

«КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

На правах рукопису

РЯБОШАПКО Станіслав

Миколайович

група ТЕП – 23М

УДК

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В
ГАЗОХОДАХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ**

Спеціальність 144-м – Теплоенергетика

Кваліфікаційна магістерська робота

Керівник
доцент к.т.н.
А.М.Ялова

Кривий Ріг – 2024р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електротехнічний
Кафедра теплоенергетики
Спеціальність 144 Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри теплоенергетики

Замицький О.В.

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Рябошакко Станіслав Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В ГАЗОХОДАХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ.**

Затверджена наказом по університету від «_05_»_07_2024 р. №604с

2. Термін здачі студентом закінченої роботи _____ грудень _____

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В КАНАЛАХ ГАЗОХОДІВ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В КАНАЛАХ ЗАЕКРАННОГО ГАЗОХОДУ ТВЕРДОПАЛИВНИХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

РОЗДІЛ 3 .ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ЩО ПРОТІКАЮТЬ У ЗАЕКРАННИХ ГАЗОХОДАХ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В ГАЗОХОДАХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Водогрійні котли, що виробляються на території України

2. Вид котла КСВр з шаровими колосниковими ґратами та із заекраним газоходом .

3. Показники процесу горіння

4. Модернізовані елементи котла

Дата видачі завдання _____ червень _____

Керівник _____
(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання атестаційної роботи магістра

№№ пп	Назва етапів атестаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	08 серпня	виконано
2	Аналіз сучасних методів інтенсифікації теплообміну в каналах газоходів водогрійних котлів малої потужності.	09 серпня – 20 вересня	виконано
3	Порівняльні дослідження інтенсифікації теплообміну в каналах заекраного газоходу твердопаливних водогрійних котлів малої потужності	21 вересня – 20 жовтня	виконано
4	Закономірності процесів що протікають у заекраних газоходах водогрійного котла	21 жовтня – 15 листопада	виконано
5	Розробка рекомендацій по впровадженню методів інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів	16 листопада – 25 листопада	Виконано
6	Висновки	26 листопада	виконано
7	Список використаних джерел	30 листопада	виконано
8	Представлення роботи на антиплагіат	1-6 грудня	виконано

Студент _____
(підпис)

Керівник _____
(підпис)

Допущено до перевірки на академічну доброчесність.

Керівник _____
(підпис)

Завідувач кафедри _____
(підпис)

Анотація

Максимальне використання поверхні цільнозварних трубних панелей у теплообміні як усередині топки, так і поза, а також у конвективній частині із застосуванням каналів заекранного газоходу з поперечним обтіканням панелей та труб нової конфігурації може позитивно (якісно та кількісно) вплинути на аеродинаміку та теплообмін у котельному агрегаті.

В умовах дефіциту палива актуальні технічні рішення, спрямовані на забезпечення стійкої роботи та продовження термінів експлуатації теплоенергетичного обладнання. Серед них – інтенсифікація теплообміну, зниження температури димових газів, що йдуть, оптимізація топкового об'єму. До 50% теплотримання в котлі відбувається в обсязі топки, актуальним завданням, вирішення якого має першочергове значення для теплоенергетики, стає інтенсифікація теплообміну та вдосконалення камери згоряння.

У магістерській дисертації було проведено аналіз аналіз сучасних методів інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів, аналіз наукових робіт з інтенсифікації теплообміну та опору в газоходах з поперечним обтіканням труб.

Проведено дослідження інтенсифікації теплообміну в каналах заекранного газоходу твердопаливних водогрійних котлів малої потужності.

Визначено закономірності процесів, що протікають у заекраних газоходах водогрійного котла, а саме: гідродинамічні та теплообміні закономірності в каналі газоходу водогрійного котла, оцінка теплової ефективності каналу заекранного газоходу з пластинами.

Розроблено рекомендації по впровадженню методів інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів та по модернізації вугільного водогрійного котла КСВр з каналом заекранного газоходу та колосниковими ґратами.

Ключові слова: котел, топка, екрани, тверде паливо, теплообмін, вода.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ККД- коефіцієнт корисної дії

ВАТ – відкрите акціонерне товариство

НАН- Національна академія наук

КПТМ- комунальне підприємство теплових мереж

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В КАНАЛАХ ГАЗОХОДІВ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ.	8
1.1 Аналіз конструкцій водогрійних котлів що виробляються на території України.	8
1.2 Аналіз наукових робіт з інтенсифікації теплообміну та опору в газоходах з поперечним обтіканням труб..	16
1.3 Висновки до розділу 1	22
Розділ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В КАНАЛАХ ЗАЕКРАНОГО ГАЗОХОДУ ТВЕРДОПАЛИВНИХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ	24
2.1 Порівняльні дослідження регульованої подачі повітря при спаленні твердого палива на колосникових ґратах з тонким шаром.	24
2.2 Порівняльні дослідження розміщення заєкраних труб	29
2.3 Висновки до розділу 2	35
Розділ 3 ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ЩО ПРОТІКАЮТЬ У ЗАЕКРАННИХ ГАЗОХОДАХ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА	37
3.1 Гідродинамічні та теплообмінні закономірності в каналі газоходу водогрвіного котла	37
3.2 Оцінка теплової ефективності каналу заєкранного газоходу з пластинами..	40
3.3 Висновки до розділу 3.	47
Розділ 4 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ	49

ТЕПЛООБМІНУ В ГАЗОХОДАХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ

4.1	Модернізація вугільного водогрійного котла КСВр з каналом заекранного газоходу та колосниковими ґратами.	49
4.2	Опис конструкції колосникових ґрат для спалювання в тонкому шарі зі зниженими викидами CO ₂ та інших токсичних елементів.	56
3.3	Висновки до розділу 4	63
	ВИСНОВКИ	65
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

ВСТУП

Актуальність теми. Враховуючи сучасні тренди у світі з декарбонізації, зростання екологічного тиску на довкілля, зростання цін на первинні енергоресурси, потрібно терміново здійснювати впровадження нових технологій спалювання палива, у тому числі на малих котельнях, зі зниженням значних витрат паливних ресурсів, з різким скороченням викидів парникових газів та токсичних речовин в атмосферу. [1]

Системи теплопостачання (опалення, вентиляція та гаряче водопостачання) промислових підприємств, житлових та громадських будівель споживають значну кількість палива. Станом на 01.01.2024 р. «Криворіжтепломережа» експлуатує та обслуговує: 72 котельні, загальною встановленою потужністю 2028,73 Гкал/годину, в яких встановлено 245 котлів, з них 122 - зі строком експлуатації більше 20 років; 5 центральних теплових пункти; 24 насосних станцій. Окрім того в нашому місті є досить велика кількість приватних твердопаливних котелень малої потужності.

До цього часу у м Кривий Ріг актуальне питання заміни водогрійних котлів малої теплової продуктивності до 3,15 МВт, як на твердому паливі так і на газовому. Близько 49 % теплової енергії виробляється малими котельнями, що характеризуються ККД на рівні 55 %, що призводить до перевитрати понад 115 тис. тонн умовного палива на рік, а також до додаткових викидів у довкілля. Вони потребують заміни на нові водогрійні котли з ККД на рівні 84-88% та з режимом спалювання із суттєво зниженими викидами CO₂, SO₂ та інших шкідливих та токсичних викидів [5]. У конструкціях твердопаливних водогрійних котлів малої потужності цільнозварні мембранні трубні панелі широко не використовуються в якості топкових екранів. Однак реалізація у водогрійних котлах до 3,15 МВт (3,0 Гкал/год) малої теплової потужності цільнозварних трубних екранів з

поперечним обтіканням газами можуть дати суттєві переваги щодо теплової та екологічної ефективності на відміну від експлуатованих у часі котлів .

Максимальне використання поверхні цільнозварних трубних панелей у теплообміні як усередині топки, так і поза, а також у конвективній частині із застосуванням каналів заекранного газоходу з поперечним обтіканням панелей та труб нової конфігурації може позитивно (якісно та кількісно) вплинути на аеродинаміку та теплообмін у котельному агрегаті [4, 18]. Отже встановлення закономірностей інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів є **актуальним науковим завданням**.

Мета і завдання дослідження. Метою дипломної роботи магістра є дослідження методів інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів. Для досягнення вказаної мети в роботі вирішувались наступні задачі:

1. Провести аналіз сучасних методів інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів .
2. Провести методів інтенсифікації теплообміну в каналах заекранного газоходу твердопаливних водогрійних котлів малої потужності.
3. Встановити закономірності процесів що протікають у заекраних газоходах водогрійного котла.
4. Розробити рекомендації по впровадженню методів інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів.

Об'єкт дослідження. Процеси що протікають при використанні методів інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів.

Предмет дослідження. Параметри теплообмінних процесів під час інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів.

Методи дослідження. Узагальнення відомих наукових і технічних результатів, теоретичні та аналітичні методи інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в обґрунтуванні та вирішенні наукової задачі збільшення інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів.

Наукове значення роботи. Вперше розглянута методика оцінювання ефективних методів використання інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів.

Практичне значення отриманих результатів. Розробка рекомендацій до інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів. Результати дослідження можуть бути використані при розробці та проектуванні нових ефективних шляхів використання методів інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів.

Структура роботи. Дипломна робота магістра складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 50 найменувань. Загальний обсяг дипломної роботи становить 74 сторінки, 24 рисунки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В КАНАЛАХ ГАЗОХОДІВ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ.

1.1. Аналіз конструкцій водогрійних котлів що виробляються на території України.

Українські підприємства мають потужний потенціал у виробництві різноманітного котельного обладнання. На українському ринку опалювальних котлів намітилася стійка тенденція становлення та розвитку вітчизняних виробників таких як "Будмаш" м.Прилуки, "Колві" м.Київ, "Мегаватт-М" м.Бориспіль, "Теплотехніка" та "Теком" м.Монастирище, "Євро-формат" м.Київ, «Лота» м.Київ, «БЗКУ» м.Бровари та понад 50 інших промислових підприємств.

В умовах дефіциту палива актуальні технічні рішення, спрямовані на забезпечення стійкої роботи та продовження термінів експлуатації теплоенергетичного обладнання. Серед них – інтенсифікація теплообміну, зниження температури димових газів, що йдуть, оптимізація топкового об'єму. [3]

Беручи до уваги, що до 50% теплотримання в котлі відбувається в обсязі топки, актуальним завданням, вирішення якого має першочергове значення для теплоенергетики, стає інтенсифікація теплообміну та вдосконалення камери згоряння.

Ефективність використання палива можна підвищити:

1. Розробкою та встановленням нових ефективних газових пальників;
2. Реконструкцією котлів із встановленням у них додаткових поверхонь теплообміну;
3. інтенсифікацією теплообміну випромінюванням між продуктами згоряння та екранними поверхнями котла.

Інтенсифікація теплообміну призводить до зниження максимальної температури в ядрі факела, що зменшує утворення топки термічних оксидів азоту.

В Інституті технічної теплофізики НАН України проводяться теоретичні та науково-дослідні роботи, спрямовані на практичне використання та впровадження нових методів інтенсифікації топкового теплообміну. Аналіз тенденцій сучасного котлобудування та останніх розробках ІТТФ, за держзамовленням ДЗ/505-2011 комітету Держінформнауки України, дозволили створити концепт котла нового покоління, заснований на інтенсифікації топкового теплообміну з максимально можливою утилізацією теплоти газів, що йдуть. [3]

Все це дозволило в 2012 році розробити, випробувати, впровадити у виробництво і здати в експлуатацію новий котел водогрійний модульний з утилізатором теплоти газів, що йдуть КВМУ-1,25Гн. [4].



Рис.1.1 Котел водогрійний модульний КВМУ-1,25Гн.

Впровадження котла КВМУ-1,25Гн здійснено на квартальній котельні КП «Харківські теплові мережі», проведені необхідні для подальшої оптимізації конструкції експерименти, отримано дозвіл на експлуатацію.

Котел КВВ-1,0 та КВВ-2,0 (рис.1.2) розроблені Інститутом технічної теплофізики НАН України та випускаються ВАТ "Будмаш" м. Прилуки. Котел призначений для застосування в системах опалення та гарячого водопостачання. [6]



Рис 1.2 Котел КВВ-1,0

Сталеві жаротрубні котли Колві (рис 1.3) сконструйовані з інверсивною камерою згоряння, де третій перебіг димових газів проходить у жарових трубах. Котел спроектований для роботи на різних теплових потужностях.

Складається з горизонтальної інверсивної камери згоряння та радіально розташованих димогарних труб. Така конструкція забезпечує надійний вихід димових газів та ефективність теплообміну, високий ККД; низькі показники шкідливих викидів при мінімальному рівні шумової емісії. [7]



Рис.1.3 Сталеві жаротрубні котли Колві

Котел КСВр виробництво Енергія -К. (рис.1.4) Твердопаливні водогрійні котели марки КСВр набули широке застосування в котельнях, обладнаних топками з ручною подачею вугілля. Завдяки досить високій теплопродуктивності вони широко використовуються для опалення та гарячого водопостачання різних житлових та виробничих приміщень об'ємом до 18000 м³. При робочому тиску 3-6 МПа котел здатний нагрівати воду до 115 °С. Одна з переваг котла КСВр - висока стійкість до утворення накипу та перегріву трубної системи. Циркуляція води в котлі проводиться примусовим способом. Як основне паливо використовується як кам'яне, так і буре вугілля, резервним паливом служать дрова. [6]



Рис1.4 Котел КСВр виробництво Енергія -К.

Водогрійні котли КСВр з шаровими колосниковими ґратами та із заекраним газоходом. (рис1.5). Розроблена нова конструкція вугільних водогрійних водотрубних котлів із заекраним газоходом серії КСВр має мінімальний об'єм води у трубах котла та максимальне використання поверхні труб до 96 % активного теплообміну. У всіх звичайних класичних водогрійних водотрубних котлах в активному теплообміні використовується лише до 84 % поверхні труб. [8]

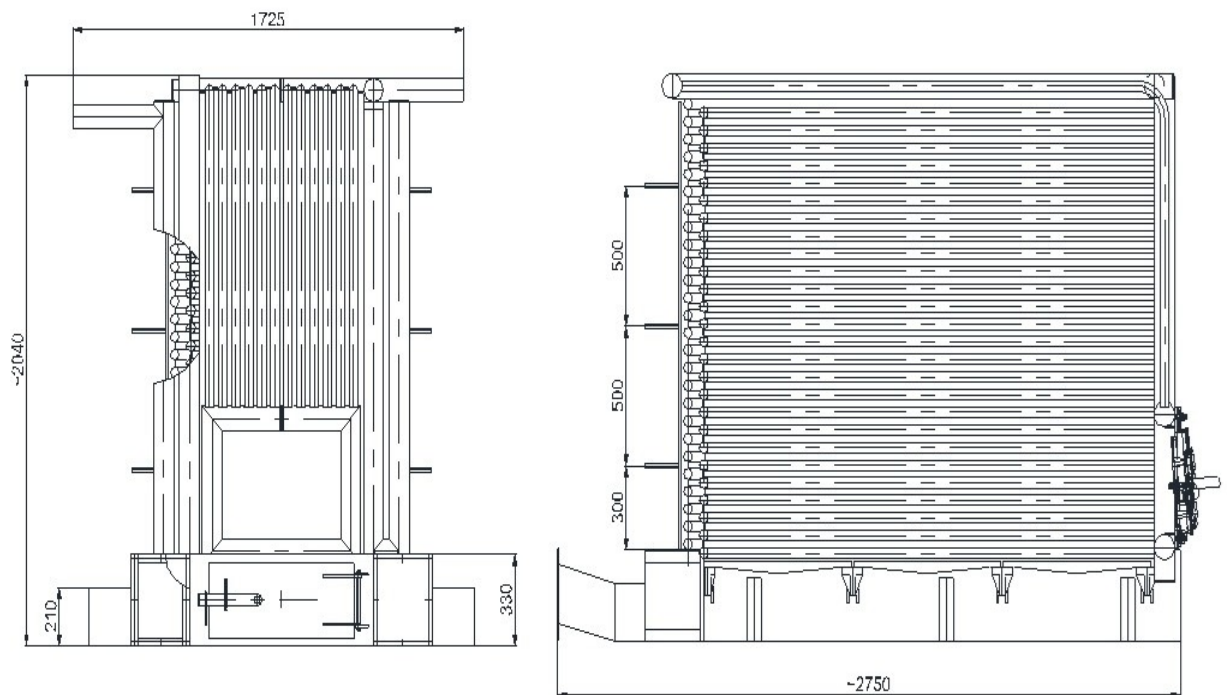


Рис.1.5 Вид котла КСВр з шаровими колосниковими ґратами та із заекраним газоходом з фронту (ліворуч) та поздовжній розріз котла (праворуч).

При створенні водогрійного котла КСВр з шаровими колосниковими ґратами та із заекраним газоходом вирішувалося завдання щодо забезпечення надійної роботи при тисках води, що відповідають роботі водогрійних котлів за закритою схемою тепlopостачання, коли тиск води в системі тримався постійним, а гаряче водопостачання забезпечувалося за допомогою підключення теплообмінників за окремою схемою.

Порядок з'єднання екранів у даному котлі, дозволяє ефективно працювати в умовах експлуатації як у оптимальному режимі з номінальним

витратою води, так і знижувати теплове навантаження до 20% зі зниженням тиску води в котлі та надійною стійкою роботою. Розширення діапазону роботи з варіюванням та зміною витрати не тільки дутьового повітря, але і тиску води в традиційних водогрійних котлах з класичною схемою компоновання або в циліндричних котлах із жаровими трубами реалізувати неможливо. У конструкції зазначених твердопаливних водогрійних котлів кількість труб у ході та швидкість води в них розраховуються відповідно до теплової напруги послідовно по кожній зоні горіння в топці по висоті та окремо в заекранному газоході, чого не можна зробити у традиційних схемах котлів. [9]

Конструкція водогрійного котла КСВр дозволяє варіювати довгою, висотою та шириною топки для вибраних співвідношень між радіаційною та конвективною поверхнею нагріву. Для конкретного виду твердого палива підбирається та оптимізується площа колосникових ґрат і геометричні параметри котла. Це достатньо проблематично для поширених класичних схем більшості водогрійних котлів призматичної та циліндричної форми з досить жорсткими прив'язками до габаритних параметрів котла та потужності залежно від типу вугілля. [10]

У новій конструкції котла окремо збирається внутрішній цільнозварний U – подібний екран з горизонтальним розташуванням паралельних U – подібних екранних труб, за яким розміщується зовнішній екран, зібраний із паралельних не зварених між собою U – подібних труб. Фронт та стельовий екран котла закривається Г – подібним фронтним і стельовим цільнозварним екраном утворюючи топку. Зовнішня тильна та дві бічні сторони котла закриваються знімними теплоізольованими декоративними панелями, а зсередини металевими тепловими випромінювачами із пластинами. [9]

Знімні теплоізольовані панелі дозволяють оперативно без зупинки роботи водогрійного котла з водяної сторони проводити огляд та обслуговування всієї конвективної та зворотної сторони радіаційної поверхні

нагрівання. Переваги водогрійних котлів КСВр на твердому паливі підтверджуються численними позитивними відгуками замовників.

Тривала експлуатація понад 20 років – водогрійних котлів на твердому паливі на території України (нараховується понад 120 котлів першої серії КСВр по всій території України) з каналом заекранного газоходу з поздовжнім обтіканням труб показала їх високу надійність та економічність, данна конструкція довела право на існування і показала деяку перевагу щодо інших схеми котлів.

Експлуатаційне значення ККД водогрійних котлів КСВр із заекраним газоходом досягали 82%. На відміну від поширених водогрійних циліндрових котлів форми із жаровими трубами ККД яких не перевищував 55 – 60 %.[10]

Водотрубні котли мають мінімальний об'єм води. Відомо, що обсяг води в циліндричних водогрійних котлах більше 7 – 10 разів, ніж у водотрубних котлів такої ж потужності. При аварійних ситуаціях часто виникають перебої в постачанні електроенергії та раптовому припиненні циркуляції води в таких котлах з продовженням горіння вугілля в шарі вже призводили до великої аварії з людськими жертвами.

На рисунку 1. 6 представлена схема елементів вимірювальної системи вугільного котла КСВр-0,43 з конвективним каналом заекранного газоходу з колосниковими ґратами.

На вході та виході води з фронтової верхньої частини котла встановлено датчики “Зліт ПРЦ” та на кожному трубопроводі встановлений манометр і термометр для визначення гідравлічного опору котла по воді та перепад температури по водяному боці. На поздовжньому розрізі котла КСВр-0,43 представлений дутьовий вентилятор подачі повітря під колосникові ґрати з встановленим зондом з термометром Т2. У завантажувальні двері з фронтального боку котла вставлявся зонд, що вимірював температуру Т1, газовий склад Г1 та розрядження газів над шаром вугілля dP . Зонд пересувався над шаром на висоті від 200 до 270 мм від

фронтної стінки до тильної стінки топки, як показано на рис. 1.6. Після попадання газів у верхній частині внутрішнього цільнозварного екрану по всьому П – подібному периметру котла газу опускаються вниз каналом заекранного газоходу до нижнього газоходу яким збираються в тильній нижній частині котла в газозбірній камері, де розміщується зонд для вимірювання температури газів, що йдуть, T_3 і складу газів Γ_2 . Після газозбірної камери газохід котла виконаний тільки по висхідній лінії до димососа та після нього до димової труби з установкою байпас навколо димососа. [11]

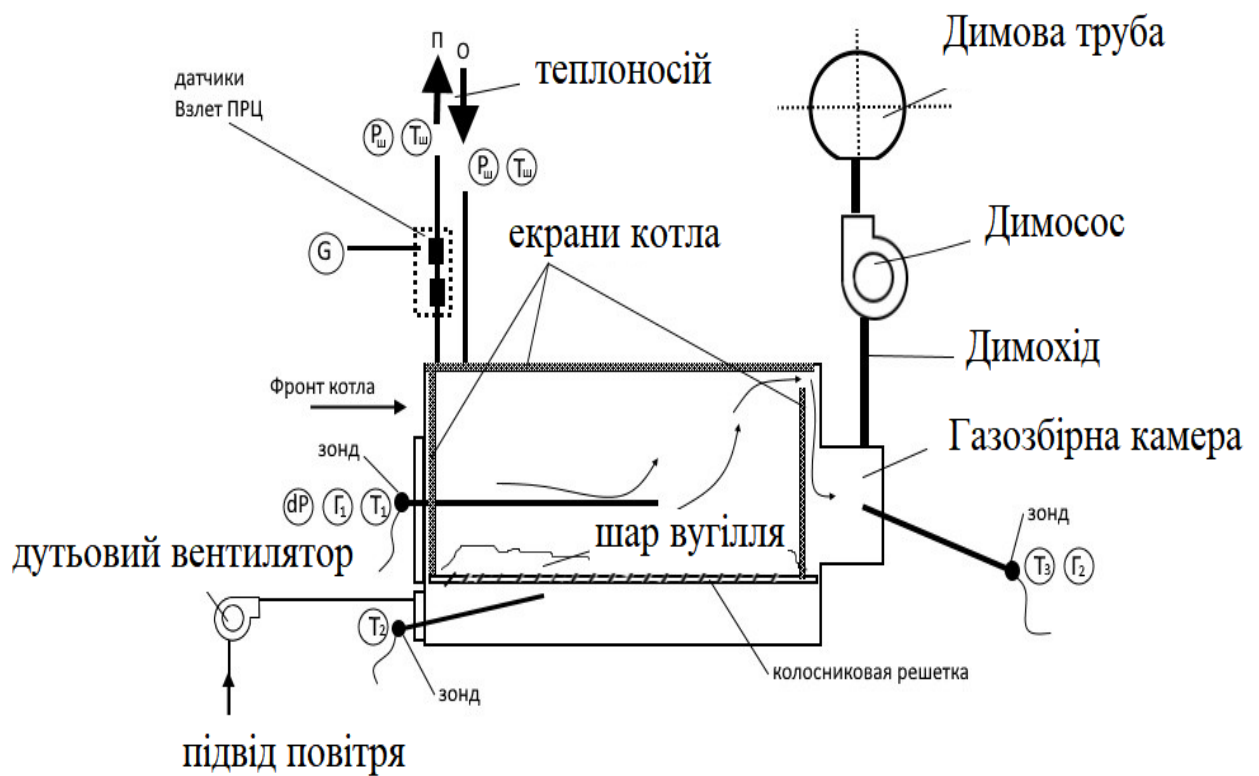


Рис.1.6 Схема елементів вимірювальної системи для вугільного котла КСВр-0,43

(П, О – пряма та зворотна труби руху теплоносія; $P_{ш}$, $T_{ш}$ – штатні манометри та термометри, встановлені на прямій та зворотній лініях теплоносія, dP – вимірювання зондом трубки Піто розрядження в топці, Γ_1 – вимірювання зондом газоаналізатора газового складу у топці, T_1 – вимірювання термопарою трубки Піто температури в топці, T_2 –

вимірювання термopарою температури повітря в подовій частині під ґратами, ТЗ – вимірювання термopарою температури газів, що йдуть у газозбірній частині (газоході), Г2 – вимірювання зондом газоаналізатора газового складу тих, газів що йдуть у газозбірній камері (газоході).

Така схема газового тракту від котла КСВр-0,43 до димососа при розігрітому димарі, особливо в міжсезоння, забезпечує достатньо велике розрядження по газовому тракту і відповідно високу тягу в топці. Цей важливий факт слід особливо наголосити на режимах роботи малих водогрійних котлів з шаровими топками та з маленькою товщиною шару вугілля. Слід зазначити, що у розглянутій вимірювальній системі та схемою розміщення вимірювальних елементів за рис.1. 6 поздовжній розріз котла показаний умовно.

1.2. Аналіз наукових робіт з інтенсифікації теплообміну та опору в газоходах з поперечним обтіканням труб.

Аналіз сучасних напрямів розвитку котельної техніки малої потужності, сучасних способів інтенсифікації теплообміну в водогрійних котлах малої потужності, аналіз останніх публікацій та інформації про водогрійних котлів малої потужності дозволив зробити висновок, що сучасна котельна техніка малої та середньої теплової потужності розвивається у наступних напрямках:

- підвищення енергетичної ефективності шляхом зниження теплових втрат та найбільш повного використання енергетичного потенціалу палива;
- Зменшення габаритів котельного агрегату за рахунок інтенсифікації процесу спалювання палива;
- інтенсифікація теплообміну в камері топки і на поверхнях нагріву;
- зниження газоподібних викидів, що забруднюють атмосферу (CO, NO_x, SO_x);
- Підвищення надійності роботи котла. [12]

Аналіз відомих експериментальних та теоретичних досліджень з теплообміну в різних теплообмінних пристроях [5-7] та конвективних частинах котельних установок малої теплової потужності дозволяє зробити висновок про перевагу інтенсифікації теплообміну при поперечному обтіканні труб та трубних цільнозварних панелей у такого типу пристроях. Наприклад, у роботі [8] передбачалося досягти рівня тепловіддачі використовуючи різні вставки без збільшення витрат енергії на просування теплоносія. При цьому у роботі не передбачалися конкретні рекомендації щодо вибору форми та розмірів оптимальної теплообмінної поверхні.

Докладніші кількісні закономірності руху потоку в зонах прикордонного шару ще мало вивчені. З класичних робіт відомо, що саме ці області і в основному в'язкий підшар з лінійним законом зміни швидкості потоку створюють основний термічний опір передачі тепла. За наближеною оцінкою відомих дослідників у цій галузі при перебігу повітря та води в трубі термічний опір в'язкого підшару при числах Рейнольдса $Re \approx 10^4$ складає відповідно 32% та 74% від повного опору передачі тепла. [10].

Оцінка термічного опору в'язкого підшару для потоку повітря в інших авторів становить 25%, а в потоці трансформаторної олії коливається в діапазоні від 55 до 90% [9].

При вплив самого потоку на прикордонний шар або всілякими типами турбулізаторів тепловіддача різко збільшується в місцях приєднання потоку до стінки після його відриву, як це спостерігається при поперечному обтіканні труб або на новій початковій ділянці та етапі формування прикордонного шару (рис 1. 7).

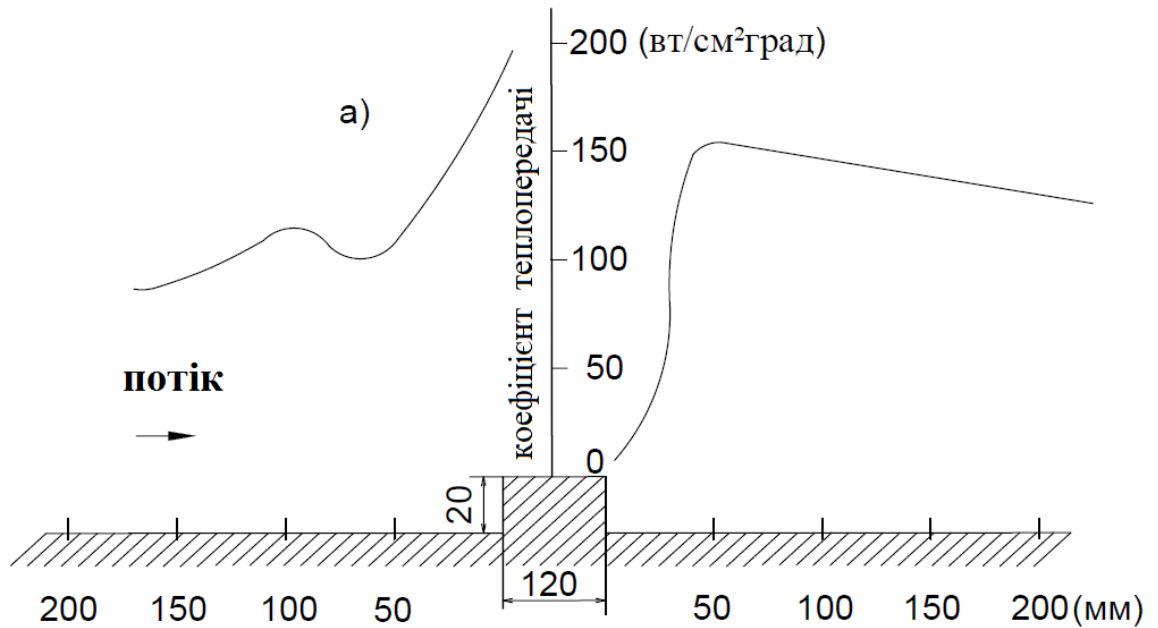


Рис.1.7 Вплив відриву прикордонного шару на коефіцієнт тепловіддачі до та після прямокутного уступу на стінці.

У роботі вчених Блох А.Г., Журавлев Ю.А. описано близько 200 робіт з новими поверхнями нагрівання де показано, що при експлуатації таких поверхонь особливо в запиленому потоці як конвективні поверхні нагрівання стосовно водогрійних котлів виявилися неефективними і марними. [11,12].

Інтенсифікацію теплообміну в елементах котла можна проводити двома шляхами: встановленням інтенсифікаторів теплообміну в топці або конвективному газоході [12, 13, 16]. Як зазначено у роботі [18], перший спосіб відчутно впливає як на теплотехнічні, так і на екологічні результати (ККД зростає, викиди CO , NO_x зменшуються). Способи інтенсифікації теплообміну у конвективних елементах водогрійних котлів відрізняються великою різноманітністю: застосування перфорованих поверхонь, багатошарових конвективних поверхонь, ребра, а також вставок різної конфігурації [17,19].

У топку, як правило, встановлюють вторинні випромінювачі, які сприяють кращому теплообміну в топці, а звідси – покращення екологічних показників. Збільшення ефективності тепловіддачі продуктів згоряння до

поверхні нагріву призводить до інтенсифікації процесів теплообміну в котлах [20-22]. При виборі способу інтенсифікації тепловіддачі слід враховувати те, що вона пов'язана із зростанням витрат енергії на подолання аеродинамічних опорів.

Інтенсифікація конвективної складової теплообміну відбувається, в основному, у зв'язку з аеродинамічним впливом на газовий потік, під час якого штучна турбулізація прикордонного шару впливає на зменшення його товщини чи руйнування. Здійснення даних методів на практиці пов'язано із застосуванням різних форм пристроїв, а саме що створюють гвинтові, закручені або пульсаційні течії.

У конвективних поверхнях малих водотрубних котлів як проміжний випромінювач найбільш раціонально використовувати тонкі сталевих пластин або перфоровані листи, вільно розміщені в міжтрубному просторі [23].

Основним показником ефективності роботи котла є його ККД, який залежить багатьох чинників. Недоліком багатьох водогрійних та парових котлів є малоефективна тепловіддача в топці і обумовлено це високою температурою газів (до 200 -250 ° С) і низький ККД. Для вирішення цієї проблеми широкий розвиток можуть отримати методи інтенсифікації топкового теплообміну шляхом зміни геометрії топкового простору з урахуванням процесів аеродинаміки, розподілу температурних градієнтів, швидкостей та повноти перебігу хімічних реакцій Одним із шляхів підвищення ефективності використання палива в котлах, та відповідно підвищення їх ККД та зменшення газових викидів в атмосферу (включаючи CO₂, NO_x, та ін), є інтенсифікація теплообміну і відповідно тепловіддачі в топковій камері [10, 13, 23,].

До цього часу існує стійка думка досить великої кількості дослідників, що у самій природі компактних теплообмінних поверхонь закладено властивості, що забезпечують високу ефективність тепловіддачі, незважаючи на збільшення витрат енергії на просування потоку теплоносія за рахунок

зменшення гідравлічного діаметра. Обґрунтовується це тим, що коефіцієнт тепловіддачі збільшується пропорційно зменшенню еквівалентного діаметра каналу компактного теплообмінника. У компактних теплообмінниках із плавниковими трубами використовуються різні методики з інтенсифікації теплообміну, такі як: стрічкові ребра подібні до жалюзі, перфоровані та гофровані ребра [24, 25]. Велика кількість досліджень з тепловіддачі проводилася з крученими, гофрованими, спіральними трубами та трубами зі спіральним ребрами (рис.1. 8)

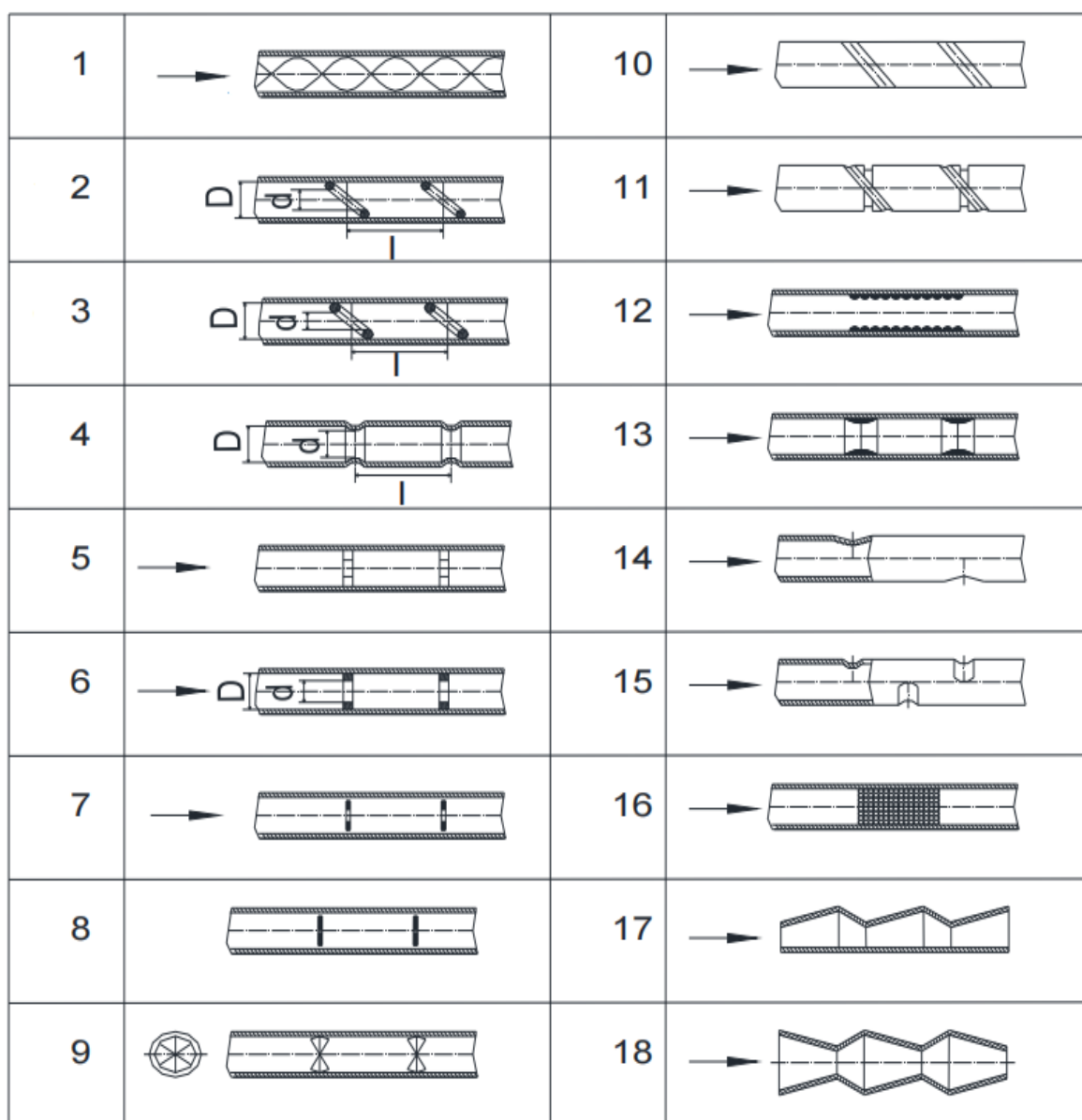


Рис.1.8 Варіанти труб з різними вставками, виступами, типами конфузур- дифузур та інші.

Огляд методів інтенсифікації теплообміну показав, що на сьогодні існує безліч способів збільшення коефіцієнта тепловіддачі. Діляться всі ці методи на активні і пасивні.

Під активними методами інтенсифікації розуміється вплив безпосередньо на потік робочого середовища (завихрення, пульсація тиску; вдування або відсмоктування робочого середовища через пористу поверхню і т.п.) [25, 27].

Пасивні методи навпаки характеризують вплив на поверхню теплообміну. Основним способом пасивного методу вважається застосування інтенсифікаторів.

Підвищення ефективності роботи котлів може бути досягнуто як за рахунок конвективної, так і за рахунок променистої складової результуючого теплоперенесення. Інтенсифікацію теплообміну в елементах котла можна проводити шляхом: встановленням інтенсифікаторів теплообміну в топці або жаротрубному елементі [9, 17, 22-24].

Слід підкреслити, що необхідні для перерахованих вище методів пристосування та встановлення не завжди сумісні з більшістю водогрійних котлів з холодними стінками при роботі на твердому паливі [28-30].

Ця проблема особливо актуальна в даний час, коли використання нової поверхні нагріву не дає переваг за вартістю з теплової ефективності при порівнянні з класичними теплообмінними поверхнями стосовно вугільних водогрійних котлів та запиленими потоками.

Найбільш широко застосовуються в теплоенергетиці методи поперечного обтікання трубних поверхонь нагріву, таких як конвективні пакети труб з шаховим розташуванням у конструкціях пароперегрівачів, водяних економайзерів і трубчастих повітропідігрівачів достатньо ефективні з погляду високих значень коефіцієнта тепловіддачі.

При постійному потоці тепловіддача протікає інтенсивніше.

При невеликих значеннях швидкості та числа Re відрив прикордонного шару відбувається більш «пізно» в тильній стороні при кутах $\alpha = 125 \div 150^\circ$.

При великих швидкостях обтікання труби (великих Re) у тильній частині труби утворюється «раніше» вихровий відривний перебіг при кутах $\alpha = 82^\circ \div 90^\circ$. Такий характер обтікання спостерігається до наступу критичного режиму при $Re = 2 \times 10^4$. Дослідження показують, що навіть невеликий ступінь турбулентності викликає в окремих зонах і в основному у лобовій частині труби (циліндра) збільшення тепловіддачі більш ніж на 30 – 50% [21].

Збільшення швидкості потоку при $Re = 5 \times 10^5$ призводить до збільшення тепловіддачі в кормовій тильній частині труби і може значно перевищувати тепловіддачу в її лобовій частині. На практиці це призводить до захаращення каналів, ступінь якого виражається ставленням діаметра труби до висоти каналу.

Аналіз робіт [28,29] показав, що збільшення поздовжнього кроку $\sigma_2 = s_2/d$ шахових пучках (пакетах) труб збільшує аеродинамічний опір і пояснюється це тим, що збільшується міжтрубне простір і відповідно область з великими вихорами, на які і витрачається частина енергії потоку.

При великому поперечному кроці $\sigma_1 = s_1/d > 2$ течія у шахових пакетах буде ближче до обтікання коридорних пучків труб. У тісних шахових пакетах труб з $\sigma_1 < 1,7$ значно скорочується зона переходу до автомодельного характеру опору. Зі зменшенням поперечного кроку σ_1 число Ейлера Eu (аеродинамічний опір) збільшувалося [23].

1.3 Висновки за розділу 1.

1. Експлуатаційне значення ККД водогрійних котлів КСВр із закраним газоходом досягали 82%. На відміну від поширених водогрійних циліндрових котлів форми із жаровими трубами ККД яких не перевищував 55 – 60 %.

2. Інтенсифікацію теплообміну в елементах котла можна проводити двома шляхами: встановленням інтенсифікаторів теплообміну в топці або конвективному газоході.

3. Способи інтенсифікації теплообміну у конвективних елементах водогрійних котлів відрізняються великою різноманітністю: застосування перфорованих поверхонь, багат шарових конвективних поверхонь, ребра, а також вставок різної конфігурації.

4. Інтенсифікацію теплообміну в елементах котла можна проводити шляхом: встановленням інтенсифікаторів теплообміну в топці або жаротрубному елементі.

5. Найбільш широко застосовуються в теплоенергетиці методи поперечного обтікання трубних поверхонь нагріву, таких як конвективні пакети труб з шаховим розташуванням у конструкціях пароперегрівачів, водяних економайзерів і трубчастих повітропідігрівачів достатньо ефективні з погляду високих значень коефіцієнта тепловіддачі.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В КАНАЛАХ ЗАЕКРАНОГО ГАЗОХОДУ ТВЕРДОПАЛИВНИХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

2.2 Порівняльні дослідження регульованої подачі повітря при спаленні твердого палива на колосникових ґратах з тонким шаром .

Одним із способів ефективного спалювання вугілля є його спалювання у тонкому шарі. Підтвердженням цього є те, що інтенсивність горіння на поверхні вугільних частинок у факельному процесі наближається до своєї межі фізично. Для шарового процесу спалювання оцінки показують приблизно п'ятдесят кратну перевагу або п'ятдесятикратний запас наскільки можна інтенсифікувати горіння твердого палива в шарі в порівнянні з граничними значеннями при факельному спалюванні вугільного пилу і відповідно кратна перевага зі скорочення викидів парникових газів – декарбонізації та шкідливих речовин. [33]

Насамперед шарове спалювання вугілля дозволяє максимально утримувати та вловлювати тверді великі та дрібні фракції шлаку та зольних частинок у межах котла на решітці при номінальних режимах без форсування процесів горіння, крім періодів закидання або подачі свіжої порції твердого палива на палаючий шар та інтенсивне виділення та активне горіння летючих. Після виділення та вигоряння летючих над шаром відбувається досить тривале горіння на колосникових ґратах коксового залишку у шарі з вмістом вуглецю у твердій фазі. [34]

З тривалого досвіду спалювання твердого палива у шарі відомо, що навіть у тонкому шарі товщиною порядку 30 -35 мм над шаром практично відсутній кисень [36], який весь витрачається на горіння вуглецю в шарі зазначеної невеликої товщини. В результаті над тонким шаром товщиною 30

- 35 мм виходить високий вміст окису вуглецю CO тобто відновлююче середовище, яке разом із невеликою температурою сприяє низьким викидам.

Однак широко поширені у приватних котельнях отримали вугільні водогрійні (парові) котли призматичної та циліндричної форми із жаровими трубами які мають ККД не вище 55 – 65 %. Об'єм води в циліндричному водогрійному котлі більше у 7 – 10 разів більше, ніж у водотрубному котлі такої ж потужності. [37]

Факти аварійних ситуаціях з перебоями у постачанні енергії та припиненні циркуляції води, з несанкціонованим горінням вугілля в топці вже приводив до пароутворення в котлі та до аварії з людськими жертвами.

Тому в роботі розглядаються твердопаливні водогрійні водотрубні котли з мінімально можливим об'ємом води в котлі та з максимальним використанням поверхні труб в активному теплообміні до 96% від загальної поверхні. Оскільки звичайні традиційні водогрійні водотрубні котли класичного профілю в активному теплообміні використовували лише до 84 % поверхні труб. Порядок з'єднання екранів у котлах, дозволяє їм ефективно працювати в умовах експлуатації як у оптимальному режимі з номінальною витратою води, так і знижувати теплове навантаження менше 20% з мінімальним тиском води та збереженням стійкої циркуляції води. Широкий діапазон роботи з варіюванням потужності та зміною витрати та тиску води у традиційних водогрійних котлах з класичною схемою компонування або в циліндричних котлах з жаровими трубами реалізувати неможливо. [36]

Конструкція водогрійного котла КСВр дозволяє варіювати довжиною, висотою та шириною топки для вибраних співвідношень між радіаційною та конвективною поверхнею нагріву. Для конкретного виду твердого палива підбирається та оптимізується площа колосникових ґрат і геометричні параметри котла. Це неможливо для широкого кола класичних схем існуючих водогрійних котлів та циліндричної форми через жорстку прив'язку до габаритних розмірів котла та потужності в залежно від типу і сорту вугілля, що спалюється на колосниковій решітці.

У сучасній конструкції котла окремо збирається внутрішній цільнозварний U – подібний екран з горизонтальним розташуванням паралельних U – подібних екранних труб, за яким розміщується зовнішній екран, зібраний із паралельних не зварених між собою U – подібних труб з опорами, що утворюють за екранний газохід. Фронт котла та стельові цільнозварні екрани котла виконуються у формі Г – подібного загального екрану і накриває фронтову та стельову частину утворюючи об'єм топки. Зовнішня тильна та дві бічні сторони котла закриваються знімними теплоізольованими декоративними панелями, а всередині встановлюється тепловий випромінювач. [38]

Знімні панелі дозволяють персоналу швидко без зупинки роботи водогрійного котла з водяної сторони проводити технічний огляд, ремонт та обслуговування всієї конвективної та зворотної сторони радіаційної топкової поверхні нагрівання котла. Переваги ефективною роботи водогрійних котлів КСВр на твердому паливі з тонким шаром підтверджуються численним тиражуванням котлів та позитивними відгуками.

При роботі на рядовому вугіллі з тонким шаром вугілля, що горить на колосникових ґрат і ручним обслуговуванням водогрійні котли КСВр показали суттєву економію вугілля за опалювальний період, а також зниження парникових газів та шкідливих викидів в атмосферу. [39]

За котлом у газоході перед трубою встановлювався димосос і паралельно монтувався байпас до основного газоходу, щоб у водогрійному котлі забезпечувалася природна тяга з розрядження до 150 Па від попередньо прогрітої димової труби діаметром 325 мм та висотою 12 м. Видалення продуктів згоряння за котлом виконано з постійним висхідним рухом газів по підйомному газоходу до димової труби. Газохід виконаний таким чином, що гази після газоходів котла постійно піднімалися до входу в димову трубу, така висхідна конструкція газового короба через активний рух палаючих газів швидше прогривається разом із димарем і створює суттєву тягу в котлі. У нагрітому висхідному газоході та трубі створюється природна тяга з

розрідженням понад 150 Па. Така величина розрідження стає достатньою для забезпечення тяги в палаючому тонкому шар вугілля навіть без включення димососу. При цьому провал, прогрітий до певної досить високої температури понад 100 °С і розміщений під колосниковими ґратами, спеціально формується таким чином, щоб холодне повітря, що затягується, з відкритих дверей зольника частково підігрівався. За такої конструктивної схеми роботи котла КСВр-0,43 практично повністю використовується фізичне тепло шлаку та провалу, що також підвищує ККД котла. [36]

У початковий період горіння свіжої порції палива як показано на рисунку 2.1 (ліва частина) відбувається різке зростання викиду діоксиду вуглецю CO_2 та його величина в перші 15 хвилин досягає 7,3% на висоті над палаючою шаром порядку 240 – 300 мм.

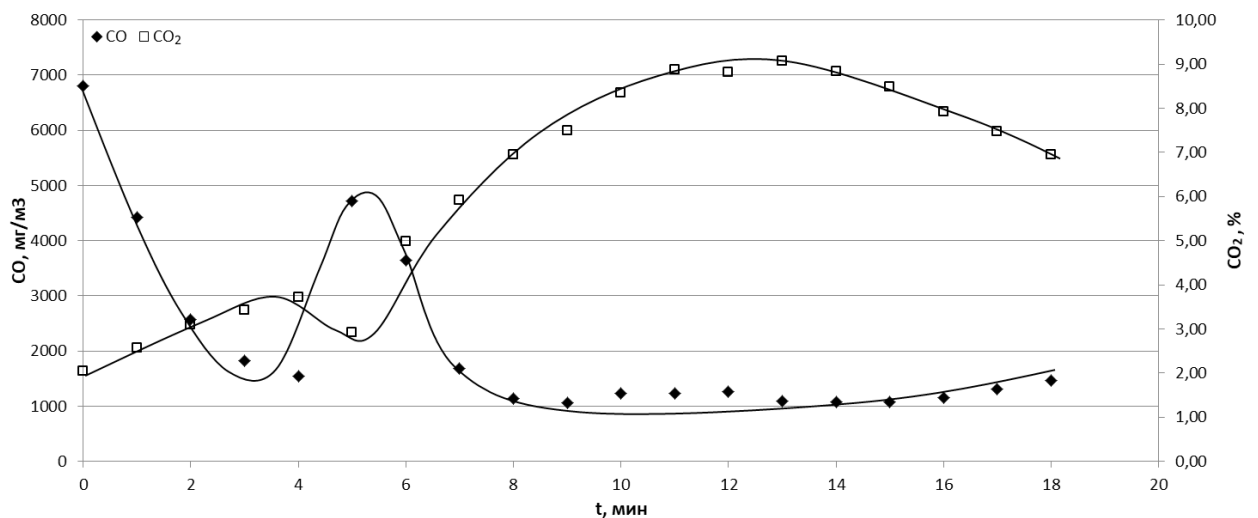


Рис.2.1 Дані CO і CO_2 в активній стадії горіння

У цей же період різке зниження спостерігається окису вуглецю CO і часу 15 хвилин практично досягає нульового значення. Різке зниження концентрації кисню над шаром спостерігається в цей же проміжок часу тривалістю близько 15 хвилин і це пояснюється активним горінням летючих, на яке і витрачається основна кількість повітря, що подається під колосники (кисню). Після 30 хвилин горіння в тонкому шарі концентрація окису вуглецю збільшується і перевищує значення 5%, до цього моменту часу CO_2 знижується нижче 4%. [40].

Як видно з на рисунку 2.2 з вигорання шару на колосникових ґратах, найбільш характерним є те, що в найактивнішій частині інтенсивно палаючого шару йде глибока газифікація вугілля з видачею в об'єм топки практично «напівгазу». Слід зазначити, що в активній зоні шарового горіння є постійна та неминуча нестача повітря (кисню), незважаючи на його малу товщину. Це слід пояснити тим, що як при інтенсивному горінні великого обсягу летючих, так і при активному горінні коксового залишку наявність надлишкових горючих компонентів у першому випадку та наявність великої кількості чистого вуглецю (в тонкому шарі) у другому випадку витрачається практично весь кисень.

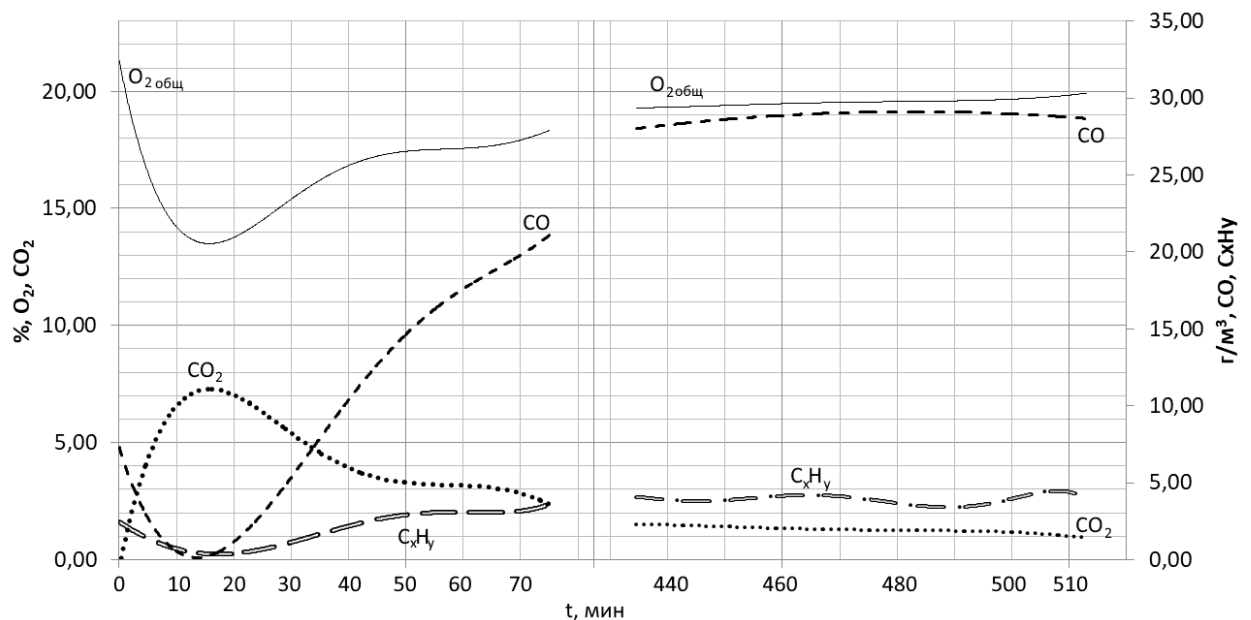


Рис.2.2 Склад газів над тонким шаром вугілля на решітці:
з форсуванням повітрям (ліворуч) і при природній тязі (праворуч)

Тобто. в межах високотемпературного тонкого шару в камеру топки видається «напівгаз» з великим вмістом окису вуглецю CO, як показано на рисунку 2.2 (праворуч). При середньому та високому форсуванні шарової топки вигорання основної маси палива може відбуватися за 10, 15 або 20 хвилин як це представлено на рисунку 2.2 (ліворуч) [42].

Впровадження котлів КСВр-0,43 та досвід напрацювання при спалюванні різних вугілля дає можливість при експлуатації відпрацювати

адекватні режими роботи з мінімізацією впливу на довкілля. [43] Є можливість тривалої та стійкої роботи таких котлів без форсованого спалювання кам'яного вугілля в тонкому шарі на колосникових ґратах, це вже дозволяє суттєво скоротити викиди вуглекислоти CO_2 та інших речовин.

Перед першим запуском водогрійного котла КСВр вся трубна система промивається чистою водою, після спорожнення вся система знову заповнюється водою, а в теплову систему та ємність котла засипається 2 – 3 кг речовини для промивання всієї теплової мережі з короткочасним увімкненням мережевого насосу.

Як показано на рис 2.1 після активного виділення та горіння летючих після перших тридцяти хвилин після рівномірного завантаження свіжої порції вугілля по колосникових ґратках з тонким шаром і плавним регулюванням подачі повітря під решітку можна розтягнути процес активного горіння від 30 хвилин і більше, а горіння коксу збільшити до 550 хвилин. Однак у роботі [44] на лабораторній установці при спалюванні німецького та рядового газового вугілля на решітці з тонким шаром час активного горіння регулювалося від 10 хвилин із форсуванням топки від $q_{T2} = 2,2 \times 10^6$ ккал/м²×год та швидкістю потоку повітря до $w_2 = 0,68$ м/с. До 20 хвилин з форсуванням топки $q_{T1} = 0,76 \times 10^6$ ккал/м²×год та швидкістю потоку повітря до $w_1 = 0,23$ м/с. Щоб скоротити зону та тривалість активного горіння до 10 хвилин і одночасно збільшити викиди вуглекислоти CO_2 до 18% [45] доводиться збільшити теплове форсування топки в 2,89 рази, а форсування шару в 2,77 рази і при цьому збільшити швидкість потоку повітря під тонкий шар вугілля у 2,95 рази.

Як показали теплотехнічні випробування водогрійного котла КСВр-0,43 збільшення тривалості горіння коксу вугілля може суттєво зменшити викиди CO_2 до 1,7 - 1,8 %, [46] при цьому тривалість горіння коксу при плавному регулюванні та зниження подачі повітря під тонкий шар може складати години.

2.2 Порівняльні дослідження розміщення заекраних труб

Однією з перших у роботі [29] було досліджено модель ділянки каналу заекранного газоходу з поздовжніми цільнозварними трубними панелями зі зміщеними мембранами без поперечних турбулізаторів та з поперечними сталевими прутками.

Повітря з компресора надходило в електричний нагрівач і нагрівалося до температури 200-250 °С. Нагрів проводився чотирма паралельно включеними дротяними спіралями з ніхрому. У першому варіанті нагрівачами служили термічні опори з нержавіючої сталі марки Х18Н9Т діаметром 12×1 мм, через які пропускався струм напругою 30, з силою струму $I = 300 - 1000$ ампер. Температура повітря регулювалася зміною інтенсивності нагріву спіралей (змінювалася сила струму з допомогою трансформатора). Після нагрівача нагріте повітря трубою діаметром 89×4 мм проходило стабілізуючу ділянку та діафрагму і далі надходило у ділянку газоходу.

Активний теплообмін у такому каналі відбувається лише з поверхнею поперечних труб та труб у трубній цільнозварній панелі. Цим фактором і пояснюється більш ретельний підбір та вибір не тільки геометричного каналу заекранного газоходу, а також (швидкісних) гідродинамічних і теплообмінних характеристик та режимів течії. Комплексний підхід у визначенні оптимальних гідродинамічних та теплообмінних характеристик може покращити конструктивні параметри водогрійного котла, що ефективно працює на твердому паливі. [47]

На ділянці заекранного каналу газоходу водогрійного котла на рис. 2.3 вимірювання поля статичного тиску проводилося по довжині в точках протилежних поперечним трубам, розміщеним по середині каналу, оскільки між середніми трубами на верхньому теплоізолюваному листі теплового випромінювача розміщувалися поперечні пластини під кутом 45° до потоку і періодично спрямовували половину потоку на кожну трубу. Між

поперечними пластинами розміщувалися імпульсні отвори діаметром до 0,5 мм для вимірювання статичного тиску вздовж усієї довжини ділянки каналу.

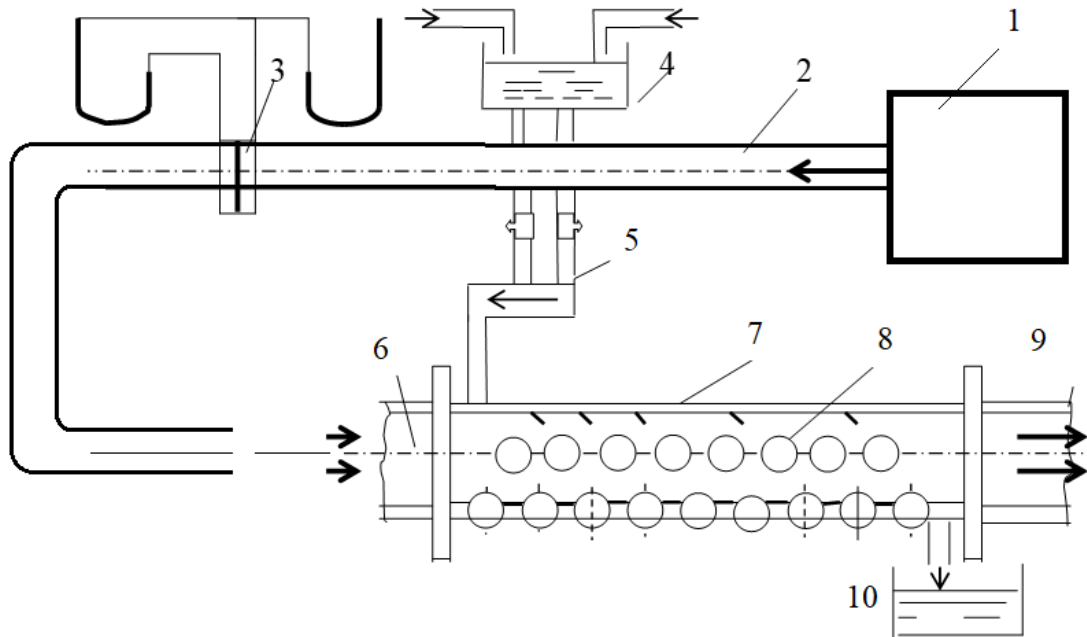


Рис.2.3 Схема ділянки каналу заекранного газоходу з поперечним обтіканням.

1 – котел КВа-100, 2 – стабілізуюча ділянка, 3 – шайба виміру витрати повітря, 4 – змішувальний бак, 5 – змішувальна камера, 6 – стабілізуюча ділянка, 7 – змінна панель із тепловими випромінювачами, 8 – поперечне обтікання пучка, 9 – вихідна ділянка, 10 – мірний бак

На виході з ділянки преставленої на рис.2.3 для зазначених чотирьох значень числа Re статичний тиск помітно більший, ніж на кінці ділянки. Це пояснюється тим, що площа складного поперечного перерізу ділянки з поперечними трубами після виходу з нього збільшується, оскільки перетин вважається за зовнішнім контуром без труб і тому швидкість потоку знижується. При цьому з рис.2.3 можна зробити висновок що по відповідним лініям 1, 2, 3 та 4 зі збільшенням швидкості потоку (числа Re) крутість ліній та загальний перепад статичного тиску на початковій та кінцевій ділянці збільшується. [48]

Заекранний газохід утворений двома поздовжніми цільнозварними трубними панелями по чотири труби діаметром 40×3 мм в одній панелі. У

цільнозварної панелі труби зварювалися між собою плавцями з усуненням від діаметральної площини все в один бік. Потік повітря проходить у поздовжньому напрямку між двома трубними панелями, з метою інтенсифікації теплообміну поперек потоку між панелями встановлювалися сталеві круглі стрижні діаметром до 12 мм із кроком від 200-250 мм.

Опис іншого методу інтенсифікації теплообміну та опору в каналі заекранного газоходу із поперечними трубами показано на рис.2.4. Це ділянка каналу заекранного газоходу з поперечним обтіканням цільнозварної трубної панелі та поперечних труб твердопаливного сталевого водогрійного котла тепловою продуктивністю від 0,2 до 1,0 МВт. У поперечному перерізі ділянка являє собою канал прямокутного перерізу. Відношення ширини каналу до його висотм $Ш/h = 5,25$ і $Ш/h = 10,5$, де зовнішній діаметр екранних труб котла КСВр-0,43 $d_{тр} = 38$ мм [49]

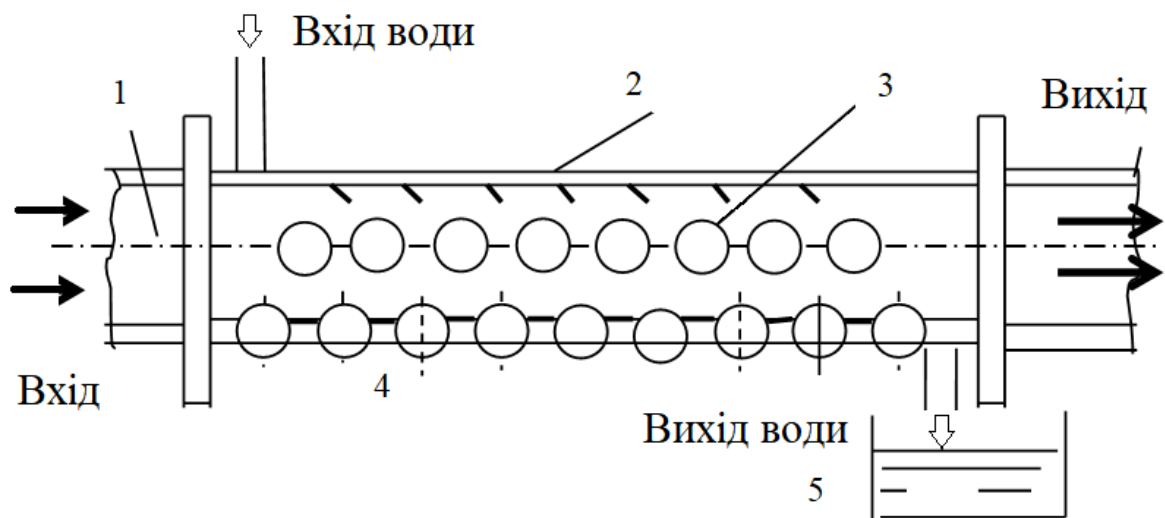


Рис.2.4 Схема каналу заекранного газоходу з поперечним обтіканням труб

1 – стабілізуюча ділянка, 2 – змінна панель з тепловими випромінювачами, 3 - канал з поперечним обтіканням пучка, 4 - змінна мембранна панель, 5 - мірний бак

Послідовно по довжині ділянки міститься десять труб $n = 10$ по ходу газів. Це забезпечує усунення впливу бічних стінок на гідродинаміку течії в каналі та вплив початкової ділянки та бічних стінок. У нижній частині

каналу встановлювалася стінка з цільнозварної мембранної трубної панелі. Фланці, плавці, бічні стінки та знімна верхня стінка з пластинчастими тепловими випромінювачами виготовлялася з листової сталі марки Ст.3. Збірна ділянка уніфікована, а самі вузли дозволяють, не вдаючись до значних конструктивних змін збирати ділянки каналів із різними комбінаціями верхньої стінки.

Установка труб у бічних торцевих стінках проводилася до нижньої цільнозварної панелі, тим самим забезпечує точне положення труб у каналі заекранного газоходу з поперечним обтіканням труб і з тепловим випромінювачем із зовнішньої верхньої сторони. Ділянка з боків, з боку нижньої та верхньої сторони каналу щільно закривалися теплоізоляційним матеріалом. [50]

Для зниження втрат тепла та підвищення точності теплових вимірювань ділянка газоходу закривається теплоізоляційним матеріалом, разом із сполучними вхідними та вихідними патрубками.

Ділянка каналу заекранного газоходу з поперечним обтіканням цільнозварних трубних панелей та поперечних труб з тепловим випромінювачем із вхідної сторони ділянки моделі з'єднується з газоходом водогрійного котла КВа-100 рис.2.5

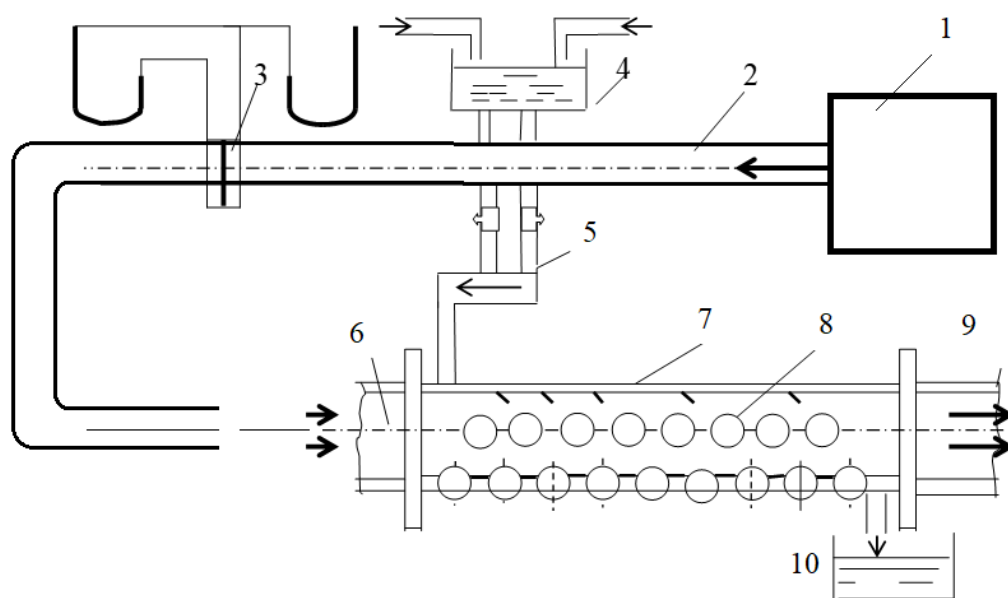


Рис.2.5 Схема ділянки каналу заекранного газоходу з поперечним обтіканням.

1 – котел КВа-100, 2 – стабілізуюча ділянка, 3 – шайба виміру витрати повітря, 4 – змішувальний бак, 5 – змішувальна камера, 6 – стабілізуюча ділянка, 7 – змінна панель із тепловими випромінювачами, 8 –поперечне обтікання пучка, 9 – вихідна ділянка, 10 – мірний бак

Як витікає з вище наведених досліджень встановлення напрямних пластин призводить до: підтискання потоку в каналі між зовнішньою стінкою котла та трубок поруч; перерозподілу поля швидкості з перенаправлення більшої частини витрати в канал між рядами трубок; збільшенню швидкості газів в області рядів трубок; збільшенню гідравлічного опору ділянки газоходу.

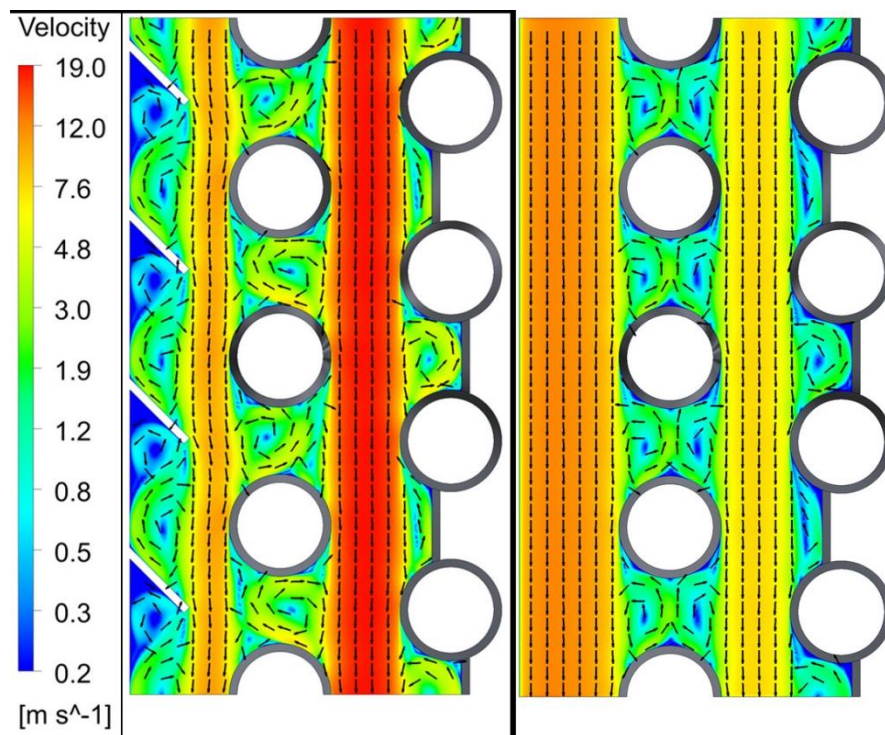


Рис. 2.6 Розподіл швидкості димових газів на ділянці газоходу.

Порівняння розподілу температури на ділянці газоходу показує, що: встановлення направляючих пластин призводить до інтенсифікації теплообміну між газом та трубками; локальному зниженню температури в каналі між зовнішнім екраном та зовнішньою стінкою котла за рахунок зміни течії напрямними пластинами.

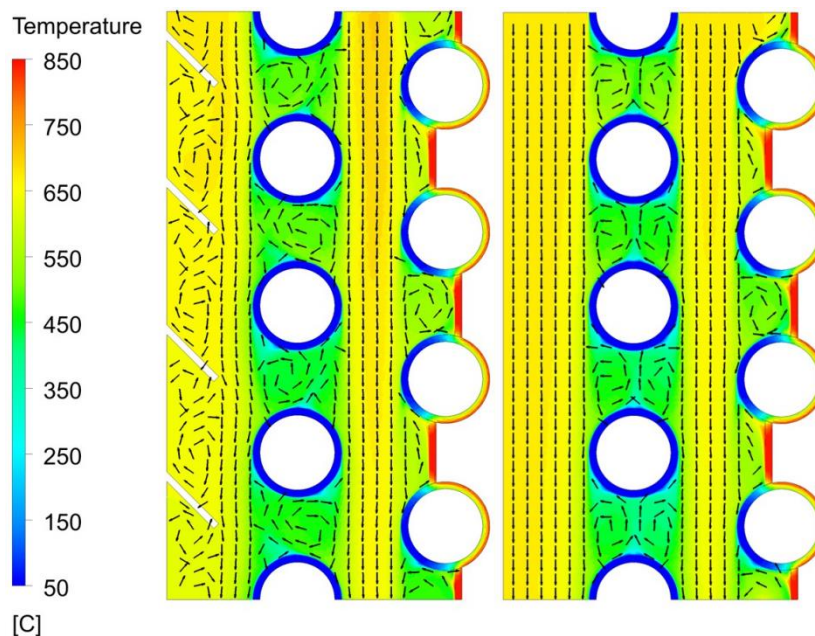


Рис.2.7 Розподіл температури димових газів на ділянці газоходу.

Однак широко поширені у практиці невеликих приватних підприємств вугільні водогрійні (парові) котли призматичної та циліндричної форми з жаровими трубами мають ККД не вище 55 - 65%. Об'єм води в циліндричному водогрійному котлі більше у 7 – 10 разів , ніж у водотрубному котлі такої ж потужності.

Цей факт при аварійних ситуаціях з перебоями у постачанні енергією та припиненні циркуляції води з несанкціонованим горінням вугілля топці вже приводив до пароутворення в котлі та до великих аварій з людськими жертвами.

2.3 Висновки за розділом 2

1. Встановлення напрямних пластин призводить до: підтискання потоку в каналі між зовнішньою стінкою котла та трубок поруч; перерозподілу поля швидкості з перенаправлення більшої частини витрати в канал між рядами трубок; збільшенню швидкості газів в області рядів трубок; збільшенню гідравлічного опору ділянки газоходу.

2. Порівняння розподілу температури на ділянці газоходу показує, що: встановлення направляючих пластин призводить до інтенсифікації теплообміну між газом та трубками; локальному зниженню температури в каналі між зовнішнім екраном та зовнішньою стінкою котла за рахунок зміни течії напрямними пластинами.

3. Для шарового процесу спалювання оцінки показують приблизно п'ятдесят кратну перевагу або п'ятдесятикратний запас наскільки можна інтенсифікувати горіння твердого палива в шарі в порівнянні з граничними значеннями при факельному спалюванні вугільного пилу і відповідно кратна перевага зі скорочення викидів парникових газів – декарбонізації та шкідливих речовин.

4. При роботі на рядовому вугіллі з тонким шаром вугілля, що горить на колосникових ґрат і ручним обслуговуванням водогрійні котли КСВр показали суттєву економію вугілля за опалювальний період, а також зниження парникових газів та шкідливих викидів в атмосферу.

РОЗДІЛ 3

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ ЩО ПРОТІКАЮТЬ У ЗАЕКРАННИХ ГАЗОХОДАХ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА

3.1 Гідродинамічні та теплообміні закономірності в каналі газоходу водогрвйного котла

Визначальною характеристикою при розрахунках теплообмінників є гідравлічний опір. Гідравлічний опір у каналах з поперечним обтіканням труб визначається перепадом статичного тиску на ділянці, що вимірюється, і залежить від якісної картини перебігу газового потоку за поперечною трубою та елементами, що становлять стінки каналу газоходу.

Періодичне прискорення та уповільнення потоку, характерне для поперечного обтікання труб, що чергуються, утворюють вихрові сліди і зони, що ведуть до втрати кінетичної енергії потоку. Для каналів із малим числом поперечно обтічних труб на загальний гідравлічний опір впливає додаткова кінетична втрата енергії в першому ряду та втрати напору на виході з ділянки з малим числом труб. Слід зазначити, що у каналі заекранного газоходу з поперечним обтіканням труб одна стінка з поперечними пластинами взаємодіє з вихровим потоком лише з погляду гідродинаміки без теплообміну. [29]

Наведений коефіцієнт тепловіддачі від нагрітого газу за котлом КСВр-0,43 з тепловим випромінювачем до стінок поперечних труб та мембранною панеллю визначався за формулою [26]:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{F\delta}{F\lambda} + \frac{F}{\alpha_2 F n}}$$

де k - коефіцієнт теплопередачі, Вт/(мК); α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до води, що визначається по [29], Вт/(м²К); F , F_p , $F\delta$ - поверхні каналу заекранного газоходу по газовій стороні, стінки труб, кордоні вода - газ та

внутрішня поверхня труб, m^2 ; d – товщина стінки труб, м; l - коефіцієнт теплопровідності сталі, Вт/(мК). [27]

Коефіцієнт $a_{пр}$ є наведеним коефіцієнтом тепловіддачі каналі заекранного газоходу з поперечним обтіканням цільнозварної панелі та труб з тепловим випромінювачем віднесеним до всієї поверхні заекранного газоходу газовою стороною.

Коефіцієнт тепловіддачі в докільця за умов природної конвекції розраховувався за такою формулою [29]:

$$\alpha_{навк} = 11,3 + 0,08(T_B - T_{навк})$$

$\alpha_{навк}$ - коефіцієнт тепловіддачі для природної конвекції, Вт/($m^2 \times K$);

T_B , $T_{нпвк}$ - температури води, навколишнього середовища та ребра у трубній панелі, К. [19]

На рисунку 3.1 представлено зміну статичного тиску вздовж ділянки через кожні 140 мм для різних чисел Re 14000, 15500, 17000 та 21500

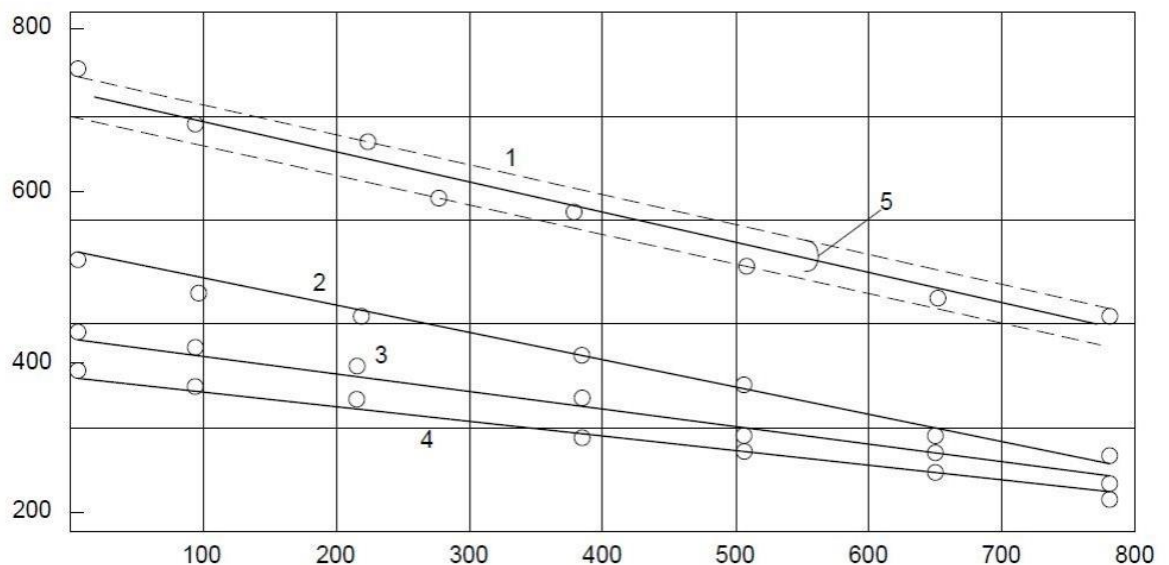


Рис. 3.1 – Розподіл статичного тиску за довжиною шахового пучка труб:

Вісь абсцис – довжина каналу, мм; вісь ординат - статичний тиск, Па;

1 - число Re = 21500, 2 - число Re = 17000, 3 - число Re = 15500, 4 - число Re = 14000, 5 – похибка вимірювань. [16]

На рис 3.1 представлено, що у другій, четвертій та шостій точках зняття показників від входу ділянку, тобто. через 140 мм, 560 мм та 840 мм, для

всіх чотирьох режимів перебігу при числах Re , рівних 14000, 15500, 17000 та 21500 спостерігається зниження статичного тиску. Це пояснюється розташуванням імпульсних отворів №2, №4 на верхній кришці безпосередньо за поперечними пластинами, встановленими під нахилом на 45° до основного потоку і відповідають мінімальному поперечному перерізу каналу. У зазначених точках швидкість потоку максимальна ділянці, ніж за наступним поперечним рядом труб, де швидкість потоку менше, а статичний тиск більший ніж у відповідних точках №1, №3, №5.

Дослідження коефіцієнта гідравлічного опору для каналу заекранного газоходу з поперечним обтіканням, утвореного цільнозварними мембранними трубними панелями з поперечними трубами проводилося спираючись на ізотермічні умови. Дослідження теплообміну та визначення коефіцієнта тепловіддачі на неізотермічній ділянці дозволяло визначити і коефіцієнт опору в умовах охолодження потоку.

Теплофізичні характеристики потоку нагрітого повітря або потоку гарячого газу визначалися за середньою температурою, розрахована швидкість у характерному найменшому прохідному перерізі поперечного ряду труб та похилих пластин. За характерний визначальний розмір приймався діаметр труб, який не значно відрізнявся від еквівалентного діаметра розрахованого по відомій формулі

$$d_{екв} = 4P/F,$$

де $d_{екв}$ – еквівалентний діаметр поперечного перерізу каналу,

P – змочений периметр каналу для гідродинаміки та окремо P_t – змочений периметр каналу задіяний у безпосередньому теплообміні між газовим потоком та водою у трубах,

F – характерна площа поперечного перерізу у найменшому прохідному перерізі експериментального каналу. [18]

При роботі котлів на малих та середніх навантаження значення швидкості газів невеликі в заекранному газоході. Додатково на рис.3.1 видно, що зі збільшенням швидкості потоку та числа Re у розглянутій моделі

каналу заекранного газоходу спостерігається чітке чергування значень статичного тиску, що характеризує змінний рух потоку, що чергується то зі збільшенням швидкості, то зі зниженням швидкості кожної поперечної серединної труби в каналі.

Аналогічний результат змін статичного тиску, що чергуються, був отриманий в роботі [29] і в роботі Балабекова О.С.. На рис.3.1 видно, що перепад статичного тиску чергується, для чисел Re від 6000 і до 17000 для дослідженого каналу заекранного газоходу [30] з похилими пластинами перевищував розрахункову похибку щодо статичного тиску і тому отриманий змінний розкид статичного тиску цілком реальний і зрозумілий.

У роботі [31] в діапазоні чисел Рейнольдса від 6×10^3 до 17×10^3 коефіцієнт гідравлічного опору для заекранного каналу газохода з пластинами під кутом 45° до потоку не відрізнявся між собою .

Зростання коефіцієнта гідравлічного опору з похилою пластиною зі збільшенням швидкості (Re) пояснюється тим, що пластина накидає половину потоку на бічну частина під кутом 45° до стінки кожної поперечної труби по всій її довжині, а це призводить до збільшення лобового опору. Додатково простір за похилою пластиною заповнюється значними вихровими зонами по всій довжині кожної труби яка вимагає певних витрат кінетичної енергії.

У деяких [31, 32] цей факт із вихровими зонами показаний візуально реальними картинками із чітко сформованими вихорами. Відомо, що простори що порівнюються з характерним розміром каналу заповнені частими вихровими зонами і вимагають інших кінетичних витрат енергії потоку.

3.2 Оцінка теплової ефективності каналу заекранного газоходу з пластинами.

У раніше виконаній роботі [29] з дослідження каналу закранного газоходу з різним розташуванням труб, як поздовжніх, так і поперечних з гладкими стінками з напівтрубами, розміщеними з однієї топкової сторони були отримані емпіричні формули для інженерних розрахунків коефіцієнта тепловіддачі або Nu .

На рис.3.2 представлені залежності $\lg Nu$ та $\lg Re$ для різних моделей каналів закранного газоходу, де для порівняння наведено залежність для класичного шахового пакета труб.

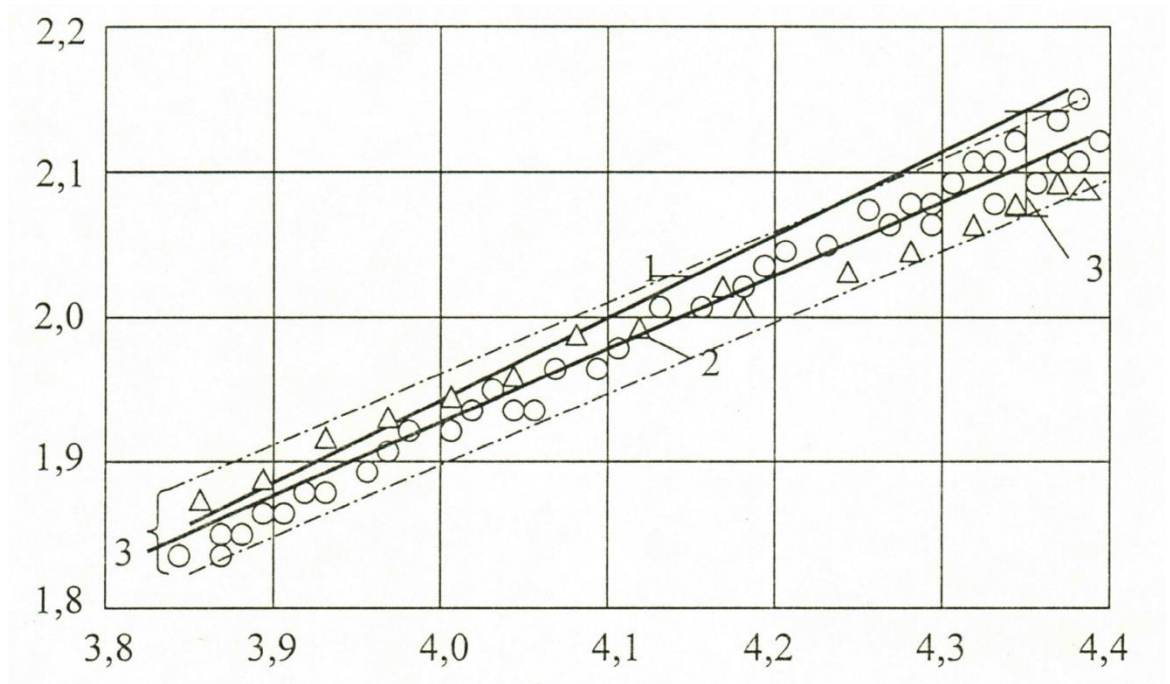


Рис.3.2 Узагальнення експериментальних даних щодо теплообміну

Вісь абсцис - логарифм числа Рейнольдса; вісь ординат – логарифм числа Nu

1-шаховий пучок труб $Nu=0,35 \times Re^{0,6}$ [29, 31],

2 – експериментальна залежність для різних видів турбулізаторів $Nu=0,72 \times Re^{0,53} \times Pr^{0,4}$ [29],

3- точність узагальнення

Залежність, показана лінією 1 рис.3.2 описує теплообмін класичного шахового пакета труб з поперечним кроком $\sigma_1 = s_1/d = 1,8$ та с поздовжнім кроком $\sigma_2 = s_2/d = 1,8$. Нижче розташована експериментальна залежність 2 отримана у роботі 3 рис.3.2 видно, що до значення числа $Re = 11585$

коефіцієнт тепловіддачі α або $Nu_{зг}$ ближче до коефіцієнта тепловіддачі класичного шахового пакета труб $Nu_{ш}$. Цей діапазон по швидкості газу від 1,5 м/с до 4÷6 м/с у каналі заекранного[29]. газоходу відповідає базовому режиму роботи твердопаливного водогрійного котла тепловою потужністю від 200 кВт до 1,16 МВт з тонким шаром вугілля, що горить на колосникових ґратах. Під час теплотехнічних випробувань в котлі величини швидкості газового потоку в заекранному газоході котла КСВр-0,43 фіксувалися багаторазово. [33]. При цьому надійність роботи конвективної поверхні заекранного газоходу не викликала сумнівів, оскільки при спалювання вугілля в тонкому шарі з мінімальною подачею дутьового повітря з шару практично не виносилися тверді фракції золи в топкове простір і відповідно канал заекранного газохода.

Доказом цього постулату є досить тривала робота водогрійного котла КСВр-0,43 з дотриманням зазначеного режиму роботи з тонким шаром. На рис.3.3 представлено залежність відношення числа $Nu_{зг}/Nu_{ш}$ від логарифму числа Re в діапазоні Рейнольдса від 5000 до 12500.

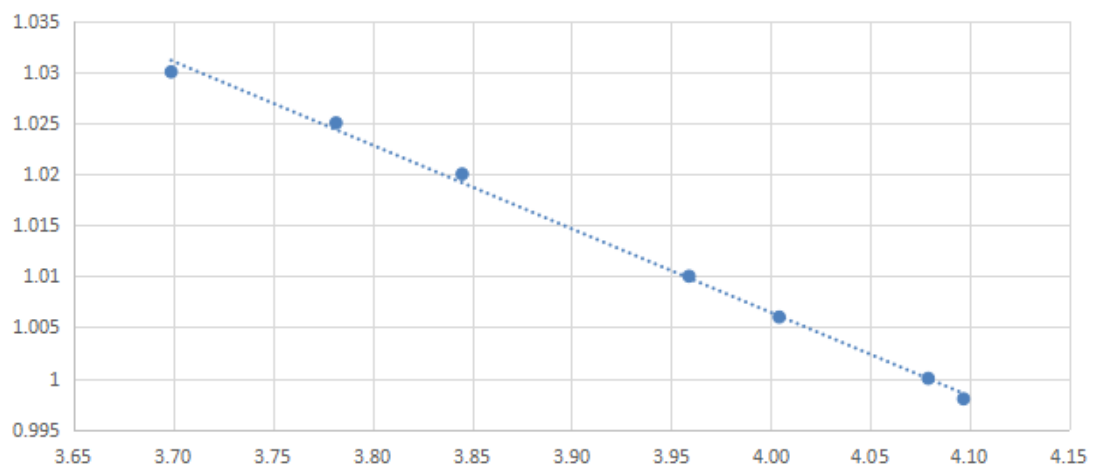


Рис. 3.3 – Порівняння теплообміну в каналі заекранного газоходу з класичним шаховим пучком

Вісь абсцис - логарифм числа Рейнольдса; вісь ординат – ставлення $Nu_{зг}/Nu_{ш}$

Близькі значення відношення числа $Nu_{зг}/Nu_{ш}$ коефіцієнта тепловіддачі від числа $lg Re$ в діапазоні від 3,8 до 4,1 у каналі заекранного газоходу

пояснюється тим, що для малих швидкостей потоку кожна похила пластина періодично спрямовує половину потоку на бічну стінку під кутом 45° кожної наступної труби. [34]. За дослідженнями інших авторів[35,36]. це місце, де коефіцієнт тепловіддачі α або Nu більш ніж удвічі менше, ніж у лобовій зоні (0° до потоку) труби. Напрямок половини потоку на бічну стінку кожної труби призводить до зменшення товщини прикордонного шару цієї зони по всій довжині кожної труби. Тому в заданому діапазоні швидкості газів коефіцієнт тепловіддачі починаючи з кута 45° і до кута 120° вздовж потоку з боку похилих пластин збільшуватиметься і сумарно буде ближче до тепловіддачі в пакеті шахових труб за таких же значень швидкості. Відповідно до цього сумарна тепловіддача в каналі за екранного газоходу буде наближено до тепловіддачі в класичному шаховому пакеті, при цьому гідравлічний опір у шахового пучка більше вказаному діапазоні швидкості газу. Як раніше зазначалося у роботі [29] гідравлічний опір каналу за екранного газоходу для розглянутого всього діапазону за кількістю Рейнольдса нижче, ніж для класичного шахового пакету труб з такими ж відносними поперечними $\sigma_1 = s_1/d = 1,8$ та поздовжніми $\sigma_2 = s_2/d = 1,8$ кроками труб.

Тому узагальнення та інтегральна оцінка переваги від застосування каналу заекранного газоходу по тепловому та гідравлічному ефекту P_e по аналогії з роботою [37,38] показує, що загальна теплогідравлічна ефективність наближається до лінії верхньої межі класичного шахового пакета труб. Досліджений діапазон теплової ефективності за кількістю Рейнольдса становить від 5000 до 11500. При порівнянні теплової ефективності по P_e використовувалися експериментально отримані залежності гідравлічного опору та тепловіддачі від числа Рейнольдса окремо для каналу за екранного газоходу та окремо для класичний шаховий пакет труб. [39]. Зниження теплового та гідравлічного ефекту зі збільшенням швидкості потоку після числа $Re = 11500$ для каналу за екранного газоходу пояснюється стійким утворенням великих вихорів за похилими пластинами.

Вихори за пластинами співмірні з половиною еквівалентного діаметра каналу та обумовлені великими витратами кінетичної енергії потоку та відповідним зростанням опору в такому каналі на відміну від шахового пакета труб.

Коефіцієнт тепловіддачі α (Nu) віднесено до повної поверхні теплообміну з боку газів, яка включає поверхню труб, поверхню мембран та торцевих ребер. Окремо враховувалась поверхня верхньої теплоізолюваної випромінюючої теплової панелі з привареними до неї похилими (45°) пластинами. За характерний розмір прийнято діаметр поперечно обтічних труб та труб у трубній нижній панелі. Швидкість потоку при визначенні критерія Рейнольдса досліджувалась для найбільш вузького прохідного перерізу каналу заекранного газоходу, а формула для визначення коефіцієнта тепловіддачі в каналі заекранного газоходу має наступний вигляд.

$$Nu = 0,98 \cdot Re^{0,52} \cdot Pr_{\text{рід}}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{рід}}}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25}$$

З роботи [40] представлено зміну коефіцієнта тепловіддачі по колу труби після другого ряду. Пунктиром на тому ж рис.3.4 показані точки каналу заекранного газоходу з пластинчастими напрямними з кутом нахилу 45° в полярних координатах.

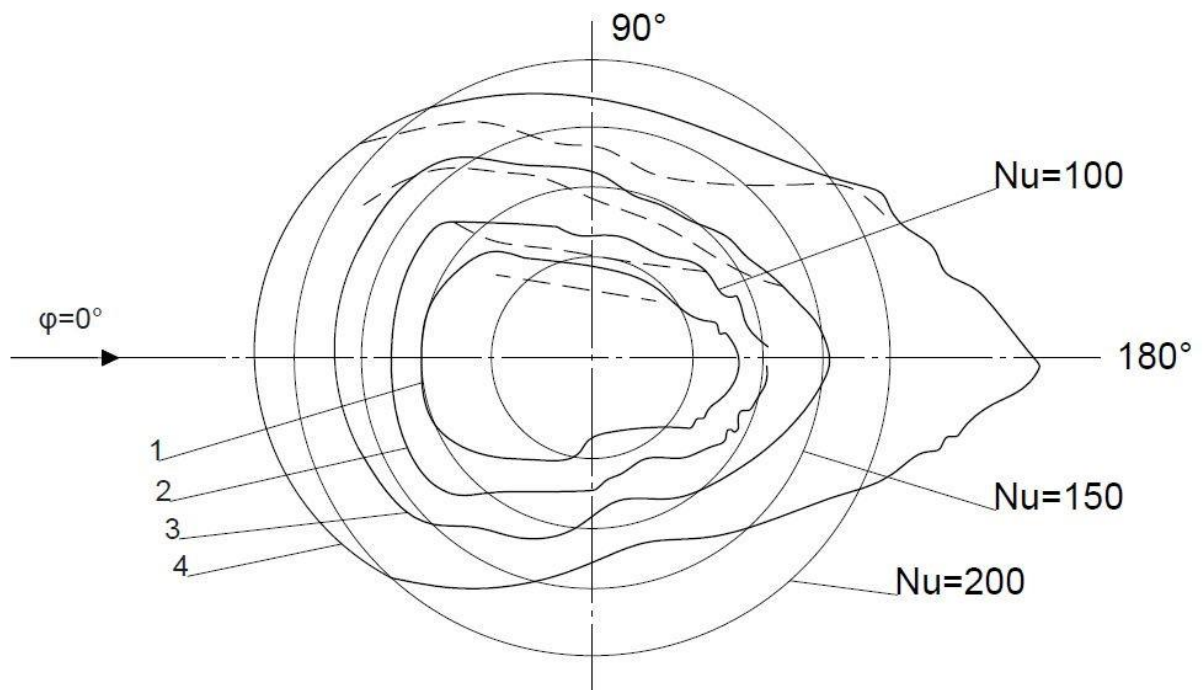


Рис.3.4 Зміна коефіцієнта тепловіддачі по колу труби після другого ряду з пластинчастими напрямними з кутом нахилу $\alpha=45^\circ$.

Полярна система координат. Полярний радіус – число Nu , полярний кут в градусах з відліком за годинниковою стрілкою. 1 - $Re = 11100$, 2 - $Re = 17600$, 3 - $Re = 32600$, 4 - $Re = 52300$ [41]

Полярний радіус представлений в масштабі числа Нуссельта Nu , безпосередньо полярний кут відраховується від лобової точки (0°) напрямки потоку на поперечну трубу і далі за годинниковою стрілкою. Перше значення профілю числа Nu навколо труби відповідає значенню числа Рейнольдс 11500.

Друге значення числа $Re = 17600$ відповідає критерію Нуссельта $Nu = 125$ у лобовій точці в діапазоні по куту $\pm 120^\circ$ у кормовій частині труби значення $Nu = 150$ з двох сторін по кутку $\pm 100^\circ$. Значення критерію $Nu = 30$ розташовується з двох бічних симетричних сторін на поверхні труби кути $\pm 70^\circ$ до потоку відповідно з двох симетричних сторін.

Застосування похилих пластин періодично спрямовують половину потоку на бічну поверхню кожної труби збільшує коефіцієнт тепловіддачі до $Nu = 50$ у зоні кута 100° і до цієї величини додається теплове випромінювання (до 7 - 8%) від сталевого нагрітого зовнішнього листа верхньої стінки каналу закранного газоходу. Тому наведене у формулі Nu визначення коефіцієнта тепловіддачі враховує збільшення теплообміну за рахунок зазначених двох ефектів у дослідженому каналі. [42].

Наступним етапом розглядається (інтегральна) сумарна площа обмеженої поверхні асиметричним щодо осі потоку профілем критерію Nu відповідного числа $Re = 11500$. При цьому фізичні параметри потоку продуктів згоряння з температурою $t_{cp} = 200^\circ C$, $\rho = 0,748 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 1,097 \text{ кДж/(кг}\times^\circ\text{C)}$, $\lambda = 4,01 \times 10^2 \text{ Вт/(м}\times^\circ\text{C)}$, $\nu = 32,8 \text{ м}^2/\text{с}$, $Pr_{pid} = 0,67$, і відповідно за тієї ж температури гаряче повітря з фізичними параметрами: $t_{cp} = 200^\circ C$, $\rho =$

$0,746 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 1,026 \text{ кДж/(кг} \times \text{°C)}$, $\lambda = 3,93 \times 10^2 \text{ Вт/(м} \times \text{°C)}$, $\nu = 34,85 \text{ м}^2 / \text{с та}$
 $Pr_{pid} = 0,68$.

Після визначення сумарної площі поверхні профілю Nu по формулою при $Re = 11500$ розраховується коефіцієнт тепловіддачі віднесений тільки до теплообмінної поверхні кожної поперечно обтічної труби.

$$\alpha = (\lambda \times Nu) / d,$$

В результаті від середнього коефіцієнта тепловіддачі, отриманого за формулою Nu при $Re = 11500$ віднімається сумарний коефіцієнт тепловіддачі поперечно обтічних труб і десяти труб розміщених у нижній цільнозварній панелі з мембранами.

Для каналу заекранного газоходу утвореного з одного боку цільнозварною трубною панеллю, з іншого боку теплоізолюваною панеллю, а по центру одним поздовжнім рядом утвореним з десяти труб із поперечним обтіканням літературні дані з гідравлічного опору та розрахункова формула для коефіцієнта гідравлічного опору:

$$\xi = 0,24 \cdot Re^{-0,18}$$

Вплив торцевих бокових стінок каналу заекранного газоходу враховано при дослідження коефіцієнта тепловіддачі α . Для неізотермічних умов, при температурному факторі $\alpha = T_i / T_{ст} = 0,66 \div 0,73$ коефіцієнт гідравлічного опору для всіх досліджених моделей каналів визначається за формулою ξ наведеною вище, приймаючи теплофізичні властивості за середньою температурою потоку у конвективному каналі заекранного газоходу. [43]. З гідродинамічної аналогії, яка дотримується для досліджених каналів за відомим співвідношенням, що зв'язує тепловіддачу і коефіцієнт опору при $Re > 104$ отримано формулу для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі α (Nu) у каналах заекранного газоходу, утворених із цільнозварних трубних панелей та поперечних труб з випромінювачами, представлений на рис.2.1:

$$Nu = 0,035 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}.$$

Ширина мембрани в трубній панелі каналу розраховувалася за максимальним тепловим потоком з сторони топки над палаючим шаром.

Мембрани розміщувалися в діаметральній площині труб і визначали відносний розмір поздовжнього кроку труб панелі (екранів). Гідродинаміка потоку при поперечному обтіканні цільнозварних трубних панелей та поперечних труб з тепловими випромінювачами якісно нагадує періодичне обтікання шахового пучка труб із невеликою кількістю труб у поперечному ряду. При цьому періодично утворені вихори за кожною наступною трубою в одному поперечному ряді з верхнім тепловим випромінювачем збільшують тепловіддачу.

Проведено зіставлення щодо ефективності теплообміну технічно гладкої труби, шахових гладкотрубних пакетів труб та каналу заекранного газоходу з поперечним обтіканням цільнозварних трубних панелей та поперечних труб із верхніми тепловими випромінювачами. Поперечне обтікання гладкотрубних шахових пакетів труб і поперечне обтікання в каналі екранного газоходу з цільнозварними трубними панелями та поперечними трубами з тепловими випромінювачами між собою за тепловою ефективністю порівнювалися методом наведеному у роботі [47,48].

Оптимізація та вибір геометрії каналу за екранного газоходу з поперечним обтіканням цільнозварних трубних панелей та поперечних труб з тепловими випромінювачами для конструкцій конвективних частин водогрійних котлів серії КСВр на твердому паливі дозволив уточнити розрахункові формули для наведеного коефіцієнта тепловіддачі та коефіцієнта опору використовуваного в тепловому розрахунку для всієї лінійки водогрійних котлів.

3.3 Висновки за розділу 3.

1. Проведено докладний аналізи з дослідження гідравлічного опору та теплообміну в конвективному каналі за екранного газоходу вугільного

- котла за невеликих швидкостей газового потоку від 2,5 м/с до 8 м/с та значеннях критерію Рейнольдса від 5000 до 11500.
2. Проаналізовані значення швидкості потоку в каналі за екранного газоходу відповідають малим та середнім навантаженням по тепловій потужності водогрійного котла при спалюванні вугілля в тонкому шарі.
 3. За результатами аналізу теоретичних досліджень гідродинаміки та теплообміну в каналах заекранного газоходу багатьох авторів у розглянутих роботах зазначені діапазони швидкості газового потоку в межах від 2,5 м/с до 8 м/с формули для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору $\xi = f(Re)$ та теплообміну $Nu = f(Re, Pr)$ які збіглися з відомими роботами це дозволяє зробити більш точний тепловий розрахунок конвективної частини із каналом заекранного газоходу водогрійного котла серії КСВр.
 4. За результатами досліджень гідродинаміки та теплообміну каналу заекранного газоходу запропоновано геометричні параметри конвективної частини водогрійних котлів серії КСВр від 100 кВт до 1,16 МВт для роботи на твердому паливі з новими конвективними каналами заекранного газоходу.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ВПРОВАДЖЕННЮ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ В ГАЗОХОДАХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ

4.1 Модернізація вугільного водогрійного котла КСВр з каналом заекранного газоходу та колосниковими ґратами.

Відсоток зносу водогрійних котлів середньої потужності суттєво зріс і фактично становив 65 – 70 %. Нині в Україні є потреба у високоефективних твердопаливних водогрійних котлах малої теплової продуктивності до 3,16 МВт.

У зв'язку з об'єктивними обставинами, що склалися, виникла необхідність у розробці нових ефективних вугільних водогрійних котлів. Потрібна розробка проектів для нових стандартів не тільки для нових водогрійних котлів, але й ефективних способів спалювання твердого палива із суттєвим зниженням викидів парникових газів та шкідливих викидів у повітря. І якщо проблемі підвищення ефективності потужних водогрійних котлів присвячено досить багато робіт та розробок [46-50], то робіт з підвищення ефективності малих водогрійних котлів, особливо працюючих на твердому паливі недостатньо [48, 43-45]. Тому поставленій проблемі

передував аналіз стану всього парку твердопаливних водогрійних котлів малої потужності.

У цьому розділі магістерській роботі наведено модернізацію конструкції існуючого твердопаливного водогрійного котла малої потужності серії КСВР від 150 кВт до 3,15 МВт з шаровою ручною та механічною топкою для роботи на вугіллі. Конвективна поверхня нагріву котла утворена каналом екранного газоходу з поперечним обтіканням з одного боку цільнозварної трубної панелі та однорядних поперечних труб, а з зовнішнього боку тепловим випромінювачем. Оптимальна геометрія каналу за екранним газоходом з поперечним обтіканням однорядних поперечних труб та панелі оптимізована.

Горизонтальне розташування П – подібних труб з мембранами, утворюють собою вертикальні єдині цільнозварні два бічних і тильний екрани з поперечними трубами та П – подібним зовнішнім випромінюючим екраном теплоізолюваний із зовнішнього боку. У цій основні переваги поперечного обтікання газами цільнозварних трубних панелей і поперечних труб розширені та реалізовані комплексно з тепловим випромінювачем. Конвективна поверхня у формі каналу за екранного газоходу в новій конструкції вугільного котла малої потужності розміщена відразу за топковим вертикальним цільнозварним екраном по П-подібному периметру топки. Схема вугільного шарового водогрійного котла малої теплової потужності до 1,0 МВт з конвективною частиною у вигляді екранного газоходу з поперечним обтіканням цільнозварної трубної панелі та поперечних труб з тепловими випромінювачами дозволяє виділити основні переваги конструкції котла щодо широко відомих та поширених конструкцій водогрійних котлів. Заходи які пропонуються по модернізації котла нададуть такі позитивні ефекти:

1. Збільшення теплової ефективності модернізованого котла, яка забезпечується включенням у теплообмін зворотної сторони поверхні

цільнозварної трубної панелі за екранного газоходу з доведенням поверхні труб працюючих в активному теплообміні під тиском до 90% (на відміну від 75 % у не модернізованій версії котлах).

2. Зниження викидів парникових газів та шкідливих викидів у атмосферу при спалюванні вугілля в тонкому шарі зі збільшенням ККД та зниження витрати палива.

3. Оптимізація гідравлічної схеми циркуляції котла КСВр з збільшенням швидкості води навколо ядра горіння над шаром у зоні максимального тепловиділення та зниження швидкості води в трубах по ходу димових газів у каналі за екранного газоходу для водогрійних котлів потужністю до 3,15 МВт.

4. Можливість широкого поширення твердопаливних сталевих водогрійних котлів малої потужності зі зниженими викидами парникових газів та тривалою практикою ефективною експлуатації.

У конструкціях модернізованих водогрійних котлів КСВр може бути вирішено питання щодо варіювання співвідношень між площею колосникових ґрат з тонким шаром, а також співвідношень радіаційної та конвективної поверхонь нагрівання, залежно від спалюваного типу вугілля та теплової потужності котла з ручними шаровими ґратами.

Співвідношення відповідають усередненим по всій поверхні нагрівання котла з тепловою напругою екранів від 22 кВт/м² та до 35 кВт/м² для водогрійних котлів серії КСВр тепловою потужністю від 0,15 МВт до 3,15 МВт.

Пропоновані рекомендації по модернізації водогрійних котлів ґрунтувалася на експериментальних дослідженнях у каналі заекранного газоходу. Вибір геометрії цільнозварних трубних панелей та крок поперечних труб утворюють за екранний газохід уточнювався розрахунковими формулами коефіцієнта опору та за коефіцієнтом тепловіддачі.

Рекомендації по модернізації конструкції котла пропонуємо реалізувати рух потоку води спочатку в топкових екранних трубах фронту та стелі і далі по конвективній частині за екранного газоходу з метою збереження постійного наростаючого температурного тиску по всьому тракту котла. Гідравлічна схема при цьому буде працювати наступним чином.

Вода в котел надходить у фронтний верхній та верхній бічний колектор з фронтового боку та по правому верхньому бічному колектору подається в праву частину верхнього тильного колектора до середньої перегородки та потрапляє у праву половину труб стельового екрану. Правою половиною труб стельового екрану потік води опускається в праву половину труб цільнозварного фронтового екрану та по правій колекторній стійці фронтних дверей опускається до правого боку нижнього фронтового колектора. Далі потік води перепускається по нижньому фронтовому колектору і подається в другу ліву половину труб цільнозварного фронтового екрану. Піднімаючись по лівій колекторній фронтній стійці дверцята та лівої половини труб цільнозварного фронтового і далі по лівій половині труб суцільнозварювального стельового екрану потрапляє в ліву половину верхнього тильного колектора. З якого по лівому верхньому бічному колектору потік води подається у верхню частину фронтового лівого вертикального внутрішнього колектора до горизонтальної перегородки. Далі потік води схеми П - подібними горизонтальними трубами цільнозварної панелі обходить по лівій бічній, тильній та правій бічній частині потрапляє у верхню частину фронтового правого вертикального внутрішнього колектора до горизонтальної перегородки. Опустившись униз нижче семи труб потік води потрапляє у п'ять П – подібних труб за якими обходить по правій бічній, тильній та лівій бічній частині потрапляє в нижню частину фронтового лівого вертикального внутрішнього колектора та опускаючись нижче п'яти труб, вже по трьох нижніх трубах обходить по лівій бічній, тильній та правій бічній частині потрапляє в нижню частину фронтового вертикального внутрішнього колектора. З внутрішнього фронтового правого

колектора потік води перепускається у фронтний правий вертикальний зовнішній колектор. Далі із зовнішнього фронтного правого вертикального колектора по дев'яти трубах потік води обходить по правій бічній, тильній та лівій бічних частин труб зовнішнього П – подібного екрана і потрапляє в лівий фронтний зовнішній вертикальний колектор, в якому піднімається і по шести трубах зовнішнього П- подібного екрану обходить по лівій бічній, тильній та правій бічній зовнішній частині потрапляє у верхню частину правого фронтного зовнішнього вертикального колектору. З верхньої частини правого фронтного зовнішнього вертикального колектору вода виводиться з котла в мережу.

В результаті збалансована гідравлічна схема водогрійного котла вибиралася такою, що швидкість води на кожній ділянці елемента поверхні нагріву в топці вибиралася залежно від теплової напруги зони. Навколо теплонапруженої зони яскравого факелу палаючого шару вугілля швидкість води буде максимальною і відповідатиме сприйнятому тепловому потоку. Далі в міру зниження теплової напруги конвективної частини за екранного газоходу швидкість води за рахунок збільшення числа труб у кожному ході знижуватиметься і далі виводилася до мережі.

Основною перевагою конструктивної схеми водогрійного котла є можливість вільного теплового розширення вгору цільнозварних екранів топки та конвективного за екранного газоходу в межах котла. Ціліснозварні трубні панелі та поперечні труби другого ряду, наприклад - по п'ять, сім або дев'ять труб не були пов'язані жорстко між собою. Конструкція водогрійного котла КСВр несприйнятлива до роботи в змінному температурному режимі експлуатації – зупинки та пуски або часті зміни навантаження котла не впливають на втому металу труб.

Зменшення товщини палаючого шару як для рядових, так і для сіяного вугілля для водогрійних котлів КСВр-0,43 з тонким шаром тепловою продуктивністю від 0,2 МВт до 3,15 МВт дозволить істотно знизити викиди вуглекислоти CO_2 та шкідливі токсичні викиди у повітря. Цю платформу та

технологію спалювання вугілля в тонкому шарі можна в майбутньому поширювати і на твердопаливні водогрійні котли з шаровою механічною топкою з ланцюговими ґратами потужністю до 11,6 МВт, 23,2 МВт та 35 МВт котлів серії КВ-ТС.

Алгоритм розробки нових конструкцій водогрійних котлів включав основну дослідницьку частину обсягу робіт з експериментів у каналі заекранного газоходу з поперечним обтіканням труб панелей та поперечних труб з тепловими випромінювачами в діапазоні малих швидкостей газів від 3 м/с до 8 м/с.

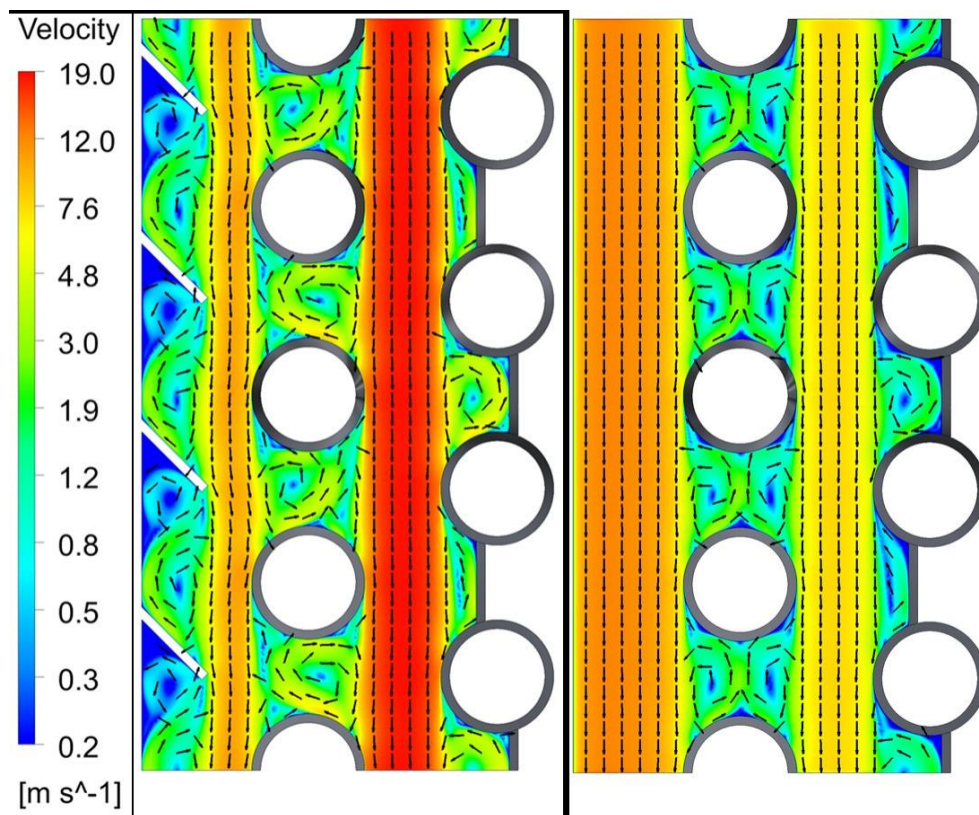


Рис.4.1 Розподілення швидкості на ділянці газоходу

Зумовлювався такий швидкісний режим роботою водогрійного котла з тонким шаром з мінімальним виносом дрібних частинок і відповідно мінімальними заносами поверхонь поперечних труб за екранного газоходу. Експериментальний вибір поперечного перерізу каналу заекранного газоходу

та отримання розрахункових формул для ξ та α (Nu) дозволили успішно реалізувати працюючу конструкцію водогрійного котла з такою поверхнею.

Відмінність нових конструкцій сталевих водогрійних котлів заекраним газоходом полягає в тому, що вони мають призматичну топку. Для вугільних котлів із шаровими топками продукти згоряння потрапляють у верхню частину топки і піднімаються над палаючим шаром і потрапляють за екранний газохід зверху в два бічних і один тильний екран.

Екранами топки є цільнозварні трубні панелі, зварені з труб та мембран у П – подібної формі. У верхній частині топки внутрішнього цільнозварного П – подібного екрану дві труби не проварені між собою та утворюють фестон для входу газів зверху заекранний газохід по периметру крім фронту. Після фестону топкові газу потрапляють у П – подібний екранний газохід з поперечним обтіканням цільнозварної панелі та другий поперечний ряд труб П – подібної форми з упорами, а із зовнішнього боку закритий теплоізолюваним тепловим випромінювачем. Таким чином утворена конвективна частина котла, є елементом шахового пакета труб у якій другий ряд поперечних П – подібних труб виконані зі зміщенням на половину кроку порівняно з розміщенням труб внутрішнього цільнозварного П – подібного екрану. Труби Г подібного фронтового та стельового цільнозварних екранів разом з горизонтальним цільнозварним П - подібним екраном утворюють топку котла. При цьому навколо П – подібного периметра другого ряду труб з упорами на такій же відстані встановлюється теплоізолюваний герметичний тепловий випромінювач. Конструктивна схема всієї лінійки твердопаливних водогрійних котлів КСВр від 0,2 до 3,14 МВт передбачає вільне теплове розширення цільнозварних трубних панелей всіх елементів труб вгору.

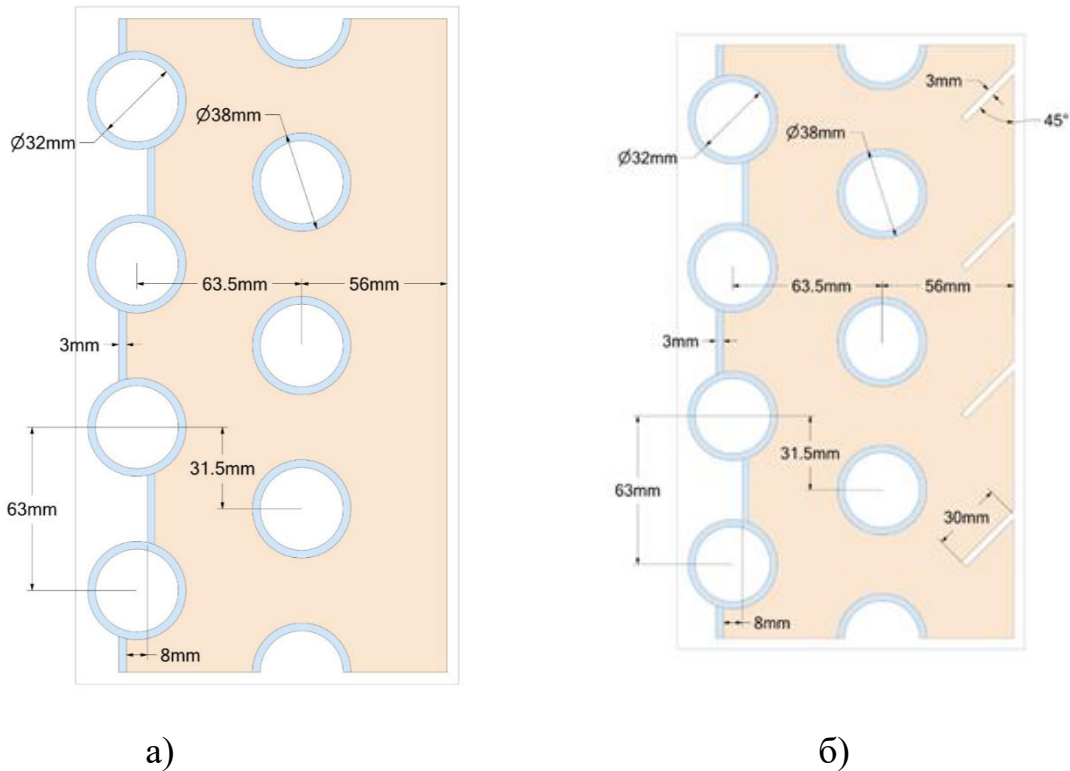


Рис.4.2 Ділянка каналу заекранного газоходу водогрійного котла КСВр-0,43 а) без напрямних пластин; б) з напрямними пластинами.

4.2 Опис конструкції колосникових ґрат для спалювання в тонкому шарі зі зниженими викидами CO_2 та інших токсичних елементів

Істотно знизити викиди вуглекислоти CO_2 та шкідливих речовин при спалюванні бурого вугілля можна застосувавши розробку нової технології спалювання з тонким шаром до 60 мм на колосникових ґратах з ручним обслуговуванням. При цьому плавно знижується і регульована подача повітря під ґрати з тонким шаром вугілля, що дозволяє збільшити ефективність при тривалому вигоранні коксового залишку вугілля за рахунок збільшення тривалості горіння коксу при природній тязі. При цьому змінюється специфіка теплообміну в топковій камері та швидкісний режим обтікання у конвективному заекранному газоході. Зниження хімічного q_3 та механічного q_4 недопалу, а також використання фізичного тепла шлаку та

провалу для підігріву повітря під колосниковими ґратами збільшує ККД брутто водогрійного котла.

Поліпшення екологічних показників забезпечується суттєвим зниженням викидів вуглекислоти та окису вуглецю в атмосферу через збільшення часу горіння коксу у шарі.

У роботі рекомендуємо застосовувати конструкцію колосникових ґрат повітря в яких подається східчасто. Спочатку, з моменту подачі свіжої порції палива включається подача вторинного підігрітого повітря за часом після 10 – 15 хвилин від початку завантаження свіжої порції твердого палива на шар.

Далі після вигорання основної частини летких та початком горіння коксу отвори подачі вторинного повітря поступово заглиблюється в шар усіх отворів разом із патрубками подачі. Поглиблення отворів вторинного повітря відбувалося до рівня верхніх країв конусних порожнистих відливів колосникових ґрат для ступінчастого спалювання вугілля. Одночасно по мірі вигорання коксового залишку знижувався витрата вторинного підігрітого повітря до 5 - 10% від загальної витрати до періоду повного догорання коксового залишку на колосникових ґратах. Подача основного повітря під колосникові ґрати і вторинного підігрітого повітря безпосередньо в зону під поверхню верхнього шару палива, що горить, плавно зменшувалася. При цьому можна змінювати співвідношення подачі кількості основного повітря під колосникові ґрати і вторинного підігрітого повітря безпосередньо в зону під поверхню. Також зберігається можливість регулювати глибину подачі вторинного підігрітого повітря під верхню межу палаючого шару вугілля. Подача попередньо підігрітого вторинного повітря у верхню зону з інтенсивним процесом газифікації в 10 – 30 мм від верхньої межі палаючого шару вугілля, забезпечує ефективне горіння з якісним та кількісним виходом газів безпосередньо над шаром.

Подача вторинного дутьового повітря проводиться з герметичного, призматичного газового коробу. Герметичний короб містить фронтону та тильну порожнисті балки з торцевими заглушками з'єднані з поздовжніми

порожніми балками з патрубками вторинного гострого дуття. Чавунні колосники забезпечені довгастими овальними отворами для основного дуття і для вторинного дуття виступають вгору конусні порожнисті відливи з отворами.

Плаваючий лист встановлений на пружинах і з'єднується несучими штоки з балками. Вхідний фронтальний патрубок подачі вторинного повітря з'єднаний з порожнистими балками послідовно.

Герметичний короб під колосниками може опускатися або підніматися разом із патрубками подачі вторинного повітря. Висота підйому залежить від ваги провалу та золи на плаваючому листі. Подання основного повітря забезпечується по вхідному коробі, розміщеному по центру фронтальної частини газоходу. Зліва від центру короба розміщені дверцята зольника. Вся верхня частина внутрішніх бокових стінок короба по всьому периметру є опорами нижніх колекторів котла. Під колосниковими ґратами труби з'єднані в одну систему з прямокутними трубами, на яких розміщуються патрубки підігрітого повітря вторинного дуття. Плаваючий лист розміщується в порожнині загального короба газоходу рис. 4.3.

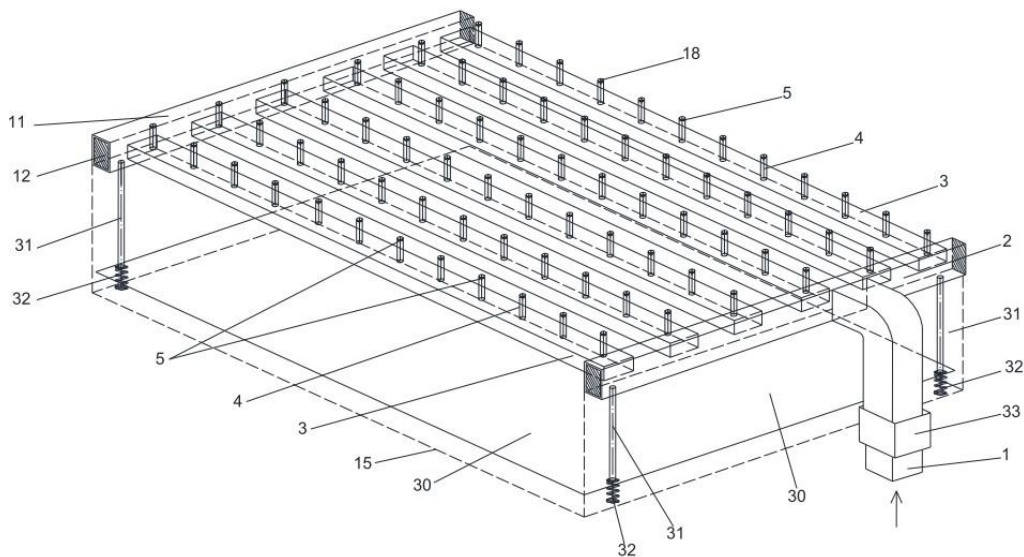


Рис.4.3 Пристрій подачі вторинного повітря з прямокутними трубами, без колосників та балок.

1-фронтний патрубок подачі вторинного повітря; 2-фронтна прямокутна труба; 3-подовжні прямокутні труби; 4-патрубок вторинного повітря із жаростійкої сталі; 5-отвори вторинного дуття під поверхню верхнього шару; 11-тильна прямокутна труба; 12-торцева заглушка фронтної та тильної прямокутних труб; 15-загальний короб газоходу; 18-заклушка патрубку вторинного дуття; 30-нижній плаваючий лист усередині коробки газоходу; 31-несучий шток нижнього плаваючого листа в коробку газоходу; 32-пружина під нижнім плаваючим листом; 33-ковзна муфта із внутрішньою діафрагмою.

Короб газоходу містить фронтний патрубок подачі основного повітря, фронтні дверцята зольника, поперечні чавунні колосникові балки з жаростійкого чавуну. На балках вільно встановлені чавунні колосники з конусними порожнистими відливами з наскрізними отворами в колосниках подачі основного дутьового повітря у відсотковому відношенні сумарного живого перерізу отворів до загальної площі колосникових ґрат від 8 % і до 20 % залежно від родовища твердого палива, що спалюється.

Сумарний живий переріз отворів чавунних колосників разом з поперечним перерізом всіх кільцевих зазорів між отворами конусних порожнистих відливів та зовнішнім діаметром патрубків вторинного дуття та зазорів між колосниками для кускового торфу чи аналогічних палив можуть складати від 25 до 30% від загальної площі колосникових ґрат. Для кам'яного та бурого вугілля, а також антрацитів відношення живого перерізу коливається в межах від 8 до 20 %, через яке пропускається під шар твердого палива - основна кількість повітря. У всі патрубки подається підігріте вторинне повітря безпосередньо під поверхню шару від 10 до 20% зі швидкістю від 5 до 15 м/с з основної кількості повітря, необхідного для повного згоряння конкретного твердого палива в шарі, кожен отвір на глибині від 10 до 30 мм від верхньої межі шару.

Зазначене відсоткове співвідношення отворів у всіх без винятку випадків спалювання вугілля у шарі, як показує практика спалювання, призводить до дефіциту кисню над усім шаром вугілля, що горить.

Конструктивно отвори патрубків вторинного дуття можуть бути на глибині від 10 до 30 мм під верхньою межею поверхні шару вугілля.

Подача вторинного підігрітого повітря до цієї зони від 10 до 20% від основного повітря може забезпечити подачу під колосникові грати в отвори патрубків вторинного повітря зі швидкістю від 5 м/с до 15 м/с горизонтально (рис 4.4.)

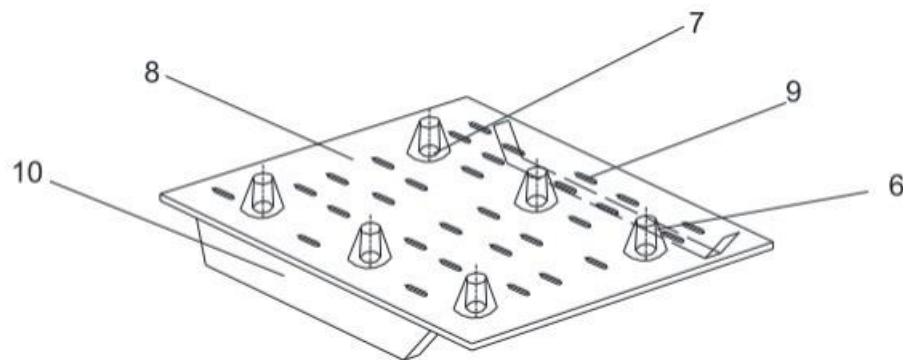


Рис.4.4. Плоский колосник з конусними порожнистими відливами, ребрами жорсткості та плоскими отворами

6-конусний порожнистий відлив колосникових грат; 7-наскрізний отвір у конусній підлозі відливу; 8-чавунний колосник із жаростійкого ЖХЧ-17; 9-щілинні отвори в чавунному колоснику для основного дуття; 10-ребра жорсткості чавунних колосників;

Оптимальна кількість повітря, що подається горизонтально по всій поверхні під поверхню шару забезпечує ефективне спалювання вугілля, при мінімізації викидів CO_2 . З догоранням коксу товщина шару зменшується та кількість вторинного повітря зменшується до 10%. Швидкість вторинного дуття знижується до 5 м/с. Глибина отворів патрубків вторинного дуття під верхній шар вугілля в процесі опускання нижнього плаваючого листа з несучими штоками теж знижується. Стиснення пружини з одночасним

звуженням ковзної муфти на фронтальному патрубку подача вторинного повітря зменшується.

В експлуатації, колосникові ґрати з пристроєм подачі вторинного повітря можуть працювати зі зміною режиму подачі основного повітря під колосникові ґрати і вторинного повітря безпосередньо в зону під поверхню верхнього шару палива, що горить. Залежно від моменту закидання свіжої порції вугілля та надалі всього періоду горіння можна змінювати співвідношення подачі кількості основного повітря під колосникові ґрати та кількість вторинного підігрітого повітря безпосередньо в зону під поверхню палаючого шару. При цьому можна регулювати глибину подачі вторинного підігрітого повітря під верхню межу шару вугілля, що горить, і рівень викидів CO_2 і CO та інших токсичних газів.

Пропонований спосіб подачі вторинного дуття горизонтально з попереднім підігрітим повітрям у верхню зону з інтенсивним процесом газифікації в 10 – 30 мм від верхньої межі палаючого шару вугілля, забезпечує ефективне горіння з суттєвим якісним та кількісним виходом газів безпосередньо над шаром обсягом топки.

При зміні теплового навантаження котла та зміні витрати вугілля конструкція колосникових ґрат з пристроєм подачі вторинного повітря забезпечить ефективне спалювання різних видів вугілля за рахунок зміни співвідношення витрат основного повітря під колосникові ґрати та вторинного повітря під верхню межу шару вугілля, що горить. При цьому забезпечується більш глибоке регулювання теплової потужності котла або теплового генератора в межах від 15% до 120% від номінальної потужності.

Подача вторинного повітря безпосередньо під поверхню шару вугілля, що горить, забезпечується з витратою від 10 до 20 % від загальної витрати під колосникові ґрати. Регулювання рівномірного подання загальної кількості повітря під колосники обумовлено відсутністю кисню у зоні над палаючим шаром за будь-якої товщини шару. Тому у новій конструкції колосникових ґрат варіювання глибини занурення патрубків під поверхню

шару від 10 мм і як максимум до 30 мм забезпечує високу якість допалювання летких та підвищує ефективність спалювання коксу практично всіх типів вугілля, як кам'яних з малим виходом летких, так і зволоженого бурого вугілля.

Конструкція колосникових ґрат з пристроєм подачі вторинного дуття, забезпечує ефективність спалювання рядового вугілля при ступінчастому спалювання твердого палива в палаючому шарі. Подання вторинного дуття та відповідно кількість вторинного повітря знижується, швидкість в отворах падає до 5 м/с під поверхнею шару глибині від 10 мм та більше. При цьому практично повністю забезпечується повітрям верхня відновна зона шару. Продовжує підтримуватись високий рівень температур, що забезпечує прискорення хімічних реакцій у цій частині верхньої зони поверхні шару.

Діапазон роботи колосникових ґрат зі зміною співвідношення витрати основного та вторинного повітря під верхню межу поверхні шару, де недостатньо окислювача, дозволяє організувати двоступінчасте та ефективне спалювання в шарі цілого ряду різних вугілля. Відмінність традиційних класичних схем колосникових ґрат з водогрійними та паровими котлами, де все повітря подається під колосникові ґрати полягає в тому, що свідомо в таких топках над шаром відбувається постійна нестача кисню. Тому реалізувати ефективне спалювання вугілля без форсування дуття неможливо. Це досягається тільки при спалюванні вугілля за пропонуваним способом і в

пропонуваній конструкції колосникових ґрат. У запропонуваній конструкції колосникових ґрат з пристроєм подачі вторинного дуття під поверхню шару, передбачається суміщення двоступінчастого спалювання з подачею підігрітого вторинного повітря під верхню межу поверхні шару зі зміною витрати та глибини подачі повітря. Причому подача вторинного повітря залежить від фаз горіння вугілля від початку завантаження та до тривалого вигорання коксу вугілля на колосникових ґратах з регулюванням. При цьому

практично усувається поява не нормованих викидів по CO та CO₂ під час роботи водогрійних котлів на різних вугіллях.

Застосування системи з плаваючим днищем усередині короба газоходу, з системою труб і з патрубками вторинного повітря, що охолоджуються з зовнішнього боку головним повітрям з-під колосників, дає можливість персоналу змінювати оптимальну висоту подачі вторинного повітря під верхню межу поверхні шару.

У реальних умовах експлуатації колосникових грат із плаваючим листом і переміщенням патрубків вторинного дуття в котельнях призводить до ускладнення в експлуатації та збільшення трудовитрат на ремонт та додаткової витрати електроенергії на власні потреби.

Переваги запропонованих колосникових грат щодо існуючих конструкцій із системою подачі горизонтально вторинного повітря, що підігрівається, від 10 до 20% від загальної витрати повітря під верхню кромку палаючого шару дозволяє організувати двоступінчасте спалювання вугілля у шарі. При цьому покращується спалювання різних сортів вугілля, знижуються шкідливі викиди в атмосферу, підвищується надійність та ефективність котла.

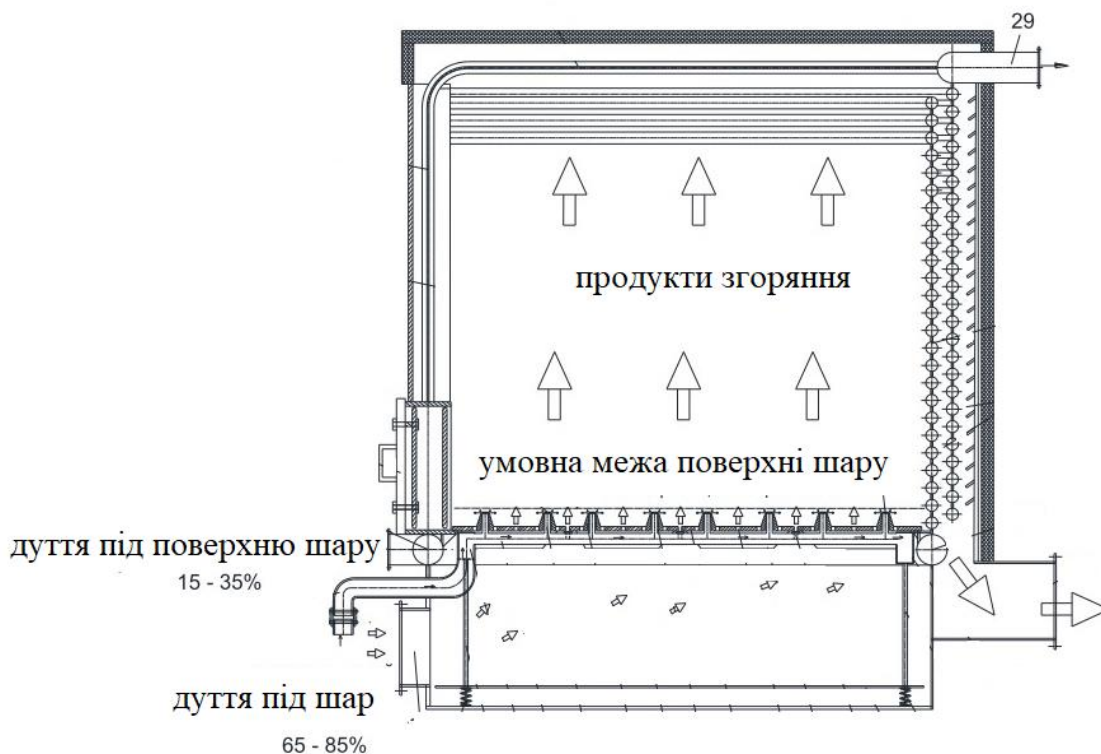


Рис. 4.5 Поздовжній переріз колосникових ґрат із системою подачі вторинного та основного повітря під колосники у водогрійному котлі.

У реальних умовах експлуатації колосникових ґрат із плаваючим днищем коробом і переміщенням патрубків вторинного дугтя до котелень не призводить до ускладнення в експлуатації та збільшення трудовитрат на ремонт та додаткові витрати електроенергії на власні потреби не потрібні.

4.3 Висновки по розділу 4.

1. З моменту закидання свіжої порції вугілля і подальшому процесі горіння змінюється співвідношення подачі кількості основного повітря під колосникові ґрати та кількість вторинного повітря під поверхню шару. Глибина подавання вторинного повітря під верхній шар вугілля знижується.

2. Основною перевагою розглянутої конструктивної схеми водогрійного котла є можливість вільного теплового розширення вгору

цільозварних екранів топки та конвективного за екранного газоходу в межах котла.

3. Істотно знизити викиди вуглекислоти CO_2 та шкідливих речовин при спалюванні бурого вугілля можна застосувавши розробку нової технології спалювання з тонким шаром до 60 мм на колосникових ґратах з ручним обслуговуванням. При цьому плавно знижується і регульована подача повітря під ґрати з тонким шаром вугілля, що дозволяє збільшити ефективність при тривалому вигоранні коксового залишку вугілля за рахунок збільшення тривалості горіння коксу при природній тязі.

4. Поліпшення екологічних показників забезпечується суттєвим зниженням викидів вуглекислоти та окису вуглецю в атмосферу через збільшення часу горіння коксу у шарі.

5. У роботі рекомендуємо застосовувати конструкцію колосникових ґрат повітря в яких подається східчасто.

6. Подача вторинного повітря залежить від фаз горіння вугілля від початку завантаження та до тривалого вигорання коксу вугілля на колосникових ґратах з регулюванням. При цьому практично усувається поява не нормованих викидів по CO та CO_2 під час роботи водогрійних котлів на різних вугіллях.

7. Переваги запропонованих колосникових ґрат щодо існуючих конструкцій із системою подачі горизонтально вторинного повітря, що підігрівається, від 10 до 20% від загальної витрати повітря під верхню кромку палаючого шару дозволяє організувати двоступінчасте спалювання вугілля у шарі. При цьому покращується спалювання різних сортів вугілля, знижуються шкідливі викиди в атмосферу, підвищується надійність та ефективність котла.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень методів інтенсифікації теплообміну в газоходах водогрійних котлів отримано нове вирішення актуального наукового завдання. На основі цього можна зробити наступні висновки:

1. Експлуатаційне значення ККД водогрійних котлів КСВр із заекраним газоходом досягали 82%. На відміну від поширених водогрійних циліндрових котлів форми із жаровими трубами ККД яких не перевищував 55 – 60 %.

2. Інтенсифікацію теплообміну в елементах котла можна проводити двома шляхами: встановленням інтенсифікаторів теплообміну в топці або конвективному газоході.

3. Способи інтенсифікації теплообміну у конвективних елементах водогрійних котлів відрізняються великою різноманітністю: застосування перфорованих поверхонь, багат шарових конвективних поверхонь, ребра, а також вставок різної конфігурації.

4. Інтенсифікацію теплообміну в елементах котла можна проводити шляхом: встановленням інтенсифікаторів теплообміну в топці або жаротрубному елементі.

5. Найбільш широко застосовуються в теплоенергетиці методи поперечного обтікання трубних поверхонь нагріву, таких як конвективні пакети труб з шаховим розташуванням у конструкціях пароперегрівачів, водяних економайзерів і трубчастих повітропідігрівачів достатньо ефективні з погляду високих значень коефіцієнта тепловіддачі.

6. Встановлення напрямних пластин призводить до: підтискання потоку в каналі між зовнішньою стінкою котла та трубок поруч; перерозподілу поля швидкості з перенаправлення більшої частини витрати в канал між рядами трубок; збільшенню швидкості газів в області рядів трубок; збільшенню гідравлічного опору ділянки газоходу.

7. Порівняння розподілу температури на ділянці газоходу показує, що: встановлення направляючих пластин призводить до інтенсифікації теплообміну між газом та трубками; локальному зниженню температури в каналі між зовнішнім екраном та зовнішньою стінкою котла за рахунок зміни течії напрямними пластинами.

8. Для шарового процесу спалювання оцінки показують приблизно п'ятдесят кратну перевагу або п'ятдесятикратний запас наскільки можна інтенсифікувати горіння твердого палива в шарі в порівнянні з граничними значеннями при факельному спалюванні вугільного пилу і відповідно кратна перевага зі скорочення викидів парникових газів – декарбонізації та шкідливих речовин.

9. При роботі на рядовому вугіллі з тонким шаром вугілля, що горить на колосникових грат і ручним обслуговуванням водогрійні котли КСВр показали суттєву економію вугілля за опалювальний період, а також зниження парникових газів та шкідливих викидів в атмосферу.

10. Проведено докладний аналізи з дослідження гідравлічного опору та теплообміну в конвективному каналі за екранного газоходу вугільного котла за невеликих швидкостей газового потоку від 2,5 м/с до 8 м/с та значеннях критерію Рейнольдса від 5000 до 11500.

11. За результатами аналізу теоретичних досліджень гідродинаміки та теплообміну в каналах заекранного газоходу багатьох авторів у розглянутих роботах зазначені діапазони швидкості газового потоку в межах від 2,5 м/с до 8 м/с формули для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору $\xi = f(Re)$ та теплообміну $Nu = f(Re, Pr)$ які збіглися з відомими роботами це дозволяє зробити більш точний тепловий розрахунок конвективної частини із каналом заекранного газоходу водогрійного котла серії КСВр.

12. За результатами досліджень гідродинаміки та теплообміну каналу заекранного газоходу запропоновано геометричні параметри конвективної частини водогрійних котлів серії КСВр від 100 кВт до 1,16 МВт для роботи на твердому паливі з новими конвективними каналами заекранного газоходу.

13. Основною перевагою розглянутої конструктивної схеми водогрійного котла є можливість вільного теплового розширення вгору цільнозварних екранів топки та конвективного за екранного газоходу в межах котла.

14. Істотно знизити викиди вуглекислоти CO_2 та шкідливих речовин при спалюванні бурого вугілля можна застосувавши розробку нової технології спалювання з тонким шаром до 60 мм на колосникових ґратах з ручним обслуговуванням. При цьому плавно знижується і регульована подача повітря під ґрати з тонким шаром вугілля, що дозволяє збільшити ефективність при тривалому вигоранні коксового залишку вугілля за рахунок збільшення тривалості горіння коксу при природній тязі.

15. Поліпшення екологічних показників забезпечується суттєвим зниженням викидів вуглекислоти та окису вуглецю в атмосферу через збільшення часу горіння коксу у шарі.

16. У роботі рекомендуємо застосовувати конструкцію колосникових ґрат повітря в яких подається східчасто.

17. Подача вторинного повітря залежить від фаз горіння вугілля від початку завантаження та до тривалого вигорання коксу вугілля на колосникових ґратах з регулюванням. При цьому практично усувається поява не нормованих викидів по CO та CO_2 під час роботи водогрійних котлів на різних вугіллях.

18. Переваги запропонованих колосникових ґрат щодо існуючих конструкцій із системою подачі горизонтально вторинного повітря, що підігрівається, від 10 до 20% від загальної витрати повітря під верхню кромку палаючого шару дозволяє організувати двоступінчасте спалювання вугілля у шарі. При цьому покращується спалювання різних сортів вугілля, знижуються шкідливі викиди в атмосферу, підвищується надійність та ефективність котла.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ЗАКОН УКРАЇНИ Про енергетичну ефективність (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2022, № 2, ст.8), Документ 1818-ІХ, чинний, поточна редакція — Редакція від 27.07.2023, підстава - 3220-ІХ.
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>
2. ЗАКОН УКРАЇНИ Про водовідведення та очищення стічних вод. Документ 2887-ІХ, поточна редакція — Прийняття від 12.01.2023.
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2887-20#Text>
3. Енергетична стратегія України на період до 2030 року // Спец. випуск інформаційно-аналітичного бюлетеня. 23 березня 2006 р. – К.: Відомості Мінпаливенерго України. – 2006. – 144 с.
4. Теплова енергетика - нові виклики часу / за заг. ред. П. Омеляновського, Й. Мисака; [упоряд. А. Акімов]. - Л: Українські технології, 2009. - 658 с. - ISBN 978-966-345-194-7.
5. Дослідження процесів теплообміну та аеродинаміки в нових типах оребрених поверхонь для теплообмінних апаратів енергетичного і промислового призначення: звіт про НДР / НТУУ „КПІ”; кер. Є.М. Письменний; ДР № 0107U002087. К., 2009. 159 с
6. Вознюк М. М., Письменний Є. М. Результати роботи теплоутилізаційного обладнання на базі плоскоовальних труб з неповним оребренням. „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”: зб. тез доп. XII міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2014. (м. Київ, 22 – 25.04.2014 р.). Т.1. С. 51.
7. Узагальнений метод розрахунку аеродинамічного опору поперечноомиваних шахових пакетів труб плоскоовального профілю з неповним оребренням / П. І. Багрій. та ін. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2008. №3/5 (33). С. 57 – 61

8. Республіка Казахстан: Отынчиева М.Т., Орумбаев Р.К., Водогрійний котел // Патент РК на изобретение №34827, опубл. в бюл. №1 від 08.01.2021

9. Республіка Казахстан: Аліяров Б.К., Бахтіяр Б.Т., Сейдалієва А.Б., Ходанова Т.В., Кібарін А.А., Кумаргазіна М.Б, Коробков М.С. Спосіб та топка для комбінованого спалювання твердого палива // Патнет РК на винахід №35502, опубл у бюл. №6 від 11.02.2022

10. Спосіб енергозбереження в апараті повітряного охолодження: пат. 110702 Україна: F28D 7/00, F28D 7/06. № и 2016 02427; заявл. 14.03.2016; опубл. 25.10.2016, Бюл. №20. 4 с.

11. Інноваційні розробки університетів і наукових установ МОН України. Т. 2 / Колектив авторів за загальною редакцією М. Стріхи та М. Ільченка. – К.: ТОВ «Мірал», 2018 – 288 с.

12. Блох А.Г., Журавлев Ю.А.. Теплообмін випромінюванням Довідник : 1991р. 432с.

13. Погребенник В., Мельник М., Бойчук М. Екологічний моніторинг: концепції, принципи, системи. Вимірювальна техніка та метрологія. № 65. Київ, 2005. С. 164-171.

14. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23 травня 2017 року (Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 29, ст.315). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>

15. Й.С. Мисак, Я.Ф. Івасик, П.О. Гут, Н.М. Лашковська. Об'єкти теплових електричних станцій. Режим роботи та експлуатації., Львів: НУ «Львівська політехніка», 2007, 256с.

16. Гічов Ю.О. Теплові електростанції і проблеми перетворення енергії. Частина I: Навчальний посібник., Дніпро: НМетАУ, 2017, 59 с.

17. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії: Підручник., Варламов Г. Б., Любчик Г. М., Маляренко В. А., Київ: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2003, 232 с., ISBN 966–622–128–4.

18. Положення про Систему управління охороною праці на підприємствах електроенергетики. Міністерство енергетики та вугільної промисловості. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 9 квітня 2015 р. № 397/26842.

19. Єрмолаєв С. О. Експлуатація енергообладнання та засобів автоматизації в системі АПК : підручник / С. О. Єрмолаєв, В. О. Мунтян, В. Ф. Яковлєв. – К. : Мета, 2003. – 543 с.

20. Ракітін Олексій Юрійович Підвищення ефективності водогрійних котлів малої потужності шляхом встановлення проміжних випромінювачів: Автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук 05.23.03, 2004. 176с.

21. Лавров Д. О. Інтенсифікація конвективного теплообміну: Оцінка енергетичної ефективності процесу теплопередачі конвективних поверхонь; експериментальний вимір теплоаеродинамічних характеристик у шахових пучках високої ефективності Автореф. дис. на здобуття наукового ступеня кандидат технічних наук 05.14.05 -173 Теоретичні основи теплотехніки 1999

22. Демченко В.Г. Способи підвищення ефективності конструкції котлів // Київ, Інститут технічної теплофізики НАН України. – Київ, –2011. - С. 12-16

23. Демченко В.Г. Інтенсифікація теплообміну у топках водогрійних котлів// Інститут технічної теплофізики НАН України. – Київ, – 2012. –123 с.

24. Ісаєв В.В., Кузнєцова І.П. Зниження освіти NOx шляхом інтенсифікації теплообміну в топці // Інж.-фіз. журн. -№3. -1993. -337-340

25. Хужаєв Парвіз Саїдгуфранович Підвищення енергоефективності твердопаливних водогрійних котлів малої потужності установкою рухомих колосникових ґрат. Автореф. дис. на здобуття вченої ступеня кандидат технічних наук: 05.23.03 – Душанбе – 2018 – 20 с.

26. Depew, C. A., and Kramer, T. J., Heat Transfer to Flowing Gas-Solid Mixtures, Adv. Heat Transfer, vol. 9, 1973, pp. 113 – 180.

27. Orumbayev R. K., Bakhtiyar B.T., Umyshev D., Kurmangazina M.B., Akimbek G. A., Otyntchieva M.T, Experimental study of ash wear of heat exchange surfaces of the boiler. Web of Science Jan 2021 in Energy. Cite Score:9.9 Impact Factor: 6.082 Quartile: Q101.03.2020

28. Kulymbaeva M. S. Orumbayev R. K. Seidalieva A. B., Munts V., Otyntchieva M.T, Experimental study of the hydraulic resistance of turbulent flow in the packed bed. Periodico Tche Quimica 17 (36), 2020 г. С. 1212–1224

29. R.K. Orumbayev, Khodanova T.V., Kibarin, A.A, Korobkov, M.S. Efficiency assessment of bi-radiated screens and improved convective set of tubes during the modernization of PTVM-100 tower hot-water boiler based on controlled all-mode mathematic models of boilers on Boiler Designer software // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. - Vol.136. - paper ID 012016

30. Балабеков О.С., Волненко О.О. Про синфазність взаємодії вихорів, що виникають під час обтікання потоком системи тел. – Праці міжнародної конференції «Сучасні проблеми механіки». Алмати, 2001. с. 68-70.

31. <https://www.braitway.com/customized-solutions.html>

32. Дослідження та розробка широкої лінійки перспективних водогрійних котлів тепловою потужністю від 0,63 МВт до 145 МВт на природному газі, рідкому та твердому паливі для власного промислового виробництва в Казахстані»: звіт про НДР (проміжний): НАО «Алматинський університет енергетики та зв'язку імені Гумарбека Даукеева»: рук. Орумбаєв Р.К.; викон.: Кібарін А.А. та ін - Алмати, 2019. -151 с. - № ГР 0118РК00580. - Інв. №0219РК01283.

33. Hans Dieter Baehr, Karl Stephan Heat and Mass Transfer. - Third, revised edition. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. - 762 p.

34. https://issuu.com/vidhyutenergy/docs/discovering_the_benefits_of_solid_fuel_steam_boiler

35. Запорожець А.О., Бабак В.П. Контроль спалювання палива в котлах малої та середньої потужності. Видавництво: ВП "Академперіодика" Київ, 2020. – 128

36. Ночвай В. М. Спосіб регулювання споживання кисню пальниками по потоку випромінювання полум'я при спалюванні пропан-бутану. Ж. ЖДТУ. 2012. Вип. 61, № 2, С. 48-52.

37. Patent No. 102512 Ukraine. Quality control system for combustion. Publ. 11.10.2015 [in Ukrainian].

38. Бабак В. П., Бабак С. В., Єременко В. С. та ін. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем. Київ, 2014. 832 с.

39. Бабак В. П., Запорожець А. О., Назаренко О. О. Підвищення ефективності спалювання палива в котлах потужністю до 3,5 МВт з використанням α -зонда. Проблеми ресурсу та безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин: Збірник наук. Київ, 2015. С. 391-407.

40. Долінський А.А., Халатов А.А., Кобзар С.Г., Назаренко О.А., Мещеряков А.А. Використання комп'ютерного моделювання для малозатратної модернізації котла НІСТУ-5. Промислова теплотехніка. 2007. Вип. 29, № 5, С. 80-91.

41. Долінський А. А. Енергозбереження та екологічні проблеми енергетики. Вісник НАН України. 2006. № 2. С. 24-32.
<https://doi.org/10.15407/scin2.02.019>

42. Про запровадження нових інвестиційних можливостей, що гарантують права та законні інтереси суб'єктів підприємницької діяльності для масштабної енергомодернізації: Закон України від 01.08.2016р. Офіційний вісник України. 2015. № 37, 57 с.

43. Долінський А. А., Басок Б. І., Чайка О. І., Базєєв Є. Т. Концепція (проект) Державної науково-технічної програми «Комплексна модернізація комунального теплопостачання». Вісник НАН України. 2007. № 7. С. 22-27.

44. Волюков А. Н., Новіков А. Н., Новіков О. Н., Окатьєв А. Н. Підвищення ефективності спалювання палива в котельних установках. Енергонагляд-інформ. 2010. Вип. 43, № 1, С. 54-57.

45. Запорожець А. А. Система автоматичного керування тяговими системами котлів за допомогою зондового альфа-індикатора. Наука і світ. 2014. Вип. 7, № 3, С. 168-170.

46. Купріанов В.І. Застосування економічного методу оптимізації надлишкового повітря для підвищення теплового ККД та екологічності парових котлів. Огляди відновлюваної та сталої енергетики. 2005. Вип. 9, № 5, С. 474-498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.006>

47. Купріанов В.І., Танцакунтана В. Оптимізація надлишкового повітря для покращення екологічних характеристик котла потужністю 150 МВт, що працює на тайському бурому вугіллі. Прикладна енергетика. 2003. Вип. 74, № 3-4, С. 445-453. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00199-X](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00199-X)

48. Запорожець А. Розробка програмного забезпечення системи керування горінням палива на основі частотного регулятора. Матеріали 15-ї міжнар. конф. з питань ІКТ в освіті, дослідженні та промислових застосуваннях. Інтеграція, гармонізація та передача знань. том. І: Головна конф. (12-15 червня. Херсон, Україна, 2019). [ред.: В. Єрмолаєв, Ф. Маллет, В. Яковина, Г. К. Майр, А. Співаковський], CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2387, стор. 223-230.

49. Запорожець А. Методи та апаратні засоби діагностики теплоенергетичного обладнання на основі технології Smart Grid. Досягнення інтелектуальних систем і обчислень III. 2019. Вип. 871, стор. 476-489. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01069-0_34

50. Babak S. Method of Statistical Spline Functions for Solving Problems of Data Approximation and Prediction of Objects State / S. Babak, V. Babak, A. Zaporozhets, A. Sverdlova // [Electronic resource] // Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019), Zaporizhzhia, Ukraine, April 15-19, 2019 / [eds.: D. Luengo, S. Subbotin, P.

Arras, et al]. – P. 810-821. – (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2353). – Access mode: <http://ceur-ws.org/Vol-2353/paper64.pdf>