роси димових газів, і приріст ККД котла $\Delta\eta$ значно зростає у порівнянні з режимом роботи без конденсації пари з димових газів. Таким чином, максимальне значення витрати конденсату $G_{\text{конмакс}}$ для повітрогрійних теплообмінників відповідає самій холодній порі року ($t_{\text{нс}} = - 20^{\circ}\text{C}$), а для водогрійних теплоутилізаторів і для всієї установки $G_{\text{кон макс}}$ має місце в теплий період опалювального сезону, в якому $t_{\text{нс}} > 0^{\circ}\text{C}$ і $t_{\text{зв}} < 50^{\circ}\text{C}$.

На рис. 2.8 наведено результати досліджень закономірностей зміни теплопродуктивності Q комплексної теплоутилізаційної установки для підігрівання вхідної котлової води та холодного повітря на горіння в залежності від зміни в досліджуваному діапазоні співвідношення площ S теплообмінних поверхонь водогрійного і повітрогрійного елементів системи для різних температур навколишнього середовища протягом періоду опалення, які характерні для погодних умов України. Дані, що ілюструють зміну приросту ККД котлоагрегата $\Delta\eta$ для вищезазначених умов подані на рис. 2.9. Аналіз одержаних результатів свідчить, що досліджувані параметри Q та $\Delta\eta$ суттєво залежать від кліматичних умов, а саме від режиму роботи котлоагрегата, температурних параметрів системи опалення та теплової мережі.

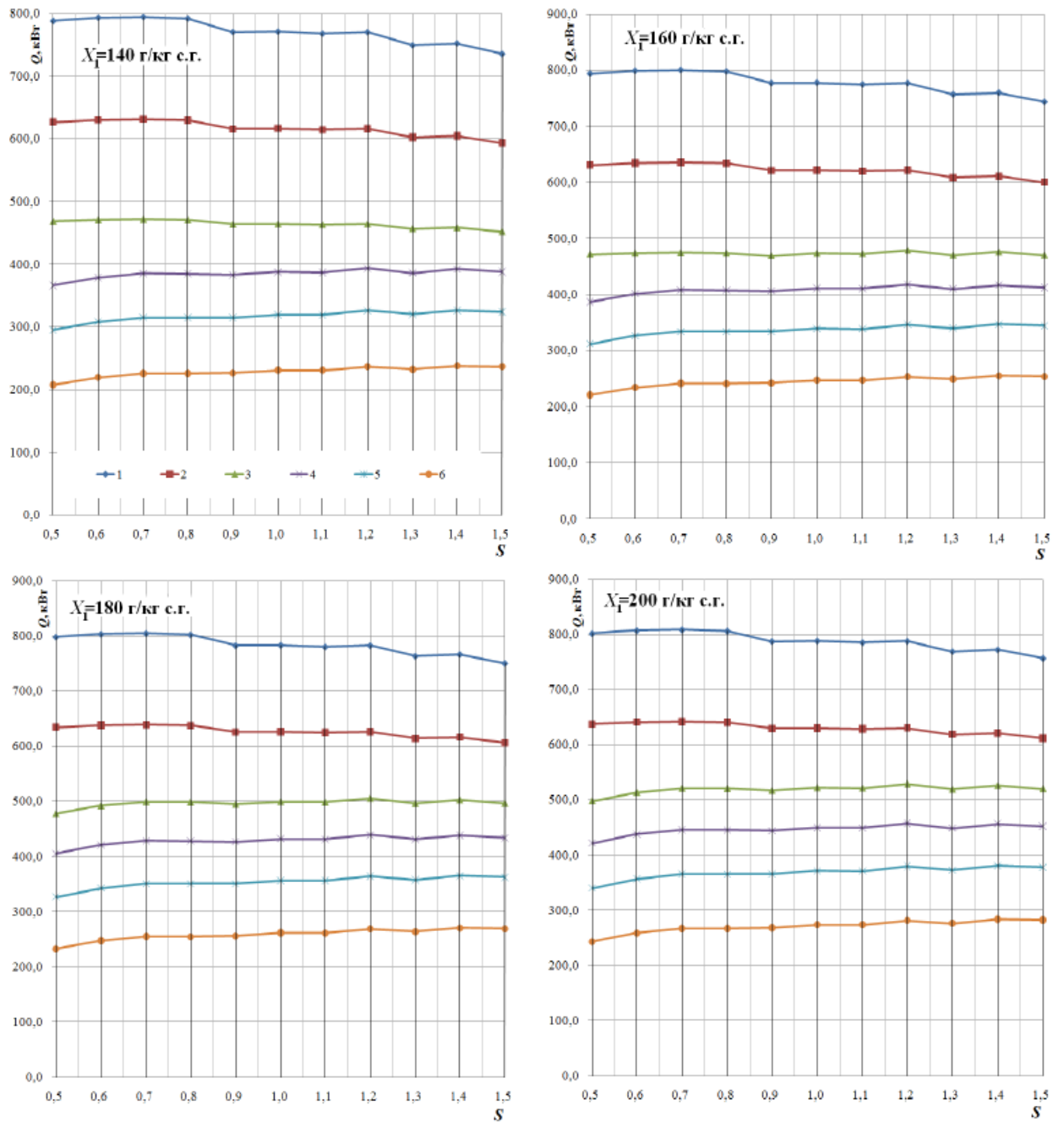


Рис. 2.8. Залежність від співвідношення площ теплообмінної поверхні водопідігрівача та повітропідігрівача S загальної теплопродуктивності Q комплексної теплоутилізаційної установки при зміні температур навколишнього середовища $t_{нс}$ для різних початкових вологовмістів X_1 димових газів:

1 – $t_{нс} = -15$; 2 – -10 ; 3 – -5 ; 4 – 0 ; 5 – 5 ; 6 – 10°C .

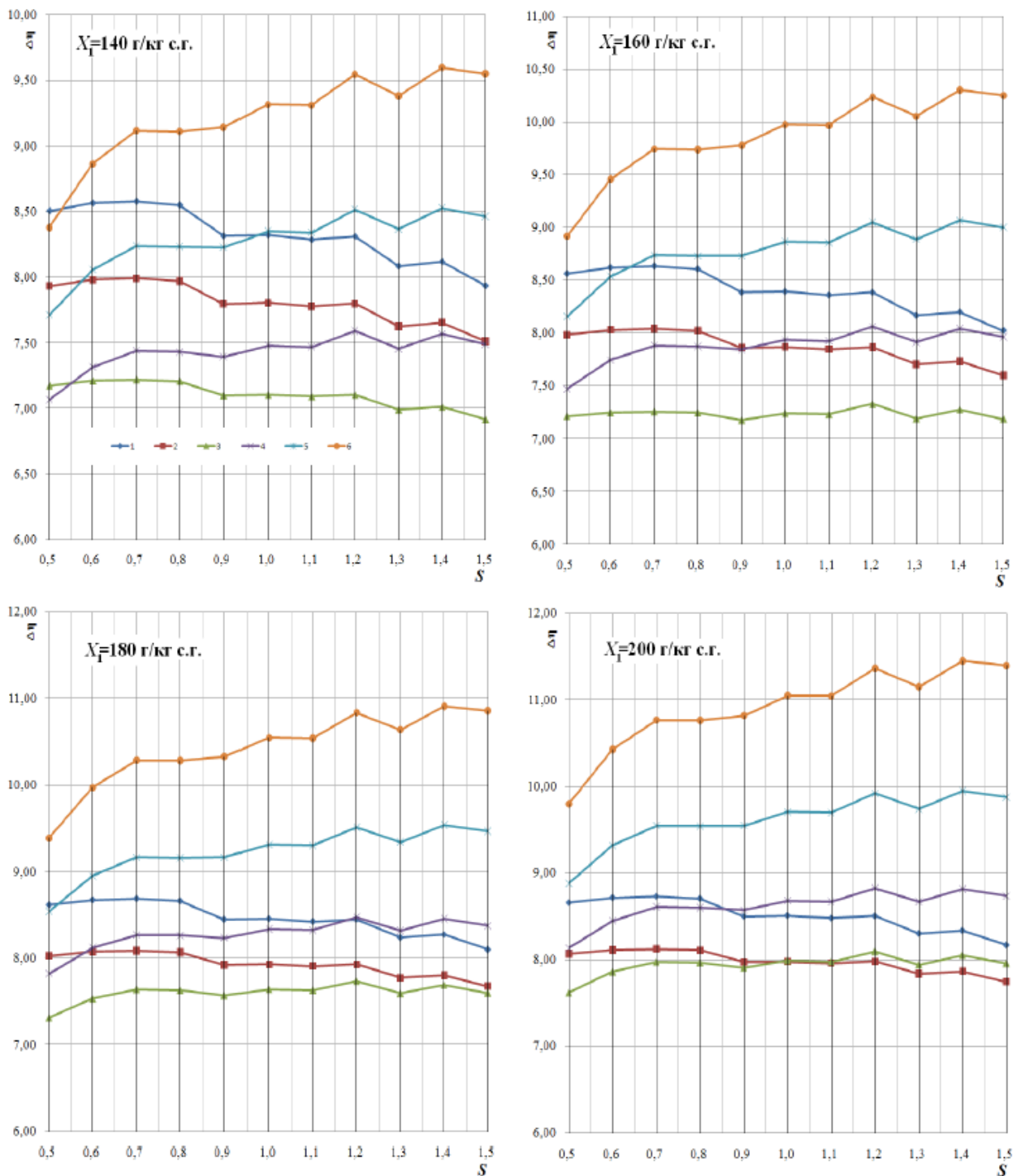


Рис. 2.9. Залежність від співвідношення площ теплообмінної поверхні водопідігрівача та повітропідігрівача S комплексної теплоутилізаційної установки загального приросту ККД котлоагрегата $\Delta\eta$ при зміні температур навколишнього середовища t_{nc} для різних початкових вологовмістів X_1 димових газів:

$$1 - t_{nc} = -15; 2 - -10; 3 - -5; 4 - 0; 5 - 5; 6 - 10^\circ\text{C}.$$

2.5 Визначення впливу вологовмісту відхідних газів котла на оптимальне співвідношення площ поверхонь нагрівання водо- та повітрянагрівного устаткування теплоутилізаційних установок

Для більш детального аналізу впливу на теплову ефективність розглянутих систем зміни співвідношення площ S теплообмінних поверхонь водопідігрівача та повітропідігрівача, початкового вологовмісту X_1 димових газів та температурних показників навколишнього середовища протягом опалювального періоду в різних регіонах України проведено дослідження, викладені у цьому підрозділі.

Дослідження полягали у визначенні та аналізі річного обсягу вироблення теплової енергії W комплексною теплоутилізаційною установкою за умов її використання лише продовж опалювального періоду при різних значеннях співвідношення площ S для різних кліматичних умов України. При цьому бралось до уваги, що температура t_{nc} навколишнього середовища – величина змінна і непередбачувана, залежна від погодних умов, відповідно і рівень річного виробництва утилізованої теплоти W буде змінюватися та відрізнятися за роками. Тому оцінка величини W була проведена за нормованими осередненими місячними показниками температури повітря навколишнього середовища для міст України, що характеризуються різними кліматичними умовами, а відтак і різними рівнями температур навколишнього середовища та тривалістю опалювального сезону. Для прикладу обрано такі характерні міста України, як Донецьк, Запоріжжя, Київ, Львів, Полтава, Суми, Херсон та Ялта, для яких в таблиці 2.2 вказано основні розрахункові температури навколишнього повітря для системи опалення та тривалість опалювального періоду. Ці параметри відповідають нормативним даним, які рекомендовані інститутом "УКРНДІНЖПРОЕКТ".

Для вказаних міст на рис. 2.10 - 2.13 наведені результати розрахунків річного виробництва утилізованої теплоти W за опалювальний сезон в комплексній теплоутилізаційній системі з підігріванням вхідної котлової

води та повітря на горіння для різних значень початкових вологовмістів X_1 димових газів.

Таблиця 2.2. Параметри роботи опалювальних систем і температури навколишнього середовища для різних регіонів України

Міста України	Середня температура навколишнього повітря, °С									Розрахункова температура для системи опалення	Тривалість опалювального періода, днів
	За опалювальний період	Найхолоднішого місяця	За місяцями опалювального періода:								
			жовтень	листопад	грудень	січень	лютий	березень	квітень		
Донецьк	-1,8	-6,6	7,9	0,9	-4,2	-6,6	-6,2	-1,0	7,9	-24	183
Запоріжжя	-0,7	-5,2	9,1	2,6	-2,6	-5,2	-4,4	0,6	9,0	-23	175
Київ	-1,1	-6,0	7,4	1,2	-3,5	-6,0	-5,4	-0,6	7,1	-21	187
Львів	-0,2	-5,0	7,7	2,4	-2,6	-5,0	-4,2	0,3	6,7	-20	191
Полтава	-1,9	-6,9	7,4	0,6	-4,5	-6,9	-6,4	-1,3	7,6	-22	187
Суми	-2,5	-7,9	6,4	-0,2	-5,4	-7,9	-7,6	-2,4	6,4	-24	195
Херсон	0,6	-3,2	10,5	4,1	-0,8	-3,2	-2,6	2,2	9,3	-18	167
Ялта	5,2	3,8	14,2	9,3	6,1	4,0	3,8	5,9	10,3	-6	126

Проведений аналіз одержаних результатів підтверджує, що величина загального річного обсягу вироблення теплової енергії W в комплексній утилізаційній установці залежить від кліматичних умов регіону, вологовмісту димових газів X_1 , і на її показник суттєво впливає значення співвідношення площ теплообмінних поверхонь S .

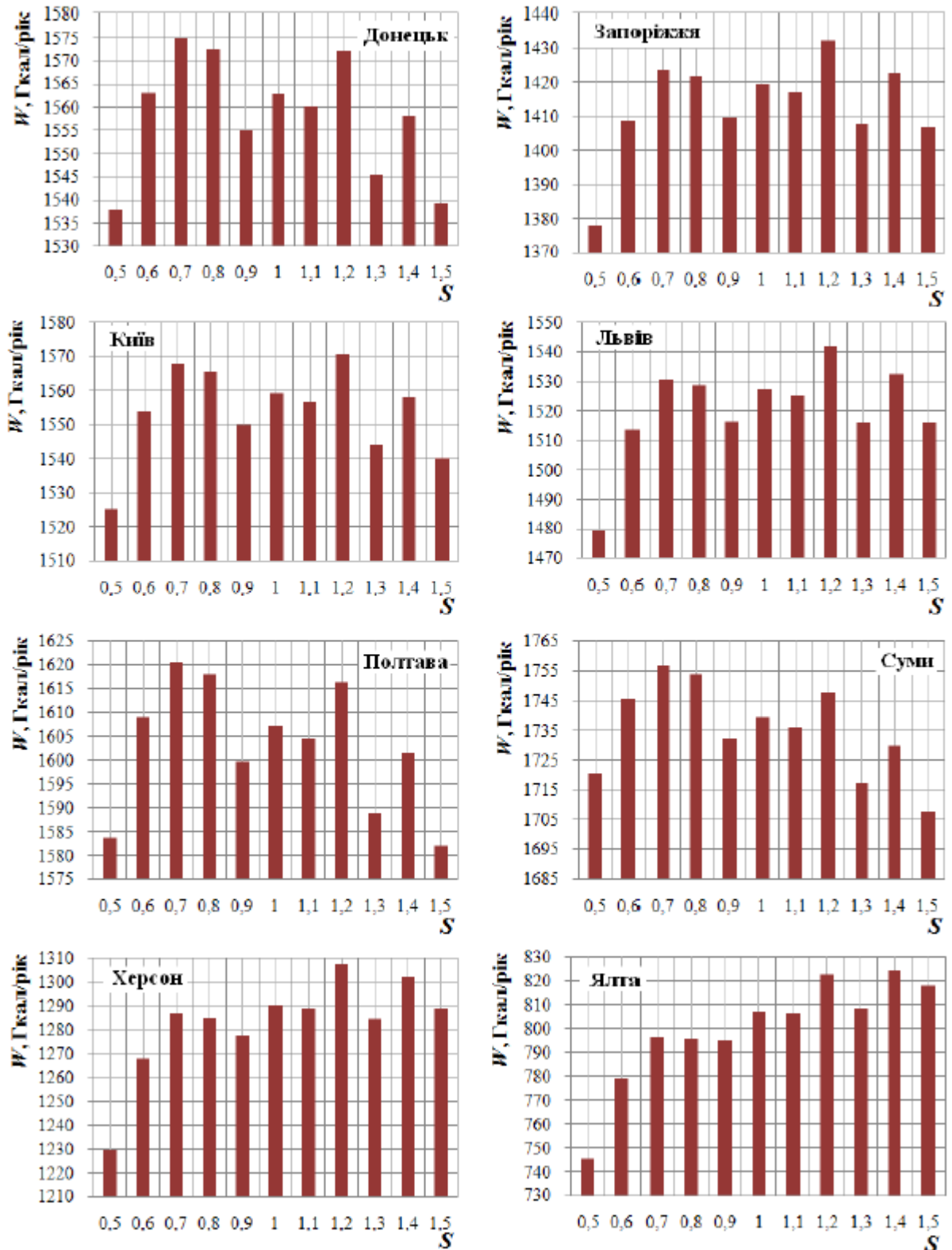


Рис. 2.10. Річна теплопродуктивність W комплексної теплоутилізаційної системи з підігріванням вхідної котлової води та повітря на горіння в залежності від співвідношення площ S водо- і повітропідігрівачів для міст України з різними кліматичними умовами при вологовмісті димових газів $X_1 = 140$ г/кг с.г.

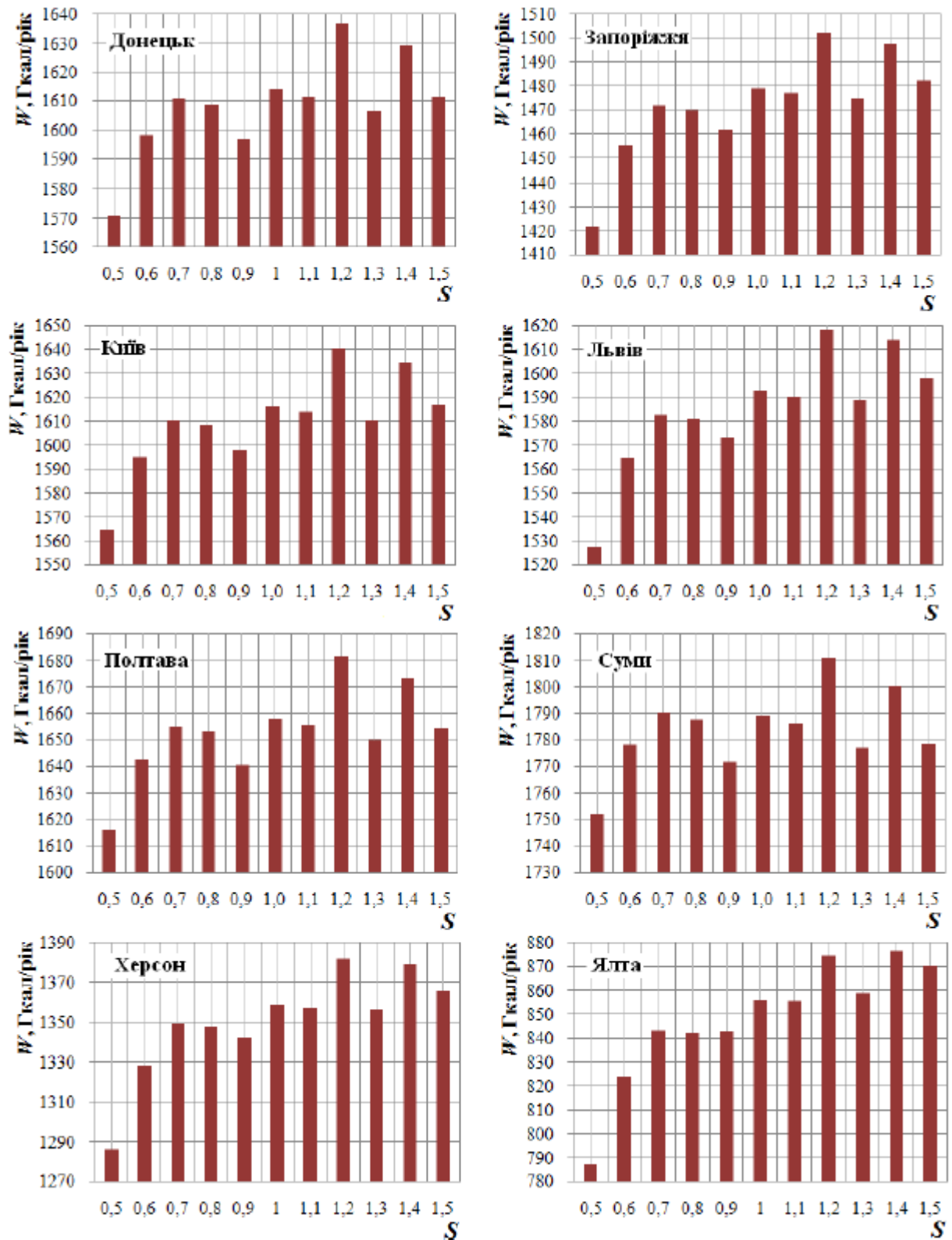


Рис. 2.11. Річна теплопродуктивність W комплексної теплоутилізаційної системи з підігріванням вхідної котлової води та повітря на горіння в залежності від співвідношення площ S водо- і повітропідігрівачів для міст України з різними кліматичними умовами при вологовмісті димових газів $X_1 = 160$ г/кг с.г.

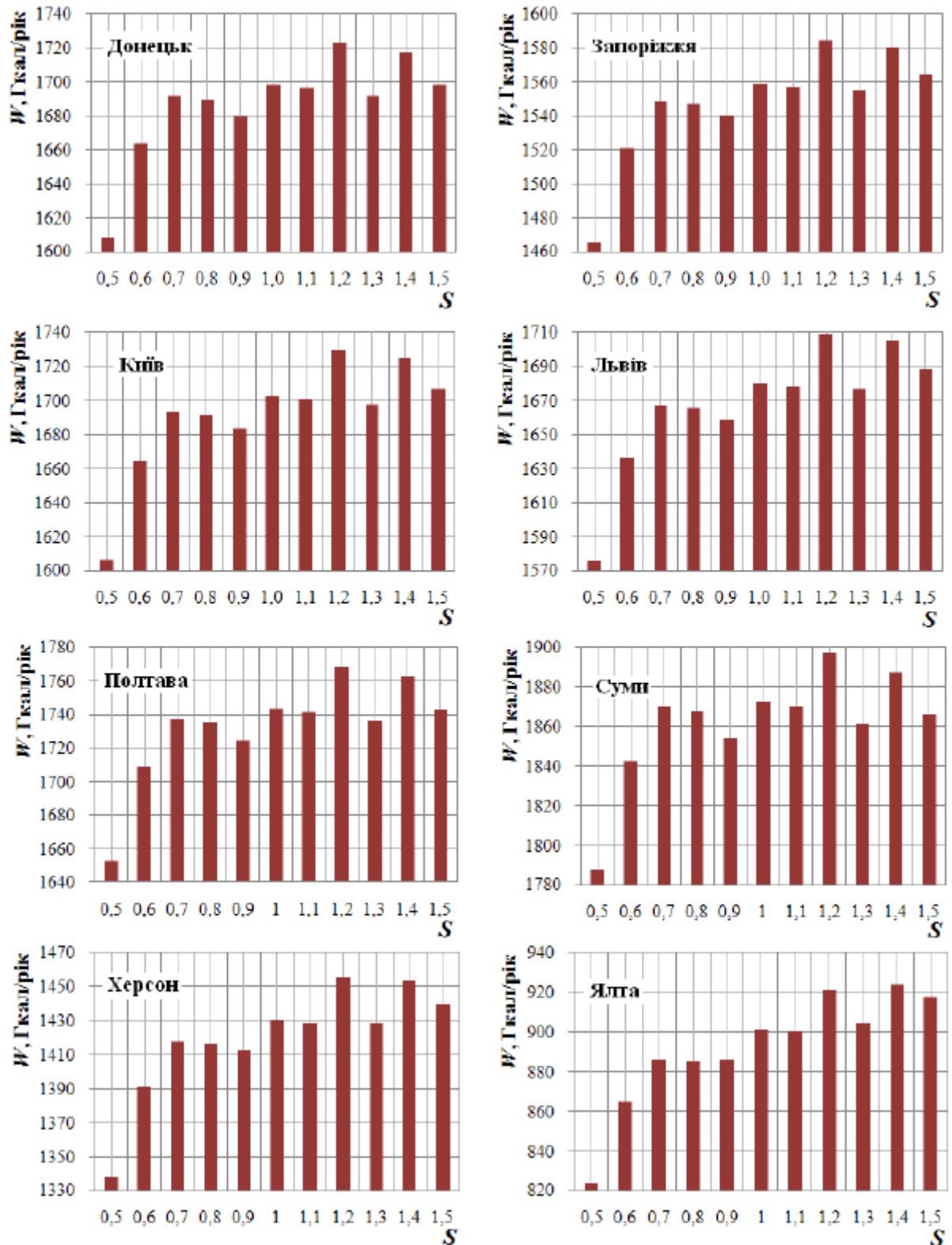


Рис. 2.12. Річна теплопродуктивність W комплексної теплоутилізаційної системи з підігріванням вхідної котлової води та повітря на горіння в залежності від співвідношення площ S водо- і повітропідігрівачів для міст України з різними кліматичними умовами при вологовмісті димових газів $X_1 = 180$ г/кг с.г.

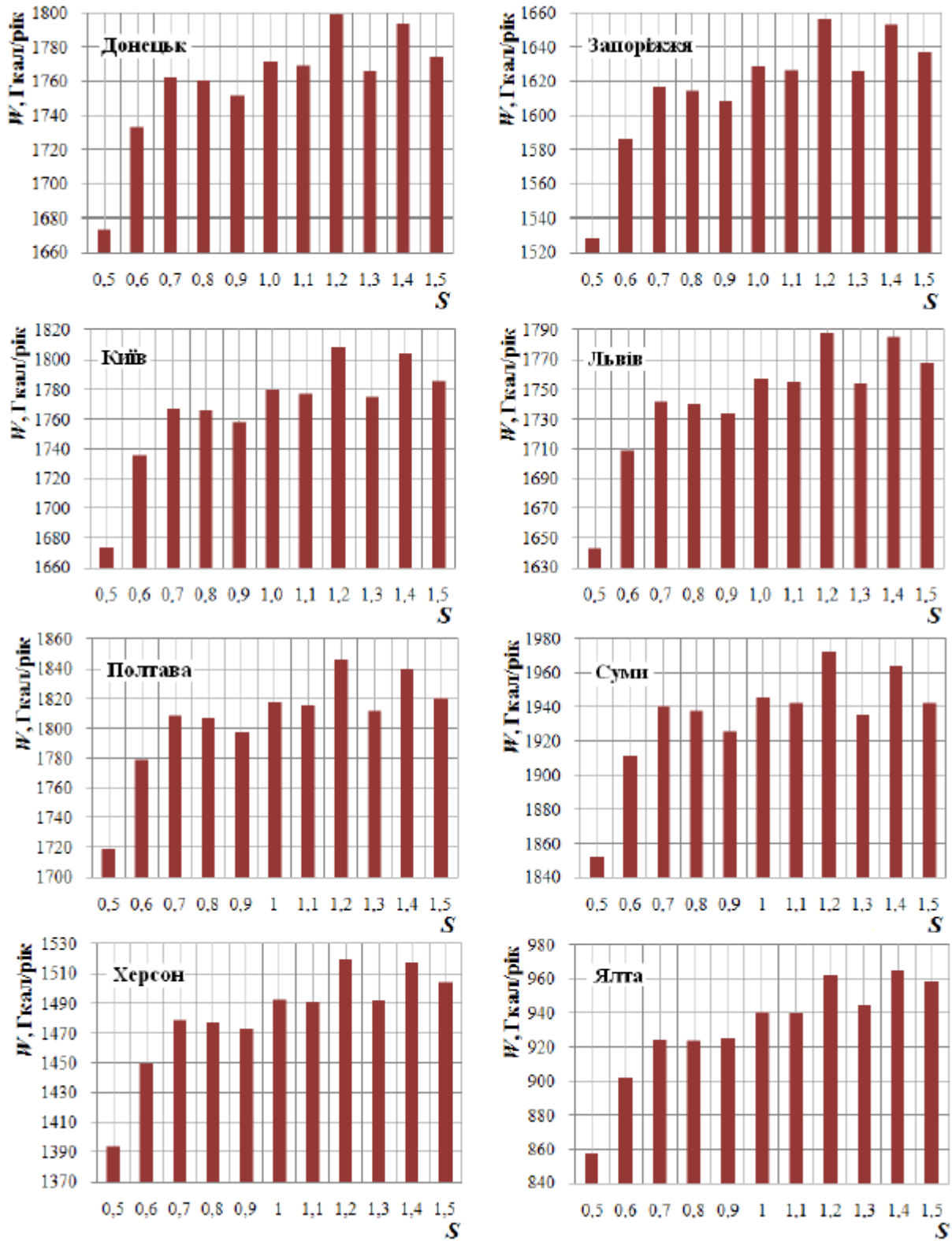


Рис. 2.13. Річна теплопродуктивність W комплексної теплоутилізаційної системи з підгріванням вхідної котлової води та повітря на горіння в залежності від співвідношення площ S водо- і повітропідігрівачів для міст України з різними кліматичними умовами при вологовмісті димових газів $X_1 = 200$ г/кг с.г.

На основі аналізу одержаних значень максимальної величини вироблення теплової енергії W в комплексній теплоутилізаційній установці з сумісним використанням водопідігрівача та повітропідігрівача можна зробити висновок, що при початковому вологовмісті димових газів $X_1 = 140$ г/кг с.г. (рис. 2.9) для територій України з відносно холодним кліматом, де середня температура навколишнього середовища за опалювальний період $t_{оп} \leq - 1,2^\circ\text{C}$ (Донецьк, Полтава, Суми), доцільним є збільшення площі поверхні теплообміну повітрогрійного утилізатора, $S_{опт} \approx 0,75$. Для міст з більш теплим кліматом, таких як Львів, Херсон, Ялта ($t_{оп} > - 1,2^\circ\text{C}$) – $S_{опт}$ повинно відповідати значенню близькому до 1,2.

Подальший аналіз результатів, поданих на рис. 2.10 - 2.13, показав, що зі збільшенням вологовмісту X_1 в межах 160...200 г/кг с.г., незалежно від кліматичної зони, область оптимальних значень співвідношення площ водо- і повітронагрівних теплоутилізаторів відповідає діапазону $S_{опт} = 1,2...1,4$.

З ЗІСТАВЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ КОМПЛЕКСНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТРАДИЦІЙНИХ КОТЛІВ ТА КОТЛІВ З ПІДВИЩЕНИМ РІВНЕМ ВОЛОГОВМІСТУ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ

Для порівняльного аналізу ефективності теплоутилізаційних установок з сумісним застосуванням водогрійного і повітрогрійного устаткування традиційних котлів та котлів з підвищеною екологічною ефективністю проведено зіставлення їхніх основних показників. Зіставлення виконувались для котла теплопродуктивністю 8 МВт, що використовується для комунальних потреб, і характеристики якого відповідають даним наведеним в таблиці 3.1, за умови дотримання оптимальних значень співвідношень поверхонь $S_{\text{опт}}$ відповідних теплоутилізаційних установок. У даному разі розглядалися такі загальні показники цих установок як: теплопродуктивність, кількість утворюваного конденсату та рівень приросту ККД котла. Значення вологовмісту змінювалось в межах $X_1 = 140 \dots 200$ г/кг с.г. При цьому значення вологовмісту $X_1 = 140$ г/кг с.г. відповідало традиційним котлам. Відповідні дані розрахункових досліджень наведені на рис. 3.1 - 3.3.

Одержані результати свідчать, що зі зростанням вологовмісту X_1 загальна теплопродуктивність теплоутилізаційної установки збільшується (рис. 3.1). При цьому вплив вологовмісту більш суттєвий при підвищенні температури навколишнього середовища ($t_{\text{нс}} \geq -10^\circ\text{C}$), за якої реалізується конденсаційний режим роботи теплоутилізаційної системи.

Щодо отриманих значень обсягу утвореного у теплоутилізаційному устаткуванні конденсату (рис. 3.2), то тут зі зростанням початкового вологовмісту відхідних газів котла X_1 від 140 до 200 г/кг с.г. спостерігається збільшення обсягу конденсату в 1,2...1,5 рази.

Найбільше значення приросту конденсату реалізується при температурі $t_{\text{нс}}$ навколишнього середовища приблизно мінус 20°C , коли відбувається максимальне утворення конденсату у повітропідігрівачі за рахунок низької температури повітря на вході в цей елемент комплексної системи.

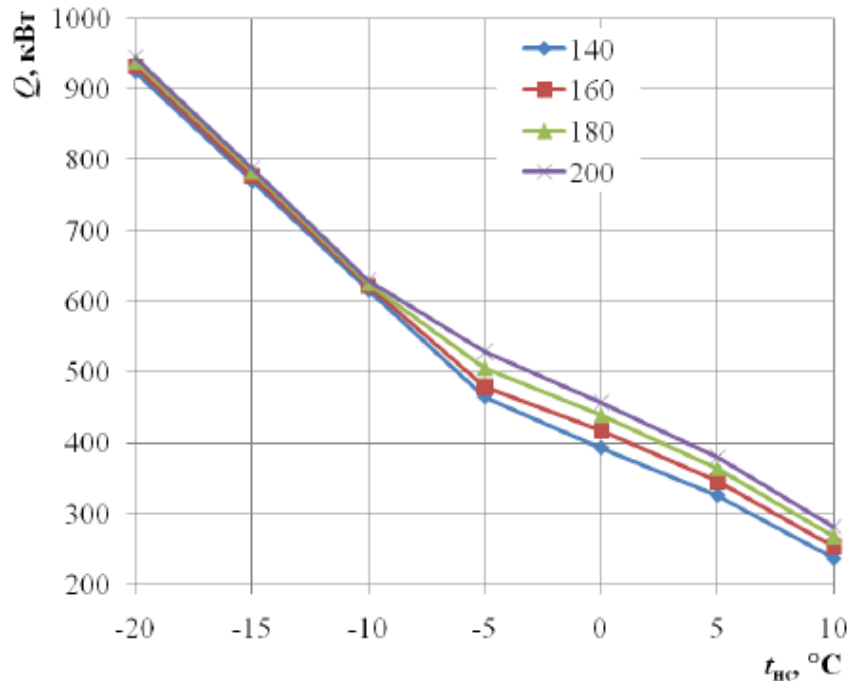


Рис. 3.1. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ загальної теплопродуктивності комплексної теплоутилізаційної установки при оптимальному співвідношенні площ теплообмінних поверхонь обладнання $S_{\text{опт}} = 1,2$ для різних початкових вологовмістів X_1 відхідних газів.

Також при $t_{\text{нс}} \approx 5^{\circ}\text{C}$ спостерігається другий пік значень обсягів утвореного конденсату. Але в цьому разі максимальний обсяг конденсатуутворення має місце у водопідігрівачі. Це зумовлено істотним зниженням температури зворотної тепломережної води на вході у водопідігрівач відповідно до температурного графіка котельні, завдяки чому відбувається глибоке охолодження димових газів, що супроводжується інтенсивним конденсатуутворенням.

Аналіз розрахункових даних щодо приросту ККД котла $\Delta\eta$ на рис. 2.3 показує, що при застосуванні розглянутої комплексної теплоутилізаційної системи з підвищенням вологовмісту димових газів відбувається зростання

цього показника. При цьому вказане зростання є більш суттєвим при температурі навколишнього середовища $t_{nc} \geq -5^{\circ}\text{C}$, що пояснюється реалізацією конденсаційного режиму роботи водогрійного елемента комплексної теплоутилізаційної системи.

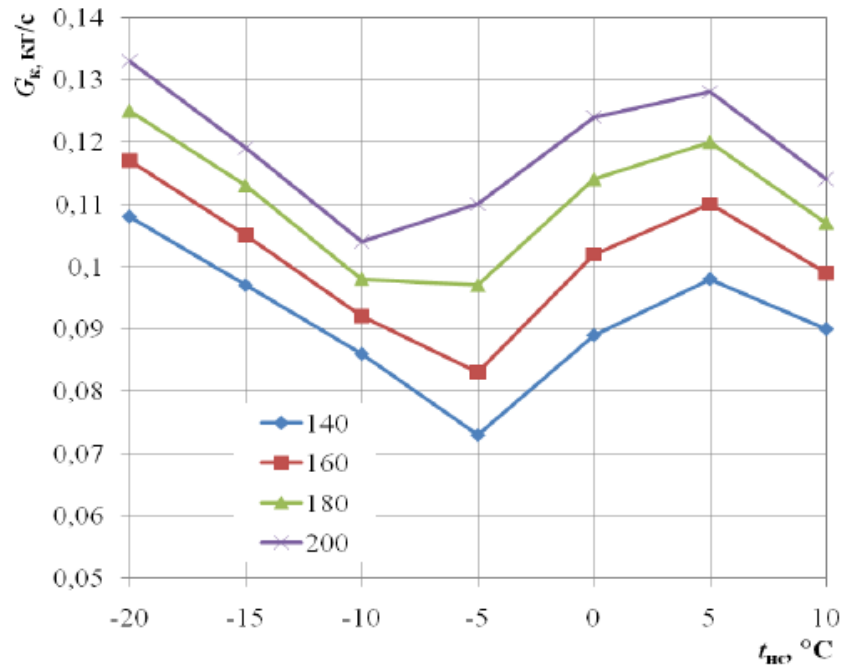


Рис. 3.2. Залежність від температури навколишнього середовища t_{nc} обсягу утвореного в комплексній теплоутилізаційній установці конденсату при оптимальному співвідношенні площ теплообмінних поверхонь обладнання $S_{opt} = 1,2$ для різних початкових вологовмістів X_1 відхідних газів

Отримані дані вказують також на зростання цього показника зі збільшенням початкового вологовмісту відхідних газів котла X_1 .

Як вже зазначалось, теплова ефективність комплексних теплоутилізаційних систем котлоагрегатів суттєво залежить від кліматичних умов їх використання. Так для вищевказаних характерних міст України в таблиці 3.3 наведені результати розрахунків приросту ККД котла для комплексних теплоутилізаційних установок з підігріванням котлової води та повітря на горіння. Теплообмінні поверхні цих установок також компонувались з дотриманням співвідношення площ S_{opt} .

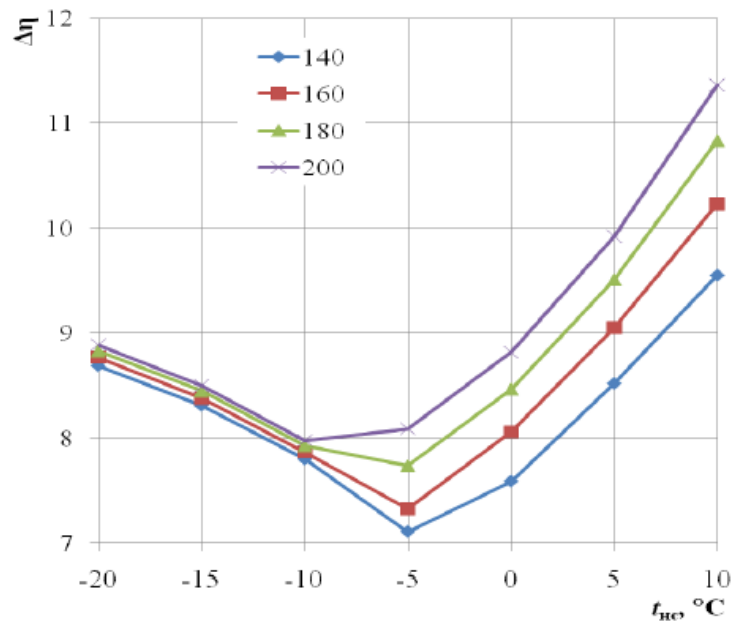


Рис. 3.3. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нв}$ рівня приросту ККД котлоагрегата з використанням комплексної теплоутилізаційної системи при оптимальному співвідношенні площ теплообмінних поверхонь обладнання $S_{опт} = 1,2$ для різних початкових вологовмістів X_1 відхідних газів

На рис. 3.4 наведені дані для міста Києва стосовно значень річного вироблення теплоенергії W теплоутилізаційною установкою з сумісним використанням водопідігрівача та повітропідігрівача при $S_{опт}$.

В таблиці 3.3 для порівняння наведено також відповідні дані для традиційних котлів з початковим вологовмістом $X_1 = 120...140$ г/кг с.г., та котлів, які експлуатуються за умов введення вологи в зону горіння ($X_1 > 140$ г/кг с.г.).

Аналіз розрахованих показників приросту ККД котлоагрегата свідчить, що збільшенню початкового вологовмісту відхідних газів котла при застосуванні ефективних теплоутилізаційних технологій з комплексним використанням утилізованої теплоти відповідає суттєве підвищення ефективності використання палива. В залежності від кліматичних умов та

значення вологовмісту X_1 приріст ККД котла $\Delta\eta_{\text{сер}}$ збільшується в 1,2...1,4 рази.

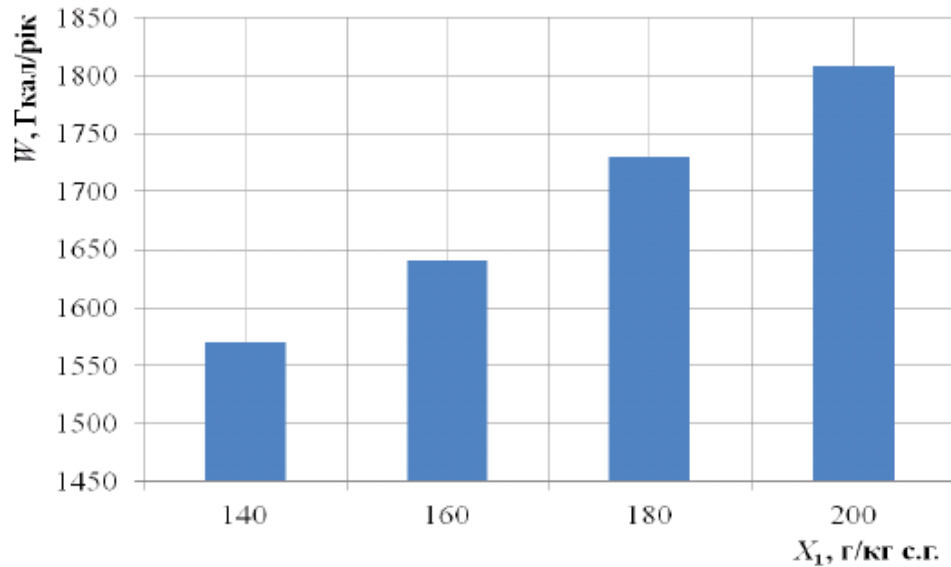


Рис. 3.4. Залежність від початкового вологовмісту X_1 відхідних газів обсягів річного вироблення теплової енергії W для комплексної теплоутилізаційної системи з оптимальним співвідношенням площ теплообмінних поверхонь обладнання $S_{\text{опт}} = 1,2$ для м. Києва.

Таблиця 3.1. Рівні приросту середньорічного ККД котла $\Delta\eta_{\text{сер}}$ з комплексною теплоутилізаційною системою для підігрівання котлової води та повітря на горіння при оптимальному співвідношенні площ $S_{\text{опт}}$ площ для різних початкових вологовмістах X_1 відхідних газів

Місто	Початковий вологовміст димових газів X_1 , г/кг с.г.				
	120	140	160	180	200
Донецьк	7,4	7,8	8,3	8,7	9,0
Запоріжжя	7,4	8,0	8,4	9,0	9,3
Київ	7,3	7,9	8,3	8,7	9,0
Львів	7,4	7,9	8,3	8,8	9,1
Полтава	7,3	7,8	8,2	8,7	9,0
Суми	7,4	7,8	8,2	8,5	8,8
Херсон	7,4	8,2	8,6	9,3	9,6
Ялта	7,8	8,9	9,4	10,9	11,0

Проведено також розрахункові дослідження стосовно зміни кінцевого вологовмісту X_2 димових газів на виході з комплексної теплоутилізаційної установки з сумісним застосуванням водопідігрівача та повітропідігрівача для різних початкових вологовмістів X_1 димових газів. Відповідні результати наведено на рис. 3.5. Отримані дані свідчать, що зі зростанням вологовмісту відхідних газів котла X_1 від 140 до 200 г/кг с.г. спостерігається збільшення X_2 приблизно в 1,4 рази при температурі навколишнього середовища $t_{nc} = -20^\circ\text{C}$ і в 1,6 рази при $t_{nc} = 10^\circ\text{C}$. Тобто при відносно високих температурах навколишнього середовища, які відповідають низьким температурам зворотної тепломережної води і зниженим навантаженням котла, а відтак і зменшеним температурам відхідних газів, вплив початкового вологовмісту газів X_1 на кінцеве його значення X_2 є більш суттєвим.

Слід наголосити, що високі значення вологовмісту X_2 призводять до зростання ентальпії відхідних газів, а отже і до збільшення теплових втрат котельної установки з відхідними газами.

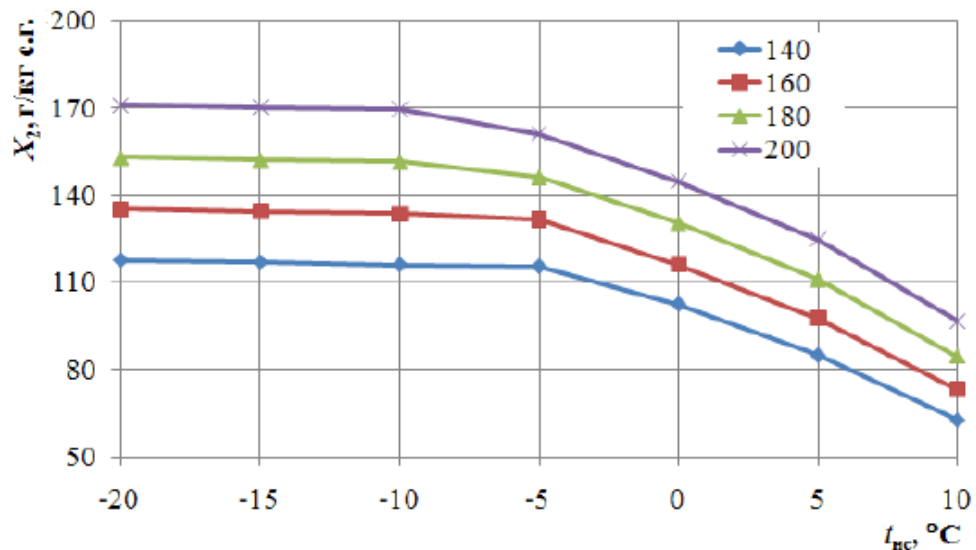


Рис. 3.5. Залежність від температури навколишнього середовища t_{nc} кінцевого вологовмісту X_2 димових газів на виході з комплексної теплоутилізаційної системи для нагрівання котлової води та дуттьового повітря при оптимальному співвідношенні площ $S_{opt} = 1,2$ для різних початкових значень вологовмісту X_1 відхідних газів.

Підвищення вологовмісту X_2 призводить також до збільшення точки роси відхідних газів, яка суттєво впливає на процеси конденсатоутворення у газовідвідних трактах, а відтак і на показники систем теплового захисту цих трактів. Для зменшення теплових втрат з відхідними газами та зниження точки роси цих газів необхідним є збільшення, за можливістю, поверхонь нагрівання теплоутилізаційного устаткування у порівнянні з традиційними системами, що дасть можливість більш глибокого охолодити відхідні гази і понизити їхню ентальпію.

За результатами порівняльного аналізу можна зробити висновок, що теплоутилізаційні системи з підігріванням котлової води та повітря на горіння при оптимальному співвідношенні площ водо- та повітрогрійного теплоутилізаторів $S_{\text{опт}}$ мають певні переваги над системами з підігріванням котлової води та води хімоводоочищення, зокрема, щодо підвищення ККД (КВТП) котельної установки. Останнє зумовлено тим, що потреби систем хімоводоочищення у тепловій енергії є обмеженими через відносно незначні нормативні обсяги води на підживлення теплових мереж (1,5...2% від витрати котлової води) та невисокі необхідні рівні її попереднього нагрівання (зазвичай до 40°C).

Стосовно теплоутилізаційних систем з підігріванням котлової води та повітря на горіння встановлено закономірності впливу вологовмісту відхідних димових газів котла X_1 на такі характеристики даної системи, як річне вироблення теплової енергії W , приріст ККД котла $\Delta\eta$, витрата конденсату G_k , оптимальне співвідношення площ водо- і повітропідігрівачів $S_{\text{опт}}$ тощо. Показано, що підвищення вологовмісту X_1 від 0,14 до 0,2 кг/кг с.г. зумовлює суттєве зростання величин W , $\Delta\eta$ та G_k . Так, середньорічне значення приросту ККД котла $\Delta\eta_c$ в залежності від кліматичних зон збільшується на 14...23%. Встановлено також, що при високих вологовмістах відхідних газів котла $X_1 \geq 0,16$ кг/кг с.г. вказане оптимальне співвідношення площ $S_{\text{опт}}$ становить приблизно 1,2 і практично не залежить від кліматичної зони України.

4 ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ УСТАНОВОК РІЗНОГО ТИПУ ПРИ ПІДВИЩЕНОМУ ВОЛОГОВМІСТІ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ КОТЛІВ

4.1 Різновиди комплексних теплоутилізаційних систем із сумісним використанням водо- та повітрянагрівного устаткування

Введення вологи в зону горіння для пригнічення утворення оксидів азоту в топці котла завдяки зменшенню температури в зоні активного горіння може здійснюватись, як вже зазначалось, різними способами. При цьому введена волога видаляється із котла з відхідними газами, що призводить в результаті до збільшення вологовмісту цих газів. Особливості розроблення та впровадження різних теплоутилізаційних систем для котельних установок з підвищеним вологовмістом відхідних газів пов'язані зі способом введення вологи в зону горіння котла (або зволоження димових газів) та збільшенням даного вологовмісту.

Теплоутилізаційні системи з охолодженням димових газів нижче точки роси та відповідне устаткування, що входить до складу цих систем, створюються, як вже зазначалося, в залежності від потреби споживача у певному виді утилізованої теплоти. Так, комплексні теплоутилізаційні системи з сумісним використанням водо- та повітрянагрівного устаткування поділяються на дві основні групи.

До першої групи вказаних комплексних систем здебільшого належать теплоутилізаційні установки з використанням утилізованої теплоти для нагрівання води різних потреб та повітря на горіння без його зволоження.

Дані установки доцільно застосовувати при введенні вологи в зону горіння шляхом вприску води, додаванням пари в топку котла чи в зону підводу дуттьового повітря, або іншими способами (розділ 2).

Для традиційних котлів (без введення вологи в зону горіння) теж застосовуються комплексні теплоутилізаційні системи з сумісним використанням водогрійних та повітрогрійних теплоутилізаторів. Порівняльний аналіз показників теплової ефективності даних систем для традиційних котлів та котлів підвищеної екологічної ефективності, що характеризуються збільшенням проти звичайного вологовмістом відхідних димових газів, наведений в розділі 2.

4.2 Загальні рекомендації щодо впровадження теплоутилізаційних технологій для котлів з підвищеним вологовмістом відхідних газів

На основі виконаних досліджень можна сформулювати основні положення, яких потрібно дотримуватись при розробленні та впровадженні комплексних теплоутилізаційних установок, що експлуатуватимуться при підвищеному вологовмісті відхідних газів котла:

1. Для газоспоживальних котельних установок, що характеризуються підвищеними, проти нормованих значень, викидами оксидів азоту в навколишнє середовище, рекомендується здійснювати заходи щодо зниження цих викидів до нормованих показників, в тому числі і шляхом введення вологи в зону горіння котлоагрегату.

2. За умов підвищеного вологовмісту відхідних димових газів котлоагрегатів незалежно від способу введення вологи в зону горіння повинні проектуватись теплоутилізаційні установки. Спосіб введення вологи вирішується на стадії проектування цих установок.

3. Теплоутилізаційні установки повинні розроблюватись відповідно до способу введення вологи в зону горіння котла та в залежності від наявності споживачів утилізованої теплоти певного призначення.

4. В теплоутилізаційних установках доцільно здійснювати глибоке охолодження відхідних димових газів, що забезпечуватиме підвищення ККД (КВТІ) котла на 6...10%.

5. При введенні вологи в зону горіння шляхом, не пов'язаним з системою теплоутилізації відхідних газів, при проектуванні вказаних систем для водогрійних опалювальних котлів доцільно застосовувати комплексне використання утилізованої теплоти, наприклад: для нагрівання зворотної тепломережної води та води системи хімводоочищення (або повітря на горіння). Для парових котлів рекомендується застосовувати комплексне використання утилізованої теплоти для нагрівання холодного повітря на горіння та води системи хімводоочищення. При наявності інших споживачів утилізованої теплоти в комплексних системах повинно бути застосовано відповідне теплоутилізаційне устаткування.

6. За умов введення вологи в топку котла зі зволуженим повітрям на горіння в теплоутилізаційних установках повинно забезпечуватись нагрівання цього повітря та його зволоження до рівня, що забезпечуватиме необхідне зниження обсягів оксидів азоту.

7. Нагрівання та зволоження повітря на горіння може здійснюватись при використанні запропонованих в даній роботі нових технічних рішень комплексних теплоутилізаційних установок.

8. Для різних типів теплоутилізаційного устаткування повинні застосовуватись матеріали, стійкі до вуглецевокислої корозії в умовах охолодження димових газів нижче точки роси водяної пари, що міститься в цих газах.

9. При усіх способах введення вологи в зону горіння котла в теплоутилізаційних установках повинні бути передбачені заходи щодо антикорозійного захисту газовідвідних трактів від конденсатоутворення.

10. Проектування заходів антикорозійного захисту газовідвідних трактів повинно здійснюватись з урахуванням типів застосовуваних димових труб. Для димових труб з високими теплоізоляційними властивостями

корпусу (цегляних або залізобетонних з футеруванням) може застосовуватись метод підсушування димових газів шляхом їх підігрівання у поверхневому теплообміннику, встановленому за теплоутилізаційним устаткуванням.

11. При використанні димових труб котелень з низькими теплоізоляційними властивостями корпусу (металевих та залізобетонних без футерування) окрім вказаного методу у разі необхідності доцільно використовувати: метод зменшення теплових втрат з корпусу димових труб шляхом внутрішньої або зовнішньої теплоізоляції їхнього корпусу, або здійснювати заміну цих труб на труби з високими теплоізоляційними властивостями корпусу.

12. Для захисту димових труб від корозії можуть застосовуватись також корозійностійкі матеріали. З цих матеріалів можуть виготовлюватись як димові труби (в нових котельнях або при плановій заміні труб), так і вставні газовідвідні стволи для наявних в експлуатації димових труб. При цьому в котельних установках необхідно забезпечувати конденсатовідведення не тільки з теплоутилізаційного устаткування, але і з димової труби.

13. За умови введення вологи в зону горіння шляхом підігрівання і зволоження дугтьового повітря в комплексних теплоутилізаційних установках повинні бути запроєктовані повітродогрівачі, встановлені після контактних апаратів для додаткового догрівання повітря, що забезпечуватиме відсутність конденсатоутворення у підвідних повітроводах.

14. При проектуванні теплоутилізаційних систем для усіх способів введення вологи в зону горіння повинна бути розглянута можливість корисного використання конденсату, утвореного при глибокому охолодженні в цих установках димових газів.

15. У разі неможливості використання утвореного конденсату в котельні та за її межами повинна бути передбачена нейтралізація цього конденсату до рівня $\text{pH} = 7,5 \dots 8,5$, що забезпечуватиме можливість його

відведення до каналізаційних стоків.

16. При проектуванні комплексних теплоутилізаційних установок для зменшення їхніх габаритів та теплових втрат з поверхонь з'єднувальних газоходів, повітроводів та водопроводів необхідно прагнути до агрегування усіх складових частин цих установок (теплообмінників-теплоутилізаторів, повітро- та газопідігрівачів, нейтралізатора конденсату тощо) в одному корпусі.

17. При розробленні комплексних теплоутилізаційних установок повинні дотримуватись чинні норми щодо проектування та встановлення котельного устаткування.

Друга група теплоутилізаційних установок (підрозділ 4.1) пов'язана зі способом введення вологи в зону горіння котла шляхом зволоження дуттьового повітря в цих установках. В даних системах реалізується використання утилізованої теплоти шляхом нагрівання води різного призначення та нагрівання і зволоження до необхідних рівнів повітря на горіння. Такі комплексні теплоутилізаційні установки не проектуються для традиційних котлів з нормованими показниками викидів оксидів азоту, а лише для котлів, у яких необхідним є зменшення цих викидів шляхом введення вологи в зону горіння з нагрітим та зволеним дуттьовим повітрям.

Для обох груп теплоутилізаційних систем котельних установок підвищеної теплової та екологічної ефективності спільною особливістю є збільшений проти значень традиційних котлів вологовміст відхідних димових газів котла. Залишкова волога з димовими газами надходить до газовідвідного каналу та димової труби і при зниженні температури газів в суміжному шарі при стінці каналу нижче точки роси конденсується там. Утворений і випадений на внутрішній поверхні тракту конденсат завдяки наявності в ньому розчинних продуктів згоряння палива має кислу реакцію.

При спалюванні газоподібного палива у традиційних котлах конденсат містить розчинені окиси вуглецю та азоту, показник водню рН такого

конденсату зазвичай знаходиться в межах 4,0...6,0. За умов роботи котлів з підвищеним вологовмістом відхідних димових газів утворений конденсат може характеризуватись меншою концентрацією розчинених оксидів завдяки більшому обсягу сконденсованої водяної пари. При цьому рН за розрахунками коливається у діапазоні 5,0...6,0. Через випадіння конденсату внутрішні поверхні конструкцій відвідних газоходів котельних установок зазнають корозійного та ерозійного руйнування. Слід підкреслити, що використання систем теплоутилізації з глибоким охолодженням димових газів для котельних установок з підвищеним вологовмістом відхідних газів в деяких режимах роботи може посилювати конденсатоутворення у газовідвідних каналах, а відтак і додаткове руйнування газовідвідного тракту. Рівень конденсації водяної пари у повітроводах та газоходах залежить від рівня зволоження і температури повітря, режимів роботи системи «котел-теплоутилізатор», кліматичних умов, стану та властивостей теплоізоляції повітроводів та газовідвідних каналів, типу та геометричних розмірів димових труб тощо.

Через це виникає необхідність застосування посиленого теплового захисту газовідвідних трактів та димових труб для відвернення випадіння конденсату на їхніх внутрішніх поверхнях. За умов застосування котельних установок підвищеної екологічної ефективності при зниженні температури в топці котла шляхом введення в пальникові пристрої зволоженого повітря на горіння виникає проблема запобігання конденсатоутворенню також і у підвідних повітроводах. Через часткове охолодження зволоженого повітря у повітряних каналах шляхом теплообміну з навколишнім середовищем може відбуватись випадіння вологи на внутрішніх стінках цих каналів, що теж спричиняє їх корозію завдяки наявності кисню в утвореному конденсаті. Зважаючи на вищенаведене, впровадження котельних установок із введенням вологи з зону горіння при використанні теплоутилізаційних технологій потребує застосування спеціальних заходів в цих технологіях щодо запобігання конденсатоутворенню у газовідвідних трактах. А в разі

використання теплоутилізаційних технологій з нагріванням та зволоженням повітря на горіння необхідно в даних технологіях передбачати заходи стосовно відвернення випадіння вологи і в повітропідвідних каналах цих котельних установок.

Ще однією особливістю впровадження теплоутилізаційних систем для котельних установок підвищеної теплової та екологічної ефективності при всіх способах введення вологи в зону горіння котла є проблема використання або відведення конденсату з рН 5,0...6,0, утвореного при глибокому охолодженні димових газів у теплоутилізаційному устаткуванні. При відведенні вказаного конденсату виникає необхідність його нейтралізації до нормованих для каналізаційних стоків значень рН 6,5...8,5 з метою захисту даних стоків від корозійної дії цього конденсату.

ВИСНОВКИ

1. Виконано теплофізичне обґрунтування нових комплексних теплоутилізаційних систем з використанням утилізованої теплоти для різних потреб (підігрівання вхідної котлової води, холодної води хімводоочищення, повітря на горіння та його зволоження) стосовно до газоспоживальних котлів малої та середньої потужності за умови підвищених рівнів вологовмісту X_1 їхніх відхідних газів.

2. Для теплоутилізаційної системи з підігріванням вхідної котлової води і води хімводоочищення (система 1) та системи, призначеної для підігрівання вхідної води котла і повітря на горіння (система 2), в діапазоні зміни вологовмісту X_1 від 0,14 до 0,2 кг/кг с.г. виконано комплекс досліджень щодо тепловологісних режимів цих систем і аналізу їхньої теплової ефективності та одержано такі результати:

- встановлено, що рівень конденсації водяної пари в даних теплоутилізаційних системах суттєво залежить від режиму роботи котла і зростає з підвищенням вологовмісту X_1 ; показано, що в усьому досліджуваному діапазоні зміни величини X_1 в режимах роботи котла, які відповідають низьким температурам навколишнього середовища, вказаний рівень конденсації для другої системи значно перевищує відповідний рівень для першої із зазначених теплоутилізаційних систем;

- показано, що приріст ККД котла $\Delta\eta$, зумовлений застосуванням досліджуваних теплоутилізаційних систем, в цілому підвищується при збільшенні вологовмісту X_1 ; так, для другої з вказаних систем при $X_1 = 0,14$ кг/кг с.г. величина $\Delta\eta$ досягає 9,5%, а при $X_1 = 0,2$ кг/кг с.г. максимальне значення $\Delta\eta = 11,4\%$;

- встановлено, що теплоутилізаційні системи з підігріванням котлової води та повітря на горіння мають переваги над системами для підігрівання котлової води та води хімводоочищення щодо приросту ККД котла через відносно низькі за даних умов потреби у тепловій енергії на

хімводоочищення; при цьому вказані переваги є найбільш значними при низьких температурах навколишнього середовища; так, для $t_{nc} = -20^{\circ}\text{C}$ величина $\Delta\eta$ становить 5,8 % та 8,9 % для першої і другої систем відповідно.

3. Стосовно теплоутилізаційних систем з підігріванням котлової води та повітря на горіння встановлено закономірності впливу вологовмісту відхідних димових газів котла X_1 на такі характеристики даної системи, як річне вироблення теплової енергії W , середньорічний приріст ККД котла $\Delta\eta_c$, витрата конденсату G_k , оптимальне співвідношення площ водо- і повітропідігрівачів S_{opt} тощо. Показано, що підвищення вологовмісту X_1 від 0,14 до 0,2 кг/кг с.г. зумовлює суттєве зростання величин W , $\Delta\eta_c$ та G_k . Так, середньорічне значення приросту ККД котла $\Delta\eta_c$ в залежності від кліматичних зон збільшується на 14...23%. Встановлено також, що при високих вологовмістах відхідних газів котла $X_1 \geq 0,16$ кг/кг с.г. вказане оптимальне співвідношення площ S_{opt} практично не залежить від кліматичної зони України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бухаркин Е. Н. Оптимальные конструктивные характеристики ребристых теплоутилизаторов для котлов. Промышленная энергетика. 1991. № 6. С. 32–35.
2. Jia L., Peng X. F., Yan Y., Sun J. D., Li X. P. Влияние конденсации водяных паров на конвективный теплообмен при течении влажных дымовых газов в вертикальной трубе. Effects of water vapor condensacion on the convektion heat transfer of wet flue gas in a vertikal tube. Int, J. Heat and Mass Transfer. 2001. Vol. 44. № 22. P. 4257–4265.
3. Yan W. M. Transient conjugated heat transfer in channel flow with convection from the ambient. Int. J. Heat Mass Transfer. 1993. Vol. 36. № 5. P. 1295–1301.
4. Bilir S. Transient conjugated heat transfer in thick walled pipes with convective boundary conditions. Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. № 14. P. 2701–2709.
5. Van W. M. Unsteady conjugated heat transfer in turbulent channel flows with convection from the ambient. Int. J. Heat Mass Transfer. 1995. Vol. 38. № 11. P. 2101–2108.
6. Luna.N, Mendez F., Trevino C. Conjugate heat transfer in circular duct with a power-low laminar convection fluid flow. Int. J. Heat Mass Transfer. 2002. Vol. 45. № 3. P. 655–666.
7. Трепутнев В. В., Горобец В. Г. Исследование теплоотдачи на горизонтальной обогреваемой трубе с поперечным разрезным оребрением в условиях естественной конвекции. Теплоэнергетика. 1997. № 9. С. 39–42.
8. Калинин Э. К., Дрейцер А. Г., Ярхо С. А. Интенсификация теплообмена а каналах. Москва: Машиностроение. 1981. 208 с.
9. Дрейцер Г. А., Лобанов И. Е. Предельная интенсификация теплообмена в трубах за счет искусственной турбулизации потока. ИФЖ. 2003. Т. 76. № 1. С. 46–51.

10. Берман Л. Д., Фукс С. Н. Массообмен в конденсаторах с горизонтальными трубами при содержании в паре воздуха. Теплоэнергетика. 1958. № 8. С. 67–75.
11. Буглаев В. Т., Казаков В. С. Теплоотдача при поперечном обтекании труб насыщенным воздухом. Изв. вузов. Энергетика. 1971. № 4. С. 128–132.
12. Андреев М. М. Исследование теплообмена при конденсации пара из потока парогазовой смеси на различных обтекаемых трубчатых поверхностях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев. 1972. 26 с.
13. Jia L., Peng X. F., Yan Y., Sun J. D., Li X. P. Effects of water vapor condensation on the convection heat transfer of wet flue gas in a vertical tube.