

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ВИФАТНЮК ВОЛОДИМИР ГРИГОРОВИЧ



УДК 536.24:621.184

**РОЗРОБЛЕННЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОСТІ КОТЛІВ НА ТВЕРДОМУ
ПАЛИВІ**

05.14.14 – Теплові та ядерні енергоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі атомної енергетики Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України та в Інституті теплоенергетичних технологій Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України
Письменний Євген Миколайович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри атомної енергетики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Арсирій Василь Анатолійович,
Одеської державної академії будівництва та архітектури, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції

кандидат технічних наук, старший дослідник
Тесленко Олександр Іванович,
Інститут загальної енергетики НАН України,
провідний науковий співробітник відділу трансформації структури паливно-енергетичного комплексу

Захист дисертації відбудеться 12 червня 2026 року о 15-00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.09 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, пров. Політехнічний, 6, корпус 5, аудиторія 307.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, просп. Берестейський, 37 та на сайті Вченої ради університету за адресою: <https://rada.kpi.ua..>

Автореферат розісланий «7» травня 2026 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. І. Коньшин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Необхідність підвищення ефективності та екологічності експлуатації теплових енергоустановок є нагальною задачею для України. Попри те, що Україна в рамках Енергетичної стратегії до 2050 року разом з країнами ЄС взяла на себе зобов'язання з послідовного зниження виробництва енергії на енергоустановках на викопному паливі, сучасний вклад теплової енергетики в роботі Об'єднаної енергетичної системи України залишається значним і буде таким тривалий час, бо потужності теплоенергетики України є замикаючими.

Паливо для котлів теплових електростанцій та теплоелектроцентралей, має використовуватися з максимальною ефективністю та з мінімально досяжною шкодою для навколишнього природного середовища. Тому робота існуючих потужностей теплових енергоустановок має бути спрямована на підвищення їх коефіцієнта корисної дії та впровадження методів зменшення шкідливого впливу діяльності теплоенергетики на довкілля і клімат, щоб відповідати сучасним екологічним вимогам.

Котли ТЕС і ТЕЦ повинні бути готовими до розширення їх паливної бази за рахунок біомаси як вуглеце-нейтрального палива та відходів, включаючи відходи вуглезбагачення. Енергетичне використання відходів дозволить вирішити екологічну проблему відходів та емісії парникових газів і забруднюючих речовин.

Таким чином, актуальність підвищення ефективності та екологічності твердопаливних енергоустановок визначає мету та завдання роботи..

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати досліджень, представлених в дисертаційній роботі, отримані на кафедрі атомної енергетики ННІАТЕ НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» при виконанні держбюджетної теми № 2734 «Дослідження інтенсифікації процесів теплообміну в поверхнях нагрівання нового покоління для новітніх ресурсозберігаючих технологій в енергетиці та промисловості» (РК 0104U000468) та в ІТЕТ НАН України при виконанні відомих науково-дослідних робіт: «Відпрацювання технологій спалювання високозольного вугілля різного ступеня метаморфізму в низькотемпературному киплячому шарі, розробка та спорудження котлоагрегатів малої потужності для їх термічної переробки» (РК 0107U003961), «Розробка технології та ескізного проекту конструкції парокисневого газифікатора в потоці під тиском 3-4 МПа для бурого вугілля Олександрійського родовища» (РК 0115U002921), «Розроблення технічних рішень та способів їх реалізації для конструювання нових високоефективних котельних установок на супер-надкритичні параметри пари» (РК 0119U001686) та теми «Розроблення технології спільного спалювання торфу та газового вугілля на теплоелектростанціях» (РК 0119U003032) за договором з Міністерством освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення методів підвищення ефективності та екологічності котлів шляхом модернізації технологій та обладнання.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені такі завдання:

- 1) удосконалено методику розрахунків котельного обладнання для супер-надкритичних параметрів пари. На підставі удосконаленої методики

обґрунтовано технічні рішення з оптимізації конструктивних, технологічних та екологічних параметрів котла на супер-надкритичні параметри пари в діапазоні навантажень 40-100 %;

- 2) розроблено концепцію пароповітряного газифікатора під тиском на торфі для застосування з котлом енергоблоку 300 МВт та визначено його основні технологічні параметри;
- 3) розроблено методику розрахунку котлів киплячого шару з урахуванням наявності кондуктивного, конвективного та радіаційного теплообміну в умовах високої об'ємної концентрації твердих частинок.
- 4) розроблено на підставі проведених розрахунків котлів киплячого шару основні схемні рішення та проекти для котла 10 т/год з низько-температурним киплячим шаром з рециркуляцією твердої фази та котла 75 т/год з циркулюючим киплячим шаром.

Об'єкт дослідження – процеси термохімічної переробки палив в теплових енергоустановках, які працюють на різних видах твердого палива.

Предмет дослідження – конструктивні характеристики та режими роботи котлів на твердому паливі.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети у роботі використано комплекс аналітичних, розрахункових та експериментальних методів досліджень процесів в обладнанні теплових енергоустановок.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- 1) Вперше розроблено методику теплового розрахунку пилувугільного котла, яка враховує вплив розбалансування системи при низьких навантаженнях на теплові та гідравлічні процеси в котлі.
- 2) Вперше визначено розміщення зони введення газів рециркуляції по висоті топки, при якому не порушується стабільність процесу горіння в зоні максимальних тепловиділень на мінімальних навантаженнях.
- 3) Вперше визначено оптимальні ступені рециркуляції димових газів, що підвищують ефективність роботи вторинного пароперегрівника.
- 4) Вперше визначено оптимальні параметри пароповітряної газифікації під тиском на торфі для використання синтез-газу в котлах з рідким шлаковидаленням на мінімальних навантаженнях.
- 5) Вперше обґрунтовано можливість застосування синтезу-газу як транспортного агенту для подачі твердого палива в пальники пилувугільного котла.
- 6) Вперше запропоновано трьохзонну методику розрахунку котлів киплячого шару та котлів циркулюючого киплячого шару, що включає зону киплячого шару, перехідну зону та зону пневмотранспорту і враховує високу концентрацію твердої фази, її рециркуляцію та великі розміри частинок, при цьому процес спалювання в зоні киплячого шару описується реакцією повного горіння фіксованого вуглецю палива.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення одержаних результатів полягає у:

1. розробленні концепції та ескізного проєкту реконструкції існуючого котла на надкритичних параметри енергоблоку 300 МВт на супер-надкритичні параметри пари 28МПа/600°С/600°С та з твердим шлаковидаленням;
2. розробленні концепції та технічного проєкту застосування пароповітряного газифікатора на торфі для пиловугільного котла ТПП-210А;.
3. розробленні робочого проєкту котла 10 МВт низькотемпературного киплячого шару з рециркуляцією твердої фази;
4. розробленні технічного проєкту котла циркулюючого киплячого шару паропродуктивністю 75 т/год;
5. розширенні паливної бази котлів на твердому паливі завдяки торфу та низькосортному твердому паливі, включаючи відходи.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати, що виносяться на захист, одержані здобувачем особисто: постановка задач та проведення досліджень, аналіз результатів досліджень, розроблення технологічних схем теплових енергоустановок, розроблення проєктів енергоустановок, обґрунтування технічних рішень та висновків.

Апробація результатів дисертації. Результати та основні положення роботи доповідалися та обговорювалися доповідались та обговорювались на Міжнародній науково-практичній конференції «Вугільна теплоенергетика: проблеми реабілітації та розвитку» у 2008 р., Міжнародній науково-практичній конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку» у 2021, 2023, 2025 рр..

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 13 статей у наукових фахових виданнях (з них 4 статті у виданні, включеному до категорії «А» (**SCOPUS (Q3)** Переліку наукових фахових видань України; 9 статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», які включені до міжнародних наукометричних баз), 3 статті в іноземних наукових видання, які включено до наукометричної бази даних **SCOPUS**, 4 тез доповідей та матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилань та додатків. Робота викладена на 237 сторінках, з них основний текст становить 167 сторінки. У роботі наведено 69 рисунків, 22 таблиці; перелік джерел посилання містить 144 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, показано зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та основні задачі дослідження, наведено наукову новизну і практичне значення отриманих наукових результатів, рівень результатів роботи, кількість публікацій за темою дисертації та особистий внесок автора..

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану енергетики України і аналізу котлів з супер-надкритичними параметрами пари, технологій газифікації твердого палива і його спалювання в киплячому шарі.

Теплова генерація на твердому паливі ще тривалий час буде необхідною для функціонування ОЕС України та потребує розроблення нових технологій підвищення ефективності, екологічності її роботи з розширення паливної бази. Сучасний стан впровадження котлів на супер-надкритичні параметри пари з високим ККД засвідчив перспективність цього напрямку для реконструкції існуючих генеруючих потужностей. Перспективним для енергетики України є застосування газифікації місцевого палива для генерації електроенергії та ПГУ. Технології спалювання палива в киплячому шарі дозволять розширити спектр використаних палив, включаючи біомасу та тверді відходи широкого діапазону вологості та зольності

На основі результатів виконаного аналізу обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета та задачі дослідження.

Другий розділ дисертації присвячений удосконаленню методики розрахунку пилувугільного котла з твердим шлаковидаленням на супер-надкритичні параметри пари з вимогою забезпечення температури на виході зони горіння вище мінімально допустимої температури загасання факелу, при цьому температура золових частинок повинна бути нижче за температури початку шлакування в діапазоні навантажень 40-100 %, розробці способів регулювання первинної та вторинної пари, розробці ескізного проекту котла СНКП 28 МПа/600 °С /600 °С для енергоблоку 300 МВт з вибором оптимальних марок сталі поверхонь нагріву та очікуваним ККД енергоблоку 46 %, що дозволить зменшити валові викиди діоксиду вуглецю як парникового газу та забруднюючих речовин на 20 %.

На основі числових досліджень було розроблено схему прямооточного котла СНКП 28 МПа/600 °С /600 °С (рис. 1) з розмірами зон та характерних температур по газовому тракту котла на навантаженні 100 %. Компоновка котельного обладнання прийнята П-подібною для можливості розміщення в існуючій комірках енергоблоку. Котел – з твердим шлаковидаленням для зменшення утворення оксидів азоту. В зоні максимального тепловиділення (зона 1) розташовано 3 яруси пальників (всього 24 пальники по 35 МВт теплової потужності кожен). Екранні поверхні – мембранні газощільні. Застосовано подвійні ширми I ступеня пароперегрівника, які приймають 75 % загального променистого тепла від топки, тим сам захищають ширми 2 ступеня, які сприймають 25 %.

Теплонапруження по перерізу топки підібрані таким чином, що температура забруднених екранів нижньої радіаційної частини (НРЧ) 1234 °С виявляється нижчою за температуру початку шлакування 1268 °С (для вугілля марки ДГ), що говорить про безшлакувальну роботу екранів НРЧ в усьому діапазоні навантажень 40-100%.

На рис. 2. приведено теплову схему пароводяного тракту з розрахунками температур по тракту на різних навантаженнях.

На навантаженні 100 % температура пароводяної суміші екрана стелі становить 480 °С.

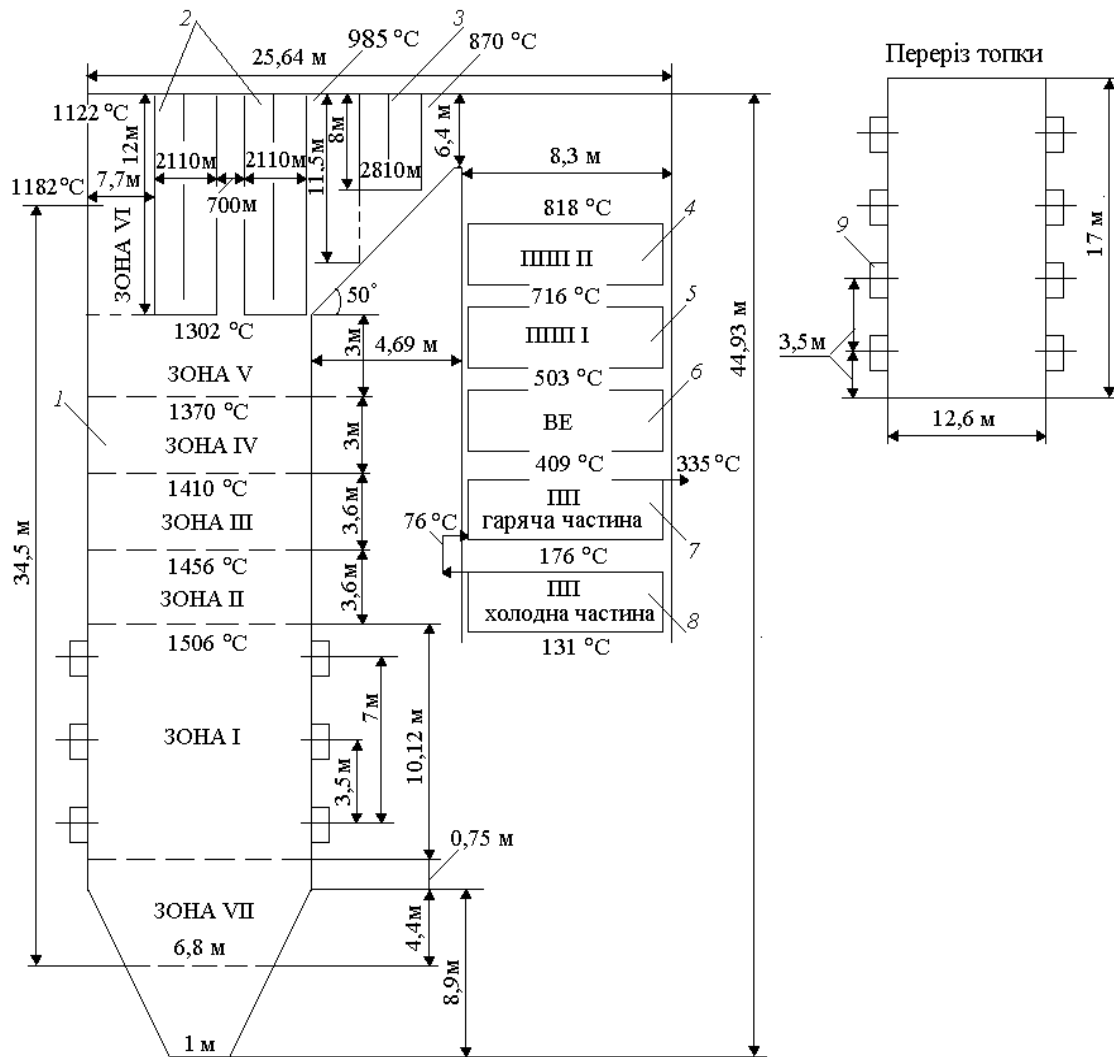


Рис. 1. Схема компоновки прямооточного пилувугільного парогенератора СНКП
28 МПа/600 °С /600 °С

Для регулювання температури вторинної пари пароводяна суміш направляється в паро-паровий теплообмінник, в якому віддає частину тепла вторинній парі, а температура суміші падає до 468 °С. Температура первинної пари регулюється вприсками перед I і II ступенями пароперегрівника. При зниженні навантаження до 50 % температура пароводяної суміші екрана стелі становить 576 °С. Після паро-парового теплообмінника її температура знижується до 518 °С. Паро-паровий теплообмінник дає можливість перекидати частину тепла вторинній парі, вирішуючи проблему невідповідності витрати пари та тепловиділення.

Для зниження теплогідравлічної розвірки труб ПППІ, і як наслідок температури стінки, було розроблено технічне рішення щодо розподілу поверхні ПППІ на два рівних пакети, встановивши між ними проміжні змішувальні колектори з повним перемішуванням пари. Таке технічне рішення дозволило зменшити температуру стінки металу першого ряду труб змійовиків ПППІ на номінальному навантаженні з 611 °С до 586 °С, тим самим зменшити вартість змійовиків ПППІ за рахунок використання дешевших марок сталі.

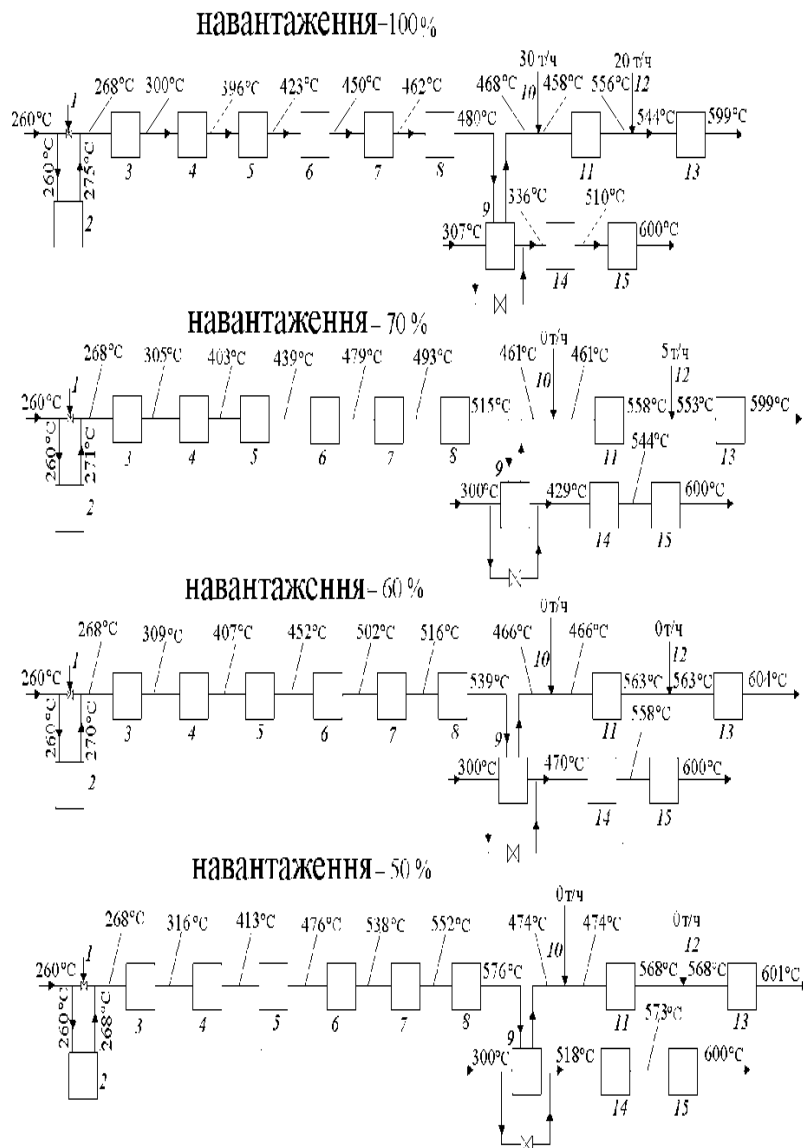


Рис. 2 Схема пароводяного тракту парогенератора СНКП 28/600/600 в діапазоні навантажень 50–100%: 1 – регулюючий клапан; 2 – підвісні труби; 3 – водяний економайзер; 4 – нижня радіаційна частина; 5 – середня радіаційна частина; 6 – верхня радіаційна частина; 7 – екрани поворотної камери; 8 – стеля; 9 – паропаровий теплообмінник; 10, 12 – впорскувальний пароохолоджувальник; 11 – перший ступінь ширмового пароперегрівника; 13 – другий ступінь ширмового пароперегрівача; 14 – вхідний ступінь пароперегрівника вторинної пари; 15 – вихідний ступінь пароперегрівника вторинного пара;

На рис. 3 представлена діаграма кількості та марок металу в поверхнях нагріву котла СНКП, Виходячи з розрахунків локальних максимальних температур стінок змійовиків пароперегрівників і суцільнозварних екранів. Завдяки проведеним дослідженням кількість аустенітних сталей зменшено до 16 % від загальної металоємності поверхонь нагріву. Традиційно частка аустенітних сталей для котлів СНКП даного параметру буде близько 20 %.

Застосування рециркуляції димових газів, відібраних після водяного економайзера, з подачею їх після зони 1, дозволить зменшити максимальні температури стінок суцільнозварних екранів ВРЧ, стелі та поворотної камери.

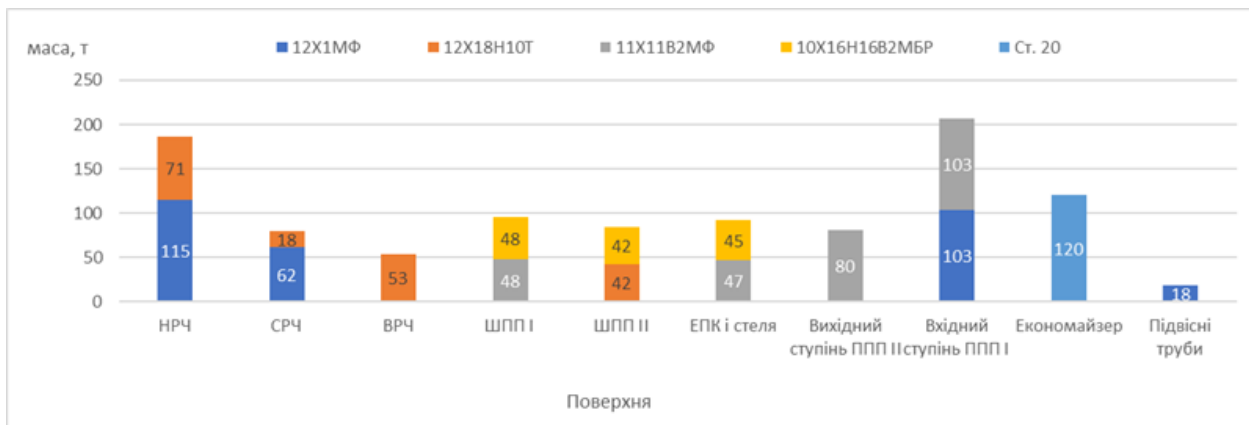


Рис. 3 – Розподіл маси по марках сталі для елементів поверхонь нагріву котла СНКП

Зі зниженням навантаження котла від 100 % до 50 %, температура газів на виході із зони максимальних тепловиділень (Зона 1, відмітка 18 м) зменшується з 1506 °С до 1342 °С (рис. 4), внаслідок чого питоме теплове навантаження поверхонь нагріву в цій зоні падає в 1,469 рази, в той час як витрата живильної води на вході в парогенератор зменшується вдвічі. Для вирішення цієї проблеми було розроблено технічне рішення щодо перекидання тепла, якого бракує, з первинного тракту у вторинний тракт за допомогою паро-парового теплообмінника. Застосування рециркуляції знижує температуру димових газів на виході зони 2 з 1259 °С до 1176 °С.

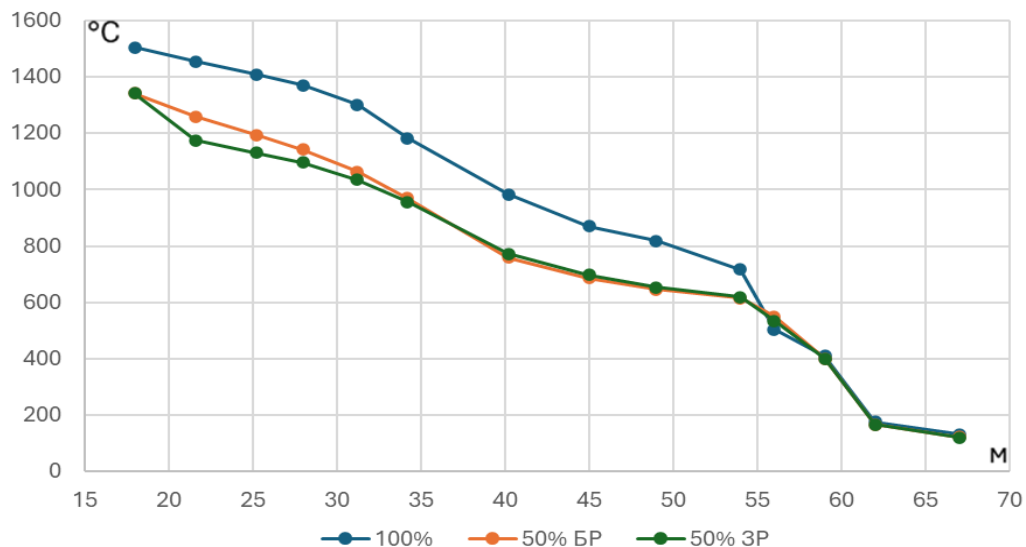


Рис. 2.19 – Зміна температури димових газів по тракту котла від НРЧ до РПП

Це знижує температуру робочого середовища в стелі з 576 °С до 538 °С, а також в ВРЧ і ЕПК (рис. 5). Це дозволяє зменшити навантаження на паро-паровий теплообмінник і знизити температури стінок змійовиків ППП-1 і ППП-2.

На рис. 5 показано, що на навантаженні 50 % при рециркуляції димових газів ($K_{\text{рец}} = 13 \%$) відбувається падіння температури пари і температури стінок в первинному тракту, завдяки чому має місце зниження максимальних температур стінок суцільнозварних екранів: стелі на 37 °С, ВРЧ – 40 °С та ЕПК – 35 °С.

Числові дослідження показали, що на мінімальному навантаженні 40% оптимальний ступінь рециркуляції димових газів становить $K_{\text{рец}} = 12 \%$.

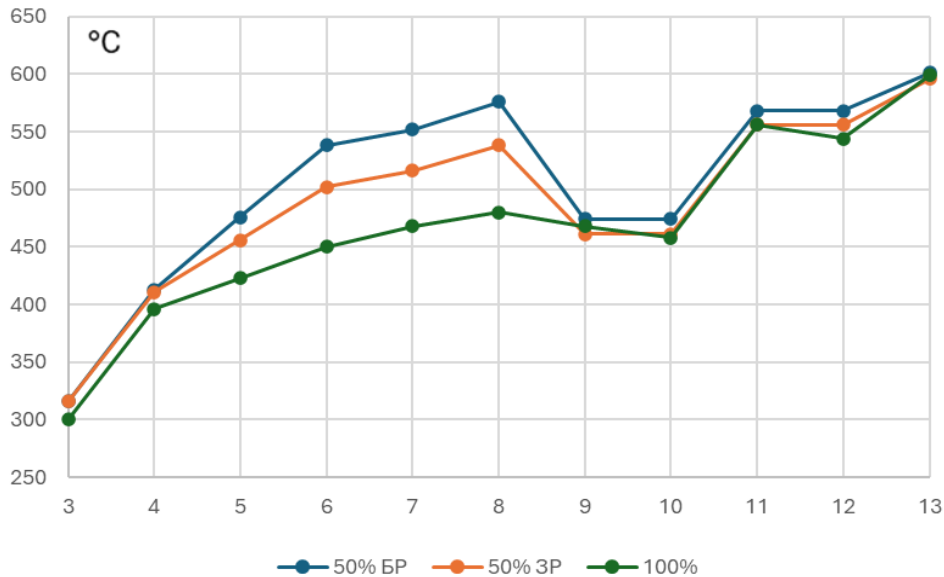


Рис. 5 – Зміна температури робочого середовища в трубах по ходу тракту гострої пари для навантажень: 50 % без рециркуляції (БР), 50 % з рециркуляцією (ЗР), 100%:

3 – водяний економайзер; 4 – нижня радіаційна частина; 5 – середня радіаційна частина; 6 – верхня радіаційна частина; 7 – екрани поворотної камери; 8 – стеля; 9 – паро-паровий теплообмінник; 10, 12 – впорскувальний пароохолоджувальник; 11 – вихід з I ступеня ширмового пароперегрівника; 13 – вихід з II ступеня ширмового пароперегрівника.

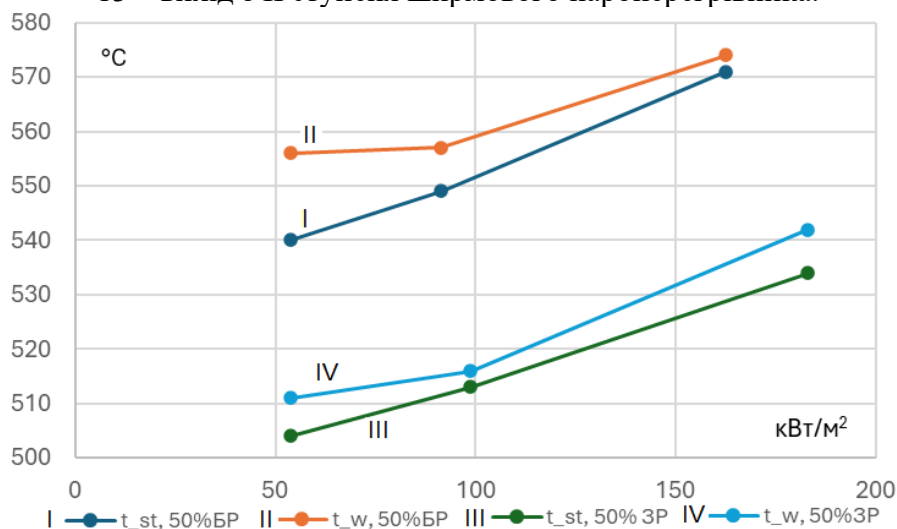


Рис. 5. Залежність температури пари (st) та стінок (w) після ВРЧ, ЕПК та стелі для навантаження 50% без рециркуляції (БР) та 50% з рециркуляцією (БР) від питомого теплового потоку.

У третьому розділі описано процес підготовки торф'яного синтез-газу для спалювання в топці з рідким шлаковидаленням котла ТПП-210А (рис. 6), який отримується шляхом термохімічної переробки волинського торфу в реакторі з нерухомим шаром в пароповітряній суміші, збагаченій киснем, під тиском 1,5 МПа.

Запропоновано використати газифікатор неперервної дії (на відміну від відомих технологій Lurgi і BGL) для подачі синтез-газу в нижню частину котла з метою забезпечення сталого шлаковидалення в котлі на мінімальних навантаженнях. Газифікатор складається з 4 зон. В зоні I утворюється шлакова подушка з частинок золи, сформованих в результаті горіння і газифікації. Вона захищає колосникову решітку від перегріву.

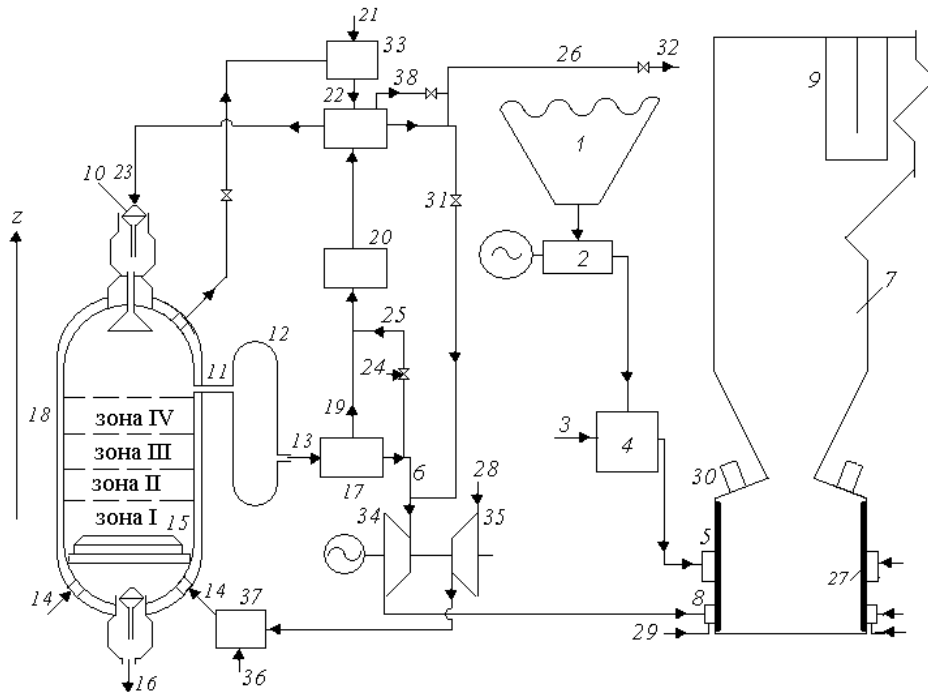


Рис. 6. Схема спільного спалювання в топці котла ТПП-210А газового вугілля і торф'яного синтез-газу. 1 – бункер вугільного пилу; 2 – живильник пилу; 3 – транспортуючий агент; 4 – змішувач; 5 – основні пальники; 6 – синтетичний торф'яний газ; 7 – топка; 8 – газові пальники; 9 – ширми; 10 – мигалка; 11 – вихід генераторного газу; 12 – скруббер; 13 – вихід сирого неочищеного газу; 14 – пароповітряна суміш; 15 – решітка; 16 – вихід золи; 17 – очищення газу; 18 – газогенератор; 19 – подача смоли в камеру згоряння; 20 – камера згоряння; 21 – подача сирого торффу; 22 – сушильна камера; 23 – висушений торф; 24 – регулювальний клапан; 25 – подача генераторного газу в камеру згоряння; 26 – випаровування води вихідного торффу; 27 – рідкий шлак; 28 – повітря, збагачене киснем; 29 – повітря; 30 – скидні пальники; 31 – шибер; 32 – скидання води за котел; 33 – шлюзовий бункер; 34 – газова турбіна; 35 – компресор; 36 – пара; 37 – камера змішування; 38 – скидання продуктів згоряння за котел; I – шлакова подушка; II – зона окислення; III – зона газифікації; IV – зона піролізу

Вище розташована окислювальна зона II, яка включає дві області. У першій з них велика частина кисню в дуже вузькому інтервалі шару інтенсивно витрачається на конверсію вуглецю і догорання продуктів газифікації CO і H_2 , температури газу і частинок торффу досягають максимальних значень. У другій окисно-відновлювальній області поглинання тепла гетерогенних ендотермічних реакцій домінує над виділенням тепла екзотермічних реакцій, внаслідок чого відбувається різке падіння температур фаз і концентрації O_2 . Відновлювальна зона III має більшу висоту за окислювальну через малі швидкості гетерогенних відновлювальних реакцій, обумовлених порівняно низьким рівнем температур дискретної фази і концентрацій компонентів CO_2 і H_2O . У зоні IV висушені частинки торффу нагріваються безкисневою газовою сумішшю за рахунок міжфазного конвективного теплообміну і радіаційно-кондуктивного теплопереносу твердої фази, що забезпечує вихід з них летких речовин, які змішуються з газом, що виходить з третьої зони, тим самим формуючи синтез-газ на виході з газифікатора.

Запропоновано нову технологію подачі вугілля марки ДГ в котел за допомогою газоструменевого ежектора, коли синтез-газ використовується як транспортний агент, що ежектуює пил в основні пальники 5.

Для розрахунку процесів в газифікаторі було розроблено оригінальну модель на базі двовимірної системи параболічних і гіперболічних рівнянь, що описують аеродинаміку, тепломасообмін і хімічне реагування газодисперсного середовища в фіксованому шарі. Головна відмінність від існуючих моделей – урахування швидкості руху частинок, її зміни в окислювальній і відновній зонах через зменшення діаметра дисперсної фази за рахунок протікання гетерогенних реакцій. Вона дозволяє отримати детальну інформацію про конструктивні характеристики газогенератора в фіксованому шарі, рух, тепломасообмін і хімічне реагування газодисперсного середовища в пароповітряній суміші під тиском, збагачений киснем.

Диференціальне рівняння, що описує зміну швидкості руху частинок торфу в окислювальній і відновлювальній зонах, може бути отримано з рівняння нерозривності дисперсної фази, яке за умови, що в зонах газогенератора величина $\rho_p = \text{const}$, має вигляд:

$$\frac{\partial u_p}{\partial z} = - \left[(k_{C+O_2} + 2k_{C+0.5O_2}) C_{O_2}^w + k_{C+CO_2} C_{CO_2}^w + k_{C+H_2O} C_{H_2O}^w \right] \frac{6\mu_c}{\rho_p \delta}$$

Гранична умова для цього диференціального рівняння: $u_p(z = H_{bed}) = u_{p0}$. Зв'язок між діаметром реагуючих частинок торфу $\delta(\tau, z)$ і їх швидкістю $u_p(\tau, z)$ на ділянках газифікаора може бути отриманий з відношення витрат торфу на виході з відновлювальної зони і в перерізі z , що належить цим ділянкам

$$\frac{(1-\varepsilon)u_{p0}\rho_p}{(1-\varepsilon)u_p(\tau, z)\rho_p} = \left(\frac{\delta_0}{\delta(\tau, z)} \right)^3$$

де ε – пористість шару.

За допомогою побудованої моделі можна регулювати висоту піролізної зони шляхом зміни відношення двох швидкостей: швидкості руху торф'яних частинок і хімічного реагування за рахунок зміни частки збагачення повітря O_2 і H_2O . Така гнучка організація робочого процесу дозволяє регулювати температуру фаз на виході з газогенератора. Це є одним з головних практичних застосувань використання даної моделі.

Було досліджено процес переробки 28,9 т/год сирого торфу в реакторах з фіксованим шаром під тиском 1,5 МПа. Отримано такі результати: склад синтез-газу на виході з реакторів: для $\tau = 400$ с – $CO = 33,474$ %, $H_2 = 8,26$ %, $H_2O = 7,82$ %, $CO_2 = 3,672$ %, $CH_4 = 6,94$ %, $N_2 = 19,81$ %, $CH_xO_y = 16,63$ % і $C_2H_2 = 3,39$ % і для $\tau = 3200$ с – $CO = 52,8$ %, $H_2 = 13,21$ %, $N_2 = 33,88$ %.

Неочищений синтез-газ витратою 33,0 т/год, отриманий при стаціонарному процесі газифікації частинок волинського торфу ($\tau \geq 2200$ с), пройшовши очищення від смоли та пилу, змішується з 5,47 т/год випареної вологи палива і після скидання надлишкового тиску в газовій турбіні в кількості 36,72 т/год надходить на вхід в газові пальники топки котла ТПП-210А. Масові частки компонент цього газу на вході в топку: $CO = 0,405$; $H_2 = 0,00723$; $CH_4 = 0,0608$; $H_2O = 0,226$; $CO_2 = 0,0674$; $H_2S = 0,00472$; $N_2 = 0,229$. Теплота згоряння синтез-газу 8,14 МДж/нм³ на вологий або 11,33 МДж/нм³ на сухий стан. Це є початковою умовою для режиму спільного спалювання 36,7 т/год синтез-газу (20% по енергії палива) і 49,0 т/год пилу газового

вугілля. Таким чином, застосування газифікатора зменшить викиди твердих частинок, оксидів сірки і азоту.

На рис. 7 приведено розподіл температури частинок волинського торфу і температури газу по висоті газифікатора. З часом відбувається вирівнювання температурного профілю по висоті нерухомого шару (після 2800 с перебування).

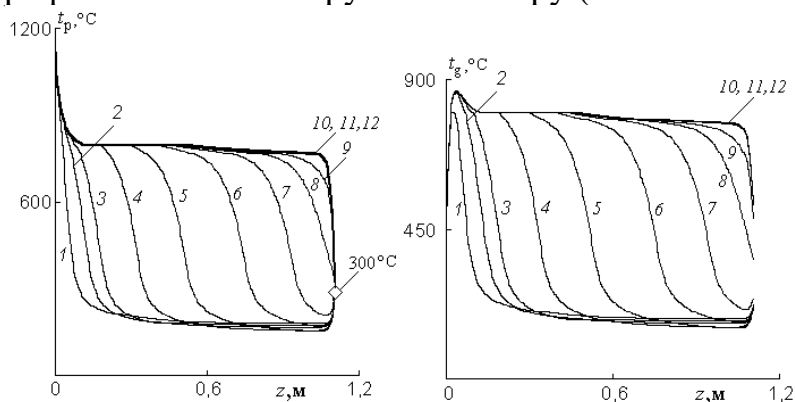


Рис. 7. Розподіл температур частинок волинського торфу і газу по висоті нерухомого шару в залежності від часу: 1 – 100 с; 2 – 200 с; 3 – 300 с; 4 – 600 с; 5 – 1000 с; 6 – 1500 с; 7 – 1900 с; 8 – 2200 с; 9 – 2400 с; 10 – 2800 с; 11 – 3000 с; 12 – 3200 с

На рис. 8 приведено розподіл по висоті газифікатора калорійних компонентів газу в часі. Очевидно, що після 2200 с часу перебування палива в газифікаторі відбувається їх повна конверсія в прості продукти, насамперед – оксид вуглецю та водень.

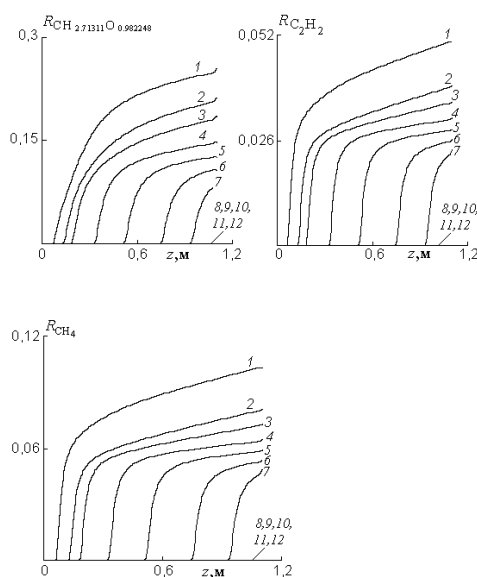


Рис. 8. Розподіл об'ємних часток метану, кисневмісної сполуки і ацетилену по висоті нерухомого шару в залежності від часу: 1 – 100 с; 2 – 200 с; 3 – 300 с; 4 – 600 с; 5 – 1000 с; 6 – 1500 с; 7 – 1900 с; 8 – 2200 с; 9 – 2400 с; 10 – 2800 с; 11 – 3000 с; 12 – 3200 с.

Четвертий розділ дисертації присвячений розробленню спеціалізованої методики розрахунку котлів киплячого шару (КШ) та котлів циркулюючого киплячого шару (ЦКШ), оскільки відома методика розрахунку пиловугільних котлів не враховує наявність кондуктивного теплообміну та його поєднання з конвективним і радіаційним видами теплообміну, а також високу концентрацію твердої фази, її рециркуляцію та великі розміри частинок.

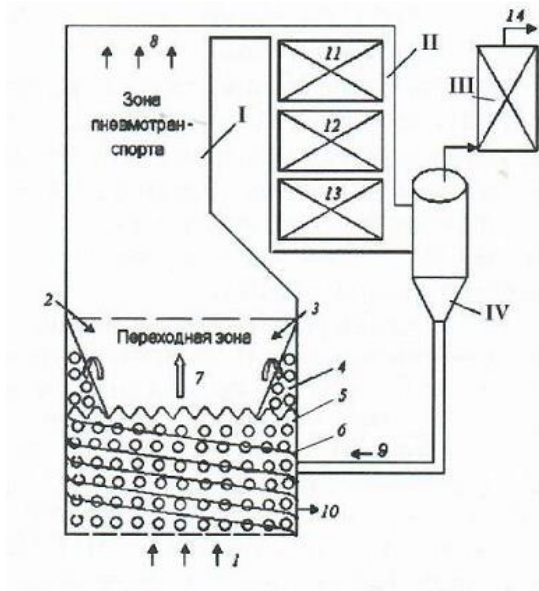


Рис. 9. Схема котла з низько-температурним киплячим шаром з рециркуляцією. I – топка 1 – подача первинного повітря від решітку; 2 – подача вторинного повітря; 3 – подача палива; 4 – кільцева зона; 5 – киплячий шар; 6 – теплообмінні поверхні нагріву; 7 – ядро потоку; 8 – гази, що йдуть у конвективну шахту; 9 – повернення рециркулюючої маси в КШ; 10 – вихід зливної золи; II – конвективна шахта; 11-13 – конвективні поверхні нагріву; IV – холодний циклон; 14 – відхідні гази.

Розроблена методика базується на розби топки киплячого шару на зону КШ, перехідну зону (ПЗ) та зону пневмотранс ЗП (рис. 9). Аеродинамічні характеристики киплячого шару розраховуються через кр Архімеда і Рейнольдса, на основі визначаються висота, площа перерізу та киплячого шару, а також коефіє кондуктивно-конвективного та радіаці теплообміну. При розрахунках в зоні припущено виключну дію реакції по вигорання вуглецю палива. Витрата перви повітря під решітку була від 63 до 74 перехідній зоні, куди подається палив вторинне повітря (26–37 %), вихід відбува летких з їх згорянням в ПЗ та ЗП, а розподіл швидкісних та температурних твердої фази, коли крупні час повертаються в зону КШ вздовж е (кільцева зона), а дрібні частинки прямують до зони пневмотранспорту на фоні процесу горіння. Висота зони пневмотранспорту визначається вихідною температурою димових газів та теплосприйняттям поверхонь нагріву.

На рис. 10 приведено результати модельних розрахунків температур коксу t_c , газу t_g і золи t_{ash} в зоні пневмотранспорту в залежності від коефіцієнту надлишку повітря α . Зростання коефіцієнту надлишку повітря в первинному повітрі призводить до підвищення температури палаючих частинок коксу в нижній частині ЗП, на границю якої надходить вторинне повітря, та зменшення вмісту горючих в золі від 22% до 3,5%. У подальшому температурні поля частинок коксу, газу і золи вирівнюються.

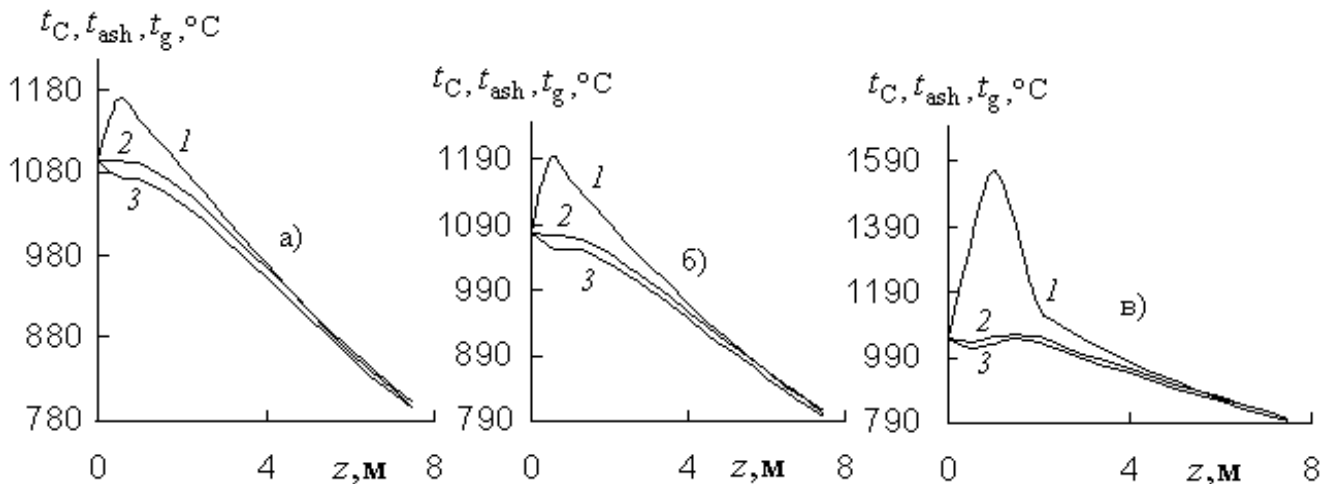


Рис. 10 – Розподіл температур фаз по висоті зони пневмотранспорту (1 – t_c ; 2 – t_g ; 3 – t_{ash}): а) $\alpha = 1,3$; б) $\alpha = 1,5$; в) $\alpha = 1,9$.

В ІТЕТ НАН України було проведено дослідне спалювання вугілля ДГ в КШ на установці ЦКШ-0,02. Температура КШ становила 860-930 °С, а в зоні пневмотранспорту – 800 °С. Швидкість газової фази в КШ – 1,4-1,6 м/с, а в зоні пневмотранспорту – 3,0-3,3 м/с. Зольність донної золи була > 90%. Відносно низька температура горіння частинок твердого палива в котлі з киплячим шаром забезпечує низький рівень вмісту оксидів азоту, а високий ступінь конверсії палива свідчить про ефективність процесу спалювання

На рис. 11 показано загальну компоновку котла низько-температурного киплячого шару з твердої фази Е-10-1,6 паропродуктивністю 10 т/год на насиченій парі температурою 200 °С, розрахованого на споживання високозольного вугілля марки ДГ витратою 1,65 т/год. Виготовлено робочу документацію котла.

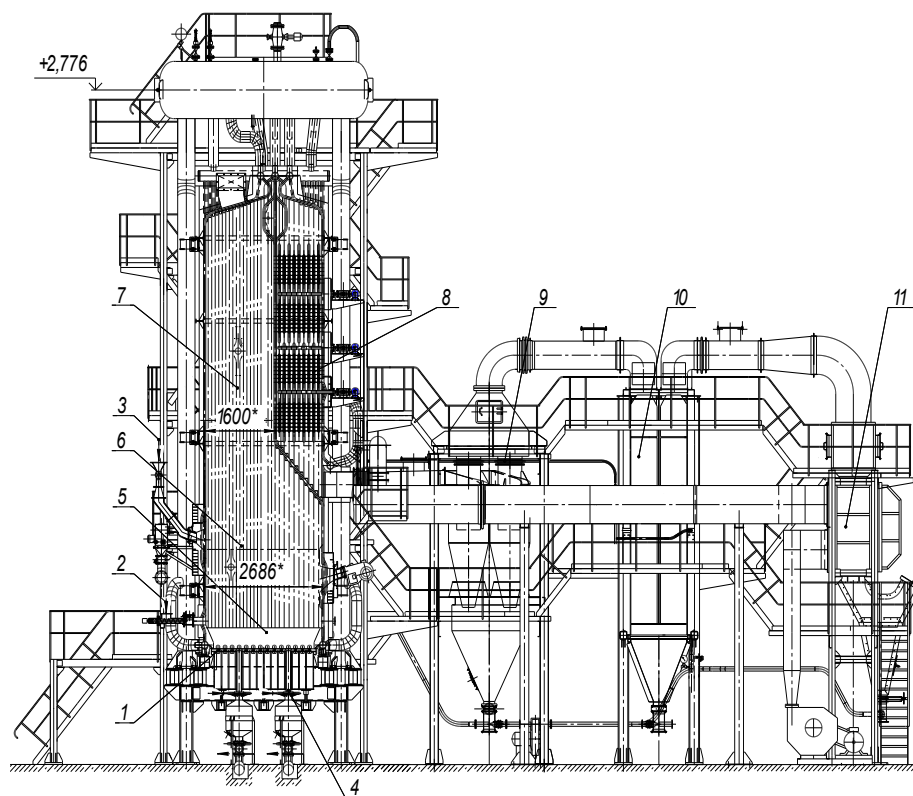


Рис. 11. Загальна компоновка КШ-котлоагрегату паропродуктивністю 10 т/год:

- 1 – ковпачкова решітка, 2 – подача в КШ (для інертного матеріалу та низько-реакційного вугілля),
 3 – подача палива в перехідну зону, 4 – система зливу золи, 5 – киплячий шар,
 6 – перехідна зона, 7 – надшаровий простір, 8 – кільцева зона, 9 – циклон, 10 – водяний економайзер, 11 – повітропідігрівник.

Дана методика була застосована для розрахунку котла циркулюючого киплячого шару, в якій було враховано наявність 3 подач повітря: первинного повітря під решітку, вторинного повітря в перехідну зону, куди надходить свіже паливо, та третинного повітря в зону пневмотранспорту. Було враховано значно вищі концентрації твердих частинок в перехідній зоні і зоні пневмотранспорту та проходження рециркулюючого потоку через гарячий циклон. Завдяки вищим швидкостям газодисперного потоку в топках ЦКШ перехідна зона розтягнута на більшу висоту.

Результати проведених розрахунків показали, що в зоні пневмотранспорту при зростанні діаметра коксозольних частинок $\delta_{\text{нп}}$ від 0,15 до 0,25 мм зменшується

теплосприйняття екранних поверхонь нагріву в НП на 25 % – з $2,72 \cdot 10^8$ кДж/год (75556 кВт) до $2,04 \cdot 10^8$ кДж/год (56667 кВт) – (криві 1 на рис. 12) за рахунок зниження температурного напору і сумарного коефіцієнта теплообміну між дисперсним потоком і екранними поверхнями надшарового простору НП, що негативно позначається на кратності циркуляції пароводяної суміші в циркуляційному контурі котла.

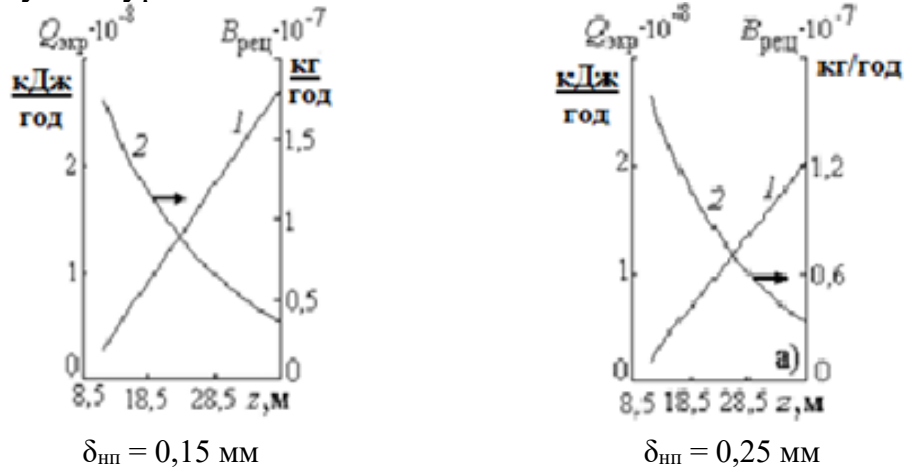


Рис. 12. Розподіл теплосприйняття настінних екранів $Q_{\text{екр}}$ (1) і витрати рециркулюючої маси $B_{\text{рец}}$ (2)

Іншою відмінністю є те, що для $\delta_{\text{нп}} = 0,15$ мм в топці витрачається 89,8 % від усієї кількості окисника, що надходить у топку, а для $\delta_{\text{нп}} = 0,25$ мм – 72,7 % (криві 4 на рис. 13).

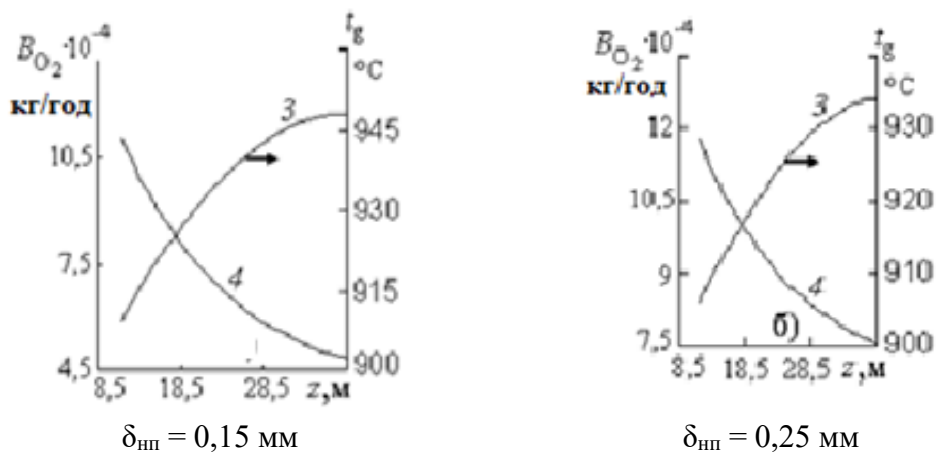


Рис. 13 – Розподіл температури газу t_g (3) і витрати кисню B_{O_2} (4)

Таке різке зниження витрачання кисню (за рахунок зменшення питомої поверхні коксозольних частинок) призводить до підвищення температури частинок в циклоні 1100 °C і вище, через що виникає небезпека розм'якшення золи та агломерації частинок. Цей ефект може бути виправлений за рахунок підвищення ступеня рециркуляції твердої фази.

На рис. 14 показано креслення котла ЦКШ Е-75-6.5-500Д, розрахованого на спалювання кеку витратою 26 т/год з оригінальною компоновкою конвективної частини та розподіленням тепла: топка (40 %), конвективна шахта (30%) і виносний теплообмінник КШ і циклон (30%), застосування яких дозволяє розширити глибину регулювання навантаження. Поверхні нагріву котла: в надшаровому просторі – 200,4 м², киплячому шарі – 74,5 м², і виносному теплообміннику КШ – 38,25 м².

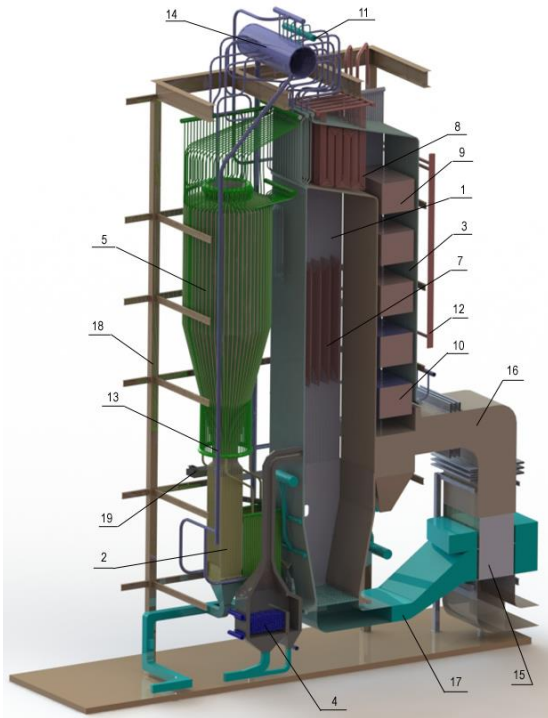


Рис. 14 – Компонування основних систем та вузлів ЦКШ-котлоагрегату: 1 – панелі екранів топки; 2 – блок пневмозатвору; 3 – панелі екранів конвективної шахти; 4 – теплообмінник киплячого шару; 5 – гарячий циклон; 6 – система золовидалення; 7 – радіаційний ширмовий пароперегрівник; 8 – конвективний ширмовий пароперегрівник; 9 – конвективний пароперегрівник; 10 – економайзер; 11 – пароохоложувальник; 12 – пароохоложувальник з вприском; 13 – трубопроводи у межах котла; 14 – барабан; 15 – повітропідігрівник; 16 – газоходи котла; 17 – повітропроводи котла; 18 – каркас котла; 19 – система паливоподачі

ВИСНОВКИ

1. Результати розрахунків на базі запропонованої методики розрахунку пиловугільного котла довели можливість забезпечення в діапазоні навантажень 40-100% температури димових газів після зони горіння вище температури затухання факелу, а температури частинок золи – нижче температури початку шлакування при сталих температурах пари.
2. Визначено оптимальні коефіцієнти рециркуляції димових газів та місце введення в топку газів рециркуляції для сталої роботи котла на мінімальних навантаженнях, що дозволить перерозподілити теплові потоки між пароперегрівниками первинної та вторинної пари і розширити діапазон регулювання потужності котла 40-100%. Визначено відношення радіаційного теплосприйняття ширмових пароперегрівників першого ступеня до другого ступеня 75:25 для забезпечення оптимальних температур середовища та стінок труб.
3. Розроблено концепцію та ескізний проєкт котла з твердим шлаковидаленням на супер-надкритичні параметри пари 28МПа/600°C/600°C в розмірах існуючої комірки вугільного котла з рідким шлаковидаленням для енергоблоку 300 МВт при очікуваному зниженні викидів оксидів азоту до 650 мг/нм³. Проведено оптимізацію застосування аустенітної сталі, що дозволило зменшити її частку в загальній металомісткості котла до 16%.
4. Застосування газифікатора щільного шару під тиском для пароповітряної газифікації волинського торфу дозволить замінити синтез-газом 20 % вугілля для котла з рідким шлаковидаленням, розширити діапазон регулювання навантаження до 60-100% та зменшити викиди золи і діоксиду сірки.

5. Створена в роботі модель газифікатора дозволяє визначити оптимальні розміри апарата та оптимальний ступінь збагачення повітря киснем та водяною парою для отримання синтез-газу потрібної якості.
6. Розроблена трьохзонна методика розрахунку котлів киплячого шару враховує наявність усіх видів теплообміну: кондуктивного, конвективного і радіаційного, і дозволяє на науковій основі здійснювати проєктування котлів киплячого шару, які характеризуються високою об'ємною концентрацією частинок палива та їх великими розмірами.
7. Дослідження процесу спалювання в низькотемпературному киплячому шарі з рециркуляцією твердої фази показали, що зростання витрати первинного повітря в 1,5 раза призводить до зменшення вмісту горючих в донній золі з 22% до 3,5%.
8. Реалізація концепції та робочої документації котла низько-температурного киплячого шару з рециркуляцією твердої фази Е-10-1,6 дозволить довести повноту вигорання вуглецю палива до 97 %, а рівень оксидів азоту знизити з 650 до 200 мг/нм³.
9. Результати розрахунків котла циркулюючого киплячого шару показали, що для підвищення ефективності спалювання та сталого режиму рециркуляції твердої фази доцільно знизити розмір коксозольної частинки в надшаровому просторі до 0,15 мм та підвищити ступінь рециркуляції твердої фази до 50.
10. Впровадження концепції та технічного проєкту котла циркулюючого киплячого шару Е-75-5,0-500Д дозволить включити в паливний баланс тверде паливо з вмістом золи до 60 % та знизити викиди NO_x.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- статті у наукових фахових виданнях України:

1. Майстренко О.Ю., Рохман Б.Б., Вифатнюк В.Г., Чернявський Н.В. (2008) Розробка нових технологій спалювання твердих палив у топках із псевдозрідженим шаром. 1. Інженерна методика розрахунку. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. – 2008. – №4. – 2-12. Фахове видання категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає в постановці задачі, підготовці концепції методики, виконанні та обробці розрахунків.

2. Майстренко О.Ю., Рохман Б.Б., Вифатнюк В.Г. (2009) Розробка нових технологій спалювання твердих палив у топках із псевдозрідженим шаром. 2. Результати експериментальних та розрахункових досліджень. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. – 2009. – №2 – 4-10. Фахове видання категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає в постановці задачі, підготовці концепції методики, виконанні та обробці розрахунків, підготовці висновків

3. Майстренко О.Ю., Рохман Б.Б., Вифатнюк В.Г., Чернявський М.В. (2009) Розробка нових технологій спалювання твердих палив у топках із псевдозрідженим шаром. 3. Динаміка вигорання коксових частинок. Основні схемні рішення КШ-

котлоагрегату паропродуктивністю 10 т/год. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. – 2009. – № 5. – 3-9. Фахове видання категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає у постановці задачі, підготовці концепції методики, виконанні та обробці розрахунків.

4. Майстренко А.Ю., Рохман Б.Б., Топал А.І., Вифатнюк В.Г., Чернявський М.В. (2010) Інженерна методика та чисельні результати розрахунку топки котлоагрегату з циркулюючим киплячим шаром. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. – 2010. – №5. – 6-13. Фахове видання, включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає у постановці задачі, підготовці концепції котла, виконанні та обробці розрахунків.

5. Майстренко О.Ю., Рохман Б.Б., Вифатнюк В.Г., Чернявський М.В. (2011) Теоретичне дослідження особливостей аеродинамічної структури та тепломасообмінних процесів у надшаровому просторі топки з циркулюючим киплячим шаром. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. – 2011. – №4. – 3-14. Фахове видання, включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає у постановці задачі, підготовці концепції котла, виконанні та обробці розрахунків.

6. Майстренко О.Ю., Дунаєвська Н.І., Засядько Я.І., Бондзик Д.Л., Шудло Т.С., Вифатнюк В.Г. (2012) Технологія та пальник для спалювання біомаси як допоміжного палива у факельних котлоагрегатах. *Наука та інновації*. – 2012. – Т. 8. – №4. – 38-88. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin8.04.083>. **Фахове видання, включено до категорії «А»** Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз SCOPUS (Q4), EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ), OpenAIRE, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає в розробці технологій, виконання розрахунків, креслень.

7. Топал О.І., Голенко І.Л., Гапонич Л.С., Вифатнюк В.Г. (2019). Використання промислових відходів збагачення коксівного вугілля для електроенергії. *Вуглехімічний журнал* – 2019 – №. 6. DOI: <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2019-0-6-24-32>. Фахове видання, включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає у постановці задачі, підготовці концепції котла, виконанні та обробці розрахунків.

8. Рохман Б.Б., Вифатнюк В.Г. (2020) Розробка концептуальних технічних рішень та способів їх реалізації при конструюванні пиловугільного парогенератора супернадкритичних параметрів пари 28 МПа/600°C/600°C для енергоблока 300 МВт. Частина 1. Математичний опис робочого процесу,

результати розрахунків та компоновки котла. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. – 2020 – № 4. – 4-19. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.4.2020.01>. Фахове видання, включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає в постановці задачі, виконанні та обробці розрахунків, розробці концепції котла.

9. Рохман Б.Б., Дунаєвська Н.І., Вифатнюк В.Г. (2021) Частина 2. Результати розрахунків котла та температур стінок його елементів на навантаженнях 50–70 %. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. – 2021 – № 1. – 4-19. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2021.01>. Фахове видання, включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає в постановці задачі, виконанні та обробці розрахунків, розробці концепції котла

10. Рохман Б.Б., Дунаєвська Н.І., Вифатнюк В.Г. (2021) Розробка концептуальних технічних рішень та способів їх реалізації при конструюванні пилувугільного парогенератора супернадкритичних параметрів пари 28 МПа/600°C/600°C для енергоблока 300 МВт. Частина 3. Особливості роботи котла на мінімальних навантаженнях 40–50 % з рециркуляцією димових газів. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. – 2021. – № 2 – 4-22. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2021.01>. Фахове видання, включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає в постановці задачі, виконанні та обробці розрахунків, розробці концепції котла.

11. Nekhamin M., Beztsennyi I., Dunayevska N., Vyfatnuik V. (2021) On using the ANSYS Fluent software for calculating the process of burning mixture of particles from different types of solid fuels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* – 2021. – 4(8(106)). Scopus. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061/2020/209762>. **Фахове видання, включено до категорії «А»** Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз **SCOPUS (Q3)**, EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ), OpenAIRE, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає в поставці задачі, обробці результатів та підготовці висновків.

12. Rokhman B.B., Dunayevska N.I., Vifatnuik V.G., Beztcennyi I.V. (2021) Co-firing of gas coal dust fine particles and synthetic peat gas. Part 1. Simulation of processes of steam-air gasification of peat in a fixed bed and combustion of dust and gas mix in a stream. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* – 2021. – № 6 – 057-065. Scopus. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/057>. **Фахове видання, включено до категорії «А»** Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз **SCOPUS (Q3)**, EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ), OpenAIRE, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає в поставці задачі, обробці результатів та підготовці висновків.

13. Rokhman B.B., Dunayevska N.I., Vifatnyuk V.G., Beztcennyi I.V. (2022) Co-firing of gas coal dust fine particles and synthetic peat gas. Part 2. Numerical studies on thermochemical processing of peat in a fixed layer. *Naukovyi-Visnyk-Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* 2022 № 1. 038-045. Scopus. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/038>. **Фахове видання, включено до категорії «А»** Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз **SCOPUS (Q3)**, EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ), OpenAIRE, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Google Scholar, Index Copernicus тощо.

Особистий внесок автора полягає в поставці задачі, обробці результатів та підготовці висновків.

- статті в інших виданнях:

14. Rokhman B.B., Vyfatnyuk V.G. (2023) The Two-Stage Process of Thermochemical Processing of Lignin in a Fixed Bed. 1. Technological Scheme of the Installation. Methods for Calculating Pyrolysis Gas Composition. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, – 2023. – Vol. 96. – Iss. 2. – 492-497. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02709-w>. Журнал включений до наукометричних баз **Scopus (Q3)**, CrossRef Open Journal Systems (CША); Bielefeld Academic Search Engine (BASE); Google Scholar (CША); OpenAIRE; WorldCat тощо.

Особистий внесок автора полягає в поставці задачі, обробці результатів, підготовці висновків.

15. Rokhman B.B., Vyfatnyuk V.G. (2023) The Two-Stage Process of Thermochemical Processing of Lignin in a Fixed Bed. 2. Simulation of the Working Process in the Reactor and Numerical Analysis of Gasification of Coke–Ash Biomass Residue. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, –2023. – Vol. 96. – Iss. 2. – 498-505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02710-3>. Журнал включений до наукометричних баз **Scopus (Q3)**, CrossRef Open Journal Systems (CША); Bielefeld Academic Search Engine (BASE); Google Scholar (CША); OpenAIRE; WorldCat тощо.

Особистий внесок автора полягає в постановці задачі, розробці концепції установки, обробці результатів, підготовці висновків.

16. Rokhman B.B., Vyfatnyuk V.G. (2023) The Two-Stage Process of Thermochemical Processing of Lignin in a Fixed Bed. 3. Simulation and Numerical Analysis of the Nonstationary Process of Pyrolysis in a Retort. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2023. Vol. 96. Is. 2. 506-512. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02711-2>. Журнал включений до наукометричних баз **Scopus (Q3)**, CrossRef Open Journal Systems (CША); Bielefeld Academic Search Engine (BASE); Google Scholar (CША); OpenAIRE; WorldCat тощо.

Особистий внесок автора полягає в постановці задачі, розробці концепції установки, обробці результатів, підготовці висновків.

- тези доповідей та матеріали конференцій:

17. Корчевой Ю.П., Майстренко О.Ю., Топал О.І., Вифатнюк В.Г. (2008) Метод спалювання твердого палива в форсованому киплячому шарі з рециркуляцією твердої фази. *Зб. тез доповідей 4 міжнародної науково-практичної конференції «Вугільна теплоенергетика: проблеми розвитку та реабілітації»*, Алушта, 18-21 вересня 2008 г., НВБК «Тріатлон» – с. 5-6.

Особистий внесок автора полягає в, розробці концепції та конструкції установки, підготовці висновків.

18. Вифатнюк В.Г. (2021) Розробка та реалізація технології виробництва паливних гранул з гідролізного лігніну. *Збірник наукових праць XVII міжнародної науково-практичної конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку»*. Київ, Інститут теплоенергетичних технологій НАН України, жовтень 2021 р. – с. 140-146. DOI: <https://doi.org/10.48126/conf2021>.

19. Баранюк О.В., Вифатнюк В.Г. (2023) Моделювання процесів теплообміну в топці котельного агрегату при спалюванні лушпиння соняшника на колосниковій решітці. *Збірник наукових праць XIX міжнародної науково-практичної конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку»*. Київ, Інститут теплоенергетичних технологій НАН України, жовтень 2023 р. – с. 164-169. DOI: <https://doi.org/10.48126/conf2023>.

Особистий внесок автора полягає в постановці задачі, розробці концепції та конструкції установки, обробці результатів, підготовці висновків.

20. Вифатнюк В.Г., Вольчин І.А., Ясинецький А.О. (2025) Транспортабельний промисловий газифікатор з вбудованим піролізером для розподіленої генерації. *Збірник наукових праць XXI міжнародної науково-практичної конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку»*. Київ, Інститут теплоенергетичних технологій НАН України, жовтень 2025 р. – с. 166-170. DOI: <https://doi.org/10.48126/conf2025>

Особистий внесок автора полягає в постановці задачі, розробці концепції та конструкції установки, обробці результатів.

АНОТАЦІЯ

Вифатнюк В. Г. Розроблення науково-технічних методів підвищення ефективності та екологічності котлів на твердому паливі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14 «Теплові та ядерні енергоустановки» / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019 р.

Дисертація присвячена розробленню та удосконаленню котельних установок на твердому паливі. Робота теплових енергоустановок має бути спрямована на підвищення їх коефіцієнта корисної дії, розширення паливної бази теплоенергетики і впровадження методів зменшення шкідливого впливу діяльності теплоенергетики на довкілля і клімат.

Було розвинуто методику розрахунку пиловугільного котла на супернадкритичні параметри пари при забезпеченні умов сталого горіння пиловугільного факелу та не допущення початку шлакування золи для котла з твердим

шлаковидаленням в діапазоні навантаження 40-100 % з використанням рециркуляції димових газів, розроблено методи регулювання первинної та вторинної пари, розроблено ескізний проєкт котла для енергоблоку потужністю 300 МВт з вибором оптимальних марок сталі для поверхонь нагріву та очікуваним коефіцієнтом корисної дії енергоблоку 46%, що дозволить зменшити валові викиди до 25%.

Розроблено модель газифікатора фіксованого шару під тиском 1,5 МПа для отримання синтез-газу з волинського торфу. Запропоновано використати газифікатор неперервної дії для подачі синтез-газу в нижню частину котла з метою забезпечення сталого шлаковидалення в вугільному котлі на мінімальних навантаженнях та заміни до 20 % твердого палива. Запропоновано нову технологію подачі вугілля марки в котел за допомогою газоструменевого ежектора, коли синтез-газ є транспортним агентом для подачі вугільного пилу.

Розроблено інженерну методику розрахунку котлів киплячого шару та котлів циркулюючого киплячого шару, яка враховує три види теплообміну: кондуктивного, конвективного та радіаційного, а також високу об'ємну концентрацію твердих частинок в КШ та їх великі розміри. В ній топка котла розбивається на зону киплячого шару, перехідну зону та зону пневмотранспорту. У зоні киплячого шару великі коксозольні частинки горять при подачі первинного повітря під решітку. У перехідній зоні, куди подається свіже паливо та вторинне повітря, виходять та горять леткі палива, а частинки палива розділяються за розміром. Великі частинки повертаються в зону киплячого шару. Дрібні частинки рухаються вгору до зони пневматичного транспортування для подальшого спалювання. Результати розрахунків дозволили розробити конструкції котлів середньої потужності для спалювання твердого палива в низькотемпературному киплячому шарі з рециркуляцією та в циркулюючому киплячому шарі.

Ключові слова: котел, тверде паливо, спалювання, викиди, супер-надкритичні параметри пари, газифікація, киплячий шар, циркулюючий киплячий шар.

ABSTRACT

Vyfatnyuk V. G. Development of Scientific and Technical Methods for Increasing the Efficiency and Environmental Friendliness of Solid Fuel Boilers. — Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.14.14 — Thermal and Nuclear Power Installations. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development and improvement of the solid fuel boiler. The operation of thermal power facilities should be aimed at increasing their efficiency, expanding the fuel base of the thermal power industry and implementing methods to reduce the harmful impact of thermal power industry activities on the environment and climate.

The calculation method of a pulverized coal boiler for super-supercritical steam parameters while ensuring stable combustion conditions of a pulverized coal torch and preventing the start of ash slagging for a dry bottom boiler in the load range of 40-100% was improved. The need for flue gas recirculation at low loads was proven, the methods for regulating the primary and secondary steam were developed, optimal flue gas

recirculation coefficients and the place of introduction of recirculation gases into the furnace for stable boiler operation at minimum loads were determined, which will allow redistributing heat flows between primary and secondary steam superheaters and expanding the boiler capacity control range of 40-100%. The ratio of radiation heat absorption of the first stage to second stage screen superheaters was determined to be 75:25 to ensure optimal temperatures of the medium and tubes walls. A draft boiler design for the modernization of the boiler for a 300 MW power unit within the existing cell has been developed with the selection of optimal steel grades for heating surfaces and the expected high efficiency of the unit and low emissions of nitrogen oxides.

A model of a fixed-bed air gasifier under a pressure of 1.5 MPa has been developed to produce syngas from Volyn peat. It is proposed to use a gasifier with continuous fuel supply to direct the formed synthesis gas to the lower part of the boiler to ensure stable slag removal in a coal-fired boiler at minimum loads and replace up to 20% of solid fuel. To calculate the processes in the gasifier, an original model was developed based on a two-dimensional system of parabolic and hyperbolic equations that describe aerodynamics, heat and mass transfer, and chemical reaction of the gas-dispersed medium in a fixed bed. Using the constructed model, it is possible to regulate the height of the pyrolysis zone by changing the ratio of two speeds: the speed of movement of peat particles and the chemical reaction by changing the proportion of air enrichment with oxygen and water vapor. Such an organization of the working process allows you to regulate the temperature of the phases at the outlet of the gas generator. A new technology for supplying coal of the brand to the boiler using a gas jet ejector is proposed, when syngas is a transport agent for supplying coal dust.

An engineering method for calculating fluidized bed boilers and circulating fluidized bed boilers has been developed, which considers three types of heat transfer: conductive, convective and radiative, as well as a high volumetric concentration of solid particles in the fluidized bed and their large size. In it, the boiler furnace is divided into a fluidized bed zone, a transition zone and a pneumatic transport zone. The aerodynamic characteristics of the fluidized bed zone are calculated using the Archimedes and Reynolds criteria, which determine the height, cross-sectional area and mass of the fluidized bed, as well as the coefficients of conductive-convective and radiative heat transfer. In the fluidized bed zone, large coke oven particles burn when primary air is supplied under the grate. In the transition zone, where fresh fuel and secondary air are supplied, volatile substances are released and burned, and the fuel particles are separated by size – large particles return to the fluidized bed zone. Fine particles move upwards to the pneumatic transport zone for further combustion. The height of the pneumatic transport zone is determined by the initial temperature of the flue gas and the heat absorption of the heating surfaces. The cyclones serve to return unburned fuel particles to the fluidized bed zone. The results of the calculations allowed us to develop the designs for medium-capacity boilers for burning the solid fuel in a low-temperature fluidized bed with solid phase recirculation and in a circulating fluidized bed.

Keywords: boiler, solid fuel, combustion, emissions, super-supercritical steam parameters, gasification, fluidized bed, circulating fluidized bed.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056

Підписано до друку __.__.2026 р. Формат 60х90 ¹/₁₆. Папір офсетний.
Гарнітура Nimes. Ум. др. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 1,2.
Наклад 100 прим. Зам. №

Видавництво «Політехнік», КПІ ім. Ігоря Сікорського
аул. Політехнічна, 14, корп. 15, Київ, 03056.
тел. (044) 204-81-78