

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОСЕЛЮВАННЯ ТВЕРДОПАЛИВНИХ ПРЯМОТОЧНИХ ПАРОВИХ КОТЛІВ

Станіслав Білогуров

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2753-389X>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

Олександр Мищенко

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7559-1407>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

Сергій Бардаков

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9367-1414>

Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро

Вступ

Інтенсивний розвиток технологічного прогресу вимагає все більших потужностей парових котлів для різних сфер застосування водяної пари, як основного теплоносія. У котлах парових, ранніх розробок, використовувався процес кипіння води у великому об'ємі, де пара спливала у вигляді парових бульбашок та накопичувалася у спеціальних парових барабанах, які мали великі розміри і становили певну небезпеку при розгерметизації. Жаротрубні котли також мають досить великі об'єми пароводяного простору при відносно невеликих потужностях, де пара накопичується у верхній частині теплообмінника. З підвищенням потужності парового котла, одночасно зростають вимоги до його експлуатації, що пов'язано з небезпекою перегрітої води у внутрішньому об'ємі системи і собівартості обслуговування. Великі об'єми пароводяного простору та значні внутрішні напруження тиску призводять до збільшення маси конструкції котла і відповідно, до збільшення часу розігріву системи, або утримання її в розігрітому стані на мінімальній потужності, що веде до неефективного використання палива. За останні роки все частіше переходять до застосування котлів з малим об'ємом пароводяного простору з метою зменшення часу розігріву, масово-габаритних характеристик і небезпеки їх експлуатації. Для котлів малої потужності можна було застосовувати змійовикові теплообмінники, у яких процес пароутворення відбувався аналогічно кипінню, як у великому об'ємі, а самі котли могли працювати за принципом термосифону [1-4]. У цих котлах співвідношення довжини до внутрішнього діаметра труби не перевищувало 140-170. При певних режимах течії продуктів згоряння і

конструкції теплообмінника вдалося досягти питомого теплового потоку більше 40 кВт/м^2 . Більш детальніша інформація викладена у [1, 2]. Для більших потужностей використовуються прямоточні парові котли, у яких процес пароутворення відбувається безпосередньо по всій довжині пароводяного каналу. Особливість конструкції теплообмінників такого типу полягає у тому, що по мірі руху пароводяної суміші, вздовж каналу, збільшується вміст частки пари, яка переходить від бульбашкового до снарядного режиму кипіння. Фізична картина такого явища потребує збільшення довжини пароводяного каналу. По даним різних авторів, починаючи зі степені сухості пари біля $x \approx 0,02$, утворюється дисперсно-кільцевий режим течії. Для зменшення протяжності снарядного режиму течії, який призводить до зниження степені сухості пари, перетин теплообмінника необхідно збільшувати до виходу пари. Таким чином теплообмінник складається з двох, або трьох послідовно з'єднаних труб різного діаметру, причому збільшення діаметру відбувається в сторону вихідного перерізу. У разі використання котлів великої потужності, замість збільшення діаметру труби, збільшуються кількість заходів теплообмінних труб, що призводить до зростання загальної площі перетину пароводяного простору.

МЕТА ТА ЗАДАЧІ

Основна задача таких теплообмінників полягає у отриманні необхідної кількості пари при постійному тиску з можливістю широкої зміни витрати її і належної якості: насичений, сухий або перегрітий. Суттєвий вплив на вирішення цієї задачі полягає у виді використання палива. При використанні газоподібного палива ця задача вирішується відносно простіше, по тепловому балансу палива і кількості отриманої пари. У випадку використання твердого палива цей процес ускладнюється по декільком причинам: калорійність палива, вологість його, інерційність камери згоряння та загрузочного пристрою. Особливі складнощі виникають при нерівномірному відборі пари на котлах малої або середньої витрати. Частково ці проблеми вирішуються за рахунок встановлення сепаратора на виході пари з парового котла, але при відносно невеликих ступенях дроселювання, якість пари погіршується і дуже згубно впливає на якість продукції. На відміну від котлів, де процес пароутворення відбувається у великому об'ємі, керування процесом у прямоточних котлах викликає певні складнощі. У більшості випадків цю проблему можна вирішити за рахунок встановлення парового редуктора на виході з котла і керування відбувається за температурою, або за тиском пари, де рівень води

підтримується по рівномірам, встановленим у компенсаційному баку. Але установка редуктора не вирішує усіх технологічних процесів і це призводить до здороження устаткування.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Експериментальні досліді проводились на спроектованому паровому котлу з циклонною камерою згоряння, загальною потужністю 500 кг/год пари. Котел включав: камеру згоряння; теплообмінник, у вигляді дворядного щільно намотаного циліндру з труби діаметром 42 мм, загальною площею теплообміну 16 м²; циклон ЦН-11; димосос; шнекову систему подачі палива; систему наддуву повітря і пульт керування котлом. Для більш надійного процесу пароутворення, була прийнята спроба здійснювати керування з використанням проміжного дроселювання частково перегрітої води на вхідній частині теплообмінника. Теплообмінник поділявся на дві частини вхідну і вихідну. На виході вхідної частини теплообмінника установлювалася дросельна шайба з розрахунку максимальної витрати пари при максимальному тиску у котлу. Секундна масова витрата води визначається відомим рівнянням:

$$\dot{m} = f_c \cdot \mu_s \sqrt{2\rho \cdot \Delta P},$$

де f_c - площа сопла дросельної шайби;

μ_s - коефіцієнт живого перетину, визначається експериментально;

ρ - густина води, $\rho \sim f(T_s)$;

ΔP - перепад тиску на дросельній шайбі.

Враховуючи, що площа сопла і коефіцієнт живого перетину шайби є постійні величини, а густину води, відповідно температури насичення, можна прийняти за сталу величину, тоді для максимально можливої витрати води при сталому тиску пари у котлу, комплекс

$$f_c \cdot \mu_s \sqrt{2\rho} = C - const.$$

По мірі зменшення витрати пари, система керування знижувала тиск води на вході у теплообмінник і одночасно зменшувалася подача палива та повітря наддуву у камеру згоряння. Перепад тиску на дросельній шайбі зменшувався і відповідно знижувалася витрата пари, а тиск її на виході із котла залишався приблизно постійним. Відповідно витрата води залежала тільки від кореня квадратного перепаду тиску на дросельній шайбі ($\sqrt{\Delta P}$), що спрощувало систему керування. Зворотній зв'язок системи керування відбувався по температурі на виході з котла.

У разі зростання витрати пари, система керування збільшувала тиск на вході у теплообмінник і одночасно зростала подача палива та

повітря наддуву у камеру згорання. Збільшення перепаду тиску на дросельній шайбі зростало, внаслідок чого підвищувалася витрата пари і наближалася до відповідної температури насичення.

На перехідних режимах, при певних витратах пари, система не встигала підтримувати постійність процесу пароутворення, що призводило до отримання то перегрітої, то вологої пари, у результаті великих теплових інерційних процесів.

Максимально можлива ступінь дроселювання котла обмежувалася критичними параметрами питомого теплового потоку і перепадом тиску на дросельній шайбі для організації надійного процесу пароутворення і забезпечення ефективного охолодження теплообмінника при постійному тиску пари.

РЕЗУЛЬТАТИ

Складність процесу керування полягала у тому, що використовувався відцентровий насос подачі води у теплообмінник, який керувався зміною частоти обертів двигуна частотним перетворювачем. У зв'язку з тим, що напірно-витратна характеристика відцентрових насосів нелінійна, то підтримка автоматичного регулювання значно ускладнювалася. Після застосовувався плунжерний насос, який має лінійну характеристику залежності витрати води від частоти обертів двигуна. У даному випадку краще застосовувати мембранний насос, який на відміну від плунжерного, дозволяє подавати воду з частковим забрудненням при лінійній характеристиці. Система керування покращилася, але не досягли бажаного результату.

Розподіл теплообмінника на дві частини, перша частина якого дроселювалася на виході, дала можливість керувати процесом пароутворення в межах незначної зміни витрати пари від номінального режиму. У зв'язку зі складністю процесу у змійовиковому прямотрубному каналі, необхідно підтримувати стабільні режими внутрішніх процесів пароутворення, у плоть до виходу пари з теплообмінника. Складність процесу полягає не тільки у зміні режиму течії робочої речовини, але і у нерівномірності кількості теплоти, підведеної на підігрів води до лінії насичення і перехід її у пароподібний стан, що збільшує теплову інерцію теплообмінника. Крім того, на дисперсно-кільцевій дільниці режиму течії, за рахунок відцентрових сил, рідина відтискається на зовнішній діаметр труби, а парова суміш розташовується біля внутрішнього діаметра і тепло з цієї зони передається до рідини на випаровування по перетину і стінці труби за законом Фур'є. Нерівномірність питомого теплового потоку по довжині газового каналу, внаслідок охолодження продуктів згорання, вносить свій вплив

на ці явища. Зміна одного, або декількох характеристик, встановленого режиму течії, веде до порушення фізичної картини пароутворення і зміни процесу теплообміну. Всі ці особливості спонукають процес парогенерації здійснювати в автономно ізольованій системі зі збереженням встановленої картини пароутворення.

Для цього на виході з теплообмінника установлюється автоматична засувка, яка має можливість прикриватися і відкриватися за допомогою електричного двигуна, який живиться від частотного перетворювача. Перед засувкою установлюється датчик тиску P_1 і термометр опору T_1 . На виході з засувки установлюється датчик тиску P_2 . Система працює наступним чином. При первинному запуску котла, встановлений клапан після засувки, відкривається і скидає пару в байпасну магістраль. По мірі досягнення номінального тиску і температури пари на виході з котла, що контролює датчик тиску P_1 і датчик температури T_1 , байпасний клапан закривається, а відкривається клапан на споживання пари. Датчик температури налаштовується таким чином, що його дійсна температура на 2-5°C більше від тиску насичення P_s . Це дозволяє трохи збільшувати степінь сухості пари, що гарантовано не дає крапельної конденсації для деяких технологічних процесів.

У разі зміни витрати пари, датчик тиску P_2 реагує зниженням показань, у разі збільшення витрати, що приводить до прикривання засувки і одночасного збільшення витрати води на вхід у теплообмінник та підвищення теплового потоку за рахунок збільшення подачі палива і повітря наддуву. Далі система керування порівнює тиски датчиків P_1 та P_2 . Коли тиски вирівнюються, засувка відкривається повністю. При зменшенні витрати пари, тиск датчика P_1 збільшується і надає команду на зменшення подачі води у теплообмінник і теплового потоку, зниженням палива та наддуву повітря. Коли тиск P_1 і P_2 урівнюються процес зміни вхідних параметрів припиняється.

Для здійснення цих процесів найкраще підходять пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори, які в автоматичному режимі здійснюють контроль і налаштування системи зі зменшенням амплітудно-частотної характеристики.

ВИСНОВКИ

Пара з котла отримується при постійному тиску і незначних коливаннях витрати її шляхом дроселювання вхідної частини теплообмінника з перегрітою водою відносно P_s .

Підтримання замкненої системи пароутворення від зовнішніх впливів спрощує систему керування прямоточним паровим котлом при різних режимах витрати пари з відносно стабільним тиском на

виході з теплообмінника.

Використання ПД – регулятора дозволяє значно скоротити час налаштування прямоточного парового котла на режим роботи зі змінними параметрами у часі.

Собівартість такої системи парогенерації на порядок менше у порівнянні з жаротрубними котлами або барабанного типу.

ПОСИЛАННЯ

1. Білогуров, С., & Панченко, А. (2013). Парогенератор (Патент України № 103829). Державна служба інтелектуальної власності України.

https://sis.nipo.gov.ua/media/INVENTIONS/2012/a201204818/published_description.pdf

2. Білогуров, С. О., Панченко, А. А., & Білогуров, О. С. (2008). Дослідження парогенерації в паралельних змійовикових каналах. Вісник Дніпровського університету, 1(12), 18–20.

3. Білогуров, С. О., & Панченко, А. А. (2008). Досвід експлуатації котлів малої потужності. Проблеми високотемпературної техніки, 3-6.

4. Білогуров, С., & Панченко, А. (2018). Парогенератор (Патент України № 119374). Міністерство економічного розвитку і торгівлі України.

https://sis.nipo.gov.ua/media/INVENTIONS/2017/a201704153/published_description.pdf