

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**  
**Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління**

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**МАРКІНА ЛЮДМИЛА МИКОЛАЇВНА**

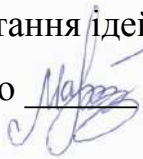
УДК 628.477:662.613.12:502.174

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ  
ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТНОГО ПРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ  
УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ**

**21.06.01 – Екологічна безпека (Технічні науки)**

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело  Л.М. Маркіна

Науковий консультант – **Антонов Анатолій Васильович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри екологічного аудиту та експертизи Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління.

**Київ 2020**

## АНОТАЦІЯ

**Маркіна Л.М.** Розвиток наукових основ екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – Екологічна безпека – Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ, 2020.

*Ідея роботи* полягає в зменшенні шкідливого впливу на довкілля об'єктів накопичення, зберігання твердих органічних відходів, а також процесів їх утилізації шляхом застосування екологічно прийняттого піролізного способу.

*У вступі* наведено актуальність теми дослідження, ідею, мету і завдання, а також об'єкт і предмет дослідження, відображено наукову новизну отриманих результатів, їх практичну значимість; наведено дані про апробацію результатів дослідження і їх публікації.

*Перший розділ* присвячено аналізу світової та національної наукової інформації за напрямком поводження з відходами, впливу їх на навколишнє середовище та здоров'я людей, технологій їх утилізації та продуктів переробки. Фіксація негативних показників процесів системи поводження з відходами, таких як вплив полігонів або сміттєпереробних підприємств (СПП), продуктів їх діяльності на довкілля, відсоток корисного використання вторинних продуктів або отриманих продуктів дуже повільно сприяють розвитку та впровадженню екологічно прийнятних технологічних процесів поводження та утилізації твердих органічних відходів (ТОВ).

Це привело до необхідності розвитку наукових основ екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів для зменшення негативного впливу на довкілля, що враховують особливості та закономірності термічної деструкції зазначених відходів, і, як наслідок, мінімізує потрапляння небезпечних речовин до атмосферного повітря, ґрунтів та поверхневих і підземних вод у наднормативних концентраціях, шкідливих для довкілля та здоров'я людей, забезпечуючи при цьому екологічну безпеку процесу утилізації в цілому.

*У другому розділі* описані об'єкт та предмет дослідження, методи теоретичного

(математичне моделювання, розрахункові методи), практичного дослідження (фізичне моделювання, натурний експеримент на лабораторних установках, апаратне визначення параметрів процесу і характеристик отриманих продуктів), методики проведення експериментів та математичні методи обробки результатів. Досягнення визначеної мети та розв'язання поставлених завдань засновано на комплексному використанні підходів та методів системного аналізу.

У розділі наведено дані щодо можливих дослідних сумішей твердих органічних відходів з різним відсотковим змістом їх складових компонентів з урахуванням середньостатистичних кількісних та якісних характеристик накопичених відходів. Наведено методи контролю за станом екологічної безпеки при проведенні процесів їх термічної деструкції, а саме: визначення розподілення гетероатомних сполук за контурами з додатковою циркуляцією продуктів деструкції піролізного процесу, наявність шкідливих небезпечних компонентів в кінцевих продуктах, контроль параметрів навколишнього середовища в робочій зоні, вміст токсичних металів в рідкому продукті та твердому залишку.

Для реєстрації показників процесу використовували вимірювальні прилади прямої дії (термопари) та гравіметричний метод. Розроблено програми випробувань на експериментальних установках: «Програма проведення дослідження температурних та часових характеристик технології циркуляційного піролізу з різними видами полімерних відходів» та «Програма проведення досліджень хімічного складу рідкої легкої фракції, отриманої піролізним процесом, з різних видів полімерних відходів на установці рідкого хроматографу NeoCHROM».

При розрахунках елементів конструкцій технологічного обладнання застосовувались загальні рівняння теплопровідності. Методи оптимізації в моделюванні технологічних процесів здійснено з використанням комп'ютерних технологій, аналітично-розрахункових методів.

У процесі проведення практичних та експериментальних досліджень використано наступні методи: інфрачервоної спектрофотометрії (Beckman DU 520) та газо-рідинної хроматографії – для дослідження складу і властивостей отриманих продуктів, визначення долі сконденсованих та кінцевий фракцій, їх складу та якості (газовий хроматограф NeoCHROM, програмне забезпечення для обробки даних –

система UniChrom, для автоматизації та виключення похибки хроматограф облаштований системою CTC A200S Autosampler), також методи вязкозіметрії, калориметрії; наявність токсичних сполук металів у рідкому та твердому продуктах (Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn) визначались атомно-адсорбційним спектрофотометром C-115M1, статистичної ідентифікації – для перевірки однорідності та достовірності експериментальних даних. Отримані результати оброблялись з використанням методів статистичної та математичної обробки даних.

У *третьому розділі* представлено розроблену математичну модель деструкційних перетворень твердих органічних відходів при рециркуляції в піролізному процесі з визначенням кінетичних показників: термічна деструкція суміші органічних відходів, математично описується системами диференціальних кінетичних рівнянь, кількість яких залежить від кількості компонентів суміші відходів. Розроблено алгоритм математичного розрахунку матеріального балансу. Проведено моделювання процесу рециркуляції та встановлення рівноваги парогазової суміші на контурах циркуляційного піролізу.

Результатом моделі є розрахунки визначення складу та мольного потоку рідкої та парової фази, що розділяються на контурах на основі спільного рішення системи рівнянь матеріального балансу рециркуляції парогазової суміші (ПГС) в циркуляційній системі та рівняння рівноважних фаз за вмістом кожного компонента з використанням програмного комплексу ASTRA 4. Визначено параметри фазорозділення на контурах циркуляційної системи при яких досягається послідовна рециркуляція до 90% нелетких компонентів первинної газової суміші.

Встановлено, що найбільш оптимальний режим охолодження для 3 контуру: приймається при температурі 355-360°C, за якої досягається отримання масових витрат газо-рідинних потоків. Найбільш оптимальний режим охолодження для 2 контуру приймається при температурі 245°C, за якої досягається отримання масових витрат газо-рідинних потоків. На 3 контурі постає завдання отримання товарних продуктів - піролізний газ та рідка фракція. Для цього обрано температуру в 140-170°C, яка дозволяє забезпечити її масовий вихід у кількості 72% для сировини – зношені автошини, та 52% для сировини – суміш полімерних відходів.

Визначено основні термодинамічні параметри, динаміку зміни та залежність

від температури, на базі яких побудовано графіки зміни термодинамічних показників в залежності від температури. Термодинамічні параметри стану ПГС дозволяють оцінити рівноважну ступінь розділення парогазових потоків за рівнянням залежності константи рівноваги від зміни ентальпій та ентропій.

У четвертому розділі представлено шляхи інтенсифікації процесів та забезпечення екологічної безпеки процесів, обладнання та продуктів термічної деструкції органічної сировини при циркуляційному піролізі. Для відпрацювання робочих режимів, виявлення особливостей процесів деструкції різнорідних органічних відходів, визначення параметрів роботи піролізного обладнання, встановлення екологічної безпеки розроблено, спроектовано та виготовлено лабораторне та промислове устаткування з роботою в циклічному режимі (продуктивність 10 кг/цикл – ЕУ БЦП-14) та безперервному режимі (продуктивність 100 кг/добу – ЕКОПР-18Д, продуктивність 500 кг/добу – Екопір-БЦП).

Проведено комп'ютерне моделювання температурного режиму реактора експериментальної установки ЕУ БЦП-14. Аналіз результатів моделювання показує, що характеристики перехідних процесів нагріву у різних точках реактора суттєво відрізняються між собою, що підтверджує доцільність розгляду реактора циркуляційного піролізу як об'єкта керування з розподіленими параметрами при його моделюванні. В ході проведених випробувань було виявлено, що тривалість виходу на режим реактора залежить від складу сировини, складає 90-130 хв. Час збільшується до 40%, якщо у відходах збільшується кількість поліетилену. Загальний час повного процесу деструкції 180-250 хв. для сумішей композитних матеріалів (суміші полімерних речовин). Найбільший вихід газу був зафіксований при переробці пакувальної клейкої стрічки (поліпропілену з домішками) та пляшок (поліетилентерефталату), найбільший вихід рідкого продукту, найменший час переробки матеріалу 180-200 хв. – для медичних шприців з поліпропілену. Для експериментального визначення кінетичних характеристик термічного розкладання відходів було використано дані диференціального термогравіметричного аналізу. В результаті визначено значення активаційних величин кінетичної моделі термічної деструкції відходів, термодинамічні параметри стану системи, які дозволяють прогнозувати можливість здійснення процесу конденсації і оцінити взаємний вплив

речовин, а також представляти відносні швидкості рівноважних реакцій перетворення при конденсації на окремо взятому контурі.

Проведені дослідження зусиль стиснення плунжерною системою сировини розміром від 2 до 20 мм в різних вихідних конусних насадках з метою забезпечення екологічної безпеки безперервного процесу циркуляційного піролізу за рахунок оптимізації геометрії вихідної насадки і, відповідно, полімерної технологічної пробки, утвореної різними фракціями подрібнених сумішей твердих органічних відходів. Представлені розрахункові напруження в шарах середовища, яке стискається і величина його переміщення, в залежності від тривалості процесу динамічного стискання, які доводять, що зусилля стискання в 1 МПа достатнє для забезпечення надійного безперервного завантаження реактора з використанням запропонованої конструкції плунжерної системи.

Розроблена фізична модель піролізного реактора для дослідження реологічних властивостей цілих зношених автошин в процесі нагріву та стискання, що в перспективі дозволить удосконалити технологію термічної утилізації відходів і збільшити заповнення реактора безперервної дії до 98%, при цьому виникає можливість суттєво збільшити продуктивність установки в порівнянні з установками циклічної дії з реакторами у вигляді реторт, в які завантажуються куски автошин. Результати розрахунків і експериментальні дослідження підтвердили можливість зменшення величини стискання при попередньому нагріву шин до температури 125°C при утилізації тепла димових газів з температурою до 250-300°C, які виходять після обігріву піролізного реактора. Експериментально встановлено, що величину стискання, можна приймати постійною в границях 0,18-0,2 кг/см<sup>2</sup>, при цьому час піролізу сировини зменшується на 25-30% в порівнянні зі стандартним піролізом автошин в ретортних реакторах з циклічним режимом. За допомогою комп'ютерної програми COMSOL Multiphysics визначено фізичні характеристики проведення процесу деструкції автошин: при збільшенні щільності на 60%, теплопровідність збільшується майже в 100 разів, скорочується час процесу утилізації цілих зношених шин на 25-30%.

*У н'ятому розділі* у результаті проведеної багатокритеріальної оцінки факторів екологічної небезпеки визначено пріоритети факторів за наступними критеріями:

ймовірність виникнення тої чи іншої загрози навколишньому середовищу; очікувані наслідки від дії фактору; рівень якості впроваджених технічних або технологічних рішень щодо запобігання прояву цього фактору. Це дозволило визначити технологічні вузли та процеси, які потенційно є найбільш небезпечними для навколишнього середовища. Побудовано ієрархічну структуру прийняття рішень та сформовано наступні критерії оцінки, а саме: ймовірність виникнення тої чи іншої загрози навколишньому середовищу, очікувані наслідки від дії фактору та рівень якості впроваджених технічних або технологічних рішень щодо запобігання прояву цього фактору.

Завдяки проведеним розрахункам залежності температур охолодження від зміни константи рівноваги встановлено, що саме при температурі 340-350°C на першому контурі конденсується фракція, що містить у своєму складі найбільшу кількість гетерогенних сполук. Однак, в отриманому кінцевому продукті вміст сірки значно менший (всього 0,3%) від вмісту сірки в первинній масі відходів (3%), що не перевищує ГДК. Сполуки сірки представлені меркаптанами (тиолами), сульфідами та тиофенами. Вміст азоту та кисневмісних сполук в кінцевому продукті дуже малий, менше 0,01%

Отримані результати показали наявність важких металів в пробах рідкого залишку отриманого рідкого продукту. Вміст Cu, Zn, Ni не відповідає нормативам для дизельного палива, проте задовольняє вимогам для палива нафтового (мазут).

В результаті проведеного аналізу твердої фракції на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С-115-М1 було підтверджено наявність Fe, Cu, Ni, Mg. Встановлена концентрація міді, яка дорівнює 0,11655 мг/дм<sup>3</sup>, що не перевищує встановлені ГДК міді в ґрунті та відповідають нормам СанПін 4630-88.

У шостому розділі визначено напрямки впровадження установок утилізації твердих органічних відходів, які здійснюють екологічно прийнятний піролізний процес. Проведено формалізацію основних задач автоматичного керування та контролю узагальненого технологічного комплексу утилізації цілих зношених автомобільних шин (АШ). Визначено, що застосування автоматики з запропонованою функціональною структурою дає змогу повністю автоматизувати процеси контролю і керування технологічними комплексами утилізації, що дозволяє

суттєво підвищити ефективність роботи та економічні показники даних комплексів.

Розроблена нова технологія екопірогенезису (ЕПГ) і нестандартне обладнання для неї, яка об'єднує сукупність процесів властивих багатоконтурному циркуляційному піролізу (БЦП) і процесів багатоконтурної двозонної газифікації (БЦДГ) органічних відходів наявних в даному мікрорайоні. Зазначені процеси супроводжуються формуванням внутрішніх перетворень при глибокому термічному розкладанні проміжних токсичних речовин з одержанням екологічно безпечних вихідних продуктів (піролізного газу, генераторного газу, рідкого палива легких фракцій при мінімальному обсязі твердого залишку, який можна передати на безпечне захоронення на полігон за традиційною схемою).

Проаналізовано ризикові події, ідентифіковано ризики та проведена їх таксономія, на основі якої ризики сформовано до 24 груп. Досліджено практику експлуатації підприємств з утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) та встановлено яким чином групи ризиків можуть ускладнювати процес управління цими проектами в цілому. На основі методу експертних оцінок, проведено якісний аналіз груп ризиків, встановлено ранги ризиків, їх вплив на час, вартість та якість реалізації проекту підприємства з утилізації відходів.

**Ключові слова:** екологічна безпека, доквілля, тверді органічні відходи, циркуляційний піролізний процес, шкідливі речовини, піролізні установки, інтенсифікація, товарні продукти.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

*Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science*

1. **Markina L., Tymchenko I.** Comprehensive evaluation of environmental hazard factors at disposal of waste using the "ecopyrogenesis" technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 2/6 (74), P. 38 – 44. (Scopus, Index Copernicus) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39941>. *Особистий внесок: сформовано фактори екологічної небезпеки при утилізації відходів за технологією піролізу, визначено основні ймовірні аварійні ситуації, досліджено характер їх впливу та методи зменшення загроз навколишньому середовищу.*



2. Ryzhkov S., Rudiuk N., **Markina L.** Research of Thermal conductivity of the Condensed Mass of the Whole Waste Tires and Determination of Their Optimum Arrangement in the Pyrolysis Reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 4/5 (82), P. 12-19. (Scopus, Index Copernicus). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.73557> *Особистий внесок: досліджено температурне поле в об'ємі ущільненої суміші компонентів цілих автошин в реакторі та оптимальне їх розташування в піролізному реакторі.*
3. Ryzhkov S., **Markina L.**, Kryva M. Modeling of Destruction Processes During Recycling of Rubber-Technical Waste Using the Technology of Multi-Contour Circulation Pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 3/10 (87), P. 28-35. (Scopus, Index Copernicus). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101725> *Особистий внесок: Розроблено кінетичну схему термічного розкладання органічних відходів за технологією циркуляційного піролізу*
4. **Markina L.M.**, Kryva M. S. Study of technological parameters of pyrolysis of waste tires under static load. *Science and Innovation*. 2018, 14(6): P. 35-49. (Web of Science, Index Copernicus International). <https://doi.org/10.15407/scin14.06.038> *Особистий внесок: досліджено фізичні характеристики теплотехнічного процесу деструкції зношених автошин в піролізному реакторі в поєднанні із статичним навантаженням.*

#### **Статті у фахових наукових виданнях із переліку МОН України**

5. Рижков С. С., **Маркіна Л. Н.**, Рудюк М. В. Інноваційні технології утилізації органічних відходів з отриманням альтернативного палива на основі багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2010. № 2 (431), С. 133-142. *Особистий внесок: проведено порівняльний аналіз піролізного устаткування, техніко – економічні розрахунки.*
6. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.** Аналіз процесу регулювання потоків в циркуляційній системі багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Електронне видання : Вісник НУК*. 2010. № 1, С. 144-151. *Особистий внесок: встановлено можливості регулювання ступенем деструкції на проміжних етапах переробки,*

*визначено технологічні температурні показники контурів циркуляційної системи.*

7. **Маркіна Л. М.**, Філатова М. І. Аналіз можливості застосування термічних методів деструкції органічної сировини для утилізації побутових відходів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2010. № 6 (435), С. 152-159. *Особистий внесок: Виявлено можливості процесу циркуляційного піролізу для регулювання режимів утилізації різних видів органічної сировини.*

8. **Маркіна Л. М.** Розробка новітньої технології енергозбереження та екологічної безпеки при утилізації органічних відходів методом екопірогенезису. *Збірник наукових праць НУК*. 2011. № 4 (439), С. 156-163. *Особистий внесок: запропоновано новітню технологію утилізації органічних побутових відходів методом екопірогенезис.*

9. Рижков С. С., **Маркіна Л. Н.**, Рудюк М. В., Ощип О. В. Анализ процессов деструкции диоксинов и тяжелых углеводородов при многоконтурном циркуляционном пиролизе твердых бытовых отходов. *Научно-технический журнал : Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2011. № 6, С. 43-48. *Особистий внесок: обґрунтовано технологічні параметри циркуляційного піролізу для екологічно безпечного функціонування піролізної установки.*

10. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Лісова А. В. Тверді побутові відходи як сировина для двостадійного процесу термічної деструкції. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2011. № 3 (438), С. 140-148. *Особистий внесок: досліджено та проаналізовано показники твердих відходів та визначено доцільність їх використання для одержання нетрадиційних видів палива.*

11. Рижков, С. С., **Маркіна Л. М.**, Рудюк М. В., Філатова М. І. Дослідження раціональних технологічних параметрів роботи установки ЕУ БЦП-14. *Вісник НУК*. Миколаїв : НУК. 2012. № 2, С. 574-583. *Особистий внесок: проведено експериментальні дослідження з переробки різномірної сировини, досліджено технологічні параметри роботи експериментальної піролізної установки.*

12. Трохименко Г. Г., **Маркіна Л. М.**, Циганюк Н. В., Цимбал Д. О. Виявлення важких металів у твердому залишку продуктів БЦП методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії. *Електронне видання : Вісник Національного університету кораблебудування*. Миколаїв : НУК. 2012. №2, С. 410-413. *Особистий внесок:*

визначено наявність важких металів у твердому залишку продуктів циркуляційного піролізу методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії.

13. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Мирошніченко М. В. Екологічна безпека продуктів екопірогенезису та використання їх як альтернативного палива. *Екологічна безпека*. 2012. № 2(14), С. 98-103. *Особистий внесок: обґрунтовано екологічну безпеку продуктів піролізу та визначено шляхи використання їх як альтернативного палива.*

14. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Рудюк М. В. Аналіз теплового потенціалу технологій піролізу твердих побутових відходів і шляхи його реалізації. *Збірник наукових праць НУК*. 2012. № 1 (442), С. 124-127. *Особистий внесок: встановлено тепловий потенціал процесів піролізу ТПВ, визначено шляхи його реалізації у напрямку скорочення енергетичних витрат за умови екологічної безпеки.*

15. Кондратенко Ю. П., **Маркіна Л. М.**, Козлов О. В. Математичне моделювання температурних режимів реактора багатоконтурної піролізної установки для задач автоматичного керування. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2012. № 2 (443), С. 84-90. *Особистий внесок: визначено температурні режими піролізного реактора для розробки математичної моделі керування поведінкою об'єкта в усталеному та перехідному режимах.*

16. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Сербін С. І., Радченко М. І. Кондиціонування повітря на вході турбогенератора використанням скидної теплоти піролізної технології утилізації твердих побутових відходів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2012. № 3-4 (444), С. 128-132. *Особистий внесок: проаналізовано теплову ефективність процесів в піролізному устаткуванні для кондиціонування повітря на вході турбогенератора, що працює на піролізному газі.*

17. Рижков С.С., **Маркіна Л. М.**, Крива М. С. Аналіз особливостей фізико-хімічних процесів багатоконтурного циркуляційного піролізу органічних відходів. *Збірник наукових праць НУК*. 2012. № 5-6 (445), С. 125-131. *Особистий внесок: визначено особливості фізико-хімічних процесів, що проходять при циркуляційному піролізі органічних відходів на експериментальній установці.*

18. **Маркіна Л. М.**, Мирошніченко М. В. Альтернативні рідкі палива з відходів:

переваги та недоліки. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2013. № 4, С. 23-30. *Особистий внесок: проведено порівняльний аналіз продуктів циркуляційного піролізу органічних відходів з паливами нафтового походження.*

19. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Крива М. С. Дослідження кінетики термічної деструкції органічних відходів. *Екологічна безпека*. 2013. № 2(16), С. 82-88. (Index Copernicus). *Особистий внесок: розроблено кінетичну модель деструкції реакційної маси відходів при циркуляційному піролізі.*

20. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Рудюк М. В., Філатова М. І. Контроль та дослідження можливих модифікацій рідких вуглеводнів піролізного палива. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2014. № 5 (455), С. 117-125. (Crossref, eLIBRARY, WorldCat, Base-Search, Scholar.google). *Особистий внесок: експериментально досліджено модифікації рідких вуглеводнів одержаних в режимах за технологією циркуляційного піролізу, проведено детальний вуглеводневий аналіз зразків отриманого рідкого продукту.*

21. Козлов О. В., **Маркіна Л. М.**, Рудюк М. В. Автоматизація процесів керування технологічними комплексами утилізації цілих зношених автошин. *Наукові праці. Науково-методичний журнал : Комп'ютерні технології*. 2015. № 254 (Том 266), С. 131-137. (Scholar.google). *Особистий внесок: проведено формалізацію основних задач автоматичного керування та контролю обладнання утилізації цілих зношених автомобільних шин.*

22. **Маркіна Л. М.**, Тимченко І. В. Розробка автоматизованої системи управління екологічними ризиками при утилізації відходів за технологією «Екопірогенезіс». *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 2/4(22), С.50-56. (Index Copernicus). *Особистий внесок: розроблено структуру автоматизованої системи управління екологічними ризиками при утилізації відходів за технологією циркуляційного піролізу.*

23. **Маркіна Л. М.** Математичне моделювання процесів автоматичного завантаження відходів у реактор. *Екологічні науки*. 2018. №1 (20), Том 2, С.74-83. (Index Copernicus).

24. Савіна О. Ю., **Маркіна Л. М.** Ідентифікація та аналіз ризиків портфеля наукомістних проектів підприємства з утилізації відходів за технологією

«екопирогенезис». *Управління проектами та розвиток виробництва*. 2018. №1 (66), С. 31-46. (Scholar.google). *Особистий внесок: ідентифіковано ризики проектів утилізації твердих органічних відходів, проведена їх таксономія, отримано групи ризиків, досліджено вплив їх на якість, час реалізації та вартість проекту підприємства.*

25. **Маркіна Л. М.**, Крива М. С. Забезпечення екологічної безпеки під час термічної утилізації гумотехнічних відходів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : технічні науки*. 2019. Том 30 (69). № 1. Частина 2. С. 41-50. (Index Copernicus). *Особистий внесок: розробка математичної моделі процесу рециркуляції та встановлення паро-газової рівноваги при розділенні потоків багатокомпонентної парогазової суміші на контурах циркуляційної системи, розробка методики розрахунку константи рівноваги та визначення складу і енергетичного потенціалу сконденсованих фракцій для визначення екологічної безпеки термічної утилізації гумотехнічних відходів.*

26. **Маркіна Л. М.**, Крива М. С. Забезпечення екологічно обґрунтованого регулювання утворенням небезпечних речовин під час термічної утилізації гумотехнічних відходів. *Екологічні науки*. 2019. №1 (24), Том 2, С. 136-143. (Index Copernicus). *Особистий внесок: проведено моделювання технологічних режимів рециркуляції парогазової суміші в циркуляційній системі шляхом керування парорідинною рівновагою матеріальних потоків.*

#### ***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати***

27. Рыжков С. С., **Маркина Л. Н.**, Рудюк М. В., Заболотная Ю. В. Отработка пиролизной технологии утилизации органических отходов для морехозяйственного комплекса – система подачи отходов в пиролизный реактор. *Судостроение и морская инфраструктура*. 2014. № 2, С. 131-143. (eLIBRARY, Україніка наукова). *Особистий внесок: розроблено, створено та досліджено конструктивну схему та ефективну роботу плунжерної системи завантаження відходів в реактор циркуляційного піролізу.*

28. **Маркіна Л. М.**, Потай І. Ю. Проблеми управління проектом «Екопирогенезис» в рамках екологизации бизнеса. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2014. № 6 (456), С. 120-127. (Crossref, eLIBRARY,

WorldCat, Base-Search, Scholar.google) *Особистий внесок: проаналізовано потенційну інвестиційну привабливість проекту утилізації відходів піролізним процесом, розроблено схему управління та моніторингу.*

29. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Крива М. С., Глиняна В. В. Аналіз основних термодинамічних показників багатоконтурного циркуляційного піролізу органічних відходів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2015. № 4 (460), С. 104-112. (Crossref, eLIBRARY, WorldCat, Base-Search, Scholar.google) *Особистий внесок: проведено термодинамічний аналізу процесу термічної утилізації різних видів органічних відходів за технологією циркуляційного піролізу для отримання оцінки ексергетичної ефективності технології.*

30. Рижков С. С., Трохименко Г. Г., **Маркіна Л. М.**, Циганюк Н. В. Визначення концентрації важких металів у рідкій фракції продуктів багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2015. №1 (457), С. 92-98. (Crossref, eLIBRARY, WorldCat, Base-Search, Scholar.google) *Особистий внесок: експериментальне визначення якісних та кількісних характеристик важких металів у рідкій фракції піролізу методом атомно-абсорбційної спектрометрії та спектрофотометрії.*

31. **Маркіна Л. М.** Дослідження характеристик ущільнення маси цілих зношених автошин в піролізному реакторі. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2017. № 3 (470), С. 121-128. (Crossref, eLIBRARY, WorldCat, Base-Search, Scholar.google).

32. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Рудюк М. В., Філатова М. І., Литвинов І. В. Експериментальна установка для дослідження процесу багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Електронне видання : Вісник Національного університету кораблебудування за 2012 рік*. Миколаїв : НУК. 2012. С. 381-386. *Особистий внесок: виконано комп'ютерне моделювання та теоретичні розрахунки характеристик теплових потоків навколо піролізного реактора.*

### ***Патенти на винахід та корисну модель України***

33. Установка для безперервного піролізу твердих органічних відходів : патент на винахід 96079 Україна. **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК : F23G 5/027 (2006.01). № а 201005978 ; заявл. 18.05.2010 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

34. Установа для циркуляційного піролізу інфікованих медичних відходів : патент на винахід 96080 Україна. **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК : F23G 5/027 (2006.01). № а 201005980 ; заявл. 18.05.2010 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.
35. Установа піролізу органічних відходів з безперервним вивантаженням пірокарбону : патент на винахід 96086 Україна. **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С., Рудюк М.В. МПК : F23G 5/027 (2006.01). № а 201008360 ; заявл. 05.07.2010 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.
36. Спосіб утилізації органічних відходів – екопірогенезіс : патент на корисну модель 66822 Україна. **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК (2012.01) : F23G 5/027 (2006.01), C10G 1/00. № и 201105242 ; заявл. 26.04.2011 ; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2.
37. Установа безперервної термічної утилізації термопластичних відходів : патент на винахід 102308 Україна. **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК : (2013.01) : B09B 3/00, C10G 1/00, C10B 53/07 (2006.01), C08J 11/12 (2006.01). № а 201114361 ; заявл. 05.12.2011 ; опубл. 25.06.2013. Бюл. № 12.
38. Спосіб теплопостачання житлового мікрорайону з використанням власних альтернативних видів палива : патент на винахід 102773 Україна. **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК (2013.01) : F24D 3/00, F23G 5/027 (2006.01), C10G 1/00, C10B 53/07 (2006.01), C08J 11/00. № а 201204564 ; заявл. 11.04.2012 ; опубл. 12.08.2013, Бюл. № 15.
39. Спосіб вимірювання рівня завантаженості відходів у реакторах багатоконтурних піролізних установок : патент на корисну модель 92217 Україна. Кондратенко Ю.П., Козлов О. В., **Маркіна Л. М.**, Рудюк М. В., Коробко О. В. МПК : G21C 17/035 (2006.01), G01F 23/22 (2006.01). № и 201400945 ; заявл. 03.08.2014 ; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15.
40. Установа для безперервного піролізу подрібнених полімерних відходів з системою їх подачі в реактор : пат. на винахід 110424 Україна. **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С., Рудюк М. В., Заболотна Ю. В. МПК F23G 5/027 (2006.01). № а 201406653 ; заявл. 13.06.2014 ; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.
41. Установа для безперервного піролізу подрібнених термопластичних полімерних відходів з системою контролю рівня розплаву в реакторі : патент на винахід 110669

Україна. **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК (2016.01) F23G 5/027 (2006.01) G01F 23/22 (2006.01) G05D 9/00. № а 201407317 ; заявл. 25.01.2016 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

42. Універсальна автоматизована установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин : патент на винахід 110678 Україна. **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С., Рудюк М. В., Крива М. С. МПК F23G5/24 (2006.01), F23G 5/027 (2006.01), C08J 11/04 (2006.01), C10G 1/10 (2006.01), C10B 53/07 (2006.01). № а 201410925 ; заявл. 06.10.2014 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

43. Спосіб термічної утилізації органічних відходів з сезонним алгоритмом використання одержаних альтернативних видів палива при теплопостачанні мікрорайону : патент на винахід 110670 Україна. **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С., Рудюк М.В. МПК (2016.01) : F23G 5/027 (2006.01), C10G 1/00, B09B 3/00, C10B 53/00. № а 201407317 ; заявл. 01.07.2014 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

44. Установка безперервної глибокої термічної утилізації термопластичних відходів з одержанням рідкого палива легких фракцій : пат. на корисну модель 120657 Україна. Рудюк М. В., **Маркіна Л. М.**, Новоселова М. М. МПК (2017/01) : F23G5/027 (2006.1) B09B3/00 C10G1/00. № и 2017 05520 ; заявл. 06.06.2017 ; опубл. 10.11.17, Бюл. № 21.

45. Спосіб безперервної деполімерізації суміші полімерних відходів з отриманням рідких, газоподібних і твердих продуктів: пат. на корисну модель 124714 Україна. Рудюк М. В., **Маркіна Л. М.**, Новоселова М. М. МПК (2018.01) : F23G5/027 (2006.1) C10G1/00. № и 2017 09242 ; заявл. 19.09.2017 ; опубл. 25.04.18, Бюл. № 8.

46. Установка безперервної деполімерізації суміші полімерних відходів з отриманням рідких, газоподібних і твердих продуктів : патент на корисну модель 125168 Україна. Рудюк М. В., **Маркіна Л. М.**, Новоселова М. М. МПК (2018/01) : F23G5/027 (2006.1) B09B3/00 C10G1/00. № и 2018 00164 ; заявл. 19.09.2017 ; опубл. 25.04.18, Бюл. № 8.

#### ***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

47. **Маркіна Л. М.**, Філатова М. І. Підвищення енергетичних властивостей газоподібного продукту при двостадійному процесі. Збірник матеріалів 6-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та*



- енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2011. С.109-112.
48. **Маркіна Л. М.** Впровадження екологічно безпечної технології Екопірогенезіса при утилізації органічних побутових відходів з одержанням альтернативного палива. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: Матеріали 2-ої міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв : видавництво НУК. 2011. С. 457-460.
49. Рижков С. С., Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Розробка екологічно безпечної технології екопірогенезісу для утилізації органічних відходів та низькосортного вугілля з отриманням альтернативних видів пального. Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 10-13.
50. **Маркіна Л. М.**, Мірошниченко М. В. Розрахунок викидів NOx при спалюванні альтернативних видів палива отриманих методів двостадійного процесу утилізації органічної сировини. Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 96-98.
51. **Маркіна Л. М.**, Філатова М. І. Моделювання параметрів багатоконтурного циркуляційного піролізу для розробки експериментальної установки. Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 113-114.
52. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Крива М. С. Визначення хімічних реакцій первинного піролізу в реакторі БЦП при утилізації органічних відходів. Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 119-120.
53. **Маркіна Л. М.**, Філатова М. І. Вдосконалення технології утилізації твердих побутових відходів з отриманням альтернативних палив. Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції «*Природоохоронні аспекти використання відновлювальних джерел енергії в Україні*». Миколаїв : вид-во ЧДУ, 2012. С. 90-91.
54. Мірошниченко М. В., **Маркіна Л. М.**, Рижков С. С. Аналіз показників рідкої фракції технології БЦП. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні* : Матеріали 8 міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: видавництво

НУК. 2013.С.76-78.

55. Рижков, С. С., **Маркіна Л. М.**, Крива М. С. Встановлення первинної кінетичної моделі термічної деструкції органічних відходів. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні* : Матеріали 8 міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: видавництво НУК. 2013.С.82-85.

56. Мирошниченко М. В., **Маркіна Л. М.**, Дослідження показників рідких продуктів технології БЦП. Збірка тез доповідей 16 Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених «*Екологія. Людина. Суспільство*». Київ : НТУУ «КПІ», 2013. С. 118-119.

57. Рижков С. С., **Маркіна Л. М.**, Філатова М. І. Дослідження складу рідкого продукту багатоконтурного циркуляційного піролізу. Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*». Миколаїв : НУК, 2014. С. 70-72.

58. **Маркіна Л. М.**, Рудюк М. В. Основні положення підвищення продуктивності реактора піролізу цілих зношених автошин. Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*». Миколаїв : НУК, 2015. С. 18-19.

59. **Маркіна Л. М.**, Тоболякова М. І. Аналіз можливості застосування сучасного розрахункового пакету програм FLUENT (ANSYS, Inc.) для моделювання процесу багатоконтурного циркуляційного піролізу. Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*». Миколаїв : НУК, 2015. С. 111-113.

60. **Маркіна Л. М.**, Глиняна В. В. Ексергетичний аналіз деструктивної переробки органічних відходів методом багатоконтурного циркуляційного піролізу. Збірка тез доповідей 19 Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених «*Екологія. Людина. Суспільство*». Київ : НТУУ «КПІ», 2016. С. 108.

61. **Маркіна Л. М.** Дослідження процесу ущільнення цілих зношених шин при піролізі. Матеріали ХІ Міжнародній науково-технічній конференції «*Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*». Миколаїв : НУК, 2016. С. 25-26.

62. **Маркіна Л. М.**, Крива М. С., Глиняна В.В. Визначення ексергетичної ефективності процесу утилізації гумовмісних відходів за технологією

багатоконтурного циркуляційного піролізу. Матеріали 7-ої міжнародної науково-технічної конференції *«Інновації в суднобудуванні та океанотехніці»*. Миколаїв : видавництво НУК. 2016. С. 271-272.

63. **Markina L.**, Kryva M. Modeling of destruction processes during recycling of rubber-technical waste using the technology of multi-contour circulation pyrolysis. Збірка матеріалів XII Міжнародної науково-технічної конференції *«Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні»*. Миколаїв : НУК. 2017. С.42-43.

64. **Маркіна Л. М.**, Крива М. С. Визначення особливостей розподілення з'єднань у фракціях при утилізації автошин. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи* : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Львів : ЛДУБЖД. 2018. С. 58-59.

65. **Маркіна Л. М.** Дослідження екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : Матеріали XX міжнародної науково-технічної конференції. У 2-х томах. Т.1. Миколаїв : НУК, 2019. С. 615-617.

66. **Маркіна Л. М.**, Сегіна Є. Є., Маркін О. С. Оцінка стійкості обладнання екологічно прийнятної технології екопірогенезіс при надзвичайних ситуаціях. *Безпека життя діяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика* : Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції. Херсон, 2019. С. 50-54.

67. **Маркіна Л. М.** Розвиток наукових основ екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів. *Проблеми екологічної безпеки* : Матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції. Кременчук, 2019. С. 171-175.

68. **Маркіна Л. М.** Розробка екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів. *Проблеми екології та енергозбереження* : Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв : Видавець Торубара, 2019. С. 27-31.

Особисто автором у роботах, опублікованих за співавторства було встановлено: об'єм утворення, накопичення та характеристики сумішей твердих органічних відходів, аналіз технологій їх переробки та утилізації відходів, умов

здійснення процесів та екологічної безпеки – 4, 7, 9, 10, 52; змодельовано процес рециркуляції в системі «газ-рідина» термічної деструкції твердих органічних відходів та обґрунтовано основні параметри інтенсифікації проведення екологічно прийняттого піролізного процесу, встановлено параметри для розробки математичної моделі температурного режиму піролізного реактора та визначення експлуатаційних характеристик обладнання – 3, 6, 8, 15, 16, 17, 19, 21, 25, 29, 32, 51, 55, 59, 63; встановлено фізико-хімічні характеристики отриманих продуктів, досліджено модифікації рідких вуглеводнів, які отримані в різних температурних та часових режимах циркуляційної системи – 11, 14, 18, 20, 30, 47, 53, 54, 56, 57; досліджено характеристики ущільнення маси цілих зношених автошин, теплопровідності ущільненої маси та визначено оптимальне їх розташування в піролізному реакторі – 2, 4, 31, 40, 41, 58, 61; проведено комплексну оцінку факторів екологічної небезпеки процесу утилізації відходів методом екологічно прийняттого піролізного процесу, встановлено параметри екологічної безпеки піролізного процесу та отриманих продуктів – 1, 12, 13, 22, 26, 50, 60, 62, 64-68; створено ефективні схемні рішення піролізних установок та елементів конструкцій – 23, 27, 33-37, 39, 42, 44-46; визначено економічні аспекти застосування піролізного процесу для різних видів сировини та потужностей; обґрунтовано економічну доцільність впровадження, використання піролізного процесу та обладнання – 24, 28, 38, 43, 48, 49.

## ABSTRACT

**Markina L. M.** Development of scientific bases of ecologically acceptable pyrolysis process of solid organic waste utilization. – Qualifying scientific work on the right of manuscripts.

The dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in speciality 21.06.01 – ecological safety. – State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management. Kyiv, 2020.

The idea of the work is to reduce the harmful impact on the environment of objects of accumulation, storage of solid organic waste, as well as the processes of their utilization by using an environmentally friendly pyrolysis method.

The introduction presents the relevance of the research topic, idea, purpose and objectives, as well as the object and subject of research, reflects the scientific novelty of the results, their practical significance; data on approbation of research results and their publication are given.

The first section is devoted to the analysis of world and national scientific information in the field of waste management, their impact on the environment and human health, technologies for their disposal and recycling products. Fixation of negative indicators of waste management system processes, such as the impact of landfills or waste processing plants (WFP), products of their activities on the environment, the percentage of useful by-products or products very slowly contribute to the development and implementation of environmentally friendly processes of solid waste management and disposal (LLC).

This has led to the need to develop a scientific basis for environmentally friendly pyrolysis process of solid organic waste to reduce the negative impact on the environment, taking into account the features and patterns of thermal destruction of these wastes, and, consequently, minimizes hazardous substances in air, soil and surface and groundwater. waters in excessive concentrations, harmful to the environment and human health, while ensuring the environmental safety of the disposal process as a whole.

The second section describes the object and subject of research, methods of theoretical (mathematical modeling, calculation methods), practical research (physical modeling, field experiment in laboratory installations, hardware determination of process parameters and characteristics of the obtained products), methods of experiments and mathematical processing methods. Achieving the defined goal and solving the tasks is based on the integrated use of approaches and methods of systems analysis.

The section presents data on possible experimental mixtures of solid organic waste with different percentages of their constituent components, taking into account the average quantitative and qualitative characteristics of the accumulated waste.

Methods of control over the state of ecological safety during the processes of their thermal destruction are given, namely: determination of distribution of heteroatomic compounds along circuits with additional circulation of pyrolysis destruction products, presence of harmful hazardous components in final products, control of environmental

parameters in working zone, toxic content in the liquid product and the solid residue.

Direct-acting measuring devices (thermocouples) and the gravimetric method were used to record process indicators. Test programs have been developed at experimental facilities: "Program for research of temperature and time characteristics of circulating pyrolysis technology with different types of polymer waste" and "Program for research of chemical composition of liquid light fraction obtained by pyrolysis process from different types of polymer waste on NeoCHROM liquid chromatograph".

The general equations of thermal conductivity were used in the calculations of structural elements of technological equipment. Optimization methods in modeling of technological processes are carried out with the use of computer technologies, analytical and calculation methods.

The following methods were used in the process of practical and experimental research: infrared spectrophotometry (Beckman DU 520) and gas-liquid chromatography – to study the composition and properties of the obtained products, determining the proportion of condensed and final fractions, their composition and quality (NeoCHROM gas chromatograph, software for data processing – UniChrom system, for automation and error exclusion the chromatograph is equipped with CTC A200S Autosampler system), as well as methods of viscosimetry, calorimetry; the presence of toxic metal compounds in liquid and solid products (Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn) was determined by atomic adsorption spectrophotometer C-115M1, statistical identification – to verify the homogeneity and reliability of experimental data. The obtained results were processed using methods of statistical and mathematical data processing.

The third section presents the developed mathematical model of destructive transformations of solid organic waste during recirculation in the pyrolysis process with determination of kinetic parameters: thermal destruction of organic waste mixture, mathematically described by systems of differential kinetic equations, the number of which depends on the number of waste mixture components. An algorithm for mathematical calculation of material balance has been developed. The modeling of the recirculation process and the establishment of the equilibrium of the vapor-gas mixture on the circuits of circulating pyrolysis are carried out.

The result of the model is the calculation of the composition and molar flow of the

liquid and vapor phases, which are divided into circuits based on a joint solution of the equation of equilibrium of PGS recirculation in the circulating system and the equilibrium equations for the content of each component using ASTRA 4 software. Circuits of the circulating system in which sequential recirculation of up to 90% of non-volatile components of the primary gas mixture are defined.

The most optimal cooling mode for the 3rd circuit is established: it is taken at a temperature of 355-360 C, at which the mass flow of gas-liquid flows is obtained. The most optimal cooling mode for the 2nd circuit is taken at a temperature of 245 C, at which the mass flow of gas-liquid flows is obtained. On the 3rd circuit the task of obtaining marketable products - pyrolysis gas and liquid fraction. For this purpose, a temperature of 140-170 C was chosen, which allows to ensure its mass yield in the amount of 72% for raw materials - worn tires, and 52% for raw materials – a mixture of polymer waste.

The main thermodynamic parameters, dynamics of change and dependence on temperature are determined, on the basis of which graphs of change of thermodynamic indicators depending on temperature are constructed. Thermodynamic parameters of the PGS state allow us to estimate the equilibrium degree of separation of vapor and gas flows by the equation of the dependence of the equilibrium constant on the change of enthalpies and entropies.

The fourth section presents ways to intensify processes and ensure environmental safety of processes, equipment and products of thermal destruction of organic raw materials during circulating pyrolysis. Laboratory and industrial equipment with operation in a cyclic mode (productivity of 10 kg/cycle – EU BCP-14) and continuous is developed, designed and made for working off of working modes, revealing of features of processes of destruction of heterogeneous organic waste, definition of parameters of work of the pyrolysis equipment, establishment of ecological safety. mode (productivity of 100 kg / days – EKOPIR-18D, productivity of 500 kg/days – Ekopir-BCP).

Computer simulation of the reactor temperature of the experimental setup EU BCP-14 was performed. Analysis of the simulation results shows that the characteristics of heating transients at different points of the reactor differ significantly, which confirms the feasibility of considering the circulating pyrolysis reactor as a control object with distributed parameters in its simulation. During the tests it was found that the duration of

entering the reactor mode depends on the composition of the raw material, is 90-130 minutes. The time increases to 40% if the amount of PE in the waste increases. The total time of the complete process of destruction is 180-250 minutes. For mixtures of composite materials (mixtures of polymeric substances) the values of the highest gas yield were recorded during the processing of packaging adhesive tape (PP with impurities) and bottles (PET), the highest yield of liquid product, the lowest processing time of the material 180-200 minutes. – for medical syringes (PP). Differential thermogravimetric analysis data were used to experimentally determine the kinetic characteristics of thermal decomposition of waste. As a result, the values of activation magnitudes of the kinetic model of thermal destruction of waste are defined, also thermodynamic parameters of the system are determined, which allow to predict the possibility of condensation and evaluate the interaction of substances, as well as to represent the relative rates of equilibrium conversion reactions during condensation on a single circuit.

A study of compression efforts by the plunger system of raw materials from 2 to 20 mm in different source cone nozzles was conducted in order to ensure environmental safety of the continuous process of circulating pyrolysis by optimizing the geometry of the source nozzle and, accordingly, the polymer plug, which is formed by different fractions of crushed solids. The stresses in the layers of the compressed medium and the magnitude of its movement are presented, and it is defined that it depends on the duration of the dynamic compression process, which prove that the compression force of 1 MPa is sufficient to ensure reliable continuous loading of the reactor using the proposed design of the plunger system.

A physical model of the pyrolysis reactor has been developed to study the rheological properties of whole worn tires in the process of heating and compression, which in the future will improve the technology of thermal waste disposal and increase continuous filling of the reactor to 98%. At the same time there is an opportunity to essentially increase productivity of installation in comparison with installations of cyclic action with reactors in the form of retort in which pieces of tires are loaded. The results of calculations and experimental studies confirmed the possibility of reducing the amount of compression during preheating of tires to a temperature of 125 °C when utilizing the heat of flue gases with a temperature up to 250-300 °C, which are obtained after heating the



pyrolysis reactor. It has been experimentally proven that the amount of compression can be assumed to be constant in the range of 0.18-0.2 kg / cm<sup>2</sup>, while the pyrolysis time of raw materials is reduced by 25-30% compared to standard pyrolysis of tires in retort reactors with cyclic mode. Using the computer program COMSOL Multiphysics, the physical characteristics of the process of destruction of tires were determined: with increasing density by 60%, thermal conductivity increases almost 100 times, the time of the process of disposal of worn tires reduces by 25-30%.

In the fifth section, as a result of the multicriteria assessment of environmental hazards, the priorities of the factors are determined by the following criteria: the probability of occurrence of a particular threat to the environment; expected consequences of the factor; the level of quality of implemented technical or technological solutions to prevent the manifestation of this factor. This allowed us to identify technological units and processes that are accompanied by the greatest danger to the environment. A hierarchical structure of decision-making is built and the following evaluation criteria are formed, namely: the probability of a threat to the environment, the expected consequences of the factor and the level of quality of implemented technical or technological solutions to prevent this factor.

Due to the calculations of the dependence of cooling temperatures on the change of the equilibrium constant, it was shown that it is at a temperature of 340-350 °C that the fraction containing the largest number of heterogeneous compounds condenses on the primary circuit. However, in the obtained final product the sulfur content is much less than 3% of the sulfur content in the primary mass of waste. Sulfur compounds are represented by mercaptans (thiols), sulfides and thiophenes. The content of nitrogen and oxygen-containing compounds is very small, less than 0,01%

The obtained results showed the presence of heavy metals in the samples of the liquid residue of the obtained liquid product. The content of Cu, Zn, Ni does not meet the standards for diesel fuel, but meets the requirements for petroleum fuel (fuel oil).

As a result of the analysis of the solid fraction on the atomic absorption spectrophotometer C-115-M1, the presence of Fe, Cu, Ni, Mg was confirmed. The set concentration of copper is equal to 0,11655 mg/dm<sup>3</sup>, which does not exceed the set maximum concentration limits in the soil and meet the standards of SanPin 4630-88.

The sixth section identifies the areas of implementation of solid organic waste disposal plants that carry out environmentally friendly pyrolysis process. The formalization of the main tasks of automatic control and monitoring of the generalized technological complex of utilization of whole worn – out AS has been carried out. It is determined that the use of automation with the proposed functional structure allows to fully automate the processes of control and management of technological complexes of utilization, which can significantly increase the efficiency and economic performance of these complexes.

A new technology of ecopyrogenesis (EPG) and non-standard equipment for it has been developed, which combines a set of processes inherent in multi-circuit circulating pyrolysis (BCP) and processes of multi-circuit dual-zone gasification (BCG) of organic waste available in this neighborhood. These processes are accompanied by the formation of internal transformations during deep thermal decomposition of intermediate toxic substances to obtain environmentally friendly starting products (pyrolysis gas, generator gas, liquid fuel of light fractions with a minimum amount of solid residue that can be safely disposed of in the landfill).

Risk events are analyzed, risks are identified and their taxonomy is carried out, on the basis of which up to 24 groups are formed. The practice of operation of solid waste disposal enterprises is studied and it is established how risk groups can complicate the process of managing these projects as a whole. Based on the method of expert assessments, a qualitative analysis of risk groups, risk ranks, their impact on the time, cost and quality of the project.

**Key words:** ecological safety, environment, solid organic waste, circulating pyrolysis process, harmful substances, pyrolysis plants, intensification, marketable products.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	31
РОЗДІЛ 1. КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ СТАНУ ПОВОДЖЕННЯ З ТВЕРДИМИ ОРГАНІЧНИМИ ВІДХОДАМИ, ЕКОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ .....	42
1.1 Сучасний стан поводження з твердими органічними відходами, вплив техногенно небезпечних об'єктів їх накопичення, зберігання та переробки на довкілля .....	42
1.1.1 Аналіз статистичних даних утворення та переробки твердих органічних відходів .....	42
1.1.2 Вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей об'єктів накопичення твердих органічних побутових та промислових відходів ..	51
1.1.3 Оцінка поширення застосування технологій утилізації твердих органічних відходів та впливу їх на довкілля .....	54
1.2. Визначення показників якості, екологічної безпеки та технологічних особливостей проведення процесів та продуктів утилізації відходів .....	62
1.2.1. Технологічні особливості та параметри процесів термічної рециркуляційної утилізації твердих органічних відходів .....	62
1.2.2 Аналіз ефективності використання піролізної технології та продуктів .....	69
1.3. Ризики впровадження екологічно безпечної технології утилізації відходів .....	75
1.4. Обґрунтування ідеї, мети та завдання наукового дослідження .....	81
Висновки до розділу 1 .....	83
РОЗДІЛ 2. НАУКОВЕ ОБґРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ (СТВОРЕННЯ МЕТОДОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ) ДОСЛІДЖЕНЬ ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТНОГО ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ .....	86
2.1 Методологія проведення дисертаційного дослідження .....	86

2.2	Характеристика об'єкту дослідження: склад та параметри досліджуваних твердих органічних відходів .....	88
2.3	Основні принципові методологічні рішення теоретичних досліджень термічної утилізації органічних відходів екологічно прийнятним піролізним процесом .....	94
2.4	Методи та обладнання експериментальних досліджень визначення технологічних параметрів, складу і властивостей отриманих продуктів піролізу .....	96
	Висновки до розділу 2 .....	104
	<b>РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ</b> .....	106
3.1.	Математична модель деструкційних перетворень твердих органічних відходів при рециркуляції в піролізному процесі з визначенням кінетичних показників .....	106
3.2.	Моделювання процесу рециркуляції та встановлення рівноваги парогазової суміші на контурах циркуляційного піролізу .....	114
3.3.	Результати математичного моделювання процесу рециркуляції та встановлення рівноваги в піролізному обладнанні .....	118
	Висновки до розділу 3 .....	128
	<b>РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТНОГО ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ</b> .....	130
4.1	Розробка схемних рішень експериментальних установок для дослідження екологічно прийнятеного піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів .....	130
4.2	Дослідження технологічних параметрів екологічно прийнятеного піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів .....	142
4.2.1	Визначення характеристик теплових потоків навколо реактора .....	142
4.2.2.	Визначення температурних та часових параметрів здійснення стабільного режиму роботи установки екологічно прийнятеного	

піролізного процесу .....	152
4.3 Визначення кінетичних показників термодеструкції твердих органічних відходів .....	159
4.4 Визначення максимальної енергетичної ефективності процесу циркуляційного піролізу твердих органічних відходів .....	164
4.5 Дослідження забезпечення екологічної безпеки обладнання при подачі відходів в безперервному процесі роботи піролізної установки ..	167
4.6 Результати дослідження технологічних параметрів екологічно прийняттого піролізного процесу автошин при додатковому навантаженні .....	192
Висновки до розділу 4 .....	223
<b>РОЗДІЛ 5. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТТОГО ПІРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОТРИМАНИХ ПРОДУКТІВ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ ..</b>	<b>226</b>
5.1. Комплексна оцінка факторів екологічної небезпеки процесу термічної утилізації відходів, розробка автоматизованої системи управління екологічними ризиками .....	226
5.2 Встановлення кількісного, якісного складу та вмісту шкідливих речовин в отриманих продуктах .....	245
5.2.1 Вплив технологічних параметрів на склад рідкого продукту .....	245
5.2.2 Дослідження вмісту токсичних компонентів металів в отриманому рідкому та твердому продуктах .....	275
Основні результати та висновки до розділу 5 .....	280
<b>РОЗДІЛ 6 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТТОГО ПІРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ .....</b>	<b>282</b>
6.1 Комплексна автоматизація технологічних об'єктів та основні задачі контролю і автоматичного керування технологічним комплексом	

екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів .....	282
6.2 Розробка зразку промислової установки БЦП – 5 .....	285
6.3 Розробка та впровадження технології «Екопірогенезіс», практичні рекомендації з використання в системах тепlopостачання України .....	293
6.4 Розрахунок матеріального та енергетичного балансу тепlopостачання мікрорайону з використанням технології Екопірогенезісу .....	317
6.5 Економічні аспекти впровадження екологічно безпечної технології «Екопірогенезіс» .....	323
6.6 Оцінка екологічно орієнтованих управлінських рішень проектів підприємств з утилізації ТПВ за технологією «Екопірогенезіс» шляхом визначення можливих інноваційних та економічних ризиків .....	326
Висновки до розділу 6 .....	342
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДИСЕРТАЦІЇ .....	345
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	350
ДОДАТКИ .....	388

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** В Україні щороку утворюється понад 30 млн. тонн твердих органічних відходів. За даними Державної служби статистики у 2018 році в Україні зібрано 11,86 млн. тонн побутових та подібних відходів, або 280,5 кг з розрахунку на одного мешканця країни. Такі відходи та об'єкти їх накопичення становлять небезпеку для довкілля та здоров'я людини: збір та нагромадження в непристосованих та неорганізованих місцях з утворенням та виділенням фільтрату, потрапляння його у водні об'єкти, займання та пожежі на звалищах з утворенням та емісією в атмосферу шкідливих речовин ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), потрапляння токсичних сполук металів у ґрунт, значна потреба у додаткових землях під депонування та інше. Рівень переробки та утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів в Україні не перевищує 20% (з них 4,72% спалюється з або без отримання енергії, 3,93% утилізується, лише 10-15% використовується як вторинна сировина). На цей час серед методів утилізації твердих органічних відходів найбільшого розповсюдження набули термічні – спалювання, газифікація, піроліз. Принципова різниця між ними полягає в ступені окиснення речовини, що обробляється, і це надає широкі можливості комбінації методів в залежності від особливостей сировини та поставленої мети. Найбільш перспективним з точки зору екологічної безпеки вважається метод піролізу, який здійснюється в герметичному об'ємі при відсутності кисню повітря, що унеможливорює процеси окислення і утворення низки токсичних шкідливих речовин. Але стандартні схеми піролізу мають основний недолік, який зумовлено невідповідністю комплексного забезпечення екологічної безпеки як самого процесу, так і отриманих продуктів. Існуючі технології здійснюють проведення процесу в циклічному режимі з додатковими енергетичними витратами; мають складність регулювання технологічними параметрами термодеструкції суміші різнорідних органічних відходів, що негативно впливає на отримання заданого складу кінцевих продуктів, які в подальшому доцільно використовувати як альтернативні рідкі, газоподібні або тверді палива. Вирішення такої проблеми потребує поглибленого

аналізу кінетики процесів, інтенсифікації процесів термічної деструкції, визначення режимів та параметрів їх проведення.

Розвиток наукових основ екологічно прийнятних технологій утилізації твердих органічних відходів, в яких враховано особливості та закономірності процесів їх термічної деструкції для унеможливлення або мінімізації потрапляння небезпечних речовин до атмосферного повітря, ґрунтів та поверхневих і підземних вод у наднормативних концентраціях, шкідливих для довкілля та здоров'я людей, є актуальною науково-технічною проблемою. Вирішення зазначеної проблеми є підґрунтям та передумовою покращення екологічного стану об'єктів переробки та утилізації зазначених твердих органічних відходів та прилеглих до них територій, а також підвищення ефективності вторинного ресурсо- та енергозбереження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження проводилось у відповідності до Основних засад (стратегії) державної екологічної політики на період до 2020 року, затвердженої Законом України від 21.12.2010 року №2818-VI; відповідно до Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8.11.2017 року №820; Національного плану управління відходами до 2030 року, схваленого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 лютого 2019 року №117-р; Рамкової Директиви №2008/98/ЄС Європейського парламенту та Ради від 19.11.2008 р. “Про відходи та скасування окремих Директив”.

Результати дисертаційних досліджень отримано здобувачем як відповідальний виконавець в рамках виконання НДР: «Розроблення новітньої технології переробки органічних відходів методом багатоконтурного піролізу з отриманням альтернативного палива» (державний реєстраційний номер 0109U007601); «Наукові основи енергозберігаючого двостадійного процесу термічної утилізації органічної частини твердих побутових відходів» (державний реєстраційний номер 0111U002310); «Розробка екологічно безпечної технології екопірогенезису для утилізації органічних відходів та низькосортного вугілля з отриманням альтернативних видів пального» (державний реєстраційний номер 0111U009084); «Створення теоретичних основ екологічно безпечної та енергозберігаючої новітньої



інноваційної технології безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин під дією статичного навантаження» (державний реєстраційний номер 0115U000303), як виконавець в НДР «Системні дослідження та розробка моделей програмно-цільового розвитку системи теплопостачання України на основі новітніх технологій та процесів енергоперетворення» (державний реєстраційний номер 0112U000349).

**Метою дисертаційної роботи** є розвиток наукових основ екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів шляхом застосування інтенсифікації процесів термічної деструкції для запобігання та зменшення потрапляння шкідливих речовин у довкілля.

Для досягнення визначеної мети поставлено до розв'язання такі **задачі досліджень**:

1. Дослідити стан проблеми поводження з твердими органічними відходами, а також вплив на довкілля техногенно-небезпечних об'єктів їх накопичення, зберігання та переробки.

2. Обґрунтувати вибір методів досліджень та умов здійснення деструктивних перетворень, експлуатації обладнання та елементів устаткування для утилізації твердих органічних відходів.

3. Змодельовати екологічно безпечні технологічні процеси циркуляції проміжних продуктів піролізу твердих органічних відходів та визначити технологічні параметри процесу циркуляційної деструкції для попередження забруднення довкілля.

4. Розробити математичну модель процесів ущільнення органічних відходів в реакторі піролізу та обґрунтувати основні параметри інтенсифікації безперервного процесу для оптимізації конструктивних характеристик та підвищення потужності піролізного обладнання.

5. Провести експериментальні дослідження з визначення впливу параметрів циркуляційного піролізного процесу на показники термічної деструкції та екологічність кінцевого продукту утилізації.

6. Виконати фізичне моделювання процесу ущільнення відходів в системі безперервної подачі сировини з метою унеможливлення потрапляння шкідливих

речовин в навколишнє середовище.

7. Розробити схемні рішення екологічно прийняттого піролізного процесу, створити дослідницькі установки, які реалізують безперервний піролізний процес утилізації твердих органічних відходів, отримати технологічні параметри, відпрацювати їх та оцінити безпеку обладнання й екологічність кінцевого продукту утилізації.

8. Здійснити комплексну оцінку аварійності запропонованого піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів та впливу його на довкілля для визначення оптимальних форм управління екологічною безпекою при роботі сміттєпереробного комплексу.

9. Провести екологічну оцінку впровадження установки піролізу в сферу комунального господарства та визначити ризики цього впровадження при забезпеченні сталого соціально-економічного розвитку населеного пункту.

10. Розробити технічні умови, регламенти роботи піролізного устаткування, рекомендації для проектування та експлуатації промислових установок утилізації твердих органічних відходів за умов особливостей їх накопичення, зберігання та переробки для населених пунктів України.

**Об'єкт дослідження** – термічні процеси утилізації твердих органічних відходів.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу способів та технологічних параметрів піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів на показники забруднення довкілля та екологічність кінцевого продукту утилізації.

**Методи дослідження.** У роботі застосовано комплексний системний аналіз. Задля моделювання процесу рециркуляції та встановлення рівноваги проміжних продуктів піролізу (термічної деструкції) твердих органічних відходів (ТОВ) застосовано фізичні та математичні методи моделювання. Для створення математичної моделі кінетики піролізного процесу використано метод комбінування рівноваг. Методи оптимізації в моделюванні технологічних процесів та устаткування застосовувались з використанням комп'ютерних технологій ANSYS (Fluent), COMSOL. З використанням програмного комплексу ASTRA 4 проведено

розрахунки термодинамічних показників (ентропії, ентальпії, внутрішньої енергії термодеструкції) технологічного процесу піролізної утилізації органічних відходів.

Застосовано наступні методи експериментальних досліджень: натурний експеримент – для визначення параметрів процесу піролізу різних досліджуваних сумішей відходів, газо-рідинна хроматографія та інфрачервона спектроскопія – для дослідження складу отриманих продуктів; термогравіметричний метод – для дослідження втрати маси сировини та встановлення кінетичних параметрів процесу; статистична ідентифікація даних – для перевірки достовірності експериментальних даних. Для реєстрації показників процесу використовували вимірювальні прилади прямої дії, контроль технологічних параметрів здійснювався із застосуванням термометрії з виведенням показників термопар на ПК.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розвитку наукових основ екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів при інтенсифікації процесів термічної деструкції зі зменшенням потрапляння шкідливих речовин у навколишнє середовище та отриманням корисних продуктів.

При цьому *уперше*:

– за результатами фізичного і математичного моделювання процесів та умов здійснення деструктивних перетворень циркуляційного піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів встановлено раціональні температурні діапазони процесу в межах від 550 до 560°C та оптимальні температурні діапазони додаткової циркуляційної системи в межах від 120 до 370°C, що дозволило створити обладнання з рівнем промислової переробки суміші органічного сміття понад 80% та уникнути потрапляння наднормативної кількості шкідливих речовин у довкілля і вилучення земель під депонування;

– запропоновано та науково-обґрунтовано нові принципи до управління екологічною безпекою шляхом застосування інтенсифікації продуктивних й безперервних процесів термічної циркуляційної деструкції твердих органічних відходів в герметичному реакційному об'ємі за умов ущільнення сировини, що виключає потрапляння шкідливих речовин у довкілля, та скорочує час проведення процесу на 29%;

– розроблено метод управління екологічною безпекою технології циркуляційного піролізу шляхом одночасного регулювання фракційного складу кінцевих паливних продуктів та концентрації шкідливих гетероатомних сполук, сірковмісних компонентів, кисне- та азотовмісних речовин, який на відміну від аналогів заснований на встановленні та застосуванні принципу варіювання температурним режимом циркуляційної системи, що на відміну від існуючих підходів комплексно забезпечує екологічну безпеку при утилізації органічних відходів та дає можливість знизити техногенне навантаження на довкілля під час функціонування об'єктів поводження з відходами з отриманням товарних продуктів;

– здійснено комплексну оцінку рівнів екологічної небезпеки при утилізації відходів з використанням екологічно прийняттого піролізного процесу, ранжування загроз навколишньому середовищу за сформованими критеріями, розроблено алгоритм функціонування автоматизованої системи управління екологічними ризиками при утилізації відходів, що дозволило мінімізувати та контролювати ризики при використанні промислового обладнання.

*Удосконалено* наукові підходи до організації управління технологічним процесом піролізу твердих органічних відходів шляхом встановлення параметрів контролю за екологічною та техногенною безпекою, якістю отриманих продуктів, що дозволяє здійснювати моніторинг на кожному етапі процесу утилізації.

*Отримали подальший розвиток:*

– наукові основи технології утилізації твердих органічних відходів на основі багатоконтурного циркуляційного піролізу та засобів для її реалізації з інтенсифікацією процесів термічної деструкції, що дозволило підвищити рівень екологічної безпеки та енергоефективності;

– наукове обґрунтування організації піролізного процесу з поліпшенням його екологічних показників, що дозволило знизити витрати матеріальних ресурсів, підвищити продуктивність та енергоефективність обладнання для утилізації твердих органічних відходів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Проведене моделювання циркуляційного піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів дає

можливість встановлювати параметри інтенсифікації процесів та устаткування, а саме: температуру й час для різних видів та сумішей органічних відходів, технологічні параметри ущільнення в плунжерній системі подачі сировини в піролізний реактор, розподіл гетероатомних сполук в циркуляційній системі регулювання концентрації шкідливих речовин, що забезпечує зменшення використання енергетичних ресурсів та часу, необхідних для здійснення технологічних процесів. Експериментально встановлені умови здійснення безперервного процесу. Встановлено час виходу установки на робочий режим для контролю використання природних ресурсів в обладнанні циклічної дії. Досягнуто зниження концентрації шкідливих гетероатомних сполук, зменшення сірковмісних компонентів на 78-82%; кисне- та азотовмісних речовин на 86-88% та можливість регулювання вмістом вуглеводнів у кінцевому продукті утилізації шляхом варіювання температурним режимом процесу циркуляційного піролізу.

Результати дисертаційних досліджень було представлено до Премії Верховної Ради України найталановитішим молодим ученим в галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок за роботу: «Комплексне вирішення питань поводження з органічними побутовими відходами на основі енергозберігаючих та екологічно чистих інноваційних технологій» та отримано диплом Лауреата (Постанова Верховної Ради України від 15 січня 2009р. №871-VI).

Результати досліджень впроваджено в науково-навчальний процес НУК ім. адм. Макарова в рамках виконання НДР в НДІ «Проблем екології та енергозбереження»: створено «Науково-дослідний центр піролізних технологій», в якому розташовано розроблені та виготовлені оригінальні експериментальні установки: циклічної дії ЕУ БЦП-14; Екопір 18Д та Екопір-БЦП безперервної дії (акт впровадження від 11.09.2019р).

Розроблено практичні рекомендації з конструювання промислової установки та режиму її експлуатації, технічні умови, паспорт та інструкцію з експлуатації, впроваджені в роботі ТОВ «ТехноАльянсСервіс» на етапі складання технічного завдання та виготовлення промислового зразку піролізної установки продуктивністю 5 т/добу по сировині на ТОВ «Респект Бізнес» (акти впровадження

в додатках). Відпрацьовані технологічні режими утилізації органічних відходів для різних видів твердих органічних промислових відходів (акти впровадження внесені у додатки дисертації) впроваджено при виготовленні установки безперервної дії БЦП-5 для компанії «ERVO EnviTech s.r.o.» (Чеська Республіка) (лист підтримки, акт впровадження від 30.01.2017р). Результати наукових доробок та пропозицій використані при розробці програми поводження з твердими побутовими відходами в м. Миколаїв (довідка Миколаївського міського голови від 07.09.2018р.). Спосіб, установки та елементи конструкцій захищено 14 патентами на винахід та корисну модель.

Результати дисертаційного дослідження застосовуються в навчальному процесі НУК ім. адм. Макарова на кафедрах техногенної та цивільної безпеки, а також екології та технології захисту навколишнього середовища за спеціальностями 101 – екологія та 183 – технології захисту навколишнього середовища підготовки бакалаврів при викладанні навчальних дисциплін «Екологічна безпека», «Життєдіяльності», підготовки магістрів «Утилізація та рекуперація відходів», «Забезпечення екологічної безпеки» (акти впровадження від 16.09.2019р). Розроблено навчальні посібники «Забезпечення безпеки» та «Сировина та технології отримання альтернативного палива: навчальний посібник», що містять аналіз світового та національного досвіду поводження з відходами та методологію утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів методом піролізу.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи** забезпечено критичним аналізом літературних і патентних джерел; відповідністю методів дослідження поставленим в роботі меті і завданням; коректним застосуванням методу математичного моделювання процесів та елементів конструкцій. Достовірність отриманих результатів і висновків дослідження забезпечується відповідними розрахунками та проведенням необхідної кількості експериментальних досліджень з використанням розроблених та стандартних методик, метрологічно атестованого обладнання і повірених засобів вимірювання; застосуванням при вирішенні задач сучасних способів фізичного і хімічного аналізу та використанням при цьому сучасних уявлень про фізико-хімічні

процеси, які протікають при термічній деструкції твердих органічних побутових та промислових відходів; перевіркою адекватності математичної моделі та розрахунків процесів термічної деструкції в реакторі та рециркуляції матеріальних потоків в циркуляційній системі в лабораторних умовах на експериментальних установках та в промисловому масштабі.

Репрезентативність дослідження забезпечувалась відтворюваністю результатів експериментів, застосуванням методів математичної статистики для обробки результатів, шляхом порівняння теоретичних положень з результатами експериментальних досліджень. З використанням апробованих методів досліджень отримано результати теоретичних та експериментальних значень різних досліджуваних параметрів із задовільною збіжністю від 7 до 10%.

**Особистий внесок здобувача** полягає в обґрунтуванні наукового напрямку, у формулюванні наукової проблеми, ідеї роботи, мети, завдань і програм досліджень, наукових положень дисертаційної роботи, розробці процесів інтенсифікації обладнання термічної деструкції твердих органічних відходів, встановленні теоретичних залежностей, фізичного і математичного моделювання, визначенні встановлених параметрів для різних видів ТОВ, розробці конструктивних рішень, створенні лабораторних стендів, дослідного обладнання та устаткування, та дослідно-промислового зразку, здійснення заходів та рекомендацій з впровадження науково-технічних розробок у виробництво та навчальний процес.

З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використано лише ті ідеї і положення, що є результатом особистого дослідження. Основні результати досліджень, представлених у дисертаційній роботі, наведено у наукових працях, поданих у списку публікацій в авторефераті [1 – 68].

Особисто автором у роботах, опублікованих за співавторства було:

– встановлено об'єм утворення, накопичення та характеристики сумішей твердих органічних відходів, аналіз технологій їх переробки та утилізації відходів, умов здійснення процесів та екологічної безпеки – 4, 7, 9, 10, 52; змодельовано процес рециркуляції в системі «газ - рідина» термічної деструкції твердих органічних відходів та обґрунтовано основні параметри інтенсифікації проведення

екологічно прийняттого піролізного процесу, обґрунтовано параметри для розробки математичної моделі температурного режиму піролізного реактора та визначення експлуатаційних характеристик обладнання – 3, 6, 8, 15, 16, 17, 19, 21, 25, 29, 32, 51, 55, 59, 63; встановлено фізико-хімічні характеристики отриманих продуктів, досліджено модифікації рідких вуглеводнів, які отримані в різних температурних та часових режимах циркуляційної системи – 11, 14, 18, 20, 30, 47, 53, 54, 56, 57; досліджено характеристики ущільнення маси цілих зношених автошин, теплопровідності ущільненої маси та визначено оптимальне їх розташування в піролізному реакторі – 2, 4, 31, 40, 41, 58, 61; проведено комплексну оцінку факторів екологічної небезпеки процесу утилізації відходів методом екологічно прийняттого піролізного процесу, встановлено параметри екологічної безпеки піролізного процесу та отриманих продуктів – 1, 12, 13, 22, 26, 50, 60, 62, 64-68; створено ефективні схемні рішення піролізних установок та елементів конструкцій – 23, 27, 33-37, 39, 42, 44-46; визначено економічні аспекти застосування піролізного процесу різних видів сировини та потужностей; обґрунтовано доцільність впровадження, використання піролізного процесу та обладнання – 24, 28, 38, 43, 48, 49.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення, наукові результати теоретичних та експериментальних досліджень за напрямком дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях та семінарах різних рівнів, а саме: міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні” (Миколаїв, 2009-2019р.); міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2011-2019р.); міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми екологічної безпеки» (Кременчук, 2018, 2019р.); міжнародна науково-практична конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Екологія. Людина. Суспільство». (Київ, 2013, 2016р.); Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи (Львів, 2018р.); Україна на шляху в Європу. Вища освіта та євроінтеграція (Миколаїв, 2014р.); Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України: Всеукраїнська конференція (Миколаїв, 2018р.); Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології (Київ,



2014р.); “Чиста енергія для розвитку громад Миколаївщини”: ІХ Миколаївські міські екологічні читання «Збережемо для нащадків» Управління екології департаменту ЖКГ Миколаївської міської ради, Міський центр екологічної інформації та культури (Миколаїв, 2016р.); Інтернет – конференція "Екологія і природо-користування в системі оптимізації відносин природи і суспільства" (2015р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 68 наукових праць: з них 26 статей у фахових виданнях ДАК МОН України, з яких 4 у журналах і збірниках, які входять до науково-метричних баз Scopus та Web of Science; 6 у журналах і збірниках, які входять до інших наукових видань України; 14 патентів України на винахід та корисну модель; 22 праці апробаційного характеру опубліковано у збірниках матеріалів науково-практичних конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається з анотації, переліку умовних скорочень, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та 17 додатків. Загальний обсяг дисертації – 465 сторінок. Список використаних джерел містить 354 позиції.

## РОЗДІЛ 1

### КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ СТАНУ ПОВОДЖЕННЯ З ТВЕРДИМИ ОРГАНІЧНИМИ ВІДХОДАМИ, ЕКОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ

1.1 Сучасний стан поводження з твердими органічними відходами, вплив техногенно небезпечних об'єктів їх накопичення, зберігання та переробки на довкілля

1.1.1 Аналіз статистичних даних утворення та переробки твердих органічних відходів

Відходи є одним з найбільш значних факторів забруднення довкілля. Величезні обсяги накопичення промислових та побутових відходів – це реальна небезпека для суспільства та навколишнього природного середовища (атмосфери, ґрунту, поверхневих і підземних вод тощо), що на сьогодні є складною проблемою й потребує негайного вирішення.

Проблема відходів в Україні вирізняється особливою масштабністю і значимістю як наслідок домінування в національній економіці ресурсоємних багатовідхідних технологій, так і через відсутність протягом тривалого часу адекватного реагування на її виклики. Значні масштаби ресурсокористування та енергетично-сировинна спеціалізація національної економіки разом із застарілою технологічною базою визначали і далі визначають високі показники утворення відходів [186].

За Законом України «Про відходи» від 05.03.1998 № 187/98-ВР відходи – це будь-які речовини, матеріали і предмети, що утворилися у процесі виробництва чи споживання, а також товари (продукція), що повністю або частково втратили свої споживчі властивості і не мають подальшого використання за місцем їх утворення чи виявлення і від яких їх власник позбувається, має намір або повинен позбутися шляхом утилізації чи видалення [60].

Відходи поділяються на дві основні групи: відходи виробництва (промислові відходи) та відходи споживання (відходи вжитку, побутові відходи).

Промислові відходи – це залишки сировини, матеріалів, напівфабрикатів, що утворилися при виробництві продукції чи виконанні робіт і цілком чи частково втратили власні споживчі властивості і підлягають видаленню чи переробці з метою забезпечення захисту навколишнього середовища і здоров'я людей або з метою повторного їх залучення у господарську діяльність як матеріально-сировинних і енергетичних ресурсів [47].

Побутові відходи – це відходи, що утворюються в процесі життя і діяльності людини в житлових та нежитлових будинках (тверді, великогабаритні, ремонтні, рідкі, крім відходів, пов'язаних з виробничою діяльністю підприємств) і не використовуються за місцем їх накопичення.

Тверді побутові відходи (ТПВ) – це різні види твердих предметів і матеріалів, крім тари (пакування), які стали непридатними внаслідок їх використання в побуті та які не є відходами харчових продуктів [186].

Тверді відходи являють собою багатofракційну (практично невизначеного хімічного та фізичного складу, навіть за умови попереднього сортування) суміш неорганічних та органічних речовин (пластмаси, паперу, деревини, гуми, текстилю, харчових відходів тваринного й рослинного походження тощо), що ускладнює вибір універсальної технології переробки й знешкодження всіх складових, а з іншого, накладає жорсткі вимоги з екологічної безпеки як до самого технологічного процесу, так і до кінцевих продуктів утилізації.

Фізико-хімічні властивості визначають ступінь небезпеки багатокомпонентних сумішей та вплив на довкілля, біосферу в цілому і організм людини зокрема: можуть представляти хімічну, біологічну, токсичну, корозійну, вогне- та вибухонебезпечність, але можуть бути потенційно використані як сировина в інших галузях господарства або в ході утилізації.

Будь-яка сировина складається з двох основних частин: горючої і негорючої (баласту). Горюча частина містить різні органічні сполуки, до яких входять такі хімічні елементи: вуглець (С), водень (Н), сірка (S), кисень (О), азот (N) [4, 64, 104, 248]. Частка відходів з органічною складовою у масі складає 70-78%. Кількість та поєднання вказаних елементів впливає на процес переробки та фізико-хімічні

характеристики продукту, який отримується під час утилізації та в подальшому може бути використаний як нетрадиційне паливо [31, 42, 105, 114, 168, 177, 247]. Тому за енергетичними властивостями органічних відходів, їх можна поділити на два класи: відходи, які мають високоенергетичні властивості, та низькокалорійні відходи. До першого класу відносяться композиційні матеріали, синтетичні полімери, які в своїй основі складаються із вуглеводнів, це усі види пластмас, зношені автомобільні шини, використана тара, пакування, папір, відходи гумових виробів, пластмасові медичні відходи, змащене ганчір'я, некондиційні нафтопродукти, тощо, з показником вологості, який не перевищує зазвичай 12-18%. До другого класу належать природні полімери, які відрізняються від перших наявністю кисню та підвищеною вологістю, в своїй основі складаються з целюлози: харчові відходи, гілля, листя, мули стічних вод, тощо, які мають вологість більше 60% [64].

До складу ТОВ входить велика кількість видів різноманітних відходів, тому спосіб їх переробки визначається відповідним морфологічним складом, інтегральними показниками якого можуть призначатися величини теплотворної здатності і вологість. Залежність теплотворної здатності від вологості для змішаних ТПВ, а також для деяких найбільш характерних компонентів, представлено на рис. 1.1 [247].

Теплотворна здатність ТОВ може змінюватися в діапазонах від 3-5 МДж/кг (вміст харчових відходів) до 15-18 МДж/кг (вміст полімерів, гуми, паперу, картону, текстилю). Гумова складова характеризується високою теплою згоряння - 32 МДж/кг (табл. 1.1). Теплотворна здатність середньостатистичних ТОВ може перебувати в діапазоні 8-12 МДж/кг при вологості 30-40% [4, 104, 239, 349]. Припускається, що граничним значенням теплотворної здатності для комерційної термічної утилізації є величина 6 МДж/кг. Найефективніші сміттєспалювальні заводи (наприклад, Ramboll, Denmark) отримують з тонни ТПВ 0,67 МВт·год електричної та до 2,0 МВт·год теплової енергії [172, 244].

Відходи гуми та зношені автомобільні шини є джерелом цінної вторинної сировини, яка містить 45-55% каучуку, 25-35% технічного вуглецю, 10-15%

високоякісного металу [29, 164]. Теплота згоряння 1 т таких відходів еквівалентна теплоті згоряння 1 т якісного вугілля або 0,7 т рідкого палива. Тому велике значення набуває ефективне використання цих відходів як вторинної сировини [189].

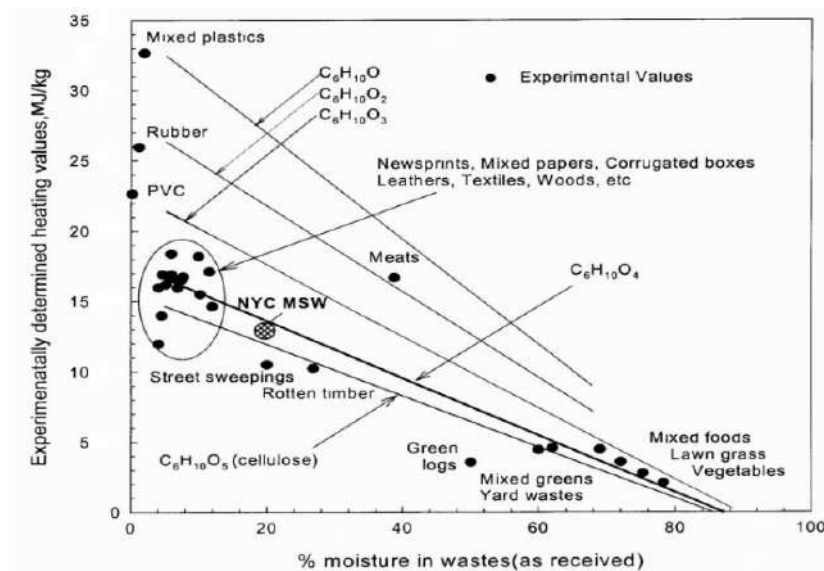


Рисунок 1.1 - Залежність теплотворної здатності від вологості різних видів відходів, як можливого самостійного палива

Таблиця 1.1 – Порівняння енергетичного потенціалу зношених шин та різних видів палива [165]

Вид палива	Сорт палива	Теплота згоряння, ккал/кг
Автомобільні шини як паливо	Паливо, отримане з відпрацьованих шин	8611
Вугілля	Напівбітумінозне вугілля	5833
	Бітумінозне вугілля	7056
Деревина	Сира деревина та подрібнені відходи деревини	2431
Газ	Викопне паливо	556

Відходи пакування як сировинний потенціал можуть замінювати первинні ресурси і відігравати важливу роль у розвитку національної економіки, сприяючи ресурсозбереженню і забезпеченню сировинної незалежності держави. Такі відходи

можливо використовувати для виробництва промислової продукції, будівельних матеріалів. Доцільним є їх широке та економічно-ефективне використання, забезпечення належного збирання та заготівлі використаної упаковки як вторинної сировини.

Процес попереднього сортування може істотно впливати на теплотворну здатність, оскільки з потоку ТПВ частково вилучаються найбільш калорійні полімери, папір і картон, що може призвести до її зниження з 9,0 до 8,4 МДж/кг для ручного сортування та до 6,8 МДж/кг у випадку оптико-механічного сортування. Сушка й компостування залишку після сортування, наприклад, у процесі механіко-біологічного оброблення, навпаки, може збільшити теплотворну здатність потенційного палива до 10-15 МДж/кг.

За даними Державної служби статистики, обсяги утворення відходів в Україні за 2018 рік становили 11,8 млн. тонн твердих побутових та подібних відходів. Незважаючи на те, що протягом останніх 20 років чисельність населення країни постійно скорочується, обсяги утворення побутових відходів збільшуються. Показник утворення відходів в нашій державі в середньому становить 280,5 кг з розрахунку на одного мешканця на рік [243]. Стан поводження з побутовими та подібними відходами (ППВ) на території України представлено в таблиці 1.2 [153]. Щорічно утворюється 9-12 млн. тонн ТОВ.

Завдяки впровадженню в 1181 населених пунктах роздільного збирання побутових відходів, роботі 26 сміттесортувальних ліній, 1 сміттєспалювального заводу (ССЗ) і 3 сміттєспалювальних установок, в Україні за 2018 рік перероблено та утилізовано близько 6,1% побутових та подібних відходів, з них: 2% спалено, а 4,1% потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні заводи (СПЗ) [153]. Решту (близько 93%) було видалено на полігони та сміттєзвалища, яких станом на 2019 рік в Україні налічувалося 6 тис. одиниць загальною площею понад 9 тис. га. Більше 99% функціонуючих полігонів не відповідають європейським вимогам (Директиві Ради № 1999/31/ЄС від 26 квітня 1999 р. «Про захоронення відходів»). За офіційними даними, щороку утворюється понад 27 тисяч несанкціонованих сміттєзвалищ [185].

Таблиця 1.2 - Поводження з побутовими та подібними відходами в Україні

Поводження з ППВ <sup>1</sup>	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Зібрано ППВ, тис. т	10356,5	13878,0	14501,0	10748,0	11491,8	11562,6	11271,2	11857,2
Видалено ППВ, тис. т	7030,0	9362,7	9504,4	5893,8	6233,0	6089,5	6469,0	7171,2
у т. ч. видалено на спеціально обладнані звалища	4321,5	5175,1	5178,5	3397,9	4194,3	4208,1	4417,5	4885,8
Спалено ППВ з метою отримання енергії, тис. т	154,0	149,9	147,6	149,0	254,3	257,3	244,4	205,5
Спалено ППВ без отримання енергії, тис. т	98,5	78,6	2,9	3,8	2,1	2,0	1,2	1,0
Утилізовано ППВ, тис. т	74,5	57,4	9,4	3,8	4,0	6,5	16,5	16,7
у т.ч. компостовано	...	...	3,7	0,0	0,4	0,0	8,2	7,9
<b>У розрахунку на одну особу</b>								
Зібрано ППВ, кг	226,6	304,3	318,7	250,0	268,5	271,0	265,3	280,5
Видалено ППВ, кг	153,8	205,3	208,9	137,1	145,6	142,7	152,3	169,7
у т. ч. видалено на спеціально обладнані звалища	94,6	113,5	113,8	79,0	98,0	98,6	104,0	115,6
Спалено ППВ з метою отримання енергії, кг	3,4	3,3	3,2	3,5	5,9	6,0	5,8	4,9
Спалено ППВ без отримання енергії, кг	2,2	1,7	0,1	0,1	0,05	0,05	0,03	0,02
Утилізовано ППВ, кг	1,6	1,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,4	0,4

<sup>1</sup>Побутові та подібні відходи (ППВ) - відходи, що утворюються в процесі життя і діяльності людини в житлових та нежитлових будинках і не використовуються за місцем їх накопичення. За Європейською статистичною класифікацією відходів (EWC-Stat) ППВ відносяться до категорії відходів 10.1.

Останнім часом в складі твердих побутових відходів значно збільшився вміст паперу та картону до 30-40%, пластмас та гуми до 10-15% [72, 150, 161, 228]. У зв'язку з виробництвом, яке постійно розширюється, відходи пластмасової та гумової індустрії є постійним супутнім фактором середовища проживання людини. Такі відходи за відсутності їх утилізації та постійному складуванні збільшують кількість звалищ побутових і промислових відходів [54, 183].

Світове виробництво пластика виросло в чотири рази протягом останніх десятиліть. За 65 останніх років було вироблено 8,3 млрд тонн цієї сировини. З них 4,5 млрд тонн – за останні 15 років., що також є однією із ключових екологічних проблем сьогодення.

Пластикові та гумові відходи дуже специфічні, вони нелеткі, не піддаються гниттю, корозії, тому постійне їх накопичення сприяє зменшенню корисних площ, а при несприятливому їх зберіганні – забрудненню середовища проживання людини [15]. Так як полімерні матеріали є діелектриками, виникає небезпека накопичення статичної електрики і виникнення в місцях звалищ відходів пожеж. При горінні в атмосферу можуть виділятися речовини 1-2 класу небезпеки. В наслідок цього, навколишнє середовище забруднюється токсичними речовинами такими як: вінілхлорид ( $C_2H_3Cl$ ), фосген ( $COCl_2$ ), ціаністий водень ( $HCN$ ), хлороводень ( $HCl$ ), сірководень ( $H_2S$ ), аміак ( $NH_3$ ), стирол ( $C_8H_8$ ), фенол ( $C_6H_5OH$ ), формальдегід ( $CH_2O$ ), бензол ( $C_6H_6$ ), диметиламін  $(CH_3)_2NH$ , окис ( $CO$ ) і двоокис ( $CO_2$ ) вуглецю, бензальдегід ( $C_6H_5CH$ ) тощо. В результаті впливу високих температур на органічні сполуки, збільшується утворення: хлорованих діоксинів і бензофуранів ( $C_8H_6O$ ), метилу ртуті ( $CH_3Hg^+$ ) тощо [55, 169, 271, 276]. Деякі з цих токсикантів сприяють руйнуванню озонового шару [113, 116].

За підрахунками Держстатистики, ситуація з переробкою промислових відходів в Україні залишилася на рівні 2017р.: утилізовано 5% з 40 тис.т пластика, 10% з 22 тис.т скла, 28% з 23 тис. т і 50% з 112 тис.т паперу і картону. Незначно покращилась ситуація з переробкою побутових відходів: 257,3 тис. т (+1%) було спалено для вироблення електроенергії і 2 тис.т просто згоріло (-5%), утилізовано за євро стандартами 6,5 тис.т (+62,5%). Але, це лише 2,3% від загальної кількості



побутового та подібного сміття [243].

Розвинені Європейські країни переробляють 70% відходів, в Швеції - 96%, через що шведи вже 10 років закупають відходи за кордоном, щоб не простоювали їх сміттєпереробні заводи. В Німеччині, Бельгії, Австрії, Нідерландах – переробка досягає 98,6% і лише у Словенії та Латвії частка оброблених відходів є меншою за 90%, тоді як в Україні лише 5% піддається методам переробки та утилізації [50, 51, 118, 149, 151, 152, 170, 188]. Стан поводження з ТПВ у країнах Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) представлено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Кількість відходів та методи поводження з ними в країнах Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР)

	Північна та Південна Америка	Європа, Туреччина та Ізраїль	Японія, Півд. Корея, тихоокеанські країни	Всього ОЕСР
Кількість відходів млн. т.	291,5	263,9	85,3	640,7
Кількість відходів, кг/(чол. рік)	607	469	421	514
Рециклінг	24%	25%	31%	25%
Компостування	8%	13%	0,3%	9%
Спалювання (без використання енергії)	0,1%	3%	4%	2%
Спалювання (з використанням енергії)	9%	20%	48%	18%
Захоронення	60%	38%	17%	45%

Найбільшу кількість відходів генерують жителі Америки, переважно, США, де більша частина відходів вивозиться на полігони (60%). Рециклінг та компостування відходів розвинене в країнах Європи (38%). Термічна обробка використовується в країнах Азії і Тихоокеанського регіону (48%), а також в Європі, більше ніж 90%

відходів, що спалюються, використовуються для отримання енергії [149, 349].

В якості порядку, пріоритетів в законодавстві і політиці щодо запобігання утворенню і управлінню відходами застосовується Директива 2008/98/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 19 листопада 2008 року «Про відходи та скасування окремих Директив». Вона вводить єдині визначення термінів і понять «відходи», «утилізація» та ін. Під поняттям «відходи» розуміється «субстанція або предмет, від яких власник позбувається, хоче позбутися або повинен позбутися відповідно до чинного законодавства». Визначено 16 категорій відходів, на основі яких запроваджено єдиний Європейський перелік відходів (рішення 2000/532/ЄС), що періодично переглядається і оновлюється. П'яти ступенева ієрархія управління відходами (рис. 1.2) базується на пріоритеті запобігання їх утворенню, а якщо запобігти не вдається – докладаються зусилля для повторного використання, якщо і це неможливо – здійснюється рециклінг (матеріали з відходів переробляються на продукцію, матеріали або речовини).



Рисунок 1.2 - П'яти ступенева ієрархія управління відходами

Політика щодо системи поводження з відходами повинна розглядатися в сукупності з питаннями енергетичної незалежності країни, політикою екологічної безпеки та економічного зростання [37, 60, 185]. Основними принципами державної політики є пріоритетний захист навколишнього природного середовища та здоров'я людини від негативного впливу відходів, забезпечення ощадливого використання матеріально-сировинних та енергетичних ресурсів, науково обґрунтоване узгодження екологічних, економічних та соціальних інтересів суспільства щодо утворення та використання їх з метою забезпечення його сталого розвитку [60].

Національна Стратегія управління відходами в Україні до 2030 року передбачає перехід системи поводження з відходами в Україні на запобігання утворенню останніх від депонування їх на звалищах та полігонах до комплексного поводження з ними [185]. В першу чергу, це зростання рівня їх перероблення та утилізації, введення в експлуатацію сміттесортувальних та сміттєпереробних заводів. Велика увага приділятиметься технологіям утилізації з використанням енергетичного потенціалу та виробництва альтернативного палива з побутових та подібних відходів [185].

Стратегія управління відходами передбачає, що обсяг захоронення твердих відходів на сміттєвих полігонах повинен скоротитися з 95% (у 2016 році) до 50% у 2023 році і до 30% у 2030 році. Однак торішні показники не встигають за заданим темпом: кількість захоронених відходів у 2018 році зменшилася всього на 1,2%. За словами експертів, ситуація в сфері поводження з відходами кардинально не зміниться, поки сортування та переробка сміття не стануть прибутковою справою для інвесторів [92, 149, 226, 239, 284].

#### 1.1.2 Вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей об'єктів накопичення твердих органічних побутових та промислових відходів

Незадовільна організація з боку управління житлово-комунального господарства (ЖКГ) облдержадміністрацій (ОДА), місцевих органів виконавчої влади та органів самоврядування у сфері поводження з ТПВ призводить до утворення несанкціонованих звалищ у межах населених пунктів, у місцях рекреації населення, лісосмугах, ринках, які є реальними джерелами перебування й розмноження гризунів, шкідливих комах та джерелами небезпечних зооантропонозів (чуми, туляремії, сказу, лептоспірозу, а також таких захворювань, як атипічна пневмонія (SARS), геморагічна лихоманка із нирковим синдромом) [А].

Унаслідок цього зростають масштаби забруднення навколишнього середовища токсичними компонентами, що містяться у відходах. Схематичне зображення впливу на довкілля та здоров'я населення наслідків накопичення твердих органічних відходів (ТОВ) представлено на рис. 1.3.

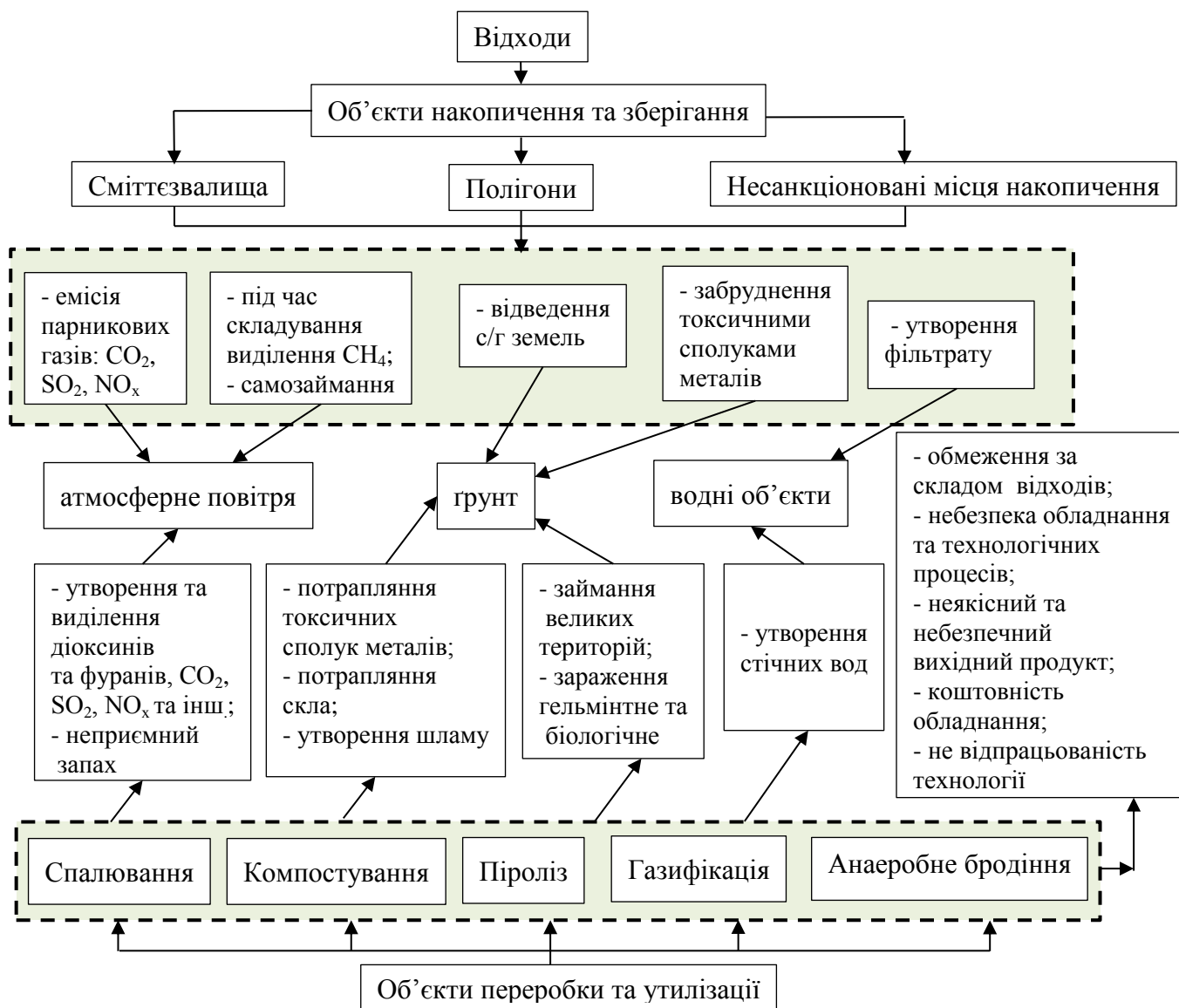


Рисунок 1.3 - Схематичне зображення впливу на довкілля та здоров'я населення наслідків накопичення відходів

Основний метод поводження з ТОВ в Україні це захоронення (санкціоноване та несанкціоноване складування на полігоні або звалищах). Площа територій, що належить відходам, займає понад 2% усієї держави, а в районах мегаполісів – більше 7% прилеглих територій. Відходи знешкоджуються на 771 офіційному міському звалищі, що займають площу понад 250 тис. га [185]. Переважна більшість звалищ (80-90%) в продовж тривалого часу працює у режимі перевантаження, з порушеними проектними показниками відносно обсягів накопичення відходів, без дотримання запобіжних заходів щодо забруднення підземних вод та повітряного басейну. За даними Міністерства розвитку громад і територій, 4,2% полігонів ТПВ в

Україні переповнені, 16% не відповідають нормам екологічної безпеки, а 30% потребують паспортизації та всього 113 працюють згідно ДБН. До недоліків складування відходів на полігонах слід віднести виведення з обігу великих площ сільськогосподарських угідь, труднощі щодо організування нових звалищ через відсутність вільних земельних ділянок. Так, для захоронення 1 т сміття потрібна площа 3 м<sup>2</sup> [247].

Морфологічний склад ТПВ і розрахункова величина теплотворної здатності ТПВ для п'яти міст України (Київ, Суми, Тернопіль, Харків, Чернівці) наведена в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Морфологічний склад ТПВ для різних міст України

Компоненти	1	2	3	4	5	Середн.	Діапазон
Харчові відходи	30,0	35,5	43,6	45,6	29,4	36,8	30-45
Папір і картон	5,3	5,9	7,6	8,5	15,6	8,6	5-15
Полімери	16,0	8,7	12,3	10,7	16,6	12,9	8-17
Скло	13,6	10,9	11,3	9,1	15,2	12,0	9-14
Чорні метали	1,0	0,3	0,6	1,2	2,0	1,0	0-2
Кольорові метали	0,1	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3	0-0,5
Текстиль	2,0	3,8	2,2	2,2	5,7	3,2	2-5
Деревина	1,6	2,5	0,1	1,4	2,0	1,5	0,1-2
Небезпечні відходи	0,3	0,1	0,3	0,3	0,5	0,3	0,1-0,5
Кістки, шкіра, гума	0,5	1,6	0,4	0,9	0,8	0,8	0,5-1,5
Комбіновані відходи	0,5	0,9	0,4	1,0	-	0,7	0,4-1
Залишок, в т.ч	29,1	29,4	20,9	18,7	11,9	22,0	12-30
Дрібні будівельні відходи	0,3	2,8	3,4	3,2	3,2	2,6	0,3-2,5
Вуличний зміт, листя	6,1	0,5	0,3	-	3,4	2,1	0-6
Гігієнічні засоби	3,1	3,7	2,6	2,8	3,6	3,2	2,3-3,5
Інше	19,6	22,4	14,7	12,7	1,8	14,3	2-22
Теплотворна здатність, Дж/кг	9,4	7,5	8,3	8,4	11,8	9,1	7,5-11,8

Відомо, що на сьогодні налічується близько 150 видів пластмас і для отримання

певних властивостей до їхнього складу вводять до 20 різних домішок, більшість із яких є токсичними. Наприклад, під дією високої температури та сонячного проміння відходи з ПЕТ починають виділяти токсичні сполуки, такі як бісфенол А (ВРА). Що сприяє порушенню роботи ендокринної системи, розвитку онкологічних та серцевих захворювань, діабету, захворювань печінки, порушенню репродуктивної функції та роботи мозку. Полівінілхлорид (ПВХ) найбільш отруйний та небезпечний при переробці для здоров'я вид пластмас, який використовується для виготовлення тари для зберігання олії, блістерів, пластикових труб, меблів та віконних профілів. Такий пластик виділяє фталати, ртуть, кадмій та бісфенол А. При спалюванні ПВХ утворюються високотоксичні хлорорганічні сполуки, які мають канцерогенну, мутагенну і тератогенну дію.

### 1.1.3 Оцінка поширення використання технологій утилізації твердих органічних відходів та впливу їх на довкілля

Досвід зарубіжних країн показує, що для ефективної утилізації відходів на перше місце виходять технології, що завдають мінімальний екологічний збиток навколишньому природньому середовищу (НПС), мають низькі капітальні витрати та дозволяють отримувати прибуток. Ці технології засновані на ретельно відпрацьованих стадіях утилізації:

- підготовка сировини: збір, очищення, сортування;
- саме переробка: механічні, фізико-хімічні, хімічні, біологічні та термічні методи;
- доопрацювання кінцевого продукту: поліпшення технологічних характеристик (якість продукту), створення товарного виду (модернізація).

З урахуванням санітарних вимог захисту населення у світовій практиці розроблені та використовуються такі схеми знезараження, переробки, утилізації відходів: захоронення на полігонах з/без збору біогазу (анаеробний процес); переробка ТПВ шляхом компостування (аеробний процес); термічна утилізація шляхом спалювання, піролізу, термолізу, плазмолізу, газифікації; знезараження ТПВ

шляхом механічного подрібнення і подальшого брикетування та інші [13, 35, 50, 51, 80, 110, 118, 149, 151, 152, 165, 170, 188].

Найбільшого розповсюдження у світовій практиці набули термічні методи утилізації: спалювання, газифікація, крекінг, коксування, напівкоксування, піроліз тощо, які застосовуються в різних галузях промисловості (Додаток У). Досвід термічної переробки сміття в розвинених країнах світу показує, що все більшого значення набувають технології, спрямовані на утилізацію комплексних сумішей, що поєднують у своєму складі як окремі горючі компоненти ТПВ, так і деякі види промислових відходів, які мають досить високу теплоту згоряння [3, 13, 30, 173, 224]. Тому перспективним є залучення в паливний баланс країни ТОВ, як альтернативних енергоносіїв, та отримання з них нетрадиційного високоенергетичного палива з забезпеченням екологічної безпеки [26, 42, 85, 302-304, 316,317, 328, 335].

Аналіз перерахованих вище технологій не дає впевненості в тому, що вони можуть бути ефективно реалізовані у випадку переробки ТОВ. Кожна технологія має ряд недоліків, які не дозволяють задовольнити всі вимоги щодо комплексної переробки усіх органічних відходів, екологічної безпеки процесу, економічної доцільності та ресурсозбереження.

Принципова різниця між термічними методами полягає в ступені окиснення речовини, що обробляється і це надає широкі можливості комбінації методів в залежності від особливостей сировини та постановки мети. Термічні методи утилізації композиційних матеріалів зображено на рис. 1.4.

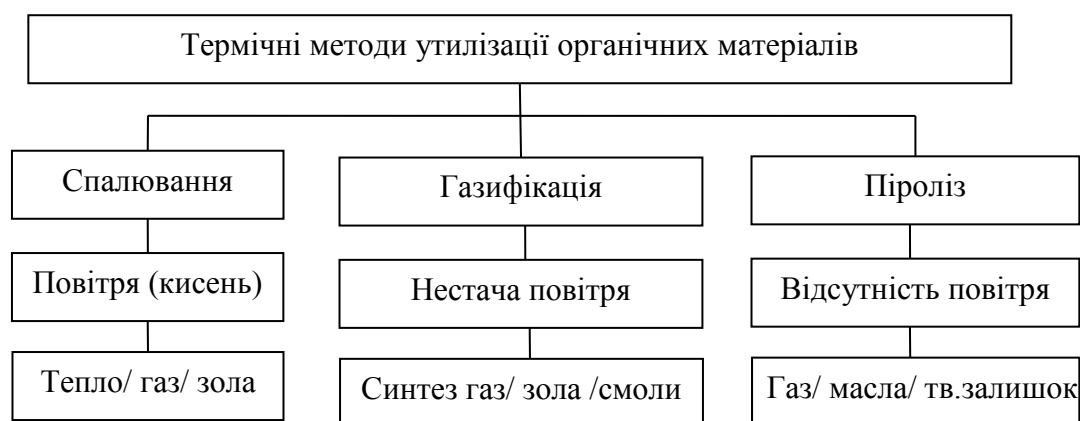


Рисунок 1.4 - Термічні методи утилізації композиційних матеріалів

Тривала практика спалювання відходів дозволяє чітко визначити його переваги та недоліки. Провідні незалежні європейські інститути вважають спалювання відходів вигідним, оскільки при цьому можна отримувати електроенергію і тепло. Проте науковці відзначають, що сміттєспалювальні установки мають низку суттєвих недоліків: низький ККД (60-70%); утворення під час роботи вторинних, надзвичайно токсичних відходів (поліхлорованих дібензодіоксинів, фуранів і біфенілів); необхідність обладнання додаткових очисних споруд для багатостадійного очищення вихідних газів; використання для процесу спалювання значної кількості додаткового рідкого палива (до 265 л на 1 т відходів, що спалюють) [13, 35, 80].

При спалюванні 1 т ТПВ утворюється: 4-8 тис. м<sup>3</sup> димових газів; близько 2 м<sup>3</sup> стічних вод; 250-450 кг шлаків; 40-50 кг золи. В димових газах ССЗ ідентифіковано і кількісно визначено 27 інгредієнтів. При спалюванні ТПВ в газоподібний стан переходять: 72-95% ртуті, 85% хлору, 75% миш'яку, 38% фтору, 5-33% свинцю, 4-27% цинку, 1-7% міді, 7% нікелю, 6% хрому і 0,02% заліза. Такі речовини в атмосфері сприяють підвищенню рівня захворюваності у населення, яке проживає поблизу спалювальних підприємств.

Найбільш небезпечними речовинами, які виділяються в процесі спалювання відходів - сполуки групи діоксинів. Діоксини, настільки токсичні, що їх ГДК в повітрі не повинна перевищувати 0,5 пг/м<sup>3</sup>. Вони мають здатність залишатися в довкіллі, не розкладаючись, протягом як мінімум 10 років [70, 100, 113, 116]. В 80-х роках були отримані прямі докази перетворення ПВХ та інших хлорорганічних полімерів в суміші діоксинів ПХДД та ПХДФ на ССЗ. Кількості ПХДД і ПХДФ, що утворюються, збільшується в 10-1000 разів за наявності в технологічному процесі кисню [55, 169]. Відомо, що з кожним мільйоном тон спаленого міського сміття утворюється близько 34 тис. т легкої золи з супроводжуючою її сумішшю ПХДД та ПХДФ [271, 276].

На сьогоднішній день проблема забруднення довкілля діоксинами вирішується на рівні законодавчих актів та постанов, в яких обмежуються концентрації діоксиноподібних речовин в промислових викидах та продуктах харчування у багатьох розвинених європейських країнах (0,1 нг/м<sup>3</sup> щодо викидів в атмосферу)



[196].

Ще одним термічним методом утилізації ТПВ є: газифікація – високотемпературний процес переробки органічної сировини, що полягає в взаємодії вуглецю з окислювачами, який проводиться з метою отримання горючих газів ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ). В якості окислювачів використовують повітря, кисень, водяний пар, діоксид вуглецю та їх суміші [224].

Процес газифікації відходів відбувається за наявності невеликої кількості повітря та за умов високих температур (1000-1200°C), або надвисоких температур (3000-3200°C) в процесі плазмової газифікації. При цьому практично вся органічна частина сировини перетворюється в газ і золу. Утворений висококалорійний синтез-газ застосовується для виробництва тепла та електроенергії, а шлак – у будівельних потребах (але за умови, що у відходах відсутні небезпечні компоненти).

Основні недоліки цієї технології: необхідність попередньої сушки та подрібнення відходів до розмірів 20-40 см (що потребує додаткового обладнання та великих витрат енергії); технологічні труднощі під час регулювання процесу; висока енергоємність та вартість.

Поряд із зазначеними, виділяють технології, що передбачають розкладання органічної складової відходів в безкисневій атмосфері – піроліз, термічна переробка органічної сировини в герметичному реакторі без додавання кисню. Кінцевими продуктами зазначеного процесу є піролізний газ із відносно високою теплотою згоряння (у вдосконалених технологіях – додатково отримують рідке паливо як конденсат легкої фракції парогазової суміші піролізного газу), смоли та твердий вуглецевий залишок (пірокарбон) [110, 165, 175, 193, 332].

Для проведення цього процесу необхідно підвести значно меншу кількість теплоти за рахунок використання отриманих продуктів у якості енергоносія для здійснення процесу, що є більш вигідним з точки зору енергетики та безпеки. Це дозволяє сформулювати наступні переваги піролізу перед іншими термічними методами утилізації: проведення процесу при більш низьких температурах [298, 321, 324, 328], отримання більш цінних та якісних кінцевих продуктів, значно нижчий рівень викидів в атмосферу окису вуглецю та інших продуктів, більш низьке теплове

забруднення НПС, низькі витрати на апаратне оформлення процесу. За допомогою піролізу можна переробляти зношені автомобільні шини, пластмаси, відпрацьовані мастила, осад стічних вод тощо. Після такої переробки не залишається біологічно активних речовин, а залишок, який утворюється, має високу щільність, що різко зменшує обсяг відходів, які потрапляють на звалища [114, 118, 170]. Отже, кількість забруднюючих речовин, що виділяються при піролізі, значно менша від тих, що виділяються при спалюванні відходів. Проте якщо переробляти за стандартною технологією піролізу всі тверді органічні відходи, піролізний газ необхідно очищати від кислих газів, зокрема, хлористого водню, внаслідок чого цей процес стає досить високовартісним через застосування спеціального устаткування і використання каустичної або кальцинованої соди; при цьому також не можна уникнути забруднення довкілля важкими металами.

Недоліком стандартних технологій піролізу є неможливість підтримання оптимальних температурних режимів, які забезпечують екологічну безпеку процесів і максимальний вихід кінцевих продуктів у широкому діапазоні хімічного та фізичного складу відходів, а відтак і низька енергетична ефективність, досить жорсткі вимоги щодо підготовки ТПВ, а саме: сортування відходів з метою виділення баластних фракцій (скла, металів, каміння), попереднє їх подрібнення; висока вартість обладнання та значні експлуатаційні витрати.

Зазначені недоліки призвели до закриття чи перепрофілювання більше, ніж 80% побудованих на основі технології піролізу заводів із переробки ТПВ [35].

На сьогодні із всіх сміттєпереробних заводів, які використовують піролізні технології, найбільш економічно вигідними є заводи фірми «Tech Trade GmBH». Вартість заводу цієї фірми потужністю 100 тис.т/рік складає € 50 млн, в той час як вартість аналогічного заводу потужністю 50 тис.т/рік складає € 30 млн. Таким чином, із зменшенням потужності заводу капітальні витрати за одиницю потужності зростають, тому в світовій практиці заводи потужністю менше ніж 50 тис.т/рік на 125 тис. населення для переробки ТПВ не будують [118].

Еколого-економічні проблеми утилізації твердих відходів досліджені як вітчизняними, так зарубіжними вченими. До них відносяться Ед Байер, Гідеон

Шрайбер, Б. Уайт, Пітер Вудерс, М. В. Абрамова, С. І. Антонюк, Г. О. Белявський, О. І. Бондарь, В. В. Вамболь, Н. В. Внукова, Г. Г. Гелетуша, Ю. Л. Забулонов, В. М. Єрмаков, М. Б. Корбут, Ю. Ю. Косивцов, І. Г. Коцюба, І. П. Крайнов, О. П. Крот, В. Л. Кузнєцов, М. С. Мальований, В. П. Матейчик, Н. Є. Ніколайкіна, О. С. Парфенюк, В. Г. Петрук, В. В. Попович, А. Л. Скромний, Д. В. Сталінський, І. Л. Трофімов, В. А. Устинов, В. М. Шмандій, Л. Я. Шубов, Farid Nasir Ani, Garry L. Rempel, Felix A. Aisien, Kalitko V. A., Obernberger I. та ін. Економічні проблеми виробництва і використання альтернативного палива в Україні вивчають українські вчені: В. І. Гавриш, який досліджував альтернативне моторне паливо аграрного сектора; В. А. Дубровін і Г. Г. Кондратюк, котрі розглядали якість дизельного біопалива; Позднякова Є. І., що займається дослідженням областей застосування продуктів піролізу; В.Г. Семенов, який аналізує перспективи використання дизельного біопалива в Україні, і ін.

Деякі економічні показники різних технологій утилізації ТОВ наведено в табл. 1.5 [226].

Таблиця 1.5 - Економічні показники різних методів утилізації відходів

Метод утилізації	Економічні показники		
	Початкові витрати, дол. / т	Доходи	Термін окупності
Захоронення	18	–	–
Спалювання	43	48	10-15 років
Піроліз	70	110	4-7 років
Компостування	40	60	5-8 років
Рециклінг	30	80	5-10 років

Найбільш ефективним способом створення оптимально замкнутих безвідходних технологій термічної переробки є використання схем з рециркуляцією. З введенням рециркуляції в технологічну схему вирішуються важливі технологічні завдання: найбільш повне використання вихідних продуктів, виключення шкідливих викидів у навколишнє середовище, забезпечення енергозберігаючого режиму утилізації [82, 158-160].

Для вирішення проблеми утилізації ТПВ запропонована схема багатоконтурного циркуляційного піролізу (БЦП) [119] (рис. 1.5), сутність якого полягає в досягненні глибокої деструкції всієї суміші органічних відходів за рахунок рециркуляції та поетапного розкладання важких фракцій проміжних продуктів, що утворилися в процесі первинного піролізу відходів [128].

Технологія БЦП поєднує реактор первинного (традиційного) піролізу та багатоконтурну циркуляційну систему (БЦС), що забезпечує розділення первинної парогазової суміші (ПГС), яка надходить з реактора первинного піролізу на контури БЦС, на два компоненти - піролізний газ та низькомолекулярне рідке паливо [119].

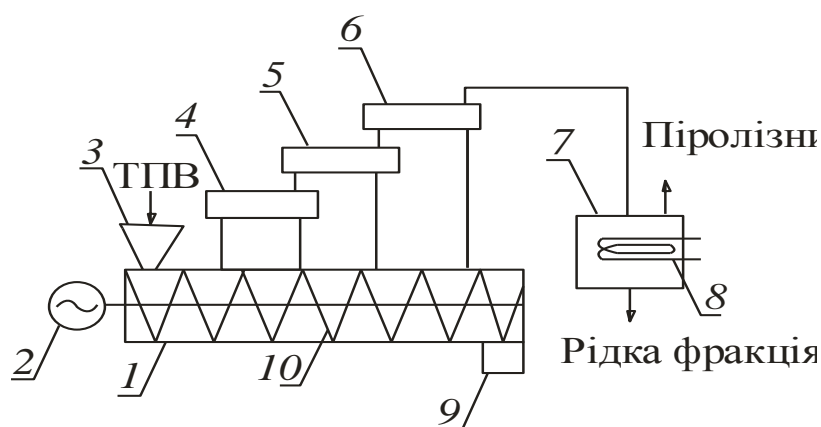


Рисунок 1.5 - Схема багатоконтурного циркуляційного піролізу: 1 – реактор; 2 – електропривід; 3 – пристрій для завантаження відходів; 4 – перший контур БЦП; 5 – другий контур БЦП; 6 – третій контур БЦП; 7 – вихідний конденсатор; 8 – система водяного охолодження конденсатора; 9 – пристрій для вивантаження пірокарбону; 10 – шнекова подача відходів

Застосовуючи принцип БЦП на виході можна отримати корисні кінцеві продукти (легкі фракції рідкого палива, піролізний газ) та твердий залишок. Утворений газ порівняно з газами, отриманими іншими термічними методами має більшу теплоту згоряння та більший вміст корисних горючих речовин, таких як метан, пропан, бутан та ін. (табл. 1.6). Дослідження якісного складу продуктів піролізу органічної сировини проводять багато вітчизняних та закордонних вчених: 17, 42, 73, 79, 117, 139, 141, 168, 245, 287 та інші.

Рідка та тверда фракції БЦП ТПВ мають кращі характеристики ніж показники

продуктів, утворених іншими різними термічними методами переробки відходів (табл. 1.7, 1.8). Ці порівняння вказують на можливість використання вихідних продуктів БЦП, як альтернативного палива.

Досягаються практично повна утилізація матеріально-енергетичних ресурсів ТПВ і енерго-автономність всього технологічного циклу. Таким чином процес БЦП є найбільш прийнятним з точки зору ресурсозбереження.

Технологія БЦП також дозволяє отримувати прибуток за рахунок реалізації виробленої продукції (тверде, газоподібне, рідке паливо, пара, електроенергія) кінцевому споживачу на відміну від багатьох дослідних виробництв, що діють сьогодні, де експлуатаційні витрати значно перевищують дохід [67, 68].

Таблиця 1.6 - Склад газоподібного продукту, отриманого при різних термічних технологіях утилізації сумішей різнорідних відходів

Найменування показників	Піролізний газ стандартних схем піролізу	Піролізний газ трьох контурного піролізу	Газифікація	Напівкоксування	Крекінг
Вміст, % мас.:					
метану	29,8-57,3	37,3-74,44	2,27-7,18	22,36-31,57	6,8
етану	3,5-5,8	7,6-12,6	-	-	3,6
пропану	0,5-4,2	3,7-15,4	-	-	1,0
бутану	0,1-1,3	0,5-2,7	-	-	0,5
етилену	0,6-5,2	0,3-3,1	-	-	6,1
пропілену	0,5-4,78	0,9-6,1	-	-	4,6
бутилену	0,3-5,8	0,1-5,2	-	-	-
водню	2,74-10,3	3,76-15,1	17,94-43,97	1,61-19,41	9,0
кисню	0,03-1,02	0,02-0,85	0,30-0,50	0,25-0,90	0,7
CO	3,5-20,6	2,1-15,3	2,6-25,0	13,35-18,60	2,6
CO <sub>2</sub>	3,2-28,4	3,3-27,5	2,7-4,6	7,20-16,60	-
Теплота згорання, МДж/кг	27,3-43,1	38,6-47,0	18-35	31,9-39,7	-

Відомі конструкції й способи піролізу для здійснення процесу утилізації суміші різних твердих органічних відходів не забезпечують високоефективний нагрів сировини в реакторі, безперервність процесу та екологічної безпеки обладнання, безпеки та корисності отриманих продуктів, мінімізації використання природних ресурсів та максимальної гарантії інвесторам повернення капіталовкладень [91, 191, 241].

Таблиця 1.7 - Елементарний склад рідкої фракції

Найменування показників	Результати аналізу			
	Піролізний газ стандартних схем піролізу	при трьох контурному піролізі	Піропаливо після швидкого піролізу	при напівкоксуванні
Вміст, % мас.:				
вуглецю	79,62-81,68	84,58-85,30	55,3-63,5	77,15-80,66
азоту	0,45-0,84	0,33-0,87	0,07-0,39	0,61-1,14
кисню	0,98-10,15	0,48-8,78	39,43-28,98	11,7-8,78
водню	9,39-13,44	12,07-14,09	5,2-7,0	10,77-8,78
Середня молекулярна маса	1050,4-1370,5	157,9-186,5	-	-

Таблиця 1.8 - Характеристика твердого залишку

Найменування показників	Піролізний газ стандартних	Пірокарбон після 3-х контурного	Напівкокс після напівкоксуван	Кокс після коксування
Вологість, % мас.	0,23-1,97	0,13-0,89	18,0	5
Зольність, % мас.	1,01-8,09	1,51-8,66	10,0	10-11
Вміст летких речовин, % мас.	1,76-12,83	1,38-9,02	10-15	0,7-1,2
Вміст, % мас.:				
вуглецю	93,58-95,58	93,78-95,90	84,4-9,8	96
водню	1,66-2,31	1,34-2,13	4,38-2,65	-
гетерогенні сполуки	2,76-4,11	1,79-2,98	2,82	1-2

Результатом ефективного управління відходами стане зменшення техногенного навантаження на НС з подальшим зменшення площ під захоронення відходів, збалансування процесів використання і відтворення природних ресурсів, екологічне оздоровлення регіонів та збільшення обсягів виробництва альтернативного палива, отриманого з відходів.

1.2 Визначення показників якості, екологічної безпеки та технологічних особливостей проведення процесів та продуктів утилізації відходів

1.2.1. Технологічні особливості та параметри процесів термічної рециркуляційної утилізації твердих органічних відходів

Основні параметри термічних процесів полягають у цілеспрямованій зміні хімічного складу сировини, її фазового і енергетичного стану за допомогою хімічних реакцій та фізико-хімічних процесів, що спрямовані на досягнення певного стану реакційної маси і її розділення на окремі компоненти чи фракції.

Критеріями якості функціонування термічних процесів служать технологічні показники - продуктивність, ступінь перетворення, вихід товарного продукту, його чистота та концентрація тощо, техніко-економічні показники, такі як собівартість, витратні коефіцієнти та інші. Стан процесів характеризується технологічними параметрами - координатами (температура, тиск, витрати, концентрації тощо).

Оскільки термічні процеси утилізації відходів головним чином характеризуються температурними показниками, то доцільно проаналізувати температурні діапазони проведення цих процесів в залежності від сировини.

На рис. 1.6 показано діапазони термічного розкладання різного органічного матеріалу.

Аналіз температурних діапазонів проведення термічних процесів показав переваги піролізу перед іншими термічними методами утилізації: проведення процесу при більш низьких температурах, отримання більш цінних та якісних кінцевих продуктів, значно нижчий рівень викидів в атмосферу окису вуглецю та інших продуктів, більш низьке теплове засмічення НПС, низькі витрати на апаратне

оформлення процесу.

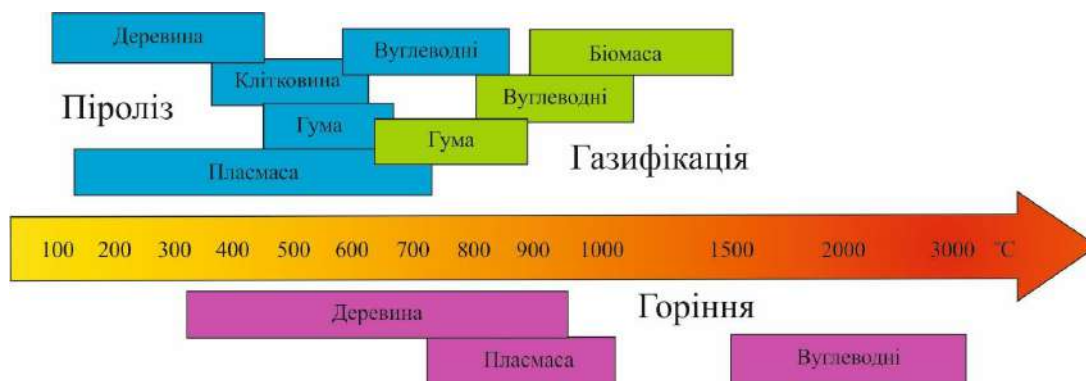


Рисунок 1.6 - Діапазони температур проведення термічних процесів

Механізм проходження фізико-хімічних процесів при піролізі нафти, вугілля, деревини та полімерів, достатньо досліджено такими вченими, як С. П. Гориславець, Д. М. Тменов, В. І. Майоров, І. П. Лосев, І. Ю. Литвинцев, Р. З. Магарил, С. Мадорський, Т. Н. Мухіна, Н. Л. Барабанов, С. Є. Бабаш, А. А. Тагер, І. І. Тугов, Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач та ін. [39, 110, 115, 157, 242, 245]. Проведення узагальнюючого аналізу традиційного піролізу вуглеводневих речовин дає змогу виявити основні процеси та реакції, за допомогою яких досягається перетворення та переробка цінної органічної сировини в корисні продукти.

Кожен етап термічного перетворення при БЦП (нагрів, плавлення, випаровування, конденсація, деструкція) характеризується утворенням певних речовин, тому важливо визначити хімічний механізм їх утворення та склад утворених продуктів для дослідження екологічної безпеки процесів.

Особливість піролізу органічних речовин полягає в тому, що термічне перетворення супроводжується подальшим розвитком системи сполучення (хімічних зв'язків різної природи) і утворенням для кожної температури більш термостійких структур [112]. Відбувається самостабілізація залишкового продукту внаслідок замикання ненасичених зв'язків під час їх рекомбінації, диспропорціонуванні і донорно-акцепторній взаємодії молекулярних фрагментів, що утворилися. Реакції піролізу речовин з переважанням полісполучених зв'язків, не є ланцюговими, за кожної із зазначених температур вони затухають внаслідок взаємодії й видалення вільних радикалів. Тому продовження процесу деструкції



необхідно ініціювати за більш високої температури. Такий процес піролізу органічних речовин відповідає кінетичній схемі радикальної поліконденсації. Загалом це визначає безповоротність піролізу вуглеводневої сировини [166]. В кожний даний момент за деструкцією невідступно йдуть реакції асоціювання. При цьому низькомолекулярні радикали, внаслідок, диспропорціонування водню, утворюють рідку фазу і вуглеводні газової фази, а з високомолекулярних, частково дегідрованих сполук формується тверда фаза.

Рідка і тверда фаза співіснують і взаємодіють між собою так, що в залежності від їх співвідношення на певних стадіях процесу виникає пластичний стан, далі відбувається твердіння пластичної маси і формування твердого вуглецевого залишку [110, 112, 158, 252]. Проведення процесу з рециркуляцією дозволяє отримати стовідсоткове перетворення сировини, що є неможливим без здійснення рециркуляції через термодинамічні обмеження, що накладаються на процес. У відповідності з теорією рециркуляції зміна потужності реактора буде відбуватися за рахунок дії трьох факторів: кількості рециркуляту, концентрації компонентів у загальному об'ємі реактора і масообміну [158-160].

Відмінність БЦП від відомої технології піролізу полягає в наявності БЦС, оскільки на виході з реактора ПГС потрапляє на контури БЦС та піддається послідовному охолодженню з пониженням температури на кожному контурі починаючи з першого. Так визначення температури для триконтурної системи -  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ . За рахунок вимушеного охолодження важкі фракції ПГС конденсуються та самопливом потрапляють до реактора первинного піролізу, де піддаються вторинній деструкції, а легкі фракції переходять на наступний контур. У результаті на кінцевому контурі досягається отримання рідкої фракції з зазначеною молекулярною масою [216].

Для спрощення і розуміння основних стадій та етапів фізико-хімічних процесів БЦП розглянуто процеси термічної деструкції на прикладі пластичних мас (I група) та деревини (II група). Процес термічного розкладання органічних відходів в установці БЦП умовно розділено на стадії.

На першій стадії здійснюється нагрів сухих органічних відходів, які знаходяться в

герметичному реакторі, до температури 550-580°C зі швидкістю 1-3 град/хв. При нагріві до температури 110-120°C із суміші відходів виділяється волога та залишок повітря. При температурі близько 200°C за рахунок реакцій дегідрування, дегідратації, первинної деструкції із суміші органічних відходів виділяються леткі речовини, які крім CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, Cl, F, SO<sub>2</sub> містять вуглеводні (олефіни та ін.). Виділення газоподібних речовин здійснюється за наявності домішок, залишків летких розчинників у полімерних відходах.

В інтервалі температур 125-270°C здійснюється фазовий перехід органічних відходів, що характеризується зміною агрегатного стану з твердого в рідко подібний для полімерних відходів та сублімацією - переходом із твердого агрегатного стану в газоподібний для матеріалів, що походять із деревини. Коли підведена теплота досягає більшого числового значення, ніж енергія зв'язків у молекулі, такі зв'язки розриваються. Отже, починають проходити первинні реакції деструкції з утворенням парогазової суміші. Перша група відходів при температурі 120-150°C характеризується відсутністю деструкції основного ланцюга макромолекули полімеру, однак відбуваються значні внутрішньо молекулярні перетворення.

Склад полімерних відходів різноманітний, і кожен полімер має свій температурний інтервал плавлення та деструкції. У таблиці 1.9 наведено особливості термічного розкладання окремих полімерів.

Нагрів реактора до температури 300-350°C приводить до повного перетворення першої групи відходів у розплав термопластичних полімерів [204]. Під час термодеструкції можливі різні напрямки реакції розкладання макромолекули. До них належать реакції розкладання або дисоціації макромолекул з утворенням низькомолекулярного продукту, у тому числі мономеру, тобто реакції деполімеризації.

Первинна деструкція другої групи відходів досліджено рядом вчених та описано в літературі [7, 115, 167, 268, 279]. Теоретично визначені фізичні явища та процеси, що проходять при утилізації сухих органічних відходів за технологією БЦП на першій та другій стадії, які характеризують процеси первинного піролізу можна узагальнити у вигляді таблиці (Додаток В).

Таблиця 1.9 - Особливості деструкції полімерних матеріалів

Полімер	$t_{пл}$ °C	$t_{дестр}$ °C	Продукти деструкції
Поліетилен	129-135	> 300	Рідкі, маслянисті та газоподібні продукти розкладання, але не етилен
Поліпропілен	165-175	200-300	Вихід мономеру 2%, низькомолекулярні речовини
Полістирол	150	500-800	Леткі сполуки, мономерний стирол, етан і бензен, кількість мономеру невелика - не більше 1%
Поліетилен-терафталат (ПЕТ)	250-280	> 300	Типовий склад газоподібних продуктів термічної деструкції, % CO - 8,0; CO <sub>2</sub> - 8,7; H <sub>2</sub> O - 0,8; CH <sub>3</sub> CHO - 80,0; C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> - 2,0; інші - 1,2
Поліаміди	205	>> 250	При деструкції виділяються вода, CO <sub>2</sub> і невелика кількість аміаку NH <sub>3</sub>

Третя стадія характеризується послідовною конденсацією ПГС на контурах багатоконтурної циркуляційної системи. Конструкція реактора ідеального витіснення забезпечує потік ПГС, що постійно утворюється при піролізі, в одному напрямку, а зі збільшенням тиску ПГС переходить на контури БЦС. На кожному контурі за рахунок відповідного ступеня охолодження від ПГС відділяється важка рідка фракція з меншою молекулярною масою, ніж на попередньому контурі. Проходять реакції поліконденсації, утворюючи з найбільш важких складових ПГС важку рідку фракцію (ВРФ), яка самопливом повертається до реактора.

Важливим фізичним явищем є контактування ВРФ з первинною та подальшою ПГС, що надходить у БЦП. Між ними проходить тепло- та масообмін, у результаті ВРФ попередньо нагрівається більш гарячими вихідними потоками. Оскільки ВРФ та ПГС не знаходяться в рівновазі і мають різні температури, то між ними почнеться обмін речовини, в результаті якого вони будуть прагнути до стану рівноваги.

При кожному контакті з ВРФ низько киплячий компонент переходить до ПГС, а

з ПГС високо киплячий компонент переходить до ВРФ. Такий двосторонній обмін компонентами, що повторюється на кожній ділянці багатоконтурної циркуляційної системи, дозволяє отримати на кінцевому контурі майже чистий низько киплячий компонент ПГС, що розділяється у вихідному конденсаторі з водяним охолодженням на піролізний газ та рідку фракцію з молекулярною масою 100-200.

Для четвертої стадії характерна наявність рециркуляції, що передбачає повернення з контурів БЦП у реакційну зону ВРФ, яка містить високомолекулярні компоненти первинного піролізу. Ця стадія характеризується глибокою деструкцією сконденсованих продуктів первинного піролізу за рахунок попадання важкої рідкої фракції в зону високих температур реактора БЦП, де відбувається інтенсивне закипання ВРФ з утворенням вторинної ПГС, що дозволяє істотно збільшити швидкість реакції розкладання складових ВРФ. Застосування циркуляційної системи забезпечує збільшення ступеня деструкції за рахунок рециркуляції ВРФ, тобто селективної конденсації на кожному контурі більш важких вуглеводнів парогазової суміші та отримання на виході рідкої фракції з зазначеною молекулярною масою.

Вхідна речовина є одним з головних параметрів для будь-якого методу утилізації. Суміш органічних відходів має широкий діапазон молекулярних мас (від 10000 і вище).

Дослідження термічної деструкції органічних відходів за технологією циркуляційного піролізу полягає у побудові сукупності достовірних математичних моделей окремих процесів та явищ, які характеризують перетворення відходів у реакційному об'ємі. Математична обробка даних у рамках розроблених моделей дозволить отримати запис окремих елементарних стадій процесу у вигляді кінетичної моделі з подальшим розглядом їх хімічного або фізичного змісту. Кінетика термічних реакцій деструкції визначає хімічний процес та відкриває можливість управління промисловим процесом утилізації відходів за технологією циркуляційного піролізу, а також дозволяє вирішувати питання про його інтенсифікацію. У зв'язку з цим встановлення кінетичних закономірностей є необхідною умовою для управління процесами термічної деструкції. Знаючи механізми перетворення відходів у товарні продукти, можна керувати їх якістю, а отже отримувати більш цінні речовини [28].

## 1.2.2 Аналіз ефективності використання технології та продуктів

Аналіз літературних джерел показав, що на даний момент як зарубіжні, так і вітчизняні видання містять інформацію про експериментальні і теоретичні результати дослідження термічного розкладання органічних речовин, проте дані цих досліджень неможливо використовувати при моделюванні процесу циркуляційного піролізу. Роботи вітчизняних авторів та країн СНД [166, 192, 272] здебільшого містять результати експериментальних досліджень процесу піролізу в апаратах лабораторного та промислового типу і характеризують конкретні технології та агрегати. Зарубіжні автори [295, 307, 322], наводять результати досліджень з експериментального визначення кінетичних характеристик процесу піролізу, а саме кінетичних констант реакцій. Неоднозначність при визначенні цих констант, в першу чергу, пов'язана з видом сировини і конкретними умовами проведення експерименту: температурою і швидкістю нагріву сировини.

Щоб керувати процесами деструкції необхідно визначати умови, за яких реакції термодинамічно можливі, і знати закони, що визначають зміни швидкості хімічних реакцій [39]. У хімічних процесах одночасно діють два протилежних фактора - ентропійний ( $T\Delta S$ ) і ентальпійний ( $\Delta H$ ). Сумарний ефект цих протилежних факторів у процесах, що протікають при постійному тиску і температурі, визначає зміна енергії Гіббса ( $G$ ):  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ .

Характер зміни енергії Гіббса дозволяє судити про принципову можливість здійснення процесу. Стан рівноваги оцінюється константою рівноваги, яка може бути виражена різними способами в залежності від того, наприклад, як написати рівняння реакції, що рахувати вихідною речовиною, а що продуктом реакції. Залежність між зміною  $\Delta G$  та константою рівноваги описується рівнянням константи рівноваги хімічної реакції, що протікає при постійних температурі і тиску.

Визначення термодинамічної ймовірності реакції дає лише якісну характеристику процесу. Для повної характеристики процесу необхідно знати і кількісний бік - швидкість, з якою дана термодинамічно можлива реакція буде

протікати. Швидкість хімічної реакції визначається зміною концентрації реагуючої речовини за нескінченно малий відрізок часу. У той же час швидкість хімічної реакції пропорційна концентрації вихідних речовин в кожен даний момент часу. Основне рівняння, що описує швидкість протікання хімічної реакції, записується наступним чином:

$$K = \frac{1}{t} \ln \frac{a}{a - \chi};$$

де  $K$  – константа швидкості реакції,  $t$  – час реакції,  $a$  – кількість молей вихідної речовини,  $\chi$  – кількість молей вихідної речовини, що прореагувала за час  $t$ .

Константа швидкості реакції  $K$  за постійної температури та тиску, величина постійна. Однак ця умова не завжди виконується, коли вихідні речовини представляють собою складну суміш вуглеводнів різного характеру.

При одній температурі вуглеводні різної будови, з різною молекулярною масою мають різні константи швидкості реакції. Парафінові вуглеводні розкладаються з найбільшою швидкістю у порівнянні з вуглеводнями інших груп; потім розкладаються нафтени і найбільш стійкі ароматичні ядра, однак довгі бокові ланцюги ароматичних вуглеводнів розкладаються майже з такою самою швидкістю, як і парафінові вуглеводні [242, 252]. Зі збільшенням молекулярної маси стійкість вуглеводнів падає і швидкість розкладання збільшується. Енергетичні характеристики реакцій визначають напрями та максимальну рівноважну ступінь перетворення вихідних речовин.

Дані розрахунків рівноважних ступенів перетворень вуглеводнів при піролізі окремих реакцій можуть бути використані лише для якісних, порівняльних оцінок стабільності речовин і складу продуктів, оскільки не враховуються результати інших, паралельно протікаючих реакцій. Для розрахунку рівноважного складу продукту піролізу необхідно вирішити систему алгебраїчних рівнянь, що пов'язують концентрації вихідних речовин, які утворюються і константи рівноваги молекулярних реакцій, якими умовно описується процес [159].

За допомогою кривих теоретичного розрахунку залежності обсягів потоків, які циркулюють на контурах трьох контурної системи, від глибини піролізу в окремих

контурах, визначені умови ведення процесу піролізу, при яких досягається мінімальне значення обсягу циркулюючих потоків 56-58%. При максимальному ступені деструкції органічних відходів значення циркулюючих потоків прагне до 90%. За рахунок правильного підбору робочого режиму можливо направити реакцію в реактора в бік максимального виходу газоподібного або рідкого продукту, які в подальшому можуть використовуватися як корисні речовини.

Складність отримання детальної інформації про перебіг хімічних перетворень відходів при їх утилізації зумовлює необхідність вивчення термодинамічних процесів в реакторі для виявлення стійких умов та оптимальних параметрів проведення процесу циркуляційного піролізу для отримання кінцевих цільових продуктів з заданими характеристиками. Склад суміші кінцевих продуктів та їх термодинамічні стійкості в реакційній суміші можуть бути визначені термодинамічним контролем та аналізом.

Застосування законів термодинаміки при дослідженні процесів термічної деструкції органічних відходів необхідне для проведення термодинамічних розрахунків, що дозволяють передбачити можливість їх перетворення, визначити діапазони температур в яких найбільш вигідно проводити процес утилізації, розрахувати запланований вихід продуктів деструкції, а також для оцінки енергетичної ефективності хіміко-технологічного процесу утилізації відходів за технологією циркуляційного піролізу.

В науково-технічній літературі є певна кількість публікацій стосовно автоматизації обладнання для переробки побутових відходів, зокрема різнотипних піролізних та газогенераторних установок і комплексів. Так, в роботах [306, 327] наведені спеціалізовані системи автоматичного керування установками для переробки вуглеводнів та низькосортного вугілля. Комп'ютеризовані системи моніторингу та керування технологічними комплексами утилізації різнотипних органічних відходів розроблені та докладно розглянуті в роботах [325]. Відомі також системи автоматичного керування установками піролізу деревини із застосуванням методів штучного інтелекту [8, 294]. Що стосується автоматизації обладнання для реалізації технології безперервної термічної утилізації цілих

зношених АШ, кількість публікацій з даної тематики обмежена, а задачі розробки функціональних структур, алгоритмів управління, компонентів та елементної бази спеціалізованих комп'ютеризованих систем контролю і керування (КСКК) технологічними комплексами утилізації ТОВ на даний час залишаються предметом для досліджень ряду наукових колективів як в Україні, так і за кордоном.

Полімерні та гумо-технічні відходи, зношені шини є цінною вторинною вуглеводневою сировиною, використання якої у технологічних процесах утилізації є економічно вигідним та екологічно безпечнішим заходом, ніж неконтрольоване зберігання їх в довкіллі [11, 29, 89, 162]. Зношені шини в загальному містять у своєму складі до 46% каучуку (натурального та синтетичного походження), 24% технічного вуглецю, до 20% металів та текстильних матеріалів у якості бортових, каркасних волокон та 10% враховують вміст азоту, кисню, сірки та присадок різного призначення (до 40 видів хімічних речовин) [11, 20].

Існуючі технології піролізу не передбачають термічну утилізацію цілих автошин в безперервному режимі з максимальним коефіцієнтом заповнення реактора, оскільки, об'ємна геометрична структура автошин не дозволяє заповнювати реактор без повітряно-газових пустот, що різко знижує коефіцієнт заповнення реактора, а це в свою чергу знижує продуктивність та енергетичний потенціал піролізних установок при збільшенні енергетичних затрат. Дана проблема викликала необхідність інтенсифікації процесу, що забезпечувало ущільнення автошин в реакторі при подальшій їх термічній деструкції. Тому виникає необхідність в дослідженні процесів деформації каркасу автошин і реології їх гуми під час проходження процесу піролізу. Що в свою чергу включає розробку і дослідження фізико-математичної моделі піролізного реактора заповненого автошинами. Складність явищ, які супроводжують процес ущільнення в момент піролізу, стало причиною того, що до теперішнього часу не розроблено математичну модель, яка б описувала процес динамічного ущільнення автомобільних шин під дією високих температур, що дозволило б використовувати її в практичних цілях для проектування піролізних установок.

В роботі [69] розглядалося однорідне температурне поле при проходженні



сировини в ізотермічних умовах, але при дослідженні режимів ущільнення автошин в піролізному реакторі необхідно враховувати вплив температури стінок обладнання на проходження сировини. Оскільки під дією температури матеріал автошини змінюють фізичний стан від твердого до в'язкопластичного, то для вирішення проблеми плинності рідини, в'язкість якої залежить від температури, необхідно фізико-математичне описання даного процесу [225]. Таким чином, при моделюванні реального процесу ущільнення автошин в піролізному реакторі, необхідно вирішити задачу плинності в неізотермічних умовах [10]. Для аналізу фізичного стану термопластичної гуми з бортовими кільцями під дією температури, в якості аналога, були прийняті результати досліджень моделі плинності в'язкого середовища, що залежить від температури [22], і динамічного ущільнення сировини з розсипчастою структурою [23], які найбільше підходять до аналізу процесу зміни фізичного стану термопластичної гуми при її ущільненні в процесі нагріву [84].

Відомі технології утилізації гуми автошин трудомісткі і енергозатратні, оскільки передбачають необхідність, по-перше, порізки автошин з використанням високовартісного обладнання [292, 298], або подрібнення за специфічними складними методиками [346], або застосування енергоємних технологічних процесів [314, 321, 326, 343, 347]. По-друге, використання взаємозамінних реторт, що приводить до необхідності роботи в циклічному режимі з великими втратами тепла, нагрів – охолодження [305, 323], при цьому використовується ручна праця при вивантаженні і завантаженні реактору [351], або додаткове використання коштовних каталізаторів [302, 317, 324, 328, 353]. По-третє, коефіцієнт заповнення реактора автошинами не перевищує 60% при малій теплопровідності маси гуми в реторті, що супроводжується малою продуктивністю технологічного обладнання [313].

На очищення кінцевого продукту може витратитися до 70% всієї енергії. Тому стає нагальною проблема розробки найбільш економічної технології поділу продуктів піролізу відходів. При збільшенні кількості компонентів, що розділяються збільшується і число варіантів їх поділу [24], що відрізняються один від одного енерговитратами.

Дослідження впливу температури на деформаційно-міцнісні властивості

високонаповнених композитів на основі поліетилену й частинок гуми наведено в роботі [24]. Встановлено, що при розтягуванні міцність гумопластів, що містять від 36 до 66% еластомірного наповнювача, практично не змінюється зі збільшенням ступеня наповнення, але зменшується при підвищенні температури. В статті [98] розкрито практичне застосування програмного комплексу FlowVision при розробці технологічного обладнання піролізної установки для утилізації відходів. Методом скінчених елементів розраховано розподіл температури в процесі утилізації, а також розподіл векторів швидкостей потоків гарячих газів, що дозволило оцінити ефективність розробленої конструкції піролізного обладнання [319].

Термічна деструкція ТОВ в піролізному обладнанні характеризується виділенням мономерів, які схильні утворювати різноманітну суміш високомолекулярних речовин, а також більш стабільні, стійкі з'єднання, серед яких присутні гетероатомні сполуки: сірко-, азото- та кисневмісні компоненти. Потрапляння таких речовин до складу кінцевих фракцій різко погіршує експлуатаційні якості отриманих альтернативних палив, а також становлять екологічну небезпеку для людей та довкілля, оскільки є ризик утворення токсичних сполук в продуктах горіння кінцевих фракцій [42, 73, 79, 139, 141].

За результатами аналізу літературних джерел щодо отриманих піролізних продуктів ТОВ встановлено, що без додаткової хімічної обробки рідинні продукти піролізу неможливо застосовувати у промисловості [67]. Необхідно встановити газоочисні прилади для зменшення викидів сірки та золи [42, 296, 345, 348]. Використання пірорідини, як компоненту мало сірчистого пічного палива можливе тільки за умови доведення окремих показників до норм відповідного галузевого стандарту [99].

Такі аспекти та прогнози є небажаними при впровадженні технології з утилізації ТОВ в промислових масштабах. Тому виникає потреба щодо розв'язання цієї проблеми за рахунок встановлення впливу технологічних параметрів на якісні та кількісні характеристики продуктів утилізації як наукового підґрунтя забезпечення екологічної безпеки технологій термічної утилізації та обладнання [191, 241]. Актуальною задачею є встановлення раціональних форм управління технологічним

процесом утилізації, що дозволить попередити потрапляння небезпечних речовин у навколишнє середовище.

### 1.3 Ризики впровадження екологічно безпечної технології утилізації відходів

Головними інвесторами біоенергетичних і сміттєпереробних проектів є держава і енергетичні корпорації. Правильна політика держави може заохочувати і стимулювати розвиток даного сектора (рис. 1.7).

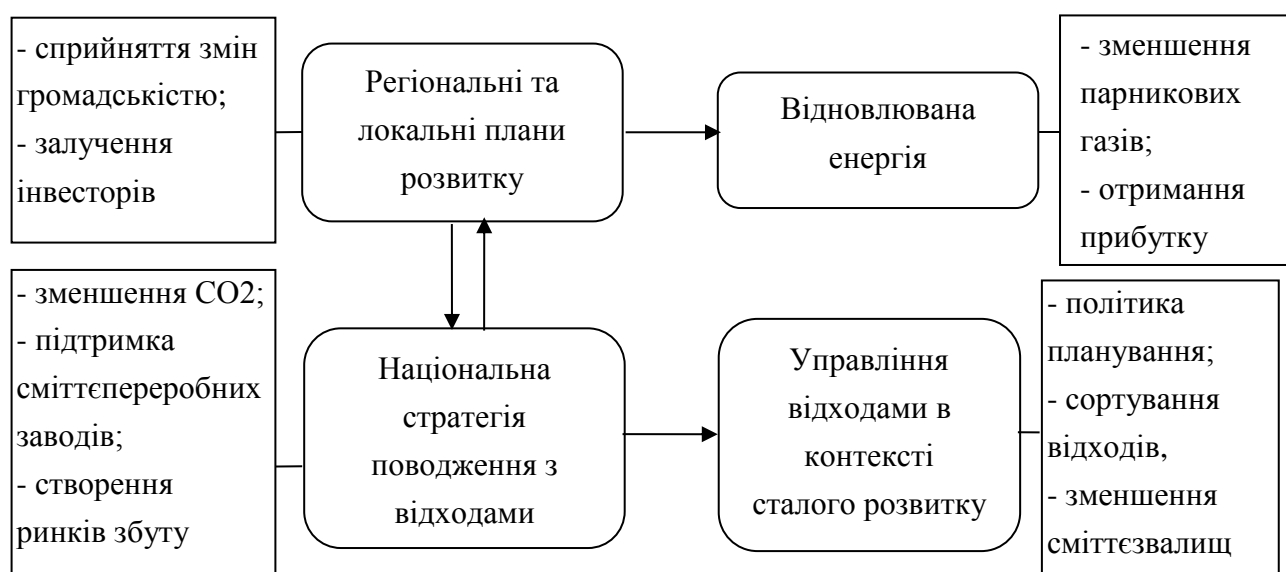


Рисунок 1.7 - Національні і локальні цілі політики

Поки технологія не зарекомендувала себе протягом певного випробувального терміну, її комерціалізація неможлива. Причому вартість демонстраційної установки може бути настільки високою, що перспективні розробки не зможуть вийти на ринок. Таким чином, необхідна підтримка функціонування існуючих заводів з частковим введенням нового обладнання для демонстрації можливостей, життєздатності та надійності технології. У разі піролізу це забезпечить значні обсяги необхідного альтернативного палива для різного роду випробувань.

Крім держави перспективним є пошук приватних інвесторів [18, 34, 46, 72, 83, 87, 108, 219]. Для залучення потенційних інвесторів необхідно надати інформацію існуючих сприятливих умовах і переваги, які можуть підтримувати комерціалізацію цієї технології. За даними Конференції ООН з торгівлі і розвитку (UNCTAD),

справедливо вважають, що країни, що розвиваються мають більший потенціал для виробництва альтернативного палива, ніж промислово розвинені країни, за рахунок кращих кліматичних умов і низьких витрат праці.

Ціна на біопаливо в США в 2010 р. досягла позначки в 172 долара за барель. Глобальне виробництво альтернативного палива збільшилася приблизно в чотири рази – з 4,7 млрд. галонів в 2000 році до 18,5 у 2010 році. В січні 2019 р., склало 134 мільйони галонів, що на 1 мільйон галонів вище, ніж виробництво в січні 2018 р., ціна 2,89 долар за галон (International Energy Agency, FO Licht).

Питання отримання та застосування альтернативних палив успішно вирішується багатьма країнами у світі. В таблиці 1.10 показано енергоспоживання на основі відновлюваних джерел за 2007 – 2017 роки [54].

Україна належить до енерго-дефіцитних країн світу. Забезпеченість власними енергоносіями не перевищує 40%. Потреба вітчизняного ринку в нафтопродуктах оцінюється на рівні 5,5 млн. т бензину і 6,5 млн. т дизельного палива в рік. Тому пошук альтернативних методів забезпечення країни паливом і становлення на шлях енергетичної незалежності країни є вкрай актуальним завданням. Збільшення частки відновлюваних джерел і виробництво альтернативного палива в національному енергетичному балансі може служити одним із завдань стратегії сталого розвитку економіки країни. Для виробництва і використання альтернативного палива в країні вже є достатні технологічна і сировинна бази.

Енергетичною стратегією України до 2030 року визначено, що освоєння нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії слід розглядати як важливий фактор підвищення рівня енергетичної безпеки держави та зниження антропогенного впливу енергетики на довкілля.

Таблиця 1.10 – Енергоспоживання на основі відновлюваних джерел за 2007 – 2017р.

	Одиниця виміру	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
1	Загальне постачання первинної енергії	тис. т н.е.	139 330	134 562	114 420	132 308	126 438	122 488	115 940	105 683	90 090	94 383	89 625
із нього													
2	Гідроенергетика	тис. т н.е.	872	990	1026	1131	941	901	1187	729	464	660	769
3	у % до підсумку	%	0,6%	0,7%	0,9%	0,9%	0,7%	0,7%	1,0%	0,7%	0,5%	0,7%	0,9%
4	Енергія біопалива та відходи	тис. т н.е.	1508	1610	1433	1476	1563	1522	1875	1934	2102	2832	3046
5	у % до підсумку	%	1,1%	1,2%	1,3%	1,1%	1,2%	1,2%	1,6%	1,8%	2,3%	3,0%	3,4%
6	Вітрова та сонячна енергія	тис. т н.е.	4	4	4	4	10	53	104	134	134	124	149
7	у % до підсумку	%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%
Усього енергія від відновлюваних джерел													
8	Загальне постачання енергії від відновлюваних джерел	тис. т н.е.	2384	2604	2463	2611	2514	2476	3166	2797	2700	3616	3964
9	Частка постачання енергії від відновлюваних джерел	%	1,7%	1,9%	2,2%	2,0%	2,0%	2,0%	2,7%	2,6%	3,0%	3,8%	4,4%

Сучасні енергетичні установки в області енергопостачання і теплопостачання та двигуни внутрішнього згоряння орієнтовані переважно на використання рідких палив з нафти. Однак світові запаси нафти нерівномірно розподілені по різних регіонах планети і не настільки великі, як відновлювальні ресурси твердих відходів органічного походження. Ці обставини створюють передумови для розробки промислових технологій одержання альтернативних екологічно безпечних видів палива із сировини не нафтового походження.

Вітчизняна законодавча база з виробництва та використання альтернативного палива потребує доопрацювання і є одним з інституційних бар'єрів для інвестування в цю галузь. Незважаючи на численні нормативно-правові документи, сформованого ринку альтернативного палива в нашій країні ще немає.

Можливість отримання альтернативних палив з необхідними фізико-хімічними властивостями дозволить цілеспрямовано удосконалювати робочі процеси дизельного обладнання та інших енергетичних установок і тим самим поліпшити їх екологічні та економічні показники.

Застосовувані альтернативні паливні рідини та матеріали мають відповідати певним технологічним вимогам. В залежності від відповідності висунутим технічним вимогам прискорюється або сповільнюється зношування та ерозія деталей, змінюються витрати експлуатаційних матеріалів та продуктивність машин.

Незважаючи на те що компанії Європи не є зацікавленими, деякі з них починають проявляти інтерес до альтернативних видів палива або вже взяли на себе зобов'язання з досліджень в цій області.

Фізико-хімічні властивості рідкої енергетичної фракції можуть змінюватися, якщо: під час термічної обробки не дотримуються чітко визначених технологічних параметрів (температури та тиску згідно з технологічним регламентом виробничого процесу); використовують різні каталізатори (наприклад, відпрацьовану оливу або димові гази), які впливають на характеристики вихідних продуктів; не витримуються необхідні обмеження складу первинної сировини або умови зберігання продукту.

Найчастіше рідку фракцію отриману методом низькотемпературного піролізу

органічних відходів використовують як пічне паливо або мазут. Полімерні відходи є найбільш перспективнішими для переробки в штучне рідке паливо [173, 182]. Розроблені іноземні технології дозволяють одержувати рідкі фракції бензину, гасу, дизельного і котельного палива. Найбільш відомими є технологічні процеси фірм «BASF» (Німеччина), «British Petroleum» (Великобританія), «Fuji Industrial Recycle Corp» (Японія). Однак головним недоліком вказаних технологій є висока ціна обладнання, що використовується і відповідно виробленого енергетичного рідкого продукту.

У сучасних економічних умовах особливо важливим є системний підхід з дослідженням якісних та кількісних корисних характеристик вхідної сировини, аналізом зовнішніх та внутрішніх технічних особливостей технологічного процесу, оцінкою ринку інвестицій в сфері поводження з відходами та ринку збуту отриманої продукції.

З точки зору формування доходу від реалізації матеріальних або енергетичних ресурсів найбільш цікавими є реалізація на вторинному ринку полімерів, виробництво електроенергії з біогазу з подальшим продажем за зеленим тарифом, а також реалізація електричної та/або теплової енергії, отриманих в процесі термічної утилізації ТПВ (рис. 1.8).

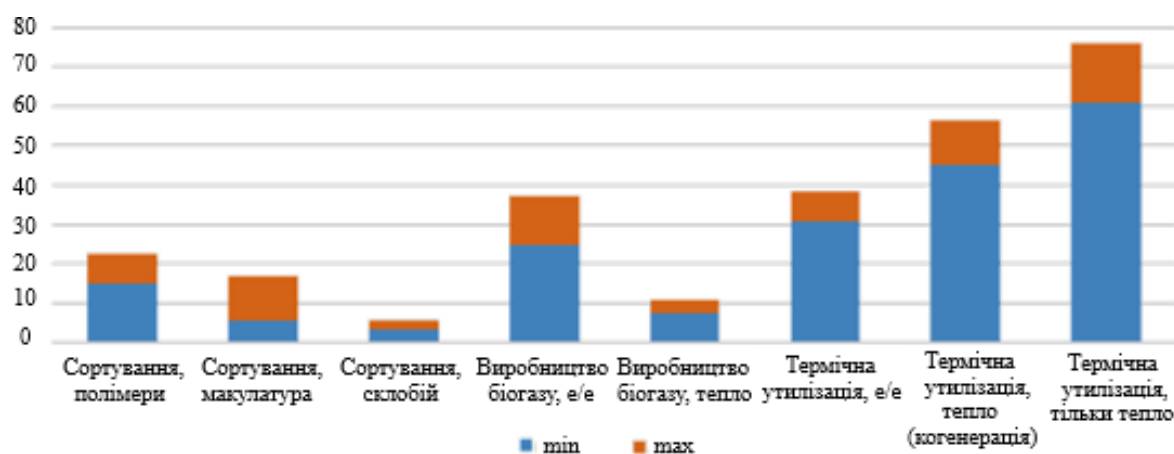


Рисунок 1.8 - Потенційний дохід, €/вро/т ТПВ

Експлуатація комплексів, які працюють за термічними технологіями утилізації відходів, пов'язана з ймовірністю виникнення небезпечних ситуацій різного характеру тому актуальною задачею є прогноз та оцінка рівнів промислової, пожежної та екологічної небезпеки на всіх етапах технологічного процесу з метою

забезпечення надійної та безпечної роботи обладнання [87, 108].

Головною метою державної інноваційної політики, як зазначено в Законі України «Про інноваційну діяльність», є створення соціально-економічних, організаційних і правових умов для ефективного відтворення, розвитку й використання науково-технічного потенціалу країни, забезпечення впровадження сучасних екологічно чистих, безпечних, енерго- та ресурсозберігаючих технологій, виробництва та реалізації нових видів конкурентоздатної продукції. Окрім цього, згідно з «Енергетичною стратегією України на період до 2030 року», в Україні повинні активно здійснюватися проекти вдосконалення та технічного переоснащення підприємств, впровадження нових виробництв і технологічних процесів, які потребують комплексного захисту від ризиків та наслідків від їх настання, особливо наукомістких проектів з переробки ТПВ.

Підприємства з утилізації відходів є унікальними та не дуже поширеними в Україні. Вони реалізують наукомісткі проекти, які характеризуються високою науковою новизною та інноваційністю, що, в свою чергу, призводить до появи ризиків. Такі ризики є неідентифікованими та маловивченими.

Тому, актуальною задачею є виявлення та аналіз ризиків проектів підприємств з утилізації ТПВ, що потребує проведення комплексної оцінки факторів можливих зовнішніх і внутрішніх загроз, небезпек технології, методів, інструментів та прогновної оцінки рівнів ризиків на всіх етапах управління. У цьому напрямі відомі роботи зарубіжних та вітчизняних вчених: Друкера Пітера Ф., Дж. М. Кейнса, Г. Саймона, А. С. Товба, Г. Л. Ципеса, В.Д. Шапіро, Є. А. Дружиніна, К. П. Колотиріна, С. Д. Бушуєва, Ю. М. Тесля, С. К. Чернова, К. В. Кошкіна, Є. А. Дружиніна, О. Б. Данченко, Ю. М. Харитонова, І. Б. Семко та ін.

Проаналізувавши розроблені підходи та методології, які дозволяють провести комплексну та адекватну оцінку ризиків (в тому числі екологічних) при проектуванні та експлуатації промислових об'єктів, слід сформулювати систему управління ризиками, визначити небезпечні фактори та перелік пріоритетних заходів з забезпечення екологічної безпеки при різних технологіях утилізації відходів. Аналіз сучасних підходів до оцінки ризиків функціонування наукомістких



небезпечних промислових об'єктів розглянуто в [18, 34, 46, 72, 83, 87, 108, 219].

Уряду необхідно враховувати, що багато ініціатив з прогресивної термічної переробки відходів здійснюються малими компаніями або державними інститутами. Ці установи мають обмежені фінансові можливості для розвитку і підтримки подальшої комерціалізації і реалізації, а також мають проблеми в наданні гарантій виконання зобов'язань. Тому має сенс для підтримки таких підприємств розглянути питання про надання фінансових ресурсів, таких, як гарантований венчурний капітал.

В межах національної проблеми по забезпеченню екологічної безпеки та регулюванню енергозбереження України суттєва увага приділяється імплементації еколого-економічних інновацій в житловому комунальному господарстві, зокрема щодо впровадження екологічно безпечної та інвестиційно привабливої технології з утилізації твердих побутових відходів [150, 161, 228, 284].

#### 1.4 Обґрунтування ідеї, мети та завдання наукового дослідження

Аналіз літературних джерел, присвячений оцінці впливу відходів побутового походження на екологічний стан України та поводженню з ТОВ свідчить про відсутність вирішення цієї проблеми.

Результатом ефективного управління відходами стане зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище, збалансування процесів використання і відтворення природних ресурсів, екологічне оздоровлення регіонів та збільшення обсягів виробництва біопалива.

Численні дослідження щодо умов проведення термічної деструкції органічної сировини, забезпечення при цьому екологічної безпеки та економічної ефективності описані в багатьох працях, проте в них не враховано вплив змішаних компонентів, технологічних параметрів на показники якості отриманих продуктів і можливість використання їх в якості корисного екологічно безпечного продукту, безпечних умов експлуатації обладнання та можливості використання його в промислових масштабах.

Комплексна оцінка рівнів та факторів екологічної небезпеки технологічних процесів термічної деструкції органічної сировини є важливим етапом при проектуванні та аналізі безпеки експлуатації промислових об'єктів, діяльність яких пов'язана з значними ризиками для довкілля, особливо підприємств і обладнання переробки та утилізації відходів (рис. 1.9).

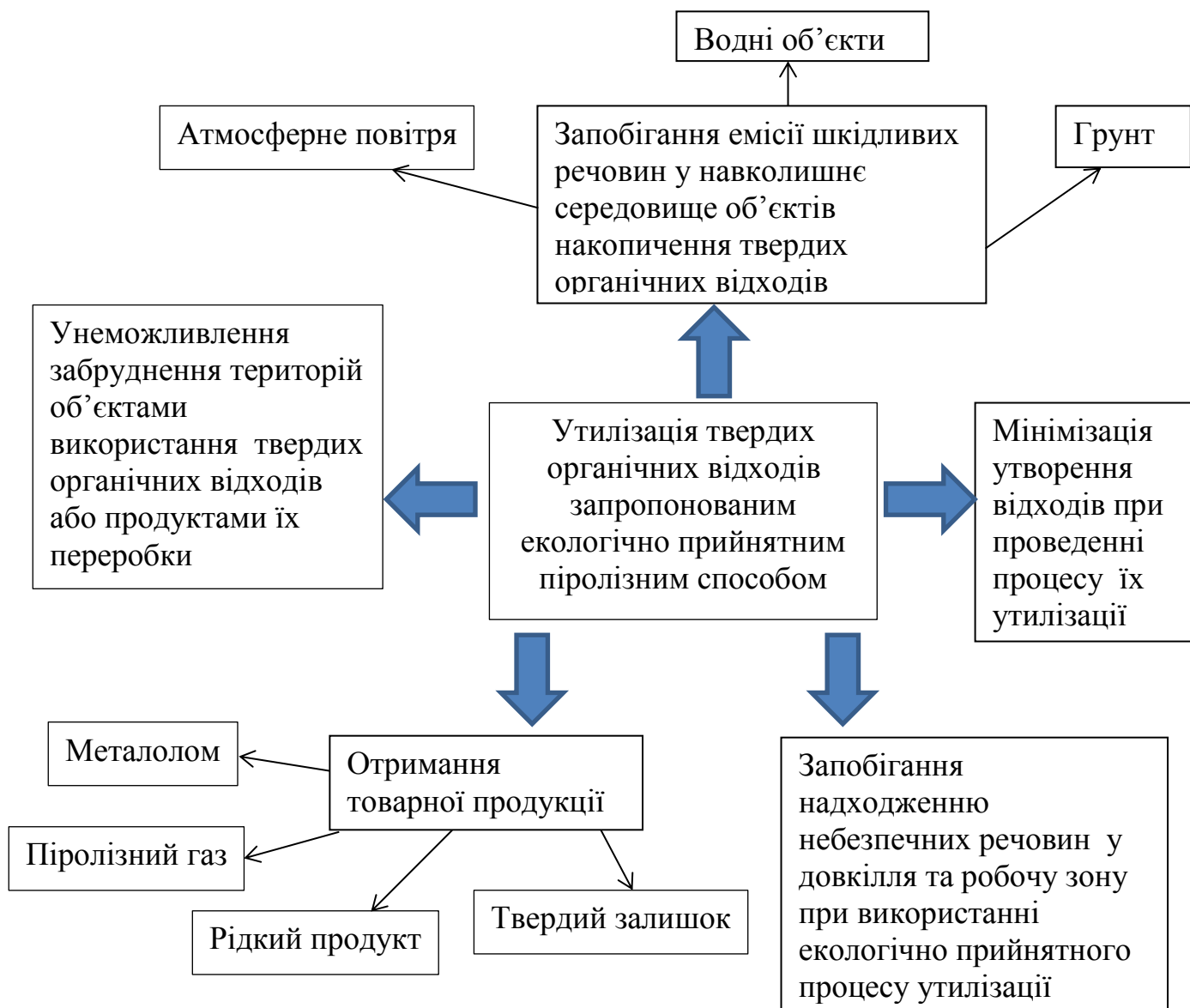


Рисунок 1.9 - Методологія забезпечення екологічної безпеки піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів

Аналіз світового та національного досвіду шляхів поводження з твердими органічними побутовими та промисловими відходами показав, що створення наукових основ екологічно прийнятних технологій утилізації відходів, тобто таких,

які унеможливають або мінімізують потрапляння небезпечних речовин до атмосферного повітря, ґрунтів та водних об'єктів у наднормативних концентраціях, шкідливих для довкілля та здоров'я людей, є актуальною проблемою, вирішення якої є підґрунтям та передумовою покращення екологічного стану об'єктів накопичення та переробки зазначених відходів та прилеглих до них територій, а також підвищення ефективності ресурсо- та енергозбереження.

Висунуто ідею, яка полягає в зменшенні шкідливого впливу на довкілля об'єктів накопичення, зберігання твердих органічних відходів, а також процесів їх утилізації шляхом застосування екологічно прийняттого піролізного способу за визначених параметрів його інтенсифікації та устаткування з отриманням товарної продукції.

Метою дисертаційної роботи є збереження та відновлення навколишнього середовища шляхом розвитку наукових основ методу екологічно прийнятної піролізної утилізації твердих органічних відходів при інтенсифікації процесів термічної деструкції зі зменшенням потрапляння шкідливих речовин у навколишнє середовище та отриманням корисних продуктів.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Здійснено аналіз державної політики та законодавчої бази в Україні, відносно поводження з відходами. Визначено, що в політиці щодо запобігання утворенню і управлінню відходами, пріоритетною є Директива 2008/98/ЄС. В Україні впроваджується Національна Стратегія управління відходами до 2030 року, яка передбачає перехід системи поводження з відходами на запобігання від депонування їх на звалищах та полігонах до комплексного поводження з ними.
2. Досліджено сучасний стан науково-технічних досягнень з питань впливу на навколишнє середовище та здоров'я людей об'єктів накопичення та зберігання твердих органічних побутових та промислових відходів, визначено характеристики забруднюючих сполук, утворених в процесі утилізації відходів, їх токсичність та негативний вплив на людину і довкілля.

3. Проаналізовано використання сучасних технологій утилізації твердих органічних відходів та їх впливу на довкілля. Визначено, що з урахуванням санітарних вимог захисту населення у світовій практиці використовуються такі схеми переробки відходів: захоронення на полігонах, переробка ТПВ шляхом компостування, термічна утилізація шляхом спалювання, піролізу, термолізу, плазмолізу, газифікації; знезараження ТПВ шляхом механічного подрібнення і подальшого брикетування та інші. Визначено, що найбільшого розповсюдження у світовій практиці набули термічні методи утилізації: спалювання, газифікація, піроліз.
4. Проаналізовано методику поводження з відходами в Україні. Визначено, що основний метод – захоронення, складування на полігоні або звалищах. Переважна більшість звалищ (80-90%) працює у режимі перевантаження, з порушеними проектними показниками, без дотримання запобіжних заходів щодо забруднення підземних вод та повітряного басейну.
5. Досліджено особливості термічної переробки відходів. Визначено, що кожна технологія має ряд недоліків, які не дозволяють задовольнити вимоги щодо комплексної переробки усіх органічних відходів, екологічної безпеки процесу, економічної доцільності та ресурсозбереження. Зроблено висновок, що найефективнішою є технологія, яка передбачає деструкцію органічної складової відходів в безкисневій атмосфері – піроліз.
6. Визначено, що використання багатоконтурного рециркуляційного піролізу є перспективним методом для утилізації твердих органічних відходів як з економічної, так і з екологічної точки зору, встановлені параметри якого дозволять проводити процес в екологічно безпечному безперервному режимі. Кінцевими продуктами такого процесу є піролізний газ, рідкий продукт та твердий вуглецевий залишок (пірокарбон), фізико-хімічні показники яких залежать від умов процесу, які треба додатково вивчати для визначення їх як комерційного продукту.
7. Запропоновано розробити систему комплексного методу управління екологічною безпекою та поводження з відходами, з використанням екологічно прийняттого піролізного процесу, для максимального зменшення техногенного

навантаження на навколишнє середовище з подальшим зменшенням площ під захоронення відходів, збалансування процесів використання і відтворення природних ресурсів, екологічного оздоровлення регіонів та збільшення обсягів виробництва альтернативного палива, отриманого з відходів.

Матеріали аналітичного розділу опубліковані у роботах автора [124, 128, 140, 194, 195, 196, 237].

## РОЗДІЛ 2

### НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ (СТВОРЕННЯ МЕТОДОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ) ДОСЛІДЖЕНЬ ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТНОГО ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

#### 2.1 Методологія проведення дисертаційного дослідження

Для вирішення поставлених задач була запропонована наступна схема використання теоретичних та експериментальних методів дослідження (рис. 2.1). Використано комплексний системний підхід, який передбачає проведення як теоретичних так і практичних досліджень [127]. Обрана методологія включає в себе:

- аналіз і узагальнення світового досвіду з питань шляхів поводження з твердими органічними відходами, а саме: аналіз їх об'ємів утворення та накопичення, фізико-хімічних характеристик з встановленням впливу відходів та методів їх складування, переробки та утилізації на довкілля та здоров'я людей;

- аналіз сучасних уявлень щодо механізмів та чинників, які визначають критерії екологічної безпеки, інтенсифікацію процесів утилізації та показники експлуатаційних характеристик піролізної технології та отриманих продуктів;

- математичне моделювання температурних режимів, кінетичних умов та термодинамічних параметрів процесів та елементів піролізного устаткування;

- розроблення та удосконалення методик експериментальних досліджень як у лабораторних умовах піролізних установок, так і під час натурних випробувань в промислових умовах;

- проведення багатокритеріальної оцінки факторів небезпеки, визначення таксономії, в результаті якої отримано групи ризиків, які впливають на якість, час реалізації та вартість впровадження екологічно прийняттого піролізного процесу, проведення якісної та кількісної оцінки груп ризиків;

- визначення методів дослідження процесів створення та регулювання властивостями екологічно прийнятних умов здійснення процесів термічної

деструкції ТОВ, встановлення можливостей та експлуатаційних вимог до якості отриманих речовин як товарного продукту;

– розробка технічних умов на установки піролізу, паспортів установок, інструкцій з експлуатації та інших технічних документів.

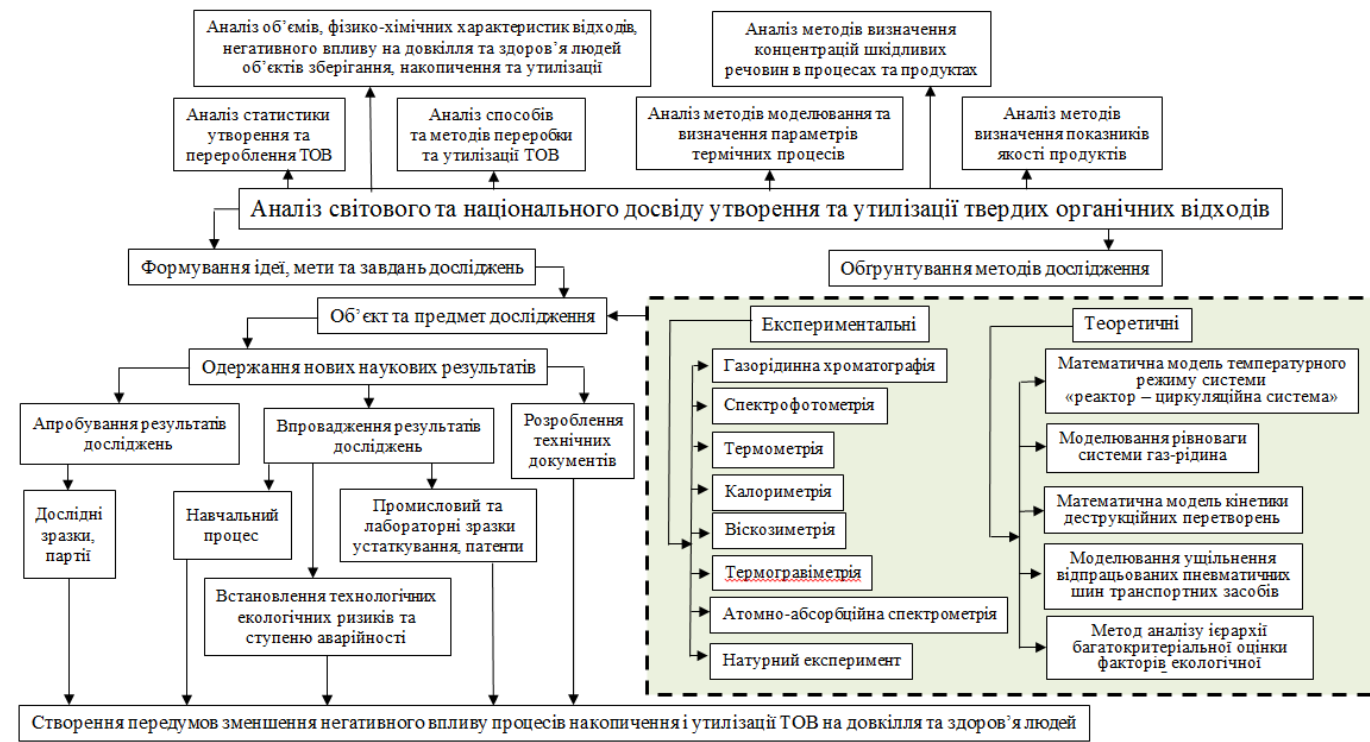


Рисунок 2.1 – Логічно-структурна схема методології проведення дисертаційних досліджень

Отримані наукові результати використано як передумову зменшення негативного впливу процесів накопичення та утилізації ТОВ на довкілля та здоров'я людей та підґрунтя розвитку наукових основ екологічно прийняттого піролізного процесу їх утилізації. У відповідності із завданнями, поставленими для досягнення мети, у роботі проведено дослідження процесів і установок із застосуванням широкого спектру фізичних, фізико-хімічних, розрахункових та математичних методів, апаратне визначення параметрів процесу і отриманих продуктів для зменшення кількості і об'ємів утворених та накопичених ТОВ.

Використовувались методи контролю за станом екологічної безпеки при проведенні процесів їх термічної деструкції, а саме: визначення розподілення гетероатомних сполук, а саме кисне-, сірко- та азотовмісних, за контурами з

додатковою циркуляцією продуктів деструкції піролізного процесу, створення умов інтенсифікації шляхом проведення безперервного процесу утилізації із забезпеченням контролю параметрів навколишнього середовища в робочій зоні, визначення наявності шкідливих небезпечних компонентів в кінцевих продуктах, вміст токсичних металів в рідкому продукті та твердому залишку.

## 2.2 Характеристика об'єкту дослідження: склад та параметри досліджуваних твердих органічних відходів

Будь-яка сировина складається з двох основних частин: горючої і негорючої (баласту). Горюча частина містить різні органічні сполуки, до яких входять такі хімічні елементи: вуглець (C), водень (H), сірка (S), кисень (O), азот (N), а також ті органічні сполуки, які під час деструкції, утворюють леткі речовини. Кількість та поєднання цих елементів визначають умови проведення екологічно прийняттого піролізного процесу та фізико-хімічні властивості отриманих продуктів, які в подальшому можуть бути використані як товарний продукт.

Тому для повного використання енергетичних властивостей органічних відходів, їх можна поділити як відходи, які мають високоенергетичні властивості та низькокалорійні відходи. До першого класу будуть відноситися синтетичні полімери, які в своїй основі складаються із вуглеводнів, такі як усі види пластмас, композиційні матеріали та їх суміші, гума, зношені автомобільні шини та ін. До другого класу – природні полімери, які відрізняються від перших наявністю кисню та підвищеною вологістю і в своїй основі складаються з целюлози.

Оскільки зараз в великих містах дуже повільно, але впроваджуються роздільний збір, то такого первинного відокремлення достатньо, для добору необхідних параметрів здійснення процесу. Крім того, морфологічний склад первинної маси відходів впливає на конструкцію пристрою подачі сировини в герметичному об'ємі технологічного обладнання термічної деструкції для забезпечення екологічної безпеки процесу, на неперевищення наднормативних концентрацій шкідливих речовин у робочому просторі [197].



Питома теплоємність відходів, які знаходяться в контейнері для сміття, для м. Миколаєва (південного регіону України весняний сезон) (табл.2.1) визначалась за формулою:  $C_{\text{ПИТ(ТОВ)}} = 21,9W + 2000$ , Дж/(кг · °С), де  $W$  – вологість ТОВ, %.

Таблиця 2.1 – Питома теплоємність основних компонентів ТОВ

Компонент	Питома теплоємність, Дж/(кг·°С)
Харчові відходи	3576,8
Дерево, картон, папір	2547,5
Гума	2569,4
Текстиль, ганчір'я	3095
Полімери (суміш)	2197,1

Визначення вологості відходів проводилось методом відбору елементарних проб за ГОСТ 3816-81 (табл. 2.2). Елементарну пробу масою 100г, зважили з похибкою не більше 0,1г, висушили до постійної маси у сушильному апараті (Сушарний шкаф круглий тип 2В-151/ ШС-3, 200°С, потужність 325 Ватт, напруга 220 вольт, виробництво завод «Електроділо») та повторно зважили. А вологість розраховувалась за формулою:  $W = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} 100, \%$ , де  $m_1$  – маса проби до висушування,  $m_2$  – маса елементарної проби після висушування до постійної маси.

Таблиця 2.2 – Вологість твердих органічних відходів

Компоненти	$m_1, \text{г}$	$m_2, \text{г}$	$W, \%$
Макулатура (картон, папір)	21,34	17,072	25
Полімери (суміш пакувань)	9,69	8,89	9
Текстиль	3	2	50
Гума	1,87	1,684	11
Деревина	4,1	3,39	21
Харчові відходи	45,54	26,48	72

Масова теплотворна здатність характеризує кількість тепла, яке виділяється при повній переробці одиниці маси. Якщо відомий хімічний склад суміші відходів, то масову теплотворну здатність можна визначити теоретичним шляхом (табл.2.3), за формулою Менделєєва Д. І., яка має вигляд:

$$Q = 339(C) + 1030(H) - 109(O - S) - 25(W), \text{ кДж/кг},$$

де  $C, H, O, S, W$  – вміст вуглецю, водню, кисню, сірки, вологи, %.

Таблиця 2.3 – Елементний склад та теплотворна здатність компонентів ТОВ

Компонент	C	H	O	S	W	Q, кДж/кг
Харчові відходи	12,6	1,8	8	0,15	72	3469,75
Макулатура	27,7	3,7	28,3	0,4	25	9535,2
Текстиль	40,4	4,9	23,2	0,1	50	14979,6
Дерево	40,5	4,8	33,8	-	21	14464,3
Відсів	13,9	1,9	14,1	0,1	80	3143,1
Полімери	55,1	7,6	17,5	0,3	9	24407,1
Шкіра, гума	65	5	12,6	0,6	26	25232

Для встановлення параметрів та оцінювання факторів, що визначають умови проведення екологічно прийняттого піролізного процесу, було створено і досліджено суміші органічних відходів з різним відсотковим змістом різних компонентів, які відповідають середньостатистичним даним утворення та накопичення твердих органічних побутових та промислових відходів (табл. 2.4, 2.5, рис. 2.2) за виключенням вологих відходів.

Суміші були складені за варіативними даними накопичення та зберігання побутових та промислових органічних відходів з урахуванням місць їх утворення та збору та накопичення.

Таблиця 2.4 – Склад дослідних сумішей компонентів ТОВ

№ суміші	Тверді органічні відходи	Склад відходів	Вміст елементів, % мас.
1	Суміш органічних сухих побутових відходів	Текстильні відходи, іграшки, частини меблів, пакування	15% PE, 25 % PP, 30 % PS, 15 % PETE, 15 % поліестер, поліамід
2	Суміш пакувальних матеріалів	Одноразовий посуд, обгортки, коробки, ящики	30% PE, 55 % PP, 15 % PET
3	Шини автотранспортних засобів, які вийшли з експлуатації	Зношені автомобільні шини	100 % синтетичні каучуки (полібутадієн, поліізобутилен та ін.)
4	PET пляшки	Пляшки одноразового використання для напоїв	100% PET
5	Шприци медичні ін'єкційні одноразового застосування (ГОСТ 22967-90)	Одноразові шприци	80 % PP, 20 % PE
6	Полімерні відходи автомобільної промисловості	Торпеди, бампери, пластикові запасні частини	60 % PS, 25 % PP, 15 % PE
7	Відходи силових кабелів з пластиковою ізоляцією різних марок (ГОСТ 16442-80)	Обрізки та зношені кабелі внутрішнього та зовнішнього застосування	100 % PE
8	Пакувальна клейка стрічка різних марок (ЛС-100011, ЛС-100012, ЛС-110011, ЛС-100241)	Відходи промислових бобин скотчу	100 % PP



Рисунок 2.2 – Тверді органічні відходи, які переробляються екологічно безпечним піролізним процесом

Таблиця 2.5 – Основні види відходів модельних сумішах, які переробляються екологічно безпечним піролізним процесом

Тверді органічні відходи	Речовина
Пляшки від миючих засобів, прозоре пакування та пакети, пакувальна та гідроізоляційна плівка, електроізоляційні оболонки, корпуси для приладів, зношені та залишки труб для води та газу, квіткові горщики, дитячі іграшки, текстильні волокна	ПЕ
Контейнери для їжі, пакування, складові автомобілів, продукція для гідроізоляції, труби для каналізації та дренажні труби, текстильні волокна, запірна арматура, шланги для поливу	ПП
Одноразовий посуд, пакувальні матеріали, дитячі іграшки, утеплювач, шумоізоляційні, фільтраційні та оздоблювальні матеріали, одноразові медичні інструменти, текстильні волокна	ПС
Пляшки для прохолоджувальних напоїв, електроізоляційні матеріали, деталі кузова автомобіля та двигунів, компресорів та насосів, текстильні волокна, пакувальні матеріали, шумо- та теплоізоляційні матеріали	ПЕТ, ПК, ПАР

Для розрахунків використовувались формули хімічного складу твердих органічних відходів, які представлено в табл. 2.6 [64, 104, 105].

Кількість та тип полімерних речовин, що входять до складу досліджуваних сумішей визначає параметри проведення процесу утилізації та основні продукти деструкції. Тому для вдосконалення, оптимізації технології та інтенсифікації процесів циркуляційного піролізу проведено аналіз сировини твердих органічних відходів, що дає підстави для визначення параметрів фізико-хімічних процесів термічної деструкції в реакторі установки.

Таблиця 2.6 – Брутто-формула основних складових суміші ТОВ

Фракційний склад	Брутто-формула
Харчові відходи	C320,3H570,9O188,4N14,9S
Макулатура	C580,6H952,3O440,8N3,49S
Текстиль	C978,8H1396O416,8N70,2S
Дерево	C1321H1904O855,6N4,6S
Полімери	C3,5H5,0O1S
Шкіра, гума	C404,4H634,9O58,1N57,2S

2.3 Основні принципові методологічні рішення теоретичних досліджень термічної утилізації органічних відходів екологічно прийнятним піролізним процесом

З метою попередження потрапляння шкідливих речовин в довкілля, зменшення технологічних та матеріальних витрат за рахунок мінімального використання енергетичних ресурсів здійснюється моделювання піролізу твердих органічних відходів в устаткуванні для утилізації.

Вирішення даного завдання можливе шляхом прогнозування фізико-хімічних процесів термічної деструкції, що базуються на основі законів збереження маси та енергії, з урахуванням рівнянь гідродинамічної структури утворених потоків та рівнянь фазової рівноваги. Математичне моделювання процесів термічної утилізації ТОВ представлено у вигляді блочного методу (рис. 2.3), який пов'язує між собою закономірності елементарних стадій.

Методика теоретичного розрахунку математичної моделі зводиться до послідовного вирішення запропонованих етапів дослідження. Спочатку виконуються моделювання кінетичних характеристик [201, 204] процесів деструкції при утилізації ТОВ, далі здійснюється розрахунок значення констант рівноваги. Наступний етап - розрахунок повного матеріального балансу газо-рідинних потоків

та розрахунок фазової рівноваги. Розрахунок здійснюється методом послідовних наближень. Моделювання процесів конденсації газо-рідинних потоків при рециркуляції продуктів термічної деструкції в технологічному обладнанні базується на основі гіпотези теоретичного контуру [130].

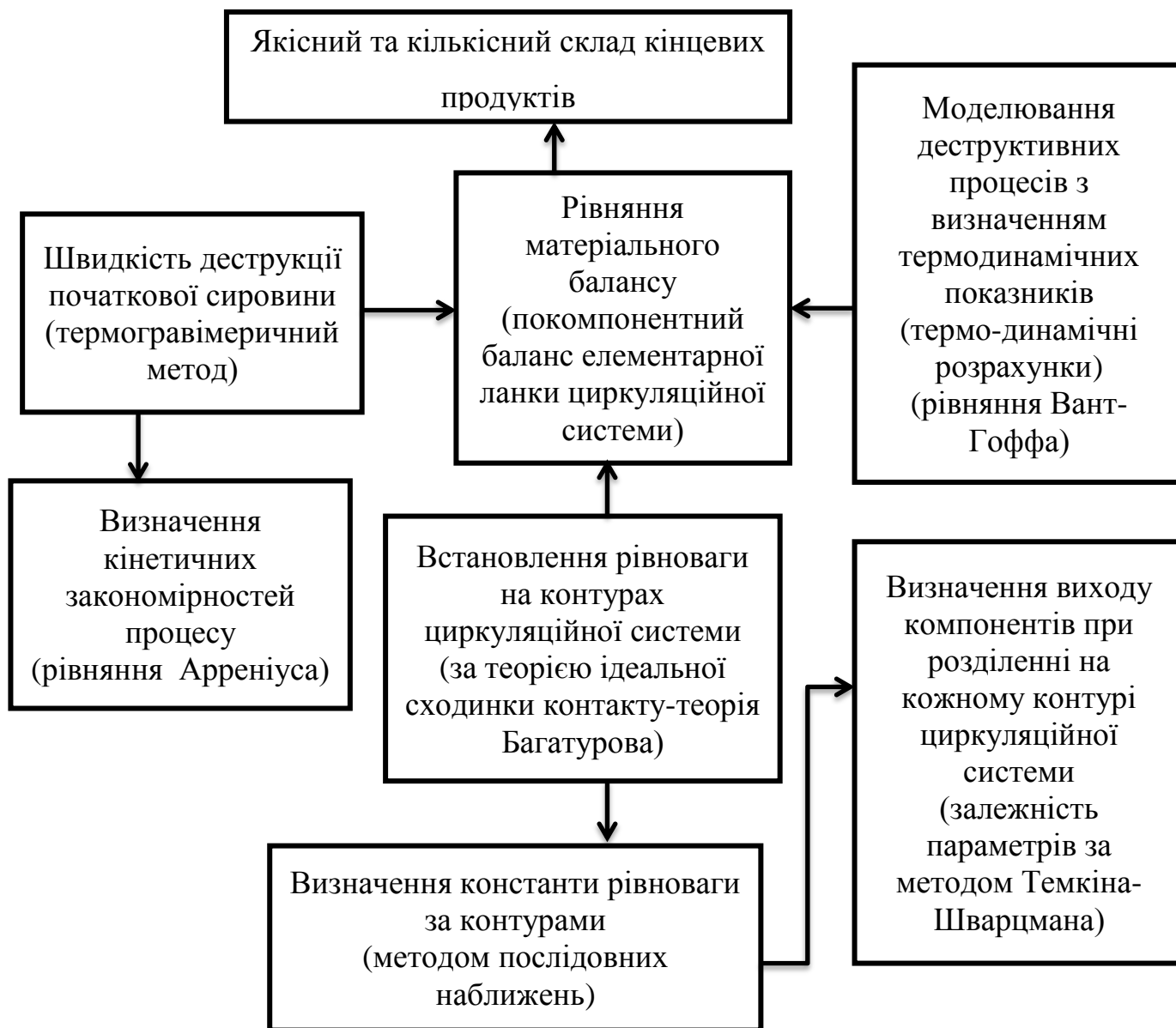


Рисунок 2.3 – Структура побудови математичної моделі термічної деструкції органічної сировини методом піролізу

Функціонування математичної моделі процесів утилізації ТОВ полягає у досягненні повної конверсії початкової суміші відходів за рахунок термічної деструкції та рециркуляції продуктів розкладання в технологічному обладнанні. Застосування математичної моделі дозволяє отримати розрахункові концентрації основних компонентів продуктів деструкції ТОВ в технологічному обладнанні

термічної утилізації зазначених відходів для оптимізації кількості та якості рідкої фракції як цільового продукту, який можна використовувати як альтернативне паливо.

Розрахунки термодинамічних показників та ексергетичного методу ефективності технологічного процесу піролізної утилізації здійснено з використанням комп'ютерних технологій, аналітично-розрахункових методів - програмного забезпечення Excel, програмного комплексу ASTRA 4, COMSOL Multiphysics, FLUENT (ANSYS, Inc.). Отримані результати було оброблено методами статистичної та математичної обробки даних з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel 2010.

2.4 Методи та обладнання експериментальних досліджень визначення технологічних параметрів, складу та властивостей отриманих продуктів піролізу

Для реєстрації показників процесу використовувались вимірювальні прилади прямої дії (термопари) та гравіметричний метод (рис. 2.4). На розробленій установці ЕУ БЦП-14 встановлено термопари типу ТХК та ТХА, 2 манометри ДМ 0,5 для визначення тиску в реакторі, пристрій для вимірювання контролю температури – вимірювач-регулятор багатofункціональний восьмиканальний УКТ38-Щ4 та декодер сигналів АЦП АС-2 (Додаток Г, М).

Розроблено програми випробувань на експериментальних установках: «Програма проведення дослідження температурних та часових характеристик технології циркуляційного піролізу з різними видами полімерних відходів» та «Програма проведення досліджень хімічного складу рідкої легкої фракції, отриманої піролізним процесом, з різних видів полімерних відходів на установці рідкого хроматографу NeoCHROM».

На експериментальній установці проведені натурні експерименти з встановлення часових та температурних параметрів екологічно прийняттого процесу піролізу досліджуваних сумішей твердих органічних відходів, визначення швидкості втрати мас відходів від температури та тривалості їх перебування в



дослідницькому піролізному реакторі. Також здійснювалося відпрацювання температурних режимів циркуляційної системи, встановлення розподілення гетероатомних (кисне-, азото- та сірковмісних) сполук на контурах для визначення екологічної безпеки процесів, відпрацювання режимів навантаження при утилізації відпрацьованих шин, встановлені умови інтенсифікації процесу при ущільненні маси відходів в реакторі.

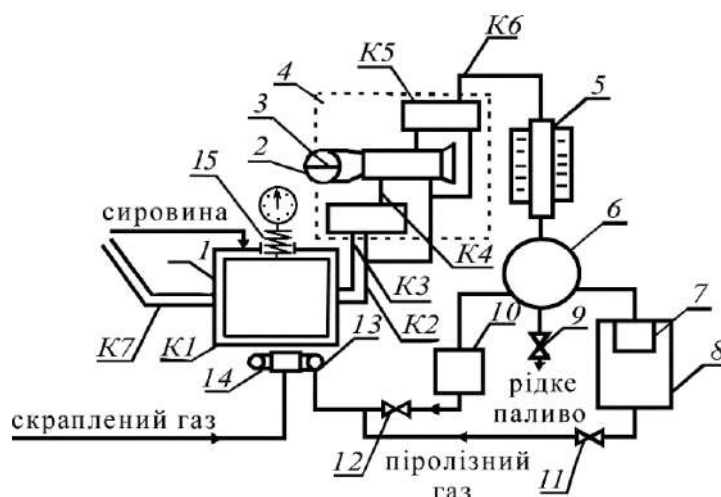


Рисунок 2.4 – Схема експериментальної установки ЕУ БЦП-14 з встановленими термопарами: 1 – реактор; 2 – система повітряного охолодження II контуру; 3 – повітряна засувка; 4 – блок контурної циркуляційної системи; 5 – вихідний конденсатор з водяним охолодженням; 6 – розподільна ємність; 7 – підривний запобіжник; 8 – компенсаційна ємність; 9 – кран зливання рідкого палива; 10 – лічильник піролізного газу; 11, 12 – крани подачі піролізного газу на пальник допалювання; 13 – пальник допалювання піролізного газу; 14 – пальник скрапеленого газу; K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7 – термопари; 15 – зважувальна пружина

Для визначення та відпрацювання технологічних параметрів роботи піролізної установки в безперервному режимі, безпечності роботи системи подачі сировини в установку розроблено та виготовлено установку ЕКОПІР 18Д. Встановлено термопари для визначення показників на контрольних точках (рис. 2.5), значення яких фіксуються на головну панель управління, збір даних з термопар на модуль фірми ICP DAS, типу I-7018P на 8 входів. Здійснювались контрольні вимірювання температурних показників: на головному пальнику (K1); димових газів в газоході

(K2); у верхній частині реактора (K3); в середній частині реактора (K4); у нижній частині реактора (K5); на вході в триконтурну циркуляційну систему (K6); важкої рідкої фракції на вході в реактор (K7); газової суміші на першому контурі (K8); газової суміші на виході з третього контуру (K9); вхідної охолодженої води на вихідному конденсаторі (K10); вихідної охолодженої води на вихідному конденсаторі (K11); на виході з конденсатору (K12).

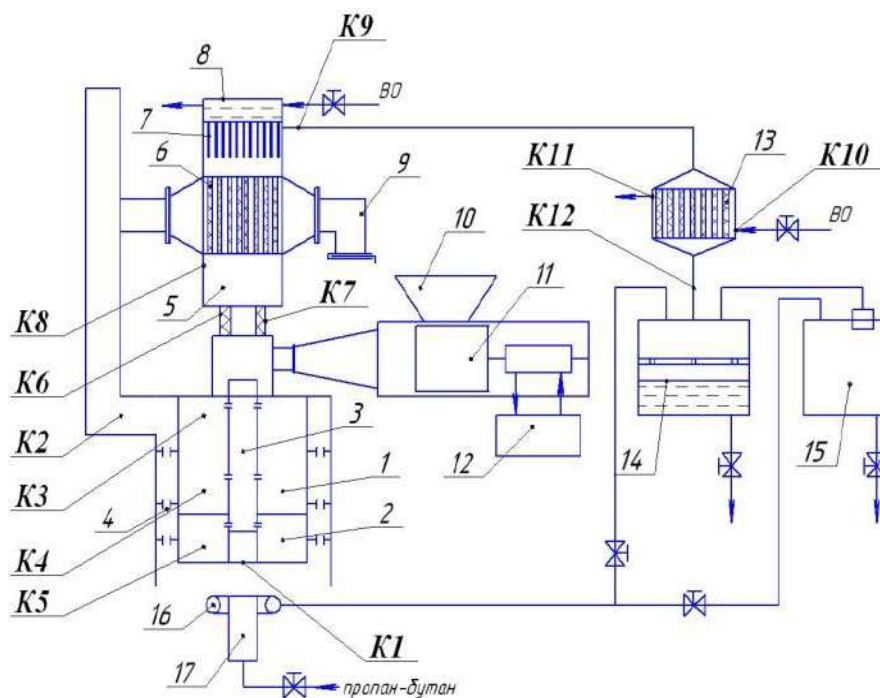


Рисунок 2.5 – Схема експериментальної установки Екопір-18Д безперервної дії для визначення температури та тривалості піролізного процесу з зазначенням розташування термопар: 1 – реактор; 2 – теплопровідні ребра всередині реактора; 3 – корзина, що виймається; 4 – димохід; 5 – 1-й контур; 6 – 2-й контур; 7 – 3-й контур; 8 – водяне охолодження 3-го контуру; 9 – повітряне охолодження 2-го контуру; 10 – бункер завантаження відходів; 11 – плунжер подачі відходів в реактор; 12 – маслостанція; 13 – вихідний конденсатор; 14 – розподільча ємність; 15 – ємність аварійного скиду піролізного газу; 16 – додатковий пальник спалювання піролізного газу; 17 – пальник газовий

Робота установок при проведенні експериментальних досліджень здійснюється наступним чином: Завантаження дослідної суміші відходів в корзину реактора. Відвести поршень плунжеру в крайнє праве положення. Завантажити порцію

відходів в бункер плунжерної системи. Ввімкнути маслостанцію та за допомогою плунжерної системи подати відходи в реактор. Кількість циклів плунжерної системи залежить від виду відходів і показань трьох термопар (K3, K4, K5), розміщених в реакторі. Вихід установки на робочий режим: відкрити кран подачі піролізного газу на додатковий пальник, відрегулювати максимальну інтенсивність горіння пропан-бутану на головному пальнику, вести постійний контроль за додатковим пальником (поява на ньому спалахів піролізного газу свідчить про вихід установки на робочий режим). При збільшенні інтенсивності горіння на додатковому пальнику необхідно зменшити подачу пропан-бутану на головному пальнику (таким чином реалізується самопідтримка процесу термічної деструкції в реакторі). Витрати піролізного газу фіксуються газовим лічильником і записуються реєстраційний лист. Коли температура в точці 3 контуру БЦС досягне 80°C, 100°C, 130°C, 160°C, 190°C, 220°C, 260°C, 300°C, 320°C, здійснити відбір рідкого палива для кожної із указаних температур. Регулювати температуру в точці необхідно за допомогою дросельної засувки, встановленої на циркуляційній системі. Зміни температур на контрольних точках записуються в реєстраційний лист кожні 5-10 хвилин з початку проведення випробування. Відбір рідкої фракції вихідних продуктів об'ємом 20 мл, використовуючи шаровий кран та мірну ємність. Відбір піролізного газу об'ємом 2×1 л за допомогою спеціального пробовідбірника (допускається відбирати вихідний газоподібний продукт у повітряні надувні кульки). Проби піролізного газу відбираються з трубопроводу подачі піролізного газу на додатковий пальник. Відбір твердого залишку масою 200 г з реактору після його охолодження. Зупинка установки: перекрити кран подачі газу на головний пальник, після того, як реактор досягне температури навколишнього середовища, можна розгерметизувати кришку реактора для відбору проб твердого залишку. Вся організація по запуску, роботі та зупинці установки повинні виконуватися відповідно паспорту та інструкції по експлуатації піролізної установки з дотриманням вимог до техніки безпеки. Результати експериментів з різними типами полімерних відходів записати в реєстраційний лист.

При розрахунках елементів конструкцій технологічного обладнання

застосовувались загальні рівняння теплопровідності, проведено розрахунки термодинамічних та кінетичних показників процесів, використано програмне забезпечення МАІ – для багатокритеріальної оцінки факторів екологічної небезпеки.

Для керування і контролю сигналів з датчиків різних типів технологічного обладнання були застосовані апаратні засоби реалізації SCADA-системи (рис. 2.6). Для отримання в даній системі керування і контролю доцільно застосовувати 3 типи модулів збору даних: модулі збору даних з термопар (табл.2.7), модулі збору даних з датчиків з виходом по струму та модулі дискретного вводу.

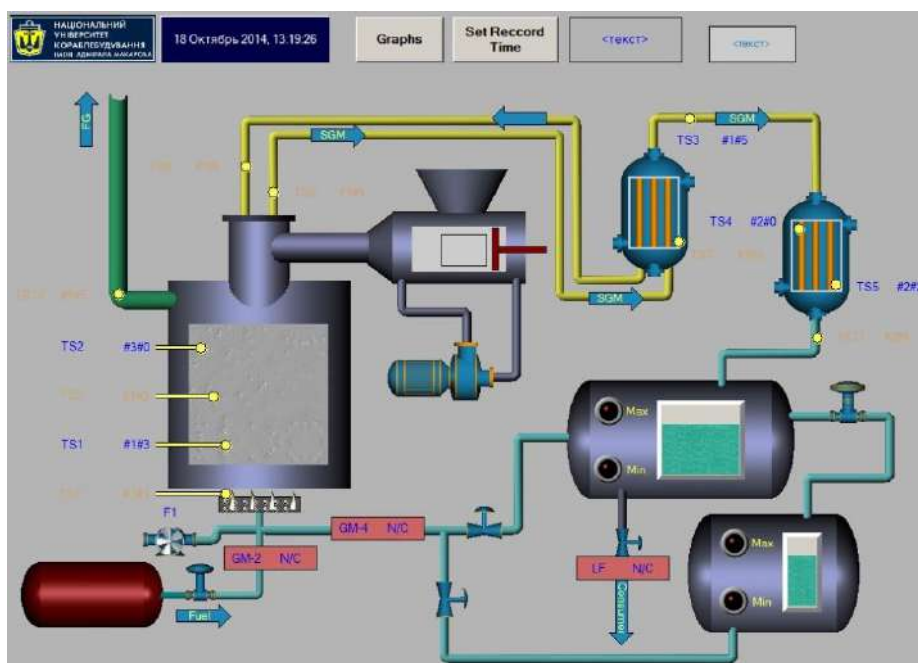


Рисунок 2.6 – Система автоматичного керування SCADA

В якості датчиків температури в даній системі керування і контролю доцільно використовувати термопари фірми «ТЕРА» двох типів: ТХК – для вимірювання температур у діапазоні від  $-40$  до  $600^{\circ}\text{C}$ , та ТХА – для вимірювання температур у діапазоні від  $-40$  до  $1050^{\circ}\text{C}$ . Зовнішній вигляд та основні технічні характеристики термопар типу ТХК та ТХА наведено в Додатку М.

В якості модулів збору даних з термопар доцільно застосовувати модулі фірми ICP DAS, типу I-7018P на 8 входів, основні характеристики яких наведені в таблиці 2.8. Зовнішній вигляд модуля даного типу на рис. 2.7.

Таблиця 2.7 – Вимірювальні параметри на дослідних піролізних установках

№	Змінна	Вимірювана величина
1	$\vartheta_{\text{ТП1}}$	Температура продуктів згорання на вході в газохід
2	$\vartheta_{\text{ТП2}}$	Температура продуктів згорання на виході з газоходу
3	$t_{\text{ст.р}}$	Температура зовнішньої стінки реактора
4	$t_{1\text{ст}}$	Температура парогазової суміші на I-му рівні багатоконтурної циркуляційної системи
5	$t_{3\text{ст}}$	Температура парогазової суміші на III-му рівні багатоконтурної циркуляційної системи
6	$t_{\text{вод.3ст}}$	Температура води у водяній камері системи охолодження III-й рівня багатоконтурної циркуляційної системи
7	$\vartheta_{\text{ТП7}}$	Температура відпрацьованого повітря, що охолоджує II-й рівень багатоконтурної циркуляційної системи
8	$t_{\text{ПГС}}$	Температура парогазової суміші на виході з багатоконтурної циркуляційної системи



Рисунок 2.7 - Зовнішній вигляд модуля збору даних з термопар I-7018P

Таблиця 2.8 – Технічні характеристики модуля збору даних з термопар I-7018P

Тип модуля	АЦП
Кількість аналогових входів АЦП	8
Тип аналогових входів АЦП	диференціальний (по напрузі, по струму або з термопари)
Максимальна частота вибірки	10 Гц
Роздільна здатність АЦП	16 біт
Напруга ізоляції аналогових входів	3000 В
Захист від перенапруги	35 В
Вхідний діапазон по напрузі	від -15 ~ +15 мВ до -2.5 ~ +2.5 В
Вхідний діапазон по струму	від-20 до +20 мА (необхідний зовнішній шунт 125 Ом)
Тип модуля	АЦП
Тип термопари	J, K, T, E, R, S, B, N, C, L, M, L2
Смуга пропускання	15.7 Гц
Точність аналогового вводу	0.1%
Напруга живлення	від+10 до +30 В
Споживана потужність	1.0 Вт

Для дослідження складу і властивостей отриманих продуктів піролізу, визначення долі сконденсованих та кінцевий фракцій, їх складу та якості було використано газовий хроматограф NeoCHROM, програмне забезпечення для обробки даних – система UniChrom, для автоматизації та виключення похибки хроматограф облаштовано системою CTC A200S Autosampler), наявність токсичних металів у рідкому та твердому продуктах (Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Cr, Zn) визначались атомно-адсорбційним спектрофотометром C-115M1 та спектрофотометром Beckman DU 520 (рис.2.8, 2.9) [207, 249, 250].



Рисунок 2.8 – Газовий хроматограф NeoCHROM та спектрофотометр Beckman DU 520 в лабораторії НУК ім. адм. Макарова

Речовини, що аналізуються, розділяється на капілярній довгій неполярній колонці, а потім надходять у коротку полярну капілярну колонку, де сполуки, які не розділилися на першій колонці, остаточно розділяються. Ідентифікація окремих сполук проводиться за допомогою мас-спектрометричного детектора з неполярною капілярною колонкою ВРХ-5 (30 м×0,25 мм×0,25 мкм), полярною колонкою ВРХ-50 (1,7 м×0,1 мм×0,1 мкм), кріоскопічним модулятором та час-пролітний мас-спектрометром. Температура інжектора хроматографа – 340°C, розділення потоку – 1:200. Програма зміни температури термостата колонок включає нагрівання до 70°C (1 хв) з подальшим підняттям температури зі швидкістю 5°C/хв до 330°C (10 хв); газ-носій – водень.



Рисунок 2.9 - Атомно-адсорбційний спектрофотометр С-115-М1

Для визначення концентрації важких металів у зразках твердого залишку циркуляційного піролізу на атомно-абсорбційному спектрофотометрі була розроблена оригінальна методика: якісне та кількісне визначення складу продуктів циркуляційного піролізу проводиться за схемою аналізу вугілля, з попереднім озоленням. Під хімічним складом твердого залишку циркуляційного піролізу розуміють вміст в ньому основних оксидів, а саме:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ . Хімічний склад твердого залишку визначають за допомогою загальноприйнятих хімічних та фізико-хімічних методів аналізу силікатних порід.

Аналіз на спектрофотометрі Beckman DU 520 проводився за стандартними методиками для кожного металу окремо, та використовувався як порівняльний для атомно-абсорбційного з метою визначення найбільш доцільного та раціонального методу дослідження продуктів піролізу на наявність в них важких металів. Металами, за якими проводився моніторинг були: свинець (Pb), нікель (Ni), мідь (Cu), цинк (Zn), кобальт (Co).

Також визначався вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Виміри проводилися через 10 хвилин після початку проведення процесу, а також через 15 хвилин після завершення роботи. Цикл складався з 10 відкриттів та закриттів гарячого реактора. Відбір проб проводили протягом 10 хвилин зі швидкістю 1 л/хв. на 2 поглиначі з 2x2 мл 80 % - ої оцтової кислоти (на вуглеводи), на 2 поглиначі з 2x3 мл води (на фенол і формальдегід).

Визначення вмісту розчинників проводилося як у повітрі навколишнього середовища, так і в рідині, що утворювалася, відповідно до діючих методик. Межа визначення вуглеводнів: граничних –  $0,05 \text{ мг/м}^3$ , неграничних –  $0,5 \text{ мг/м}^3$ , ароматичних –  $0,1 \text{ мг/м}^3$ , формальдегіду –  $0,003 \text{ мг/м}^3$ , стиролу –  $0,001 \text{ мг/м}^3$ .

## ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2

1. Розроблено структурну схему методології дисертаційних досліджень, обґрунтовано методики визначення параметрів екологічної безпеки процесу, умов



здійснення деструктивних перетворень органічної сировини та продуктів термічної деструкції відходів, які передбачали застосування як теоретичних так і експериментальних методів, зокрема розрахунковий та математичний метод моделювання; гравіметричний метод; фізико-хімічні методи, спектрометрії, хроматографії тощо.

2. Представлено перелік можливих варіантів складу сумішей органічних відходів з відповідним відсотковим вмістом компонентів, яку розроблено на основі середньостатистичних даних утворення та накопичення твердих органічних побутових та промислових відходів.

3. Наведено розроблені методики контролю за станом екологічної безпеки при проведенні процесів їх термічної деструкції, а саме: визначення розподілення гетероатомних сполук за контурами з додатковою циркуляцією продуктів деструкції піролізного процесу, наявність шкідливих небезпечних компонентів в кінцевих продуктах, вміст токсичних металів в рідкому продукті та твердому залишку.

4. Розроблено методики проведення експериментальних досліджень експлуатації обладнання та елементів устаткування для утилізації твердих органічних відходів для забезпечення екологічної безпеки.

5. Обґрунтовано вибір раціональних методів моделювання технологічних процесів з використанням комп'ютерних технологій, аналітично-розрахункових методів оцінки термодинамічних та кінетичних показників процесів, багатокритеріальної оцінки факторів екологічної безпеки.

Матеріали розділу базуються на роботах автора [127, 197, 201, 204, 207, 209, 250].

## РОЗДІЛ 3

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ

## 3.1 Математична модель деструкційних перетворень твердих органічних відходів при рециркуляції в піролізному процесі з визначенням кінетичних показників

Кінетичні показники термодеструкційних реакцій визначають напрямок хімічного процесу та надають можливість контролю та регулювання промисловим процесом утилізації твердих органічних відходів на основі піролізних технологій. У циркуляційному піролізному реакторі здійснюються складні паралельно-послідовні реакції деструкції органічної сировини [324], кожна з яких характеризується показником швидкості (кінетичний фактор) та станом рівноваги (термодинамічний фактор) [28, 32].

Модель термічної деструкції циркуляційного процесу складається з кінетичної складової, яка є сукупністю елементарних стадій та реакцій деструкції, що визначається залежністю швидкості розкладання від концентрацій реагуючих компонентів [32].

В процесі циркуляційного піролізу утворюється первинна парогазова суміш компонентів деструкції, яка направляється в циркуляційну систему з додатковою термодеструкцією, утворені продукти поділяються газову фазу, конденсовану рідку фазу та фазу конденсованого твердого стану.

На рисунку 3.1 представлена узагальнена багатостадійна схема деструктивних перетворень ТОВ при їх утилізації [341].

Схема враховує наслідково-логічні зв'язки кінетики процесу та матеріальні потоки фаз, утворених при термічному розкладанні ТОВ, а саме:  $C_{ТЗі}$ ,  $m_{ТЗі}$  – молярна концентрація та масова частка твердого залишку, утвореного з початкового складу відходів;  $C_{ТЗ.Рі}$ ,  $m_{ТЗ.Рі}$  – молярна концентрація та масова частка твердого залишку, утвореного з розплаву відходів;  $C_{Р.ГФі}$ ,  $m_{Р.ГФі}$  – молярна концентрація та масовий потік газової суміші, утвореної з розплаву відходів;  $\sum C_{ГФі}$ ,  $m_{ГФі}$  – молярна концентрація та масовий потік сумарної газової суміші;  $C_{вт.ГФі}$ ,  $m_{вт.ГФі}$  – молярна

концентрація та масовий потік вторинної газової фази, що утворилася в результаті додаткової деструкції важкої рідкої фракції;  $C_{ТЗ,реці}$ ,  $m_{ТЗ,реці}$  – молярна концентрація та масова частка твердого залишку, утвореного з важкої рідкої фракції;  $\sum C_{ТЗі}$ ,  $m_{ТЗі}$  – молярна концентрація та масова частка сумарної кількості твердого залишку, що накопичується в реакторі;  $C_{ТЗ, ГФі}$ ,  $m_{ТЗ, ГФі}$  – молярна концентрація та масовий потік газової суміші легких вуглеводнів, що виділяються в результаті термічної обробки твердого залишку;  $k_{1-9}$  – константа швидкості відповідних реакцій.

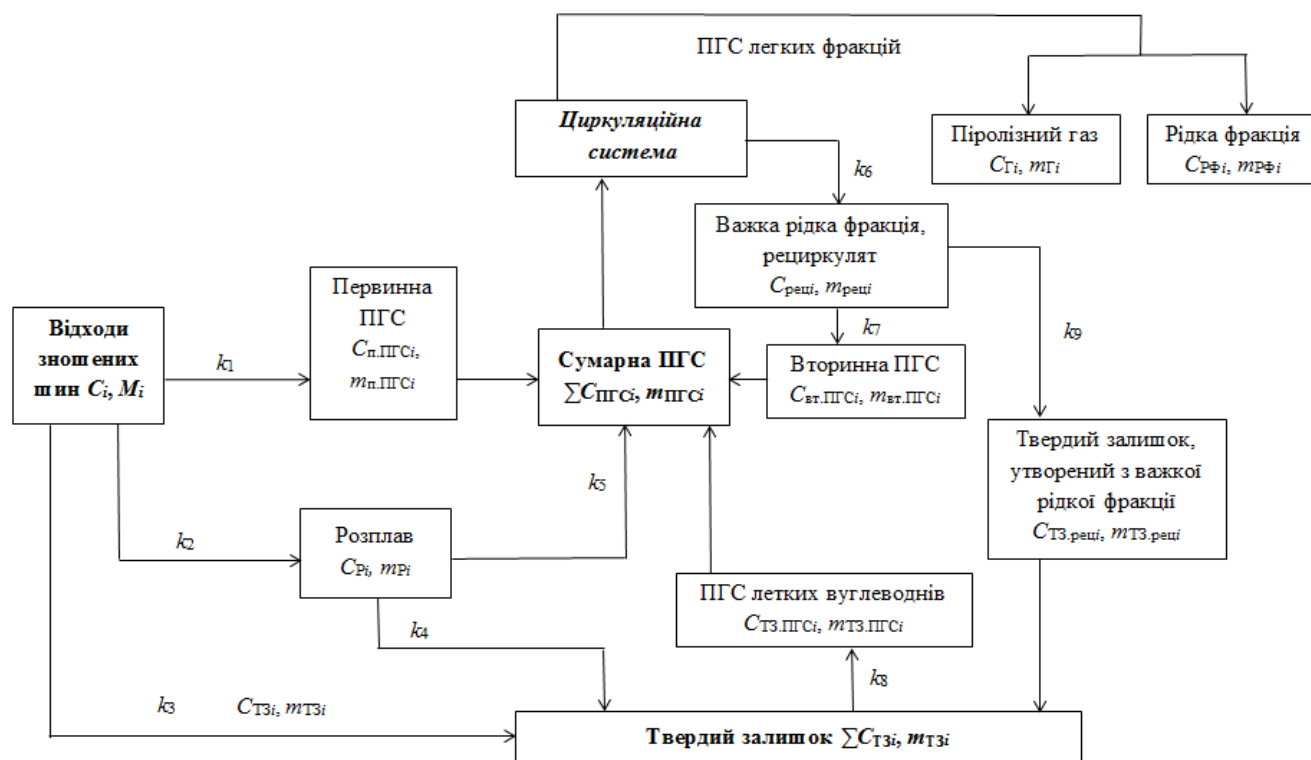


Рисунок 3.1 – Кінетична схема термічного перетворення твердих органічних відходів при їх утилізації піролізним методом

Кінетичний опис термодеструктивних перетворень визначає найбільш стабільні стадії [204], а також проміжні та кінцеві продукти процесу утилізації в цілому. Перша стадія деструкції полімерних відходів описується кінетичним рівнянням швидкості перетворення полімерних відходів з твердого стану в розплав полімерів ( $T \rightarrow P$ ), для другої стадії характерне паралельне утворення легких продуктів ( $G$ ) та твердого залишку ( $TЗ$ ).

У результаті термічної деструкції утворені речовини стають вихідними або кінцевими компонентами на різних стадіях одночасно. Тому процес розкладання

відходів представлено з декількох елементарних реакціях, для опису яких використано кінетичні закономірності елементарного акту хімічного перетворення. Кожній стадії відповідає її швидкість  $r$  ( $c$ ,  $T$ ). Швидкість стадії термічного перетворення відходів інтенсивна величина, яка задається як функція інтенсивних величин – концентрації та температури.

Розрахунок кінетичних показників термічної деструкції твердих органічних відходів заснований на рівнянні [166], яке описує залежність швидкості розкладання від маси зазначених відходів:

$$R = \frac{dm_B}{dtV} = -k_i m_B^n ,$$

де  $m_B$  – маса відходів, що піддаються деструкції;  $k_i$  – константа швидкості реакції;  $n$  – порядок реакції;  $t$  – час деструкції.

Для спрощення розрахунку й аналізу процесу деструкції ТОВ всі реакції приймаються як реакції першого порядку. Кожна реакція супроводжується втратою маси відповідно до константи швидкості  $k_i$ , що пов'язує основні кінетичні параметри в рівнянні Арреніуса в залежності від температури [201, 211].

Оскільки швидкість деструкції  $R$  визначається зміною кількості одного з компонентів реакції  $N_i$ , моль в одиницю часу та в одиницю об'єму  $V$ , то швидкість виражається через концентрацію  $C_i$ , моль/м<sup>3</sup>. Однак, слід зазначити, що реакційний об'єм реактора незмінний, тому даною величиною нехтуємо, отримуючи наступний запис рівняння для визначення швидкості деструкції:

$$R = \pm \frac{1}{V} \frac{dN_i}{dt} = \pm \frac{d\left(\frac{\sum N_i}{V}\right)}{dt} = \pm \sum \frac{dC_i}{dt} .$$

Так, у таблиці 3.1 наведено кінетичні рівняння, що описують швидкість кожної стадії перетворення реакційної суміші в процесі термічної деструкції циркуляційного піролізу відповідно до схеми процесу (рис. 3.1), а також наведено формули для розрахунку значення констант швидкості.

Таблиця 3.1 – Кінетичні рівняння деструкції органічної маси відходів у реакторі циркуляційного піролізу

Рівняння швидкості деструкції компонентів	Розв'язок	Константа швидкості
Швидкість розкладання маси твердих відходів $R_T = \frac{dC_T}{dt} = -k_1 C_T$	$\ln \frac{C_T}{C_{T_0}} = -k_1 t$ ; $C_T = C_{T_0} e^{-k_1 t}$	$k_1 = -\frac{1}{t} \ln \frac{C_T}{C_{T_0}}$
Швидкість накопичування розплаву реакційної суміші $R_P = \frac{dC_P}{dt} = -k_1 C_T - (k_2 + k_3) C_P$	$C_P = C_{P_0} e^{-(k_1 + k_2)t}$	$k_2 + k_3 = \frac{1}{t} \ln \frac{C_P}{C_{P_0}}$ $\frac{k_2}{k_3} = \frac{C_\Gamma - C_{T.3_0}}{C_{T.3} - C_{\Gamma_0}}$
Швидкість утворення парогазової суміші $R_\Gamma = \frac{dC_\Gamma}{dt} = k_2 C_P$	$C_\Gamma = C_{P_0} \frac{k_2}{k_2 + k_3} [1 - e^{-(k_2 + k_3)t}]$	
Швидкість утворення твердого залишку $R_{T.3} = \frac{dC_{T.3}}{dt} = k_3 C_P$	$C_{T.3} = C_{P_0} \frac{k_2}{k_2 + k_3} [1 - e^{-(k_2 + k_3)t}]$	

$C_{P_0} = C_{\Gamma_0} = C_{T.3_0} = 0$  – початкова концентрація речовин.

Термічна деструкція суміші органічних відходів, що зазнають термічної деструкції за циркуляційним процесом, математично описується системами диференціальних кінетичних рівнянь, кількість яких залежить від кількості компонентів суміші відходів.

Відповідно до схеми термічного перетворення відходів [341] в піролізному устаткуванні для утилізації ТОВ математичний запис кінетичної моделі представлений системою диференціальних рівнянь (3.1), яка описує термічне перетворення ТОВ за чотирма напрямками, в результаті якого утворюються основні продукти в реакторі.

$$\left\{ \begin{array}{l} R = r_1 + r_2 + r_3 = -(k_1 + k_2 + k_3)C_i \\ R_{\Sigma P_i} = r_2 - (r_4 + r_5) = -(k_2 C_i - (k_4 + k_5)C_{P_i}) \\ R_{\Sigma \text{ПГС}_i} = r_1 + r_5 + r_7 + r_8 = -(k_1 C_i + k_5 C_{P_i} + k_7 C_{\text{реци}_i} + k_8 R_{\Sigma \text{ТЗ}_i}) \\ R_{\Sigma \text{ТЗ}_i} = r_3 + r_4 + r_9 - r_8 = -(k_3 C_i + k_4 C_{P_i} + k_9 C_{\text{реци}_i} - k_8 R_{\Sigma \text{ТЗ}_i}) \\ R_{\Sigma \text{реци}_i} = r_6 - (r_7 + r_9) = -(k_6 C_{\Sigma \text{ПГС}_i} - (k_7 + k_9)C_{\text{реци}_i}) \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де  $R$  – швидкість первинних реакцій розкладання початкового складу відходів;  $R_{\Sigma P}$  – загальна швидкість накопичення розплаву відходів;  $R_{\Sigma \text{ПГС}}$  – сумарна швидкість утворення ПГС;  $R_{\Sigma \text{ТЗ}}$  – швидкість накопичення твердого залишку;  $R_{\Sigma \text{реци}}$  – швидкість утворення рециркуляту.

Модель об'єднує швидкість деструкції первинних компонентів ПГС та швидкість перетворення проміжних продуктів розкладання в залежності від концентрації та кінетичних параметрів.

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = \frac{dC_{\text{п.ПГС}_i}(t)}{dt} = -k_1 C_i \\ r_2 = \frac{dC_{P_i}(t)}{dt} = -k_2 C_i \\ r_3 = \frac{dC_{\text{ТЗ}_i}(t)}{dt} = -k_3 C_i \\ r_4 = \frac{dC_{\text{ТЗ.}P_i}(t)}{dt} = -k_4 C_i \\ r_5 = \frac{dC_{P.\text{ПГС}_i}(t)}{dt} = -k_5 C_{P_i} , \\ r_6 = \frac{dC_{\text{реци}_i}(t)}{dt} = -k_6 C_{\Sigma \text{ПГС}_i} \\ r_7 = \frac{dC_{\text{вт.ПГС}_i}(t)}{dt} = -k_7 C_{\text{реци}_i} \\ r_8 = \frac{dC_{\text{ТЗ.ПГС}_i}(t)}{dt} = -k_8 C_{\Sigma \text{ТЗ}_i} \\ r_9 = \frac{dC_{\text{ТЗ.реци}_i}(t)}{dt} = -k_9 C_{\text{реци}_i} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

У формулі використані наступні позначення:  $r$  – швидкість проходження реакцій деструкції;  $k_{1-9}$  – константа швидкості відповідних реакцій: 1 – утворення первинної газової фази; 2 – компоненти розплаву відходів; 3 – компоненти твердого залишку з початкового компоненту відходів; 4 – компоненти твердого залишку з розплаву відходів; 5 – компоненти первинної газової фази з розплаву відходів; 6 – компоненти рециркуляту; 7 – компоненти вторинної газової фази з важкої рідкої фракції; 8 – компоненти газової фази летких вуглеводнів з твердого залишку; 9 – компоненти твердого залишку з важкої рідкої фракції.

Враховуючи матеріальні потоки основних продуктів та швидкості їх утворення, складено повну модель деструкції ТОВ за технологією циркуляційного піролізу, в основу якої покладено компонентні матеріальні баланси для кожної фази за загальним рівнянням:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{P_i}(t)}{dt} = \frac{1}{t} \cdot (C_i - C_{P_i}) + R_{\Sigma P_i} \\ \frac{dC_{\text{ПГС}_i}(t)}{dt} = \frac{1}{t} \cdot (C_i - C_{\text{ПГС}_i}) + R_{\Sigma \text{ПГС}_i} \\ \frac{dC_{\text{ТЗ}_i}(t)}{dt} = \frac{1}{t} \cdot (C_i - C_{\text{ТЗ}_i}) + R_{\Sigma \text{ТЗ}_i} \\ \frac{dC_{\text{реци}_i}(t)}{dt} = \frac{1}{t} \cdot (C_{\text{ПГС}_i} - C_{\text{реци}_i}) + R_{\Sigma \text{реци}_i} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Система рівнянь для визначення концентрації компонентів реакційної суміші на виході з реактора:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{P_i} = \frac{C_i + R_{\Sigma P_i} \cdot C_i \cdot t}{1 + (R_{\Sigma P_i} - (R_{\Sigma \text{ПГС}_i} + R_{\Sigma \text{ТЗ}_i})) \cdot t} \\ C_{\text{ПГС}_i} = C_{P_i} + R_{\Sigma \text{ПГС}_i} \cdot C_i \cdot t \\ C_{\text{ТЗ}_i} = C_{P_i} + R_{\Sigma \text{ТЗ}_i} \cdot C_i \cdot t \\ C_{\text{реци}_i} = C_{\text{ПГС}_i} + R_{\Sigma \text{реци}_i} \cdot C_{\text{ПГС}_i} \cdot t \\ k_j = k_j^0 \cdot e^{\frac{E_j}{RT}}, J = 1, 2, 3 \dots \\ t = \frac{Vr}{v} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Математичний запис процесу термічної деструкції органічної сировини циркуляційним піролізом представлено покомпонентним матеріальним балансом елементарної ланки з об'ємом  $dV$  для малого проміжку часу  $dt$  (рис. 3.2) для реактору ідеального витіснення. Індекс  $i$  - це окремий компонент суміші ТОВ. Для цього використовуються прораховані значення концентрації та швидкості реакцій в результаті термічного перетворення.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Накопичення речовини} \\ i \text{ в об'ємі } dV \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Надходження речовини} \\ i \text{ в елементарну ланку} \end{array} \right\} -$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Витрата речовини } i \\ \text{в елементарній ланці} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Зміна кількості} \\ \text{речовини } i \end{array} \right\}$$

Рисунок 3.2 – Матеріальний баланс елементарної ланки реактора

Алгоритм математичного розрахунку матеріального балансу:

1. Надходження речовини з потоком  $m_i \cdot dt$ :

$$m_i \cdot dt = V_{\text{вх}} \cdot C_i \cdot dt = u \cdot S \cdot C_i \cdot dt$$

2. Витрата речовини з потоком  $(m_i + dm_i) \cdot dt$ :

$$(m_i + dm_i) \cdot dt = (V_{\text{вх}} \cdot C_i \cdot d(V_{\text{вх}} \cdot C_i)) \cdot dt.$$

3. Зміна речовини в хімічній реакції  $dV \cdot r_i \cdot dt$

4. Накопичення речовини  $dM_i$ :

$$dM_i = dC_i \cdot dV$$

$$m_i \cdot dm - (m_i + dm_i) \cdot dt + dV \cdot r_i \cdot dt = dC_i \cdot dV$$

де  $r_i$  – швидкість зміни концентрації речовини  $i$ , моль/(м<sup>3</sup>·с).

5. Мольний потік речовини  $i$ , моль/с:

$$m_i = V_{\text{вх}} \cdot C_i = u \cdot S \cdot C_i$$

6. Лінійна швидкість потоку  $u$ , м/с.

Якщо поділити всі члени рівняння на  $dV \cdot dt$ , то кінцева формула матеріального балансу в реакторі термічної утилізації ТОВ для компоненту  $i$  в одиницях моль/(м<sup>3</sup>·с) набуде форми:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{dm_i}{dV} + r_i$$

Виходячи із рівняння покомпонентного матеріального балансу складається загальний матеріальний баланс реакційної суміші ТОВ [341] в реакторі піролізного устаткування  $M_i$ , моль:

*[Швидкість накопичування циркуляційної суміші] = [вміст речовин в початковій масі відходів (M)] – [вихід первинної газової суміші ( $m_{\text{п.ПГС}}$ )] + [повернення рециркуляційного потоку зворотних важких рідких фракцій ( $m_{\text{рц}}$ )] – [утворення вторинної газової суміші при глибокій деструкції зворотних важких фракцій ( $m_{\text{вт.ПГС}}$ )] – [твердий залишок, утворений при деструкції важких рідких фракцій ( $m_{\text{ТЗ}}$ )].*

Матеріальний баланс газової фази на виході із реактора, тобто сумарної ПГС (ПГС, вторинна важка рідка фракція та ПГС летких продуктів твердого залишку) має вигляд:

$$\frac{dM_{\text{ПГС}_i} C_{\text{ПГС}_i}}{dt} = R_{\Sigma \text{ПГС}_i} + m_{\text{п.ПГС}_i} C_{\text{п.ПГС}_i} + m_{\text{р.ПГС}_i} C_{\text{р.ПГС}_i} + m_{\text{вт.ПГС}_i} C_{\text{вт.ПГС}_i} + m_{\text{ТЗ.ПГС}_i} C_{\text{ТЗ.ПГС}_i}.$$



Матеріальний баланс рідкої фази, тобто утворення розплаву реакційної маси відходів реакторі БЦП, у відповідності зі схемою потоків має вигляд:

$$\frac{dM_{P_i} C_{P_i}}{dt} = R_{\Sigma P_i} + m_{\text{реци}} C_{\text{реци}}$$

Матеріальний баланс утворення твердого залишку при деструкції початкової маси відходів:

$$\frac{dM_{TЗ_i} C_{TЗ_i}}{dt} = R_{\Sigma TЗ_i} + m_{TЗ_i} C_{TЗ_i} + m_{TЗ/P_i} C_{TЗ/P_i} + m_{TЗ/реци} C_{TЗ/реци}.$$

Загальний вигляд матеріального балансу по всім утвореним фазам в реакторі під час процесу термічної утилізації органічних відходів за технологією циркуляційного піролізу представлено системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dM_i}{dt} = R_i - m_{\text{ПГС}_i} + m_{\text{реци}} - m_{\text{втПГС}_i} - m_{TЗ_i}, \\ \frac{dM_{\text{ПГС}_i} C_{\text{ПГС}_i}}{dt} = R_{\Sigma \text{ПГС}_i} + m_{\text{ПГС}_i} C_{\text{ПГС}_i} + m_{P_i} C_{P_i} + m_{\text{втПГС}_i} C_{\text{втПГС}_i} + m_{TЗ \text{ПГС}_i} C_{TЗ \text{ПГС}_i}, \\ \frac{dM_{P_i} C_{P_i}}{dt} = R_{\Sigma P_i} + m_{\text{реци}} C_{\text{реци}}, \\ \frac{dM_{TЗ_i} C_{TЗ_i}}{dt} = R_{\Sigma TЗ_i} + m_{TЗ_i} C_{TЗ_i} + m_{TЗ/P_i} C_{TЗ/P_i} + m_{TЗ.реци} C_{TЗ.реци}. \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Для компоненту  $i$  зв'язок між вмістом його в газовій фазі  $C_{\text{ПГС}_i}$  і складом в рідкій  $C_{P_i}$  виражається співвідношенням, що базується на законі Рауля:

$$P C_i = C_{P_i} f_i(T)$$

де  $P C_i$  – парціальний тиск  $i$ -го компоненту в газовій фазі; функція  $f_i(T)$  виражає зв'язок між тиском та температурою кипіння  $i$ -го компоненту;  $P$  – тиск в системі.

Так, склад газової фази (у мольних частках)  $\sum C_{\text{ПГС}_i}$  виходить із рівнянь рівноваги газ-рідина для кожного компоненту  $i$  (рис. 3.3).

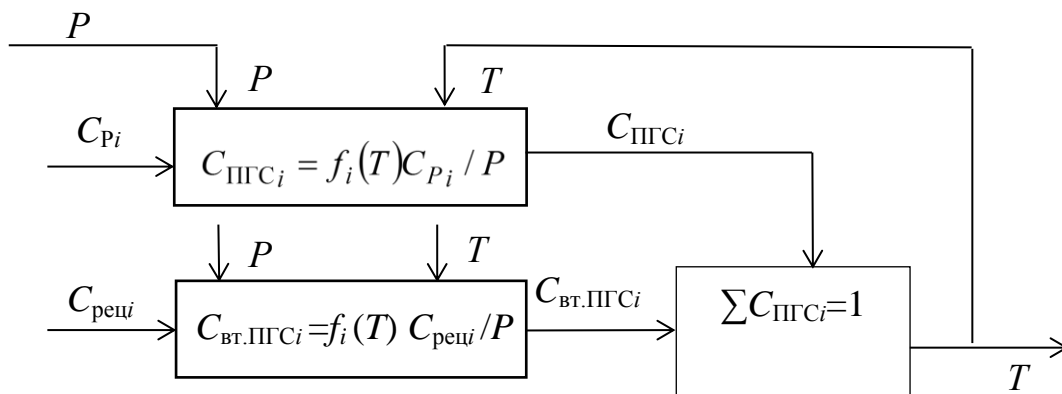


Рисунок 3.3 – Використання рівнянь парогазової рівноваги в реакторі

Таким чином, враховуючи багатокомпонентність суміші, об'єднана схема парогазової рівноваги дозволяє визначити склад газової фази ПГС ( $\sum C_{\text{ПГС}}$ ), що надходить в циркуляційну систему.

БЦС розглядається, виходячи з рівняння рівноваги  $\sum C_{\text{ПГС}}=1$ , звідки визначається частка важких фракцій, що конденсується, а саме:  $\sum C_{\text{ПГС}_i} = 1 \rightarrow m_{\text{рец}_i}$ . Із системи рівнянь (3.5) отримуємо склад важкої рідкої фракції (ВРФ) ( $C_{\text{рец}}$ ), склад ПГС ( $C_{\text{ПГС}}$ ), а також кількість ПГС ( $m_{\text{ПГС}}$ ) та кількість ВРФ ( $m_{\text{рец}}$ ).

### 3.2. Моделювання процесу рециркуляції та встановлення рівноваги парогазової суміші на контурах циркуляційного піролізу

Механізм процесу рециркуляції проміжних продуктів в циркуляційній системі є процесом безперервної зміни концентрації рідких і газових потоків на лінії контакту утворених фаз. Ланки циркуляційної системи функціонують як ряд самостійних одиниць контакту з різними температурами охолодження та забезпечують постійний масо- та енергообмін, внаслідок чого газова та рідка фази прагнуть встановити стан рівноваги. Парогазова суміш на кожному наступному контурі змінює концентрації та енергетичні характеристики, і процес продовжується внаслідок нового контактування цих фаз уже на наступному контурі за інших температур (рис. 3.4) [130].

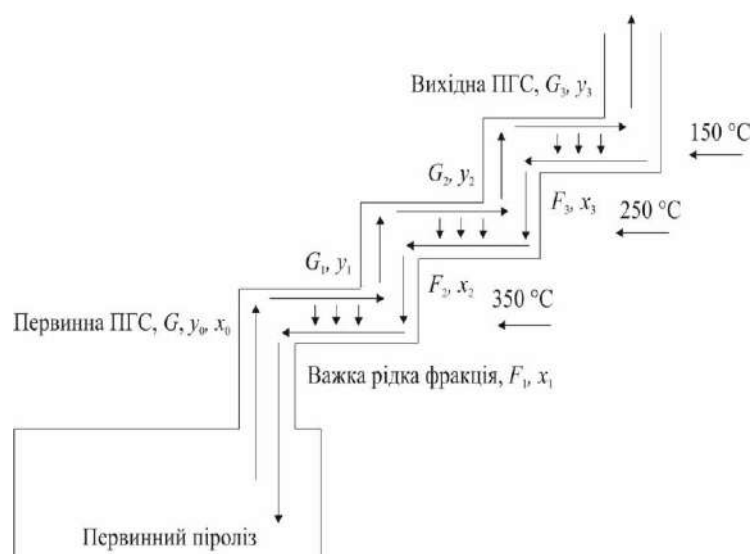


Рисунок 3.4 – Принципова схема матеріальних потоків в циркуляційній системі

Математична модель рециркуляції потоків та встановлення паро рідинної рівноваги будується на основі фізичного процесу, а математичний запис опирається на теорію ідеальної сходинки (ланки) контакту Багатурова [6].

Математична модель рециркуляції та розділення ПГС на контурах БЦС враховує наступні припущення [130]:

- теплообміном конструктивних елементів БЦС нехтуємо;
- тиск в реакторі БЦП приймається більше, ніж тиск на контурах;
- величина напору подачі продукту на контурі БЦС знаходиться між цими двома величинами;
- для регулювання компонентного складу видалених продуктів здійснюється підведенням теплоти в реактор і відведенням теплоти з контурів БЦС.

Багатокомпонентна ПГС умовно розглядається як бінарна, яка складається з легкого і важкого ключових компонентів (ЛКК і ВКК). У ЛКК входять всі компоненти, для яких  $1 < y_i/x_i < 100$ , а ВКК – всі компоненти з співвідношенням  $1 > y_i/x_i > 0,01$ , де  $y_i$  та  $x_i$  – мольний склад  $i$ -го компонента відповідно в ПГС та в важкій рідкій фракції, кмоль/сек.

Взаємодія фаз ПГС на контурах циркуляційної системи являє собою дифузію ЛКК з рідкої фракції в газову та ВКК з газової фази в рідку, що обумовлюється різницею концентрацій компонентів в масообмінних потоках. Встановлення газо-рідинної рівноваги відповідає збагаченню рідкої фази важкими ВКК), а газової фази збагаченню ЛКК. Сутність процесів, які проходять в БЦС (рис. 3.5), і отримані при цьому результати можна відстежити за допомогою  $t - x - y$  діаграми, на якій значенню  $x_i$  відповідає мольна концентрація компонента в рідкій фазі, а значенню  $y_i$  мольна концентрація компонента ЛКК в газовій фазі.

На першому контурі відбувається охолодження первинної ПГС  $G$  кмоль/год, зі складом  $X_i$  до температури  $350^\circ\text{C}$ , в результаті чого, отримаємо газову суміш  $G_1$ , зі складом  $y_{i1}$  мольних часток ЛКК, яка знаходиться в рівновазі з сконденсованою важкою рідкою фракцією  $F_1$ , зі складом  $x_{i1}$ .

Подальший перехід  $G_1$  кмоль на другий контур з температурою охолодження

250°C веде до її конденсації з отриманням рідкої фракції  $F_2$  зі складом  $x_{i2}$ , збагачену ВКК ( $x_2 > x_1$ ). Утворена при цьому  $G_2$  кмоль, зі складом  $y_{i2}$  мольних часток ЛКК потрапляє до третього контуру з температурою охолодження до 150°C, конденсація якої дає рідку фракцію  $F_3$  з ще більшим вмістом ВКК та має склад  $x_{i3}$ .

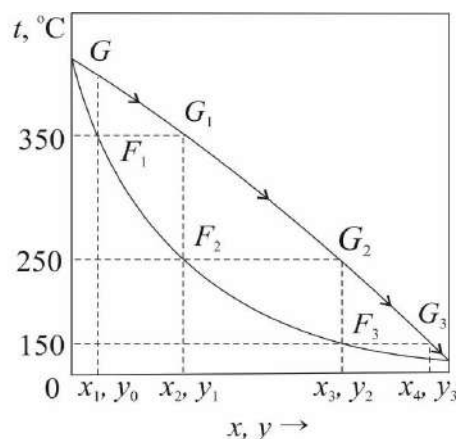


Рисунок 3.5 – Діаграма переходу компонентів в циркуляційній системі, де  $x_i$  – мольна концентрація компонента в рідкій фазі;  $y_i$  – мольна концентрація компонента в газовій фазі

Отримана на третьому контурі фаза  $G_3$  кмоль, зі складом  $y_{i3}$  мольних часток ЛКК, що представляє собою практично чистий ЛКК, спрямовується до вихідного конденсатору з водяним охолодженням, де відбувається відділення цільової рідкої фракції зі складом  $x_{i4}$  з заданою молекулярною масою та отриманням залишкового піролізного газу зі складом  $y_{i4}$ , що є висококалорійним енергоносієм.

Безперервна циркуляція буде повторюватись до тих пір, доки вся кількість сировини, що не прореагувала, не перетвориться в кінцеві продукти з заданими характеристиками.

Матеріальний баланс процесу рециркуляції матеріальних потоків для кожного контуру записано таким чином:

$$G = F_1 + G_1 - \text{матеріальний баланс першого контуру};$$

$$G_1 = F_2 + G_2 - \text{матеріальний баланс другого контуру};$$

$$G_2 = F_3 + G_3 - \text{матеріальний баланс третього контуру};$$

$$G_3 = F_4 + G_4 - \text{матеріальний баланс розділової ємності}$$

де  $F_4$   $G_4$  – кінцеві товарні продукти

Замінивши  $G_1$  та  $G_2$  отримаємо наступний вираз матеріального балансу процесу рециркуляції БЦС:  $G = F_1 + F_2 + F_3 + G_3$

Матеріальний баланс процесу рециркуляції БЦС може бути представлено в наступному вигляді:  $G X'_i = F_1 x'_{i1} + F_2 x'_{i2} + F_3 x'_{i3} + G_3 y'_{i3}$ .

Послідовність розрахунку однократної конденсації багатокомпонентної ПГС можна представити наступною схемою.

1. Задається температура ПГС на вході в перший контур БЦС.
2. Розраховують мольну долю кожного компоненту ПГС.
3. Знаходять мольну долю відгону.
4. Визначають склади рівноважних фаз за рівняннями.
5. Мольні долі компонентів перераховуються в масові.

Даний алгоритм розрахунку та отримані значення долі парів та склад ПГС для першого контуру використовують для визначення аналогічних значень величин для другого та третього контуру.

Встановлення рівноваги в піролізному обладнанні та енергетичні характеристики реакцій конденсації на контурах БЦС можна описати за допомогою термодинамічних співвідношень. Спосіб розрахунку здійснений на основі методу Темкіна-Шварцмана [192] з використанням даних теплоти реагуючих речовин, які отримані на основі комп'ютерного моделювання процесу деструкції ТОВ на базі програмного комплексу Астра 4.

Рівноважну ступінь перетворення по хімічним реакціях конденсації отримуємо з рівняння залежності константи рівноваги  $K_p$  від зміни стандартної енергії Гіббса  $G$ . В основі лежить рівняння ізотерми Вант-Гоффа. Ізобарно-термічний потенціал  $\Delta G^0$  залежить від зміни стандартних ентальпій  $\Delta H^0$  та ентропій  $\Delta S^0$  реакцій конденсації.

Для розрахунку константи рівноваги  $K_p$  на першому контурі точкою відліку приймаються основні термодинамічні показники, що характеризують рівновагу системи та параметри потоку в системі газ-рідина.

$$\frac{\Delta G_T^0}{T} = \frac{\Delta H_{298}^0}{T} - \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{dT}{T^2} \int_{298}^T \Delta C_p dT$$

Таким чином, розрахункове рішення рівняння дозволяє отримати значення константи рівноваги на першому контурі. Далі, за допомогою методики розрахунку фазової газо-рідинної рівноваги на контурах БЦС визначаємо склад та мольний потік рідкої та газової фази, що розділилися на першому контурі.

Константу рівноваги для другого, третього контуру визначаємо аналогічно, з використанням значень теплового ефекту та зміни ентропії кожного компоненту в системі газ-рідина, отриманого на попередньому контурі при заданій температурі охолодження.

Перевагами дослідження при застосуванні апарату моделювання є можливість розуміння фізико-хімічної сутності термічної утилізації відходів; визначення хімічного складу та виходу кінцевих цільових продуктів процесу при відомому складі початкової маси вуглеводневих відходів; можливість управління продуктивністю БЦС.

### 3.3. Результати математичного моделювання процесу рециркуляції та встановлення рівноваги в піролізному обладнанні

Розрахунок термодинамічної рівноваги довільних багатокомпонентних систем полягає у визначенні всіх рівноважних параметрів, термодинамічних властивостей, а також хімічного складу [156]. Визначення термодинамічних показників циркуляційного піролізу здійснено за допомогою програмного комплексу АСТРА 4. Термодинамічні параметри системи процесу термічного розкладання зумовлюють стан продуктів деструкції вихідної маси відходів та визначають подальші умови проведення процесу [27] конденсації та рециркуляції парогазової суміші. На основі комп'ютерного моделювання деструктивних перетворень за допомогою програмного комплексу АСТРА 4 визначено концентрації основних складових газової фази та термодинамічні показники системи циркуляційного піролізу.

В ході моделювання процесу було визначено основні екстенсивні термодинамічні параметри та їх показники, динаміку зміни та залежність від температури, а саме загальний коефіцієнт теплопровідності ( $LT$ ), внутрішню енергію ( $U$ ), ентальпію ( $I$ ) та ентропію ( $S$ ) [206].

Як результат дослідження та розрахунків були побудовані графіки зміни термодинамічних показників в залежності від температури, що представлені нижче.

Теплопровідність є одним з найбільш важливих параметрів речовин і матеріалів [297], який описує процес переносу теплоти і зміну температури в них.

Зміна значення повного коефіцієнту теплопровідності для різних видів відходів залежно від заданої температури показана на рисунку 3.6.

Найбільше значення повного коефіцієнту теплопровідності має відпрацьоване масло та харчові відходи – 5,3 Вт/м·К та 4,8 Вт/м·К, оскільки має напіврідку консистенції, що призводить до збільшення швидкості тепловтрат, найменше значення у пластмас – 2,1 Вт/м·К.

В інтервалі температур 560-580°C, відбувається підвищення ефективності теплопередачі, а відповідно і масопередачі та швидкості прогрівання.

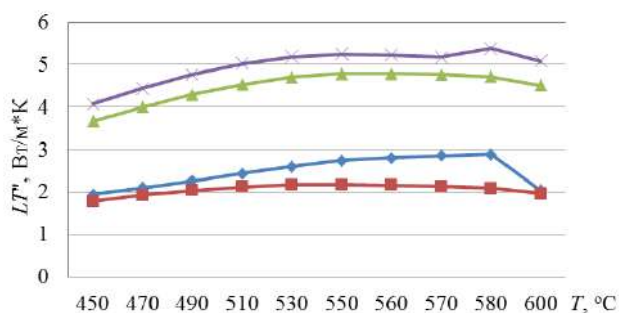


Рисунок 3.6 – Залежність повного коефіцієнту теплопровідності від температури для різних видів відходів:

◆ - гума; ■ - пластмаса; ▲ - харчові відходи; ✕ - відпрацьоване мастило

Піроліз – це ендотермічна термодинамічна система і відповідно до першого закону термодинаміки відбувається зменшення внутрішньої енергії в системі, а відповідно і значення ентальпії. Аналізуючи графік ентальпії (рис. 3.7) можна зробити висновки, що процес інтенсивніше відбувається з 560°C. Рушійною силою піролізу є ентропічний фактор (рис. 3.8), утворення летких сполук і низькомолекулярних продуктів термічного розпаду. Ентропія зростає зі збільшенням температури, відповідно відбувається прискорення процесу переходу тіла з одного агрегатного стану в інший – утворення нових продуктів (газової суміші та конденсованої фази).

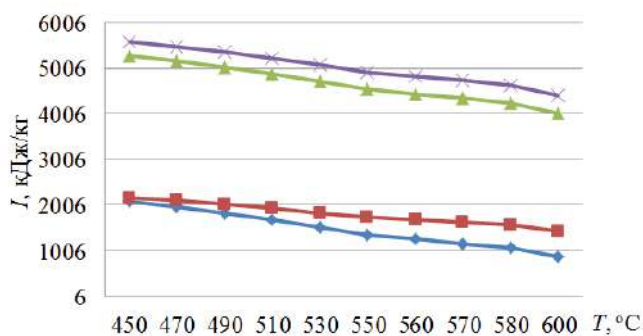


Рисунок 3.7 – Зміна ентальпії

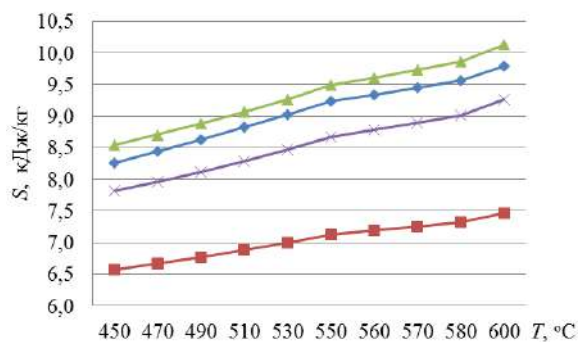


Рисунок 3.8 – Зміна ентропії

Чим швидше відбувається розігрів реактора тим швидше зростає ентропія. Встановлено, що зі збільшенням температури, починаючи з 560 °С спостерігається різке підвищення ентропії  $S$ , 9,6 кДж/кг, прискорюється процес, інтенсифікується утворення летких сполук і низькомолекулярних продуктів термічного розпаду, утворення газової суміші та конденсованої фракції.

Встановлено пряму залежність між інтенсивністю розігріву реактору та швидкістю зростання ентропії. При нагріві реактору до 560°С відбувається зменшення внутрішньої енергії  $U=1100$  кДж/кг та зменшення значення ентальпії  $I = 1206$  кДж/кг в системі. Найбільші значення ентропії спостерігається при піролізі біологічних відходів та гуми до 9,75 кДж/кг та 10,1 кДж/кг відповідно. Найменші значення ентропії має піроліз пластмаси в межах до 7,4 кДж/кг.

Для оцінки впливу незворотності процесів перетворення енергії на втрати корисної роботи може використовуватися метод ексергетичних потоків. Відповідно до цього методу розраховуються потоки ексергії робочих тіл, що входять в систему ( $\mathcal{E}_1$ ), ексергії теплоти, що підводиться ( $\mathcal{E}_q$ ), ексергії робочих тіл, що виходять з системи ( $\mathcal{E}_2$ ) (табл. 3.2).

Ексергетичний баланс, на підставі якого встановлюється масштаб використання сировинних і енергетичних ресурсів, вказує на можливість підвищення коефіцієнта корисної дії процесу. Таким чином, термодинамічна досконалість системи характеризується ексергетичним коефіцієнтом корисної дії (ккд):  $\eta_{\text{с}} = \mathcal{E}_{\text{п}} / \mathcal{E}_{\text{с}}$ , де  $\mathcal{E}_{\text{п}}$  – корисно використана ексергія, що перетинає межу системи;  $\mathcal{E}_{\text{с}}$  – витрачена ексергія ( $\mathcal{E}_q$ ).



Таблиця 3.2 – Результати ексергетичного аналізу реактору деструкції органічних відходів при різних температурних режимах за технологією БЦП

Вид відходів	Інтервал темпер °С	$S_0$ , кДж/кг	$S$ кДж/кг	$I_0$ кДж/кг (-)	$I$ кДж/кг (-)	$\mathcal{E}_1$ , кДж	$\mathcal{E}_2$ , кДж	$\mathcal{E}_q$ кДж	$l_{II}^{\max}$ кДж	$l_{II}$ кДж	$\Pi$ , кДж	$\eta_{\mathcal{E}}$ , %
Гума	450	2	8,5	8024	2006	4260	45819	152730	111171	170033	2271	66,00
	550	2	9,25	8024	1206	6811	5148	165375	167038			
	600	2	9,75	8024	906	6810	5118	170612	172304			
Пластмаса	450	1,6	6,5	8024	2006	4582	45819	152730	111493	170278	1729	66,30
	550	1,6	7,1	8024	1806	6213	5148	165375	166440			
	600	1,6	7,5	8024	1506	6513	5118	170612	172007			
Харчові відходи	450	2	8,5	15000	5206	7890	45819	152730	114801	174209	2271	67,8
	550	2	9,5	15000	4506	10488	5148	165375	170715			
	600	2	10,1	15000	4006	10986	5118	170612	176480			
Відпрацьоване мастило	450	1,9	7,75	15001	5606	7681	45819	152730	114592	174181	2300	67,8
	550	1,9	8,6	15001	4506	10487	5148	165375	170714			
	600	1,9	9,75	15001	4006	10987	5118	170612	176481			

Аналізуючи отримані дані, можна стверджувати, що при збільшенні температури роботи реактору БЦП до 560°C, збільшується ефективність роботи установки переробки органічних відходів ( $I_{II}^{\max}$ ) в межах:

- при піролізі гуми 111-172 МДж;
- піролізі пластмаси 111 – 172 МДж;
- при піролізі харчових відходів 114 – 176 МДж;
- при піролізі відпрацьованого мастила 114 – 176МДж,

що виражається ексергією, тобто відбувається збільшення максимально корисної роботи, що можна отримати від підведеної теплоти до реактора. При підвищенні «працездатності» термодинамічної системи циркуляційного піролізу збільшується відповідно і глибина деструкції складних вуглеводневих відходів.

Отримані результати дали можливість встановити термодинамічні параметри процесу піролізу відходів, які зведено до таблиці 3.3. Результатом також є кількісна оцінка компонентів та продуктів деструкції у вигляді концентрацій продуктів термічного розкладу початкової маси ТОВ (табл. 3.4), а також значення матеріальних і енергетичних потоків, що описуються термодинамічними показниками. Термодинамічні параметри стану ПГС дозволяють оцінити рівноважну ступінь розділення парогазових потоків за рівнянням залежності константи рівноваги  $K_p$  від зміни ентальпій  $\Delta H^0$  та ентропій  $\Delta S^0$ .

Таблиця 3.3 – Термодинамічні параметри для моделювання процесу циркуляційного піролізу

Параметр	Температурний режим, °С	Характеристика
Коефіцієнт теплопровідності	550-580	Збільшення швидкості прогрівання
Ентальпія	550-560	Процес інтенсифікації
Ентропія	550-560	Прискорення процесу переходу з одного агрегатного стану в інший
Молярна маса легких летких компонентів	560-600	Збільшення легких вуглеводнів в ПГС

Таким чином, визначений температурний режим нагріву реактору термічної утилізації ТОВ, який складає 550-560°C. За таких параметрів виконується повне трансформування первинної маси ТОВ у кінцеві продукти, що є основою для визначення оптимального температурного режиму проведення процесу їх термічної утилізації. В межах цього інтервалу здійснюється інтенсифікація деструктивних перетворень відходів та вихід основних теплотворних компонентів парогазової фази.

Визначені основні термодинамічні показники ПГС є початковими даними для розрахунку процесу фазової рівноваги парогазових потоків в БЦС на етапі моделювання (табл. 3.4) [341].

Матеріальний баланс кожного контуру на контурах циркуляційної системи в умовах встановлення парогазової рівноваги здійснювався для оптимізації температурного режиму з метою отримання якісного палива та рециркуляції важких, небезпечних компонентів та зведення їх вмісту до мінімуму в кінцевих продуктах термічної утилізації ТОВ.

Оптимізація температурних режимів багатоконтурної циркуляційної системи здійснюється на основі розрахунку константи рівноваги  $K_p$  та повного матеріального балансу фазових потоків ПГС при різних температурах для кожного контуру методом послідовних наближень.

Залежно від необхідного значення масового вмісту ключового компонента виконується ряд ітерацій комплексу підпрограм розрахунку коефіцієнтів теплофізичних властивостей компонентів парогазової фази в заданих температурних умовах.

Розрахунок завершується при досягненні заданого значення масового вмісту ключового компонента з необхідною точністю. Після цього проводиться розрахунок масових витрат рідкої і газової фаз.

Далі визначається оптимальна температурна межа розділення в системі газ-рідина. Температурна межа – це значення, що знаходиться між температурою кипіння при робочих умовах компонентів, що лежать по різні боки уявної лінії поділу газової фази.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку концентрацій (моль/кг) основних складових первинної парогазової фракції як начального продукту термічної утилізації вихідної маси ТОВ

Компоненти первинної газової суміші											
T, °C	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (×10 <sup>-5</sup> )	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (×10 <sup>-9</sup> )	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (×10 <sup>-13</sup> )	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (×10 <sup>-17</sup> )	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	C
450	0,11792	0,9366	13,778	0,64081	13,208	6,7198	4,4153	2,07410	3,9317	0,13758	41,14
470	0,18205	11,148	12,964	0,68616	13,484	7,1469	4,8636	2,32100	3,9317	0,13755	41,844
490	0,27508	13,097	12,082	0,73178	13,469	7,3643	5,1423	2,57920	3,9318	0,13752	42,588
510	0,40692	15,19	11,146	0,7757	13,161	7,3521	5,2194	2,66710	3,9319	0,13748	43,348
530	0,58921	17,394	10,175	0,81501	12,582	7,1142	5,08890	2,62550	3,93321	0,13743	44,098
550	0,83449	19,671	9,1897	0,84574	11,773	6,6783	4,77240	2,46440	3,93324	0,13738	44,807
560	0,98456	20,825	8,699	0,85644	11,299	6,3997	4,55700	2,34700	3,9325	0,13734	45,136
570	1,1547	21,98	8,2134	0,86317	10,791	6,0897	4,31250	2,21080	3,9326	0,13731	45,445
580	1,3458	23,132	7,7353	0,86634	10,255	5,7555	4,04590	2,06070	3,9328	0,13727	45,573
600	1,7929	25,407	6,8119	0,8538	9,1351	5,0436	3,47540	1,73810	3,9331	0,1372	46,218

Для якісного аналізу рециркуляції ПГС на контурах циркуляційної системи з встановленням механізму розподілу мольних та масових витрат потоку побудовано матеріальний баланс за розподіленням вмісту вуглеводневих компонентів для різних досліджуваних відходів (табл. 3.5 та 3.6). Здійснення процесу охолодження першого контуру до  $375^{\circ}\text{C}$  спричинює зменшення долі сконденсованої фракції та збільшення долі газової фази. В результаті велика кількість нелетких компонентів переходить на наступний контур в газовому стані. При таких умовах не здійснюється вторинна деструкція ЗАШ та виникає загроза потрапляння шкідливих компонентів в кінцеві продукти. Здійснення конденсації при  $335^{\circ}\text{C}$  – збільшує частку сконденсованих фракцій та зменшує частку газової фази. Це супроводжується конденсацією всіх енергетично цінних компонентів газової фази, що при переході на наступний контур мають складати основу для отримання кінцевих цільових продуктів. Так, для 1 контуру встановлено температуру охолодження, яка складає  $360^{\circ}\text{C}$ . Забезпечується вторинна деструкція 43% сконденсованої рідкої фази  $F_1$  та вихід газової фази  $G_1$  у кількості 57%, насичену леткими компонентами, що переходить на 2 контур для подальшого розділення.

Найбільш оптимальний режим охолодження для 2 контуру приймається при температурі  $245^{\circ}\text{C}$ , за якої досягається отримання масових витрат газо-рідинних потоків у співвідношенні 49% та 51%. На 3 контурі постає завдання отримання газо-рідиною фази  $G_3$ , що є цільовою кінцевою фазою для отримання товарних продуктів  $G_4$  (піролізний газ) та  $F_4$  (рідка фракція). Фаза  $G_3$  повинна мати високий теплотворний потенціал для можливості її використання як комерційного продукту, оскільки метою є досягнення не тільки екологічної безпеки процесу, а й отримання товарних продуктів для окупності обладнання. Для цього обрано температуру в  $170^{\circ}\text{C}$ , яка дозволяє забезпечити її масовий вихід у кількості 72%.

Так з вище встановлених умов для утилізації полімерних відходів 1 контуру визначено температуру охолодження, яка складає  $355^{\circ}\text{C}$ . Забезпечується вторинна деструкція 39 % сконденсованої рідкої фази  $F_1$  та спостерігається вихід газової фази  $G_1$  у кількості 61%, насичену леткими компонентами, що переходить на 2 контур для подальшого розділення.

Таблиця 3.5 – Матеріальний баланс циркуляційної системи (досліджувальної суміші відходів автошин)

БЦС	Температура внутрішнього об'єму контуру $T, ^\circ\text{C}$	Молекулярна маса $M$ , кг/кмоль	Витрата та масова частка ПГС, яка поступає в контур		Витрата та масова частка первинної газової суміші, яка надходить з контуру до наступного						Константа рівноваги $K_j$
			$G_j$ , кг/г	$y_i$ , %	$G_j$ , кг/г	$y_{ij}$ , %	$e_j$	$F_j$ , кг/г	$x_{ij}$ , %	$r_j$	
1 контур			$G$	$X_i$	$G_1$	$y_{i1}$	$e_1$	$F_1$	$x_{i1}$	$r_1$	$K_{i1}$
	375	881	50,0	0,595	41,5	0,494	83	8,5	0,101	17	0,103
	365	842	50,0	0,595	31,5	0,375	63	18,5	0,220	37	0,233
	<b>360</b>	<b>1836</b>	<b>50,0</b>	<b>0,595</b>	<b>28,5</b>	<b>0,339</b>	<b>57</b>	<b>21,5</b>	<b>0,256</b>	<b>43</b>	<b>0,298</b>
	355	827	50,0	0,595	25,5	0,303	51	24,5	0,292	49	0,363
	345	798	50,0	0,595	15,5	0,184	31	34,5	0,411	69	0,494
	335	761	50,0	0,595	7,5	0,089	15	42,5	0,506	85	0,621
2 контур			$G_1$	$y_{i1}$	$G_2$	$y_{i2}$	$e_2$	$F_2$	$x_{i2}$	$r_2$	$K_{i2}$
	275	778	28,5	0,325	24,0	0,273	84	4,5	0,05	21	1,361
	265	751	28,5	0,325	20,8	0,237	73	7,70	0,09	27	3,005
	250	704	28,5	0,325	15,4	0,176	54	13,1	0,150	46	5,396
	<b>245</b>	<b>691</b>	<b>28,5</b>	<b>0,325</b>	<b>14,0</b>	<b>0,159</b>	<b>49</b>	<b>14,5</b>	<b>0,166</b>	<b>51</b>	<b>6,161</b>
	235	629	28,5	0,325	9,7	0,111	34	18,8	0,215	66	7,261
3 контур			$G_2$	$y_{i2}$	$G_3$	$y_{i3}$	$e_3$	$F_3$	$x_{i3}$	$r_3$	$K_{i3}$
	175	378	14,0	0,159	11,2	0,127	80	2,8	0,032	20	10,858
	170	363	14,0	0,159	10,1	0,114	72	3,9	0,045	28	11,095
	160	332	14,0	0,159	8,1	0,092	58	5,9	0,067	42	11,569
	155	318	14,0	0,159	7,4	0,084	53	6,7	0,074	47	11,806
	140	281	14,0	0,159	4,3	0,049	31	9,6	0,109	69	12,479
	135	272	14,0	0,159	3,2	0,051	23	10,8	0,108	77	12,972

Таблиця 3.6 – Матеріальний баланс циркуляційної системи (досліджувана суміш полімерів № 2)

БЦС	Температура а внутрішньо го об'єму контуру $T, ^\circ\text{C}$	Моляр. маса $M,$ кг/кмо ль	Витрата та масова частка ПГС, яка поступає в контур		Витрата та масова частка первинної газової суміші, яка надходить з контуру до наступного						Констант а рівноваг и $K_j$
			$G_j, \text{ кг/Г}$	$G_j^l$ кмоль/ГОД	$G_j, \text{ кг/Г}$	$G_j^l$ кмоль/ГОД	$e_j$	$F_j, \text{ кг/Г}$	$F_j^l$ кмоль/ГОД	$r_j$	
1 контур			$G$	$G^l$	$G_1$	$G_1^l$	$e_1$	$F_1$	$F_1^l$	$r_1$	$K_{i1}$
	375	836	78,0	353267,8	22,6	102447,6	29	55,4	250820,2	71	0,093
	365	829	78,0	353267,8	33,5	152905,2	43	44,5	201362,6	57	0,175
	360	821	78,0	353267,8	38,2	171101,2	49	39,8	180166,8	51	0,252
	355	812	78,0	353267,8	47,6	215493,4	61	30,6	180225,6	39	0,301
	345	798	78,0	353267,8	61,6	279081,6	79	16,4	74186,2	21	0,368
	335	785	78,0	353267,8	67,1	303810,3	86	10,9	49457,5	14	0,579
2 контур			$G_1$	$G_1^l$	$G_2$	$G_2^l$	$e_2$	$F_2$	$F_1^l$	$r_2$	$K_{i2}$
	275	479	61,6	279081,6	13,5	65357,9	22	48,1	231727,6	78	4,273
	265	453	61,6	279081,6	22,2	106949,4	36	39,4	191132,2	64	4,177
	250	414	61,6	279081,6	29,6	133959,2	48	32,0	145122,4	52	6,445
	<b>245</b>	<b>392</b>	<b>61,6</b>	<b>279081,6</b>	<b>35,2</b>	<b>159076,5</b>	<b>57</b>	<b>26,4</b>	<b>120005,1</b>	<b>43</b>	<b>7,578</b>
	235	347	61,6	279081,6	40,7	184193,9	66	20,9	94887,7	34	8,456
3 контур			$G_2$	$G_2^l$	$G_3$	$G_3^l$	$e_3$	$F_3$	$F_2^l$	$r_3$	$K_{i3}$
	175	247	40,7	184193,9	11,4	51574,3	28	29,3	132619,6	72	8,154
	170	241	40,7	184193,9	12,6	57100,1	31	28,1	127093,8	69	8,365
	160	234	40,7	184193,9	15,1	68151,7	37	25,6	116042,1	63	9,543
	155	228	40,7	184193,9	17,5	79203,4	43	23,2	104990,5	57	9,237
	<b>140</b>	<b>211</b>	<b>40,7</b>	<b>184193,9</b>	<b>21,2</b>	<b>95738,8</b>	<b>52</b>	<b>19,5</b>	<b>88413,1</b>	<b>48</b>	<b>10,469</b>
	135	204	40,7	184193,9	31,3	141829,3	77	9,4	42364,6	33	10,743

Найбільш оптимальний режим охолодження для 2 контуру приймається при температурі 245 °С, за якої досягається отримання масових витрат газо-рідинних потоків у співвідношенні 43% та 57 %.

На 3 контурі обрано температуру в 140 °С, яка дозволяє забезпечити масовий вихід рідкої фракції у кількості 52%.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Складено систему диференціальних рівнянь швидкості перетворення для різних компонентів органічної сировини, враховуючи матеріальні потоки основних продуктів та швидкості їх утворення, яка дає можливість визначати розрахункові кінетичні та активаційні параметри моделі деструкції.

2. Результатом моделі є розрахунки визначення складу та мольного потоку рідкої та парової фази, що розділяються на контурах на основі спільного рішення системи рівнянь матеріального балансу рециркуляції ПГС в циркуляційній системі та рівняння рівноважних фаз за вмістом кожного компонента з використанням програмного комплексу ASTRA 4. Визначено параметри фазорозділення на контурах циркуляційної системи при яких досягається послідовна рециркуляція до 90 % нелетких компонентів первинної газової суміші

3. Визначено, що найбільш оптимальним режимом охолодження для 1 і 2 контуру є температури 355-360 °С і 245 °С відповідно, за якою досягається отримання масових витрат газо-рідинних потоків. На 3 контурі постає завдання отримання товарних продуктів - піролізний газ та рідка фракція. Для цього визначено температурний інтервал 140-170 °С, що дозволяє забезпечити масовий вихід рідкої фракції у кількості 72% для сировини – зношені автошини, та 52% для сировини – суміші полімерних.

4. Визначено основні термодинамічні і кінетичні параметри процесу деструкції ТОВ, на базі яких побудовано графіки зміни термодинамічних показників в залежності від температури.

5. Виявлено залежність між швидкістю розігріву реактора та зміною



показників ентропії. Спостерігається стрімке підвищення ентропії  $S=9,25$  кДж/кг починаючи з температури у  $560$  °С, процес інтенсифікується, пришвидшується утворення летких сполук та низькомолекулярних продуктів термічного розпаду, формується газова суміш та конденсована фракція.

Результати, викладені у розділі 3, опубліковані у роботах [130, 138, 201, 204, 206, 210, 211, 341].

## РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ  
ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТНОГО ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ

4.1 Розробка схемних рішень експериментальних установок для дослідження екологічно прийнятеного піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів

Для відпрацювання робочих режимів, виявлення особливостей процесів деструкції різнорідних органічних відходів, визначення параметрів роботи піролізного обладнання розроблено, спроектовано та виготовлено лабораторне та промислове устаткування. Експериментальні установки дозволяють визначати технологічні показники процесу піролізу, який здійснюється в циклічному режимі (продуктивність 10 кг/цикл – ЕУ БЦП - 14) та безперервному режимі (продуктивність 100 кг/добу – ЕКОПР – 18Д, продуктивність 500 кг/добу – Екопир-БЦП, продуктивність 5 т/добу – БЦП-5) (Додаток Г).

Експериментальна установка БЦП 14, представлена на рисунках 4.1 та 4.2, розроблена відповідно до ТУ У 23044537.001 – 99 «Установки пиролизные».

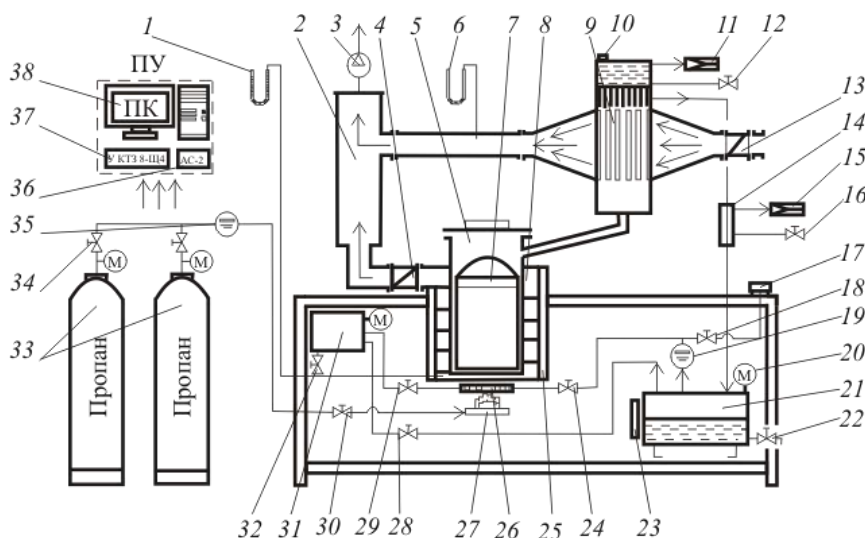


Рисунок 4.1 – Схематичне рішення розробленої експериментальної установки ЕУ БЦП – 14

На рисунку 4.1 зазначені наступні позначення: 1 – U-подібний манометр; 2 – газохід реактора; 3 – витяжний вентилятор, 4 – дросельна заслінка регулювання тяги в газоході реактора; 5 – реактор; 6 – U-подібний манометр; 7 – корзина з сировиною;

8 – рубашка обігріву реактора; 9 – система багатоконтурної циркуляції (багатоступінчастий теплообмінний апарат); 10 – пробка водяної камери; 11 – витратомір; 12 – кран регулювання потоку охолоджуючої води 3-го ступеня; 13 – шибер регулювання потоку охолоджуючого повітря 2-го ступеня; 14 – вихідний конденсатор; 15 – витратомір; 16 – кран регулювання охолоджуючої води вихідного конденсатора; 17 – індикаторний пальник; 18 – кран індикаторного пальника; 19 – газовий лічильник; 20 – манометр накопичувального бака; 21 – накопичувальний бак; 22 – кран зливу продуктів піролізу; 23 – показник рівня в баку продуктів піролізу; 24 – кран на пальник допалювання; 25 – ізоляція кожуха обігріву реактора; 26 – пальник допалювання; 27 – головний пальник; 28 – кран на ресивер; 29 – кран на пальник допалювання; 30 – кран регулювання потоку газу на головному пальнику; 31 – ресивер; 32 – кран спуску конденсату з ресивера; 33 – балон з газом (пропан-бутан); 34 – кран підключення балона до паливної системи; 35 – газовий лічильник; 36 – декодер сигналу АЦП; 37 – АЦП УКТ38-Щ4 (аналогово-цифровий перетворювач); 38 – персональний комп'ютер з портом RS-232.

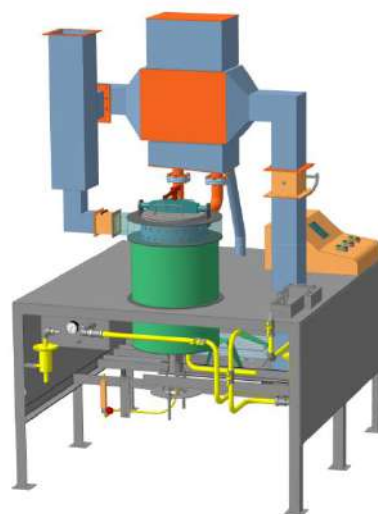


Рисунок 4.2 - Фото та 3D модель установки ЕУ БЦП – 14

Експериментальний стенд складається з основних елементів: реактора (5) піролізу з корзиною, що виймається, в яку завантажуються відходи, багатоконтурної циркуляційної системи (9), яка складається з трьох контурів, вихідного конденсатора (14), та розподільної ємності, яка забезпечує розділення парогазової суміші (ПГС) на піролізний газ та рідку легку фракцію, пульта управління.

Установка оснащена елементами безпеки у вигляді іскрогасника, що забезпечує безпечне спалювання піролізного газу на газовому пальнику та запобіжного клапану, який забезпечує номінальний тиск в реакторі та скидання надлишку піролізного газу в збірний бак, при цьому система кранів забезпечує спалювання надлишку піролізного газу зі збірного баку на пальнику піролізного газу.

В процесі виготовлення установки герметичність реактора контролювалася надлишком тиску повітря до  $P = 1,5 \text{ кг/см}^2$  з витримкою 30 хвилин, зниження тиску не спостерігалось.

Скорочені розроблені методики проведення експериментальних досліджень визначено в Додатку Д. Технічні характеристики розроблених піролізних установок вказані в Додатку Е.

Для визначення та відпрацювання технологічних параметрів роботи піролізної установки в безперервному режимі, безпечності роботи системи подачі сировини в установку розроблено та виготовлено установку ЕКОПР 18Д (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Комп'ютерне 3D зображення та фото експериментальної установки Екопір 18 Д

Установка включає реактор циліндричної форми внутрішнім діаметром 500 мм, висотою 500 мм об'ємом  $0,098 \text{ м}^3$ . Циліндр реактора виконаний зі сталі марки 12X18H10T (рис.4.4).

Внутрішнє оребрення реактора представляє собою підставку для корзини у вигляді циліндра висотою 50 мм, діаметром 70 мм, та радіальних ребер висотою 250 мм, які знаходяться з однієї сторони в тепловому контакті з внутрішньою боковою поверхнею реактора, а з другою сторони в тепловому контакті з корзиною.

В нижній частині ребер і підставки виконані 32 отвори діаметром 5-10 мм для перетоку розплавлених полімерів, що забезпечує інтенсифікацію перемішування розплаву полімерів по всьому об'єму реактора.

Корзина являє собою стакан діаметром 182 мм, виконаний з листової сталі марки 12Х18Н10Т, товщиною 1 мм, висотою 450 мм. В нижній частині стакана виконані 12 отворів діаметром 4 мм, через які розплавлена речовина з корзини потрапляє в реактор. В верхній частині корзини виконані 8 отворів діаметром 10 мм для виходу ПГС в багатоконтурну циркуляційну систему



Рисунок 4.4 – Реактор експериментальної установки БЦП Екопір 18 Д

Димохід розташований навколо реактора з внутрішніми горизонтальними кільцевими перфорованими перегородками з отворами 20 мм. Димохід має теплоізоляційний кожух, який представляє собою циліндр (сталь марки 15К ГОСТ 1050-88), та заповнений керамзитом фракції 10 мм.

У верхній частині реактора встановлена кришка по вісі якої розташований циліндр виконаний зі сталі марки 15К діаметром 186 мм та висотою 300 мм. В верхній частині циліндра виконані 2 отвори діаметром 60 мм з трубопроводами, які з'єднують реактор з БЦС. На боковій частині циліндра встановлений фланець, який з'єднує реактор з плунжерною системою подачі відходів в реактор. Верхня частина циліндра закривається герметично кришкою.

Топковий пристрій (рис. 4.5) забезпечує нагрів корпусу реактора за рахунок спалювання пропан-бутану на головному пальнику та спалювання піролізного газу на додатковому пальнику. Топковий пристрій конструктивно виконаний зі стандартного пальника пропан-бутана і оригінальної конструкції пальника

спалювання піролізного газу, який розташований навколо головного пальника. Додатковий пальник оснащений повітряним піддувом з регулюючою засувкою.



Рисунок 4.5 – Топковий пристрій

Багатоконтурна циркуляційна система (БЦС) (рис. 4.6) складається з першого високотемпературного контуру з робочою температурою 320-400°C. Контур з'єднаний з верхньою частиною реактора двома трубками діаметром 60 мм, одна з трубок забезпечує вихід ПГС, а друга – повернення рідкої важкої фракції назад у реактор. Перший контур конструктивно виконаний у вигляді герметичної ємності з природною системою охолодження. Верхня частина першого контуру герметично з'єднана з другим контуром з робочою температурою 220-280°C.

Другий контур представляє собою теплообмінник, конструктивно виконаний у вигляді трубного пучка (326×320 мм), який по торцям зафіксований в трубних дошках (326×220 мм, має 78 отворів діаметром 20 мм). Трубний пучок з зовнішньої сторони примусово охолоджується потоком повітрям. У верхній частині другого контуру розташований третій контур з робочою температурою 130-150°C.

Третій контур конструктивно виконаний у вигляді герметичної ємності з внутрішнім оребренням, та має у верхній частині патрубок відведення легкої фракції ПГС у вихідний конденсатор. У верхній частині третього контуру розташована камера з водяним охолодженням, яка знаходиться в тепловому контакті з внутрішнім оребренням.

Вихідний конденсатор з робочою температурою 25-35°C, представляє собою теплообмінник, конструктивно виконаний у вигляді трубного пучка, який по торцям зафіксований в трубних дошках, а сам трубний пучок з зовнішньої сторони примусово охолоджується водою. В нижній частині вихідного конденсатора

встановлена трубка (діаметром 60 мм, довжиною 43 мм), яка з'єднує його з розподільчою ємністю.



Рисунок 4.6 – Багатоконтурна циркуляційна система

Розподільча ємність забезпечує відділення вихідної рідкої легкої фракції від піролізного газу. Розподільча ємність конструктивно виконана герметичною (діаметром 506 мм, довжиною 300 мм) в нижній частині якої встановлений патрубок відведення рідкої фракції, а у верхній частині розташований патрубок відведення піролізного газу на пальник допалу. У верхній частині розподільчої ємності встановлені два запобіжні клапани, які забезпечують скидання піролізного газу в ресивер при критичному тиску в реакторі.

Ресивер забезпечує збір вихідного піролізного газу в аварійній ситуації. В верхній частині ресиверу встановлений патрубок (діаметром 21 мм) відведення аварійного піролізного газу на пальник допалювання, а в нижній частині його розташований патрубок для видалення конденсату.

Димохід розташований навколо реактора з внутрішніми горизонтальними кільцевими перфорованими переборками з отворами 20 мм. Димохід має теплоізоляційний кожух, який представляє собою циліндр (сталь марки 15К ГОСТ 1050-88), та заповнений керамзитом фракції 10 мм. Система обігріву реактора димовими газами містить витяжний вентилятор продуктивністю 4000 м<sup>3</sup>/час, потужність двигуна 1,5 кВт, температура димових газів на вході в реактор складає близько 900 °С, на виході з реактора – біля 500 °С, а на вході в витяжну вентиляцію

не більше 300 °С. Димові гази проходять зигзагоподібно уздовж реактора, забезпечуючи максимальний нагрів корпусу реактора.

Плунжерна система завантаження відходів (рис. 4.7) забезпечує подачу не подрібнених органічних відходів в реактор. Складається з корпусу, всередині якого розташований поршень, що з'єднаний з гідроциліндром ГЦ 80.40.400.000.00, який приводиться в дію за допомогою маслостанції V-A-PU-K<sub>4</sub>-1.3-F,M-12-C.



Рисунок 4.7 – Комп'ютерне 3D зображення та фото плунжерної системи

На виході плунжерної системи встановлений конус, в якому утворюється пробка із завантаженої сировини, що забезпечує безперервну подачу відходів при повній герметичності реактору. На корпусі та на поршні розташовані відповідно нерухомий та рухомий ножі, що забезпечують обрізання надлишку не подрібнених відходів, які подаються в реактор.

Іскрогасник встановлений на вході газу пропан-бутан в головний пальник і на вході піролізного газу в додатковий пальник. Іскрогасник конструктивно виконаний у вигляді герметичного стакана з наповнювачем тонкої мідної проволочки, яка забезпечує в аварійній ситуації гасіння полум'я в трубопроводі.

Система управління і контролю включається від головного рубильника 220 В, розташованого на силовому щиті, в якому вбудовані запобіжники, а сам він встановлений в приміщенні в якому розташована експериментальна установка. Всі силові блоки, у тому числі і пульт управління, мають індивідуальний захист від перевантаження і короткого замикання.

Конструкція установки «Екопір БЦП» (рис. 4.8 та 4.9) виконана в блочному варіанті складу: піролізного реактора, який заповнюється органічними відходами плунжерною системою з приводом від гідроциліндра з маслостанцією, багатоконтурної циркуляційної системи з примусовою системою повітряного



охолодження, вихідного конденсатора з водяним охолодженням, розподільчої ємності для рідкого палива та піролізного газу, запобіжного клапана з компенсаційною ємністю, лічильника піролізного газу, шнекової системи видалення твердого залишку.

Відмінною особливістю даної установки від попередніх є введення нових конструктивних елементів, які дозволять забезпечити надійне утворення і подальше відновлення технологічної пробки, утвореної подрібненими відходами в процесі їх порціонної подачі в їх розплав, які знаходяться в реакторі, і при цьому забезпечити максимальне видалення із них повітря.

Бункер завантаження змонтований на плунжерному пристрої, який містить платформу з закріпленням на ній корпусом, вихідний кінець якого виконано у вигляді зрізаного конуса, в корпусі розташований поршень у вигляді стакана, всередині якого встановлено гідроциліндр подвійної дії, один кінець його закріплено до внутрішньої поверхні дна поршня, а другий - до платформи. Особливістю є те, що зрізаний конус виконаний порожнистим і своїм більшим отвором з'єднаний з реактором [262].

Таке технічне виконання дозволяє забезпечити по - перше, вільне проходження подрібнених відходів по порожнині зрізаного конуса від меншого його отвору до більшого, а ущільнення відходів забезпечується за рахунок протидії стовпа розплавлених полімерів в реакторі і тиску всередині нього на технологічну пробку, яку створюють відходи, які проштовхуються в реактор. По-друге, та частина розплавлених полімерів, які складають технологічну пробку, щільно контактують з внутрішньою поверхнею зрізаного конуса, що виключає прорив токсичних парів ПГС, яка концентрується в верхній частині реактора, що забезпечує екологічну безпеку при роботі обладнання. Крім того, при зупинці реактора і його охолодженні розплавлений полімер затвердіє за рахунок охолодження водяною сорочкою, що забезпечить надійну пробку, а при повторному включенні реактора поршень за допомогою гідроциліндра зірве указану пробку і вільно просуне її у реактор разом з новою порцією відходів.

Водяна сорочка виконана на  $2/3$  довжини зрізаного конуса, що визначено

експериментально, при зменшенні її з урахуванням низької теплопровідності подрібнених і розплавлених полімерів, ефективність охолодження різко падає, визначена довжина водяної сорочки сприяє інтенсивному охолодженню розплавленого полімеру всередині зрізаного конуса як в процесі роботи реактора, так і в момент його виключення, що виключає прорив розплаву полімерів, в тому числі і токсичних парів ПГС. Зі сторони меншого отвору з діаметрально протилежних сторін вмонтовані плоскі теплообмінники, які розташовані повздовж зрізаного конуса і виступають всередину нього, при цьому теплообмінники установлені в тепловому контакті з зовнішньою боковою поверхнею корпуса зрізаного конуса, який охолоджується водяною сорочкою.

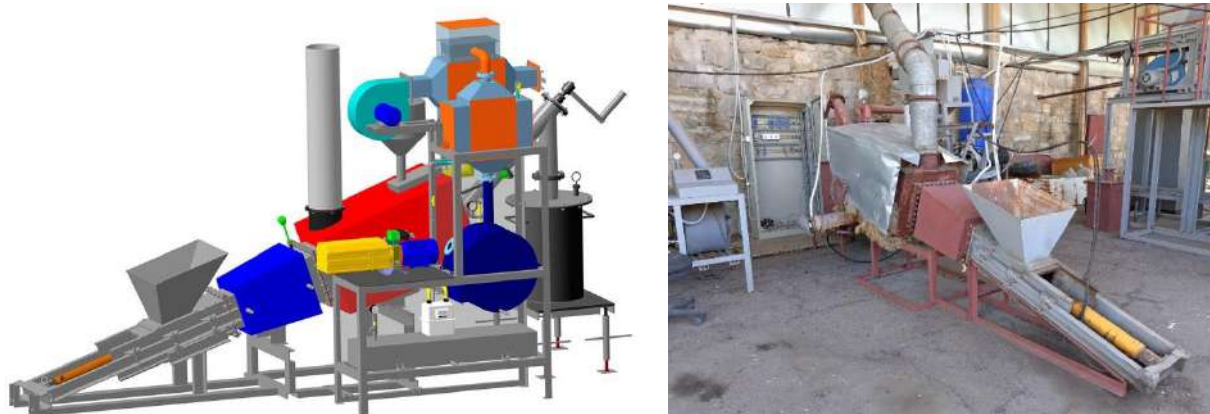


Рисунок 4.8 - Експериментальна установка Екопір БЦП та зображення 3Д моделі

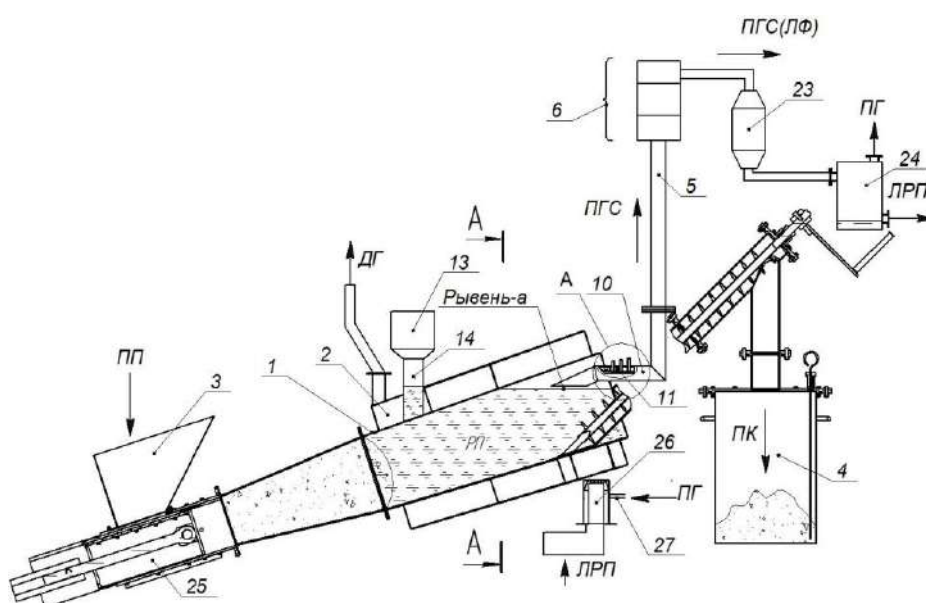


Рисунок 4.9 - Повздовжній перетин реактора установки «Екопір БЦП»: 1 – реактор піролізу; 2 - система зовнішнього обігріву; 3 - бункери для завантаження та розвантаження 4; 5 - патрубок для відведення парогазової суміші із реактора; 6 -

багатоконтурна циркуляційна система; 22 – вентилятор середнього контуру, який забезпечує повітряне охолодження; 23 - вихідний конденсатор; 24 - розподільча ємністю; 25 - плунжерна системи загрузки; 26 - топковий пристрій з додатковим пальником 27 для спалювання піролізного газу

Установка для безперервного багатоконтурного циркуляційного піролізу подрібнених органічних відходів містить реактор піролізу 1 з системою зовнішнього обігріву 2, бункери для завантаження 3 та розвантаження 4 реактору 1, патрубков для відведення парогазової суміші 5 із реактора, багатоконтурну циркуляційну систему 6, трубопровід для повернення у реактор важкої рідкої фракції 7. Торці 8 і 9 відповідно патрубка 5 і трубопроводу 7, які установлені в реакторі 1 виконані паралельно поверхні розплаву і розташовані один відносно другого на різних рівнях, відповідно. БЦС 6 складається із трьох контурів 19, 20, 21. Середній контур 20 постачений вентилятором 22, який забезпечує повітряне охолодження (П) ПГС, а контур 21 оснащений водяним охолодженням (ВО<sub>2</sub>). Циркуляційна система 6 постачена вихідним конденсатором 23 з водяним охолодженням ВО<sub>1</sub> і розподільчою ємністю 24. Установка включає плунжерну систему завантаження 25 подрібнених полімерів в реактор 1 і топковий пристрій 26 з додатковим пальником 27 для спалювання піролізного газу.

Безперервні установки мають однаковий принцип дії устаткування: Заповнюють реактор органічними відходами, в тому числі і полімерними відходами, за рахунок плунжерної системи, яка створює технологічну герметичну пробку із сировини, яка подається в реактор. Після заповнення підпалюють пальник скрапленого газу. При роботі пальника гарячі димові гази нагрівають корпус реактора, а далі через димохід виходять в навколишнє середовище. Нагрів реактора здійснюється за допомогою продуктів згоряння горючого газу пропану на головному пальнику, який розташований під реактором. Продукти згоряння проходять через газохід, що розташований навколо реактору, рухаючись зигзагоподібно, та здійснюють нагрів корпусу реактора до температури 450-600 °С. Для зниження витрат теплоти димових газів в навколишнє середовище та забезпечення безпечної температури

поверхні установки 55 °С, використовується насипний керамзит з гранулами товщиною 10 мм та мінеральна вата, товщиною 50 мм, які розташовані навколо димоходу.

Відповідно в середині реактора температура підвищується до 500 – 600°С. При даній температурі всі органічні відходи починають розкладатися з утворенням парогазової суміші (ПГС), температура якої досягає 450°С. При цьому в реакторі збільшується тиск, за рахунок його ПГС піднімається в блок трьох контурної циркуляційної системи.

ПГС утворена в реакторі подається послідовно на кожен контур, які конструктивно зв'язані між собою. Контур з'єднаний з верхньою частиною реактора двома трубками діаметром 60 мм, одна з трубок забезпечує вихід ПГС, а друга – повернення рідкої важкої фракції назад у реактор. Перший контур представляє собою камеру, яка охолоджується за рахунок природної конвекції повітря та являється з'єднувальним елементом між реактором та другим контуром. В першому контурі температура ПГС знижується до 350°С, всі важкі фракції з температурою конденсації вище 350°С конденсуються і у вигляді рідкої фракції самостійно стікають назад у реактор. Оскільки в нижній частині першого контуру розташовані два газопроводи, то це забезпечує розділення потоків ПГС яка піднімається в циркуляційну систему по одному газопроводу, а рідкі фракції які відповідно опускаються назад у реактор по другому газопроводу. Далі та частина ПГС, яка залишилася після конденсації в першому контурі надходить в другий контур циркуляційної системи, який виконано у вигляді трубчатого теплообмінника з системою повітряного охолодження вентилятором. Другий контур представляє собою теплообмінник, конструктивно виконаний у вигляді трубного пучка (326×320 мм), який по торцям зафіксований в трубних дошках (326×220 мм, має 78 отворів діаметром 20 мм). Трубний пучок з зовнішньої сторони примусово охолоджується потоком повітря. При проходженні ПГС через теплообмінник другого контуру, температура її знижується до 250°С, при цьому всі важкі фракції з температурою конденсації вище 250°С конденсуються і у вигляді рідкої фракції також самостійно стікають назад у реактор. У верхній частині другого контуру розташований третій

контур. Та частина ПГС, яка залишилася після конденсації надходить в третій контур циркуляційної системи, який має камеру водяного охолодження, що забезпечує зниження температури ПГС до 150°C, що викликає конденсацію чергової порції важких фракцій з температурою конденсації вище 150°C, внаслідок чого важка рідка фракція також самостійно стікає назад у реактор. Третій контур конструктивно виконаний у вигляді герметичної ємності з внутрішнім оребренням, та має у верхній частині патрубков відведення легкої фракції ПГС у вихідний конденсатор. У верхній частині третього контуру розташована камера з водяним охолодженням, яка знаходиться в тепловому контакті з внутрішнім оребренням, яке збільшує площу поверхні теплового контакту ПГС з охолоджувальною поверхнею перегородки.

Фактором закінчення процесу піролізу і відповідно закінчення процесу повного розкладання органічних відходів є припинення горіння піролізного газу на додатковому пальнику. Після чого, відключають установку від електроживлення до повного охолодження реактора. Потім відкривають кришку реактора, очищають його від залишків вуглецю, що залишився після розкладання органіки, і висипають їх в окрему ємність, потім процес повторюють.

Пульт керування містить комутаційну апаратуру для управління масло станцією для роботи гідроциліндра безперервної подачі сировини в реактор та індикацію температури в наступних точках:

Прилади виміру температури за допомогою герметичних термопар установлених у заданих місцях:

К1 – Термопара для виміру температури димових газів на вході в реактор.

К2 – Термопара для виміру температури ПГС на вході в перший контур.

К3 – Термопара для виміру температури важкої рідкої фракції на виході з циркуляційної системи 4.

К 4 – Термопара для виміру температури ПГС на вході в другий контур.

К 5 – Термопара для виміру температури ПГС на вході в третій контур.

К6 – Термопара для виміру температури ПГС на вході із третього контуру.

К7 – Термопара для виміру температури на виході димових газів із реактора.

## 4.2 Дослідження технологічних параметрів екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів

### 4.2.1 Визначення характеристик теплових потоків навколо реактора

Для дослідження ефективності нагріву реактора за допомогою продуктів згоряння, що проходять через газохід, раціональної витрати палива для здійснення процесу, необхідно визначити оцінку характеристик теплових потоків навколо реактора, які забезпечують його нагрів при згорянні пропану на головному пальнику та піролізного газу на допоміжному пальнику.

Реактор піролізної установки являє собою порожнистий металевий циліндр, повністю або частково заповнений відходами з неоднорідним їх розподіленням у просторі [245]. Спрощена геометрична модель реактора, як об'єкта керування за температурою нагріву, наведена на рис. 4.10 [94], де прийняті наступні позначення:  $x$  – продольна вісь циліндру;  $x_1$  – товщина нижньої плоскої стінки реактора;  $x_2$  – товщина шару відходів, завантажених у реактор;  $S$  – висота реактору;  $r$  – внутрішній радіус реактору;  $R$  – зовнішній радіус реактору. Нагрів реактора здійснюється за допомогою димових газів, що утворюються в результаті згоряння газоподібного палива. Принцип нагрівання реактора з використанням газового пальника ілюструється схемою, представленою на рисунку 4.11, де позначено: 1 – газовий пальник, призначений для нагріву реактора; 2 – бокова циліндрична стінка реактора; 3 – кожух системи нагріву реактора; 4 – верхня кришка реактора; 5 – місце для завантаження полімерних відходів в реактор; 6 – труба для виходу димових газів; 7 – перегородка кожуха для утворення спіралеподібного шляху руху димових газів; 8 – нижня плоска стінка реактора.

Для комп'ютерного моделювання теплових потоків на основі конструкторської документації була розроблена робоча розрахункова сітка реактору з газоходом (рис. 4.12), яка складається з 550 тис. тетраєдровидних елементів [208]. Початкова температура продуктів згоряння прийнята 800 °С, а максимальна витрата складала 12 м<sup>3</sup>/год.

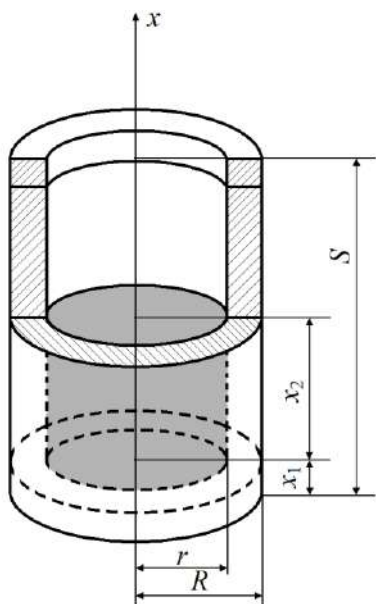


Рисунок 4.10 - Спрощена геометрична модель реактора

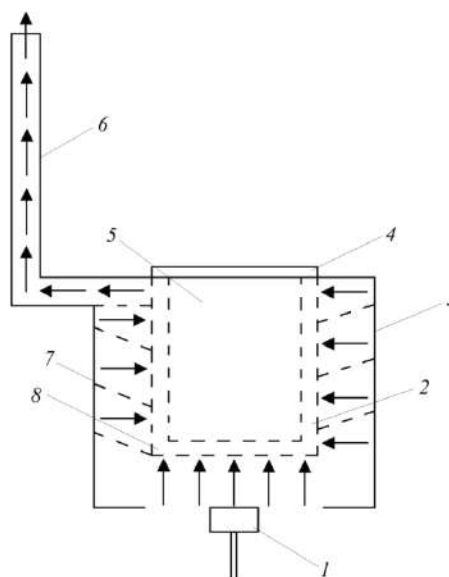


Рисунок 4.11 - Система нагріву реактора

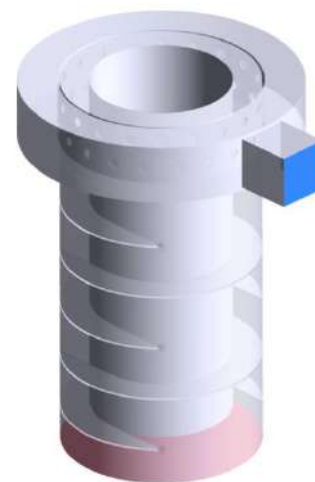


Рисунок 4.12 - Розрахункова сітка реактора з газоходом

Для розрахунку моделі задаємо початкові та граничні умови:

Об'єм реактора складає  $V_p = 14 \text{ л} = 0,014 \text{ м}^3$ . Насипна вага відходів складає  $\rho_v = 570 \text{ кг/м}^3$  (що відповідає спресованому стану полімерних відходів). Тоді маса відходів, які завантажуються в реактор  $m_v = 7,98 \text{ кг}$ .

Питома енергія для розкладання усередненого складу відходів в реакторі складає:  $e_{\text{розкл.}} = 4,6057 \text{ МДж/кг}$ . Енергія, необхідна для розкладання відходів масою  $m_v$ :  $E_{\text{розкл.}} = e_{\text{розкл.}} \times m_v = 36,7535 \text{ МДж}$ .

При максимальній тепловій потужності головного пальника 25 кВт експериментально було отримано, що час повного розкладання відходів в реакторі складає  $t_{\text{розкл.}} = 3 \text{ год.} = 10800 \text{ с}$  для досліджуваної суміші 2.

Кількість теплоти, що виділяється газовим пальником (ГП) при згорянні газоподібного палива, та потужність ГП обчислюються за формулами

$$Q_{\text{п}} = VQ_{\text{н}}^{\text{п}} \quad \text{та} \quad P_{\text{п}} = \frac{dQ_{\text{п}}}{dt} = \frac{dV}{dt} Q_{\text{н}}^{\text{п}} = BQ_{\text{н}}^{\text{п}},$$

де  $V$  – об'єм газоподібного палива,  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  – нижча питома теплота згоряння палива,  $B$  – об'ємна витрата газоподібного палива [148].

Тепловий потік  $P$ , що йде на нагрів реактора, обчислюється за формулою

$$P = P_{\Pi} - \sum P_{\text{в}} = P_{\Pi} - (P_{\text{вг}} + P_{\text{нзп}}) = P_{\Pi} - (B_{\text{вг}} c_{\text{вг}} t_{\text{вг}} + B_{\text{нзп}} Q_{\text{н}}^{\text{р}}),$$

де  $\sum P_{\text{в}}$  – сумарні втрати теплової потужності, які в основному складаються з втрат, що забирають відхідні димові гази  $P_{\text{вг}}$ , та втрат внаслідок хімічної неповноти згоряння палива  $P_{\text{нзп}}$ ;  $B_{\text{вг}}$ ,  $c_{\text{вг}}$ ,  $t_{\text{вг}}$  – витрати, питома теплоємність та температура відхідних димових газів, відповідно;  $B_{\text{нзп}}$  – витрати незгорілого газоподібного палива [148].

Теплообмін реактора та димових газів, що проходять по системі нагріву (рис. 2), здійснюється в основному за рахунок конвекції. Кількість теплоти  $Q$ , переданої конвективною тепловіддачею, розраховується за формулою, що визначається законом Ньютона – Ріхмана [76]. Значення теплового потоку та питомого теплового потоку, що передається поверхні реактора від димових газів за допомогою конвекції, розраховуються за допомогою формул

$$P = \frac{dQ}{dt} = \alpha(T_{\text{г}} - T_{\text{п}})F \quad \text{та} \quad q = \frac{P}{F} = \alpha(T_{\text{г}} - T_{\text{п}}).$$

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  обчислюється [148] на основі критерія Нуссельта. Оскільки в системі нагріву реактора димові гази проходять між стінкою реактора та кожухом (рис. 4.11), то слід розглядати конвективний теплообмін у замкненому просторі. Процес конвективної тепловіддачі у замкненому просторі розглядають як передачу тепла теплопровідністю, вводячи поняття еквівалентного коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{\text{ек}}$ , який визначається експериментальним шляхом [148].

Значення питомого теплового потоку визначається згідно з рівнянням:

$$q = \frac{\lambda_{\text{ек}}}{\delta} \Delta T,$$

де  $\delta$  – товщина шару, що приймає участь у теплообміні;  $\Delta T$  – різниця температур.

Процес нагріву реактора може бути представлений як процес нагріву масивного тіла [93]. В твердих тілах передача тепла відбувається за допомогою теплопровідності. Питомий тепловий потік при передачі енергії теплопровідністю через плоску та циліндричну стінки згідно [272] обчислюється за формулами:



$$q = \frac{\lambda}{S}(T_1 - T_2) \quad \text{та} \quad q = \frac{2\pi\lambda(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_1}{r_2}},$$

де  $S$  – товщина плоскої стінки;  $r_2$  та  $r_1$  – зовнішній та внутрішній радіуси циліндричної стінки;  $T_1$  та  $T_2$  – значення температур на зовнішній та внутрішній поверхнях стінок.

Оскільки температура в різних точках реактора матиме суттєво різні значення, то формування точної математичної моделі реактора, як об'єкта керування температурою, може бути реалізовано шляхом представлення його у вигляді об'єкта з розподіленими параметрами [272]. При цьому подальша формалізація об'єкта здійснюється на базі рівнянь з частинними похідними для розповсюдження тепла в твердих тілах. Аналітична залежність зміни температури і кількості переданого тепла у часі для будь-якої точки тіла може бути отримана на основі розв'язання основного диференціального рівняння теплопровідності Фур'є – Кірхгофа.

Для отримання однозначного рішення рівняння теплопровідності його необхідно розв'язувати сумісно з рівняннями крайових умов [76], які складаються з: а) початкових умов; б) поверхневих або граничних умов.

Граничні умови можуть бути представлені (задані) наступними способами та за даними таблиці 4.1:

1) поверхневі умови першого роду, коли розподіл температур на поверхні тіла заданий як функція часу  $T_{\text{пов}} = f_1(t)$ ;

2) поверхневі умови другого роду, коли заданий тепловий потік  $q = f_2(t)$ ;

3) поверхневі умови третього роду, коли заданий закон зміни температури оточуючого середовища  $T_{\text{п}} = f_3(t)$  і закон теплообміну між поверхнею тіла і оточуючим середовищем;

4) поверхневі умови четвертого роду характеризують умови теплообміну тіла з оточуючим середовищем за законом теплопровідності.

Таблиця 4.1 - Значення граничних умов

Найменування	Показник
Вхід газоходу: Масові витрати, кг/с	$(0,6...3,4) \cdot 10^{-3}$
Температура, °C	900
Вихід газоходу: Тиск за газоходом, Па	-60
Стінка реактора: Тепловий потік, кВт	6,8

Рішення рівняння теплопровідності для пластини нескінченної довжини і ширини та для циліндра нескінченної довжини [76] при поверхневих умовах другого роду, тобто при заданому тепловому потоку, який приймається за сталу величину ( $q_x = \text{const}$ ;  $T_{t=0} = 0$ ), мають, відповідно, наступний вигляд

$$T = \frac{qS}{2\lambda} \left[ \frac{2at}{S^2} + \left( \frac{x}{S} \right)^2 - \frac{1}{3} + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{l+1}}{\varepsilon_l^2} \cos \varepsilon_l \frac{x}{S} \exp \left( -\varepsilon_l^2 \frac{at}{S^2} \right) \right],$$

$$T = \frac{qR}{2\lambda} \left[ \frac{4at}{R^2} + \left( \frac{r}{R} \right)^2 - \frac{1}{2} \right],$$

де  $S$  – товщина пластини;  $x$  – змінна координата по товщині пластини (на зовнішній поверхні пластини  $x = S$ , на внутрішній –  $x = 0$ );  $\varepsilon_l$  – поправочний коефіцієнт,  $\varepsilon_l = \pi l$  ( $l = 1, 2, 3, \dots$ );  $l$  – нормальний ряд чисел;  $R$  – радіус циліндра;  $r$  – поточний радіус точки, для якої визначається температура (на зовнішній поверхні циліндра  $r = R$ , на повздовжній вісі циліндра  $r = 0$ ).

Підхід до формування математичних моделей на базі вищенаведених рівнянь забезпечує високу адекватність такого класу моделей, однак на практиці для синтезу математичної моделі реактора необхідно обов'язково враховувати геометричну форму реактора та напрямок теплових потоків, що його нагрівають [75, 81, 158].

Для розв'язання цієї задачі запропоновано представити геометричну форму реактора як сукупність більш простих геометричних форм, для яких існують частинні рішення при заданих граничних умовах. При розрахунку температурного режиму реактора за допомогою даного підходу необхідно ввести деякі припущення:

- 1) нагрів реактора відбувається тепловим потоком димових газів знизу та з

боків, при цьому тепловий потік рівномірно розподілений по площі поверхні, що нагрівається, тобто значення питомого теплового потоку є однаковим у всіх точках площі нагріву;

2) реактор можна умовно розділити на 4 основні компоненти: нижня плоска стінка, бокова циліндрична стінка, суцільний циліндр, утворений з відходів, завантажених до реактору, верхня плоска кришка;

3) процес нагріву нижньої стінки реактора розглядається як процес нагріву пластини з товщиною  $S$  та площею, обмеженою окружністю з радіусом  $R$ ;

4) процес нагріву бокової стінки реактора розглядається як процес нагріву циліндричної стінки з зовнішнім та внутрішнім радіусами  $R, r$ , відповідно;

5) процес нагріву відходів розглядається як процес одночасного нагріву пластини та суцільного циліндру від нижньої та бокової стінок реактора;

6) процес нагріву верхньої кришки реактора розглядається як нагрів пластини від відходів та поперечного перетину бокової стінки реактора;

7) розрахунок процесу нагріву відходів здійснюється для точки, що лежить на повздовжній вісі циліндра, тобто для точки з координатою  $r = 0$ .

Виходячи з теоретичних розрахунків теплопереносу від гарячих газів до стінки реактора, в основі яких лежить рівняння збереження енергії, при комп'ютерному моделюванні застосовувалась модель ламінарного потоку в газозоді. Математична модель температурного режиму реактора складається з наступних рівнянь:

$$q_{1x} = q_{1inx} - q_{1outx} = \frac{\lambda_1}{S_1} (T_{11} - T_{12}), \quad q_{2r} = q_{2inr} - q_{2outr} = \frac{2\pi\lambda_2 (T_{21} - T_{22})}{\ln(R_2 / r_2)},$$

$$q_{3x} = q_{3inx} - q_{3outx} = \frac{\lambda_3}{S_3} (T_{12} - T_{32}), \quad q_{3r} = q_{3inr} = \frac{2\pi\lambda_3 (T_{22} - T_{32})}{\ln(R_3 / r_3)},$$

$$q_{4x} = q_{4inx} - q_{4outx} = \frac{\lambda_4}{S_4} (T_{32} - T_{42}),$$

$$T_{11} = \frac{q_{1x} S_1}{2\lambda_1} \left[ \frac{2a_1 t}{S_1^2} + \frac{2}{3} + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{l+1}}{\varepsilon_l^2} \cos \varepsilon_l \exp\left(-\varepsilon_l^2 \frac{a_1 t}{S_1^2}\right) \right], \quad T_{12} = \frac{q_{1x} S_1}{2\lambda_1} \left[ \frac{2a_1 t}{S_1^2} - \frac{1}{3} \right],$$

$$T_{21} = \frac{q_{2r} R_2}{2\lambda_2} \left[ \frac{4a_2 t}{R_2^2} + \frac{1}{2} \right],$$

$$T_{22} = \frac{q_{2r} R_2}{2\lambda_2} \left[ \frac{4a_2 t}{R_2^2} + \left( \frac{r_2}{R_2} \right)^2 - \frac{1}{2} \right],$$

$$T_{32} = \frac{q_{3x} S_3}{2\lambda_3} \left[ \frac{2a_3 t}{S_3^2} - \frac{1}{3} \right] + \frac{q_{3r} R}{2\lambda_3} \left[ \frac{4a_3 t}{R_3^2} + \frac{1}{2} \right],$$

$$T_{42} = \frac{q_{4x} S_4}{2\lambda_4} \left[ \frac{2a_4 t}{S_4^2} - \frac{1}{3} \right],$$

де  $q_{1x}$ ,  $q_{2r}$ ,  $q_{3x}$ ,  $q_{3r}$ ,  $q_{4x}$  – значення питомих теплових потоків, що йдуть на нагрів відповідних частин моделі;  $q_{in}$  та  $q_{out}$  – значення підведених та відведених питомих теплових потоків до різних компонентів моделі;  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{21}$ ,  $T_{22}$ ,  $T_{32}$ ,  $T_{42}$  – поточні значення температури зовнішніх та внутрішніх поверхонь відповідних компонентів моделі;  $q_{4outx}$  – значення питомого теплового потоку, що відводиться від верхньої кришки реактора до оточуючого середовища за допомогою конвекції і може бути розрахований також за представленою формулою; при цьому  $q_{1inx} = q_{2inr} = q$ ;  $q_{3inx} = q_{1outx}$ ;  $q_{3inr} = q_{2outx}$ ;  $q_{4inx} = q_{3outx}$ .

За допомогою даних рівнянь проведено комп'ютерне моделювання температурного режиму реактора експериментальної установки ЕУ БЦП-14.

Моделювання проводилося при сталій нагрівальній потужності газового пальника, при сталому параметрі температуропровідності та теплопровідності відходів  $\alpha_3$  та  $\lambda_3$ , при температурі оточуючого середовища  $T = 0^\circ\text{C}$  та при відсутності зовнішніх та внутрішніх збурювальних впливів.

Тепловий потік крізь стінку реактора складає:

$$Q_p = E_{розкл} / t_{розкл} = 36,7535 \times 10^6 / 10800 = 3,4031 \text{ кВт.}$$

Згідно геометричних розмірів реактора площа поверхні теплообміну його складає  $S_p = \pi \times D_p \times H_p = 3,14 \times 0,194 \times 0,48 = 0,2926 \text{ м}^2$ .

Звідси питома тепла напруженість поверхні теплообміну реактора

$$q_p = \frac{Q_p}{S_p} = \frac{6,8062}{0,2926} = 23,2611 \text{ кВт/м}^2.$$

В результаті розрахунків були отримані зображення руху газів по газоходу (рис. 4.13-4.15, табл. 4.2). З рисунку 4.13 видно, що температура газів поступово зменшується по мірі віддалення від пальника на  $400^\circ\text{C}$ , що треба враховувати при визначенні температури на головному пальнику. Рухаючись зигзагоподібно

продукти згоряння здійснюють нагрів корпусу реактора до температури до  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  при температурі димових газів від пальника більш ніж  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

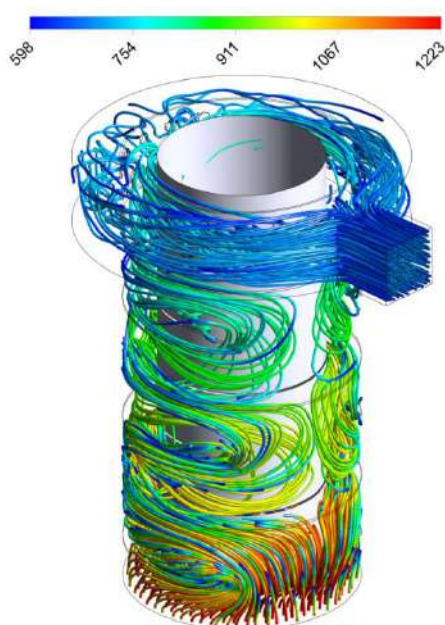


Рисунок 4.13 - Лінії потоку продуктів згоряння в газоході с показниками температури газів

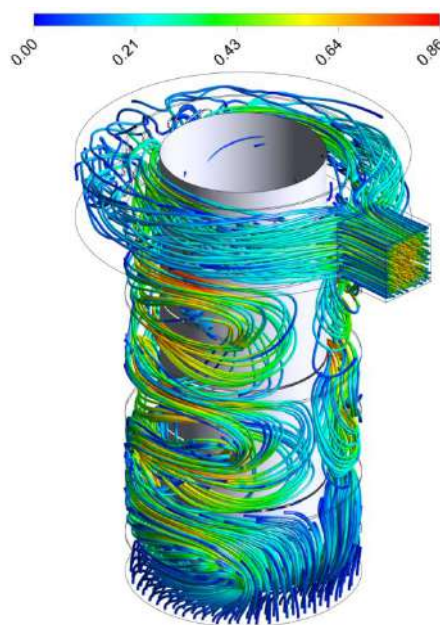


Рисунок 4.14 - Лінії потоку продуктів згоряння в газоході с показниками швидкості газів

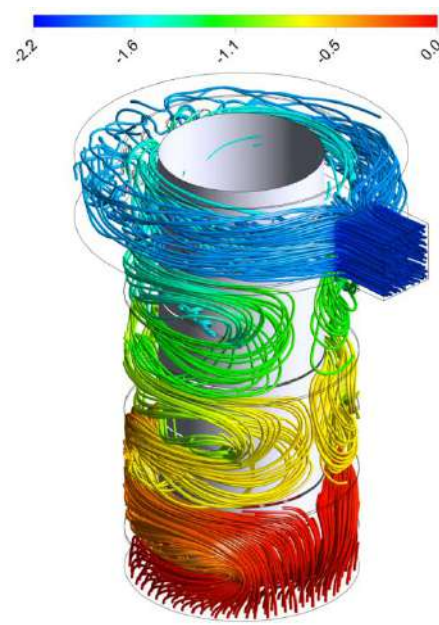


Рисунок 4.15 - Лінії потоку продуктів згоряння в газоході с показниками втрати тиску

На рисунку 4.14 представлена швидкість руху газів, що збільшується до  $0,8\text{ м/с}$  зі зменшенням перерізу газоходу та не перевищує допустимих меж. Для оцінки інтенсивності обігріву реактора димовими газами також здійснене комп'ютерне моделювання руху продуктів згоряння в газоході с показниками втрати тиску. З рисунку 4.15 видно, що втрати тиску збільшуються, але не перевищують допустиму норму, яка задається при розрахунках у верхній частині газоходу в зв'язку з підвищенням щільності газу, яка виникає через звуження газоходу [208].

Результати моделювання у вигляді графіків перехідних процесів нагріву точок на дні реактору та на поверхні відходів (біля верхньої кришки) наведені на рисунках 4.16 – 4.19 [94].

Таблиця 4.2 - Дані аналізу потоку газу з показниками температури, тиску та швидкості

Найменування	Показники					
Максимальна витрата газу, $V_{газ}$ , м <sup>3</sup> /час	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Масова витрата продуктів згоряння, $G_{п.з.}$ , кг/с	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,27 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
Час процесу, $T_{розкл.}$ , хв	510	278	180	135	109	90
Питома теплова напруженість поверхні теплообміну реактора, $q_p$ , кВт/м <sup>2</sup>	4,11	7,53	11,63	15,51	19,21	23,26
Витрата тиску в реакторі, $\Delta P$ , Па	1,03	1,51	2,12	2,92	4,07	5,78

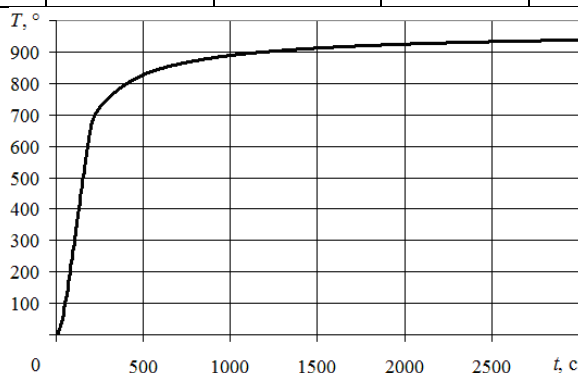


Рисунок 4.16 - Графік зміни температури розрахункової точки на дні реактора під час нагріву

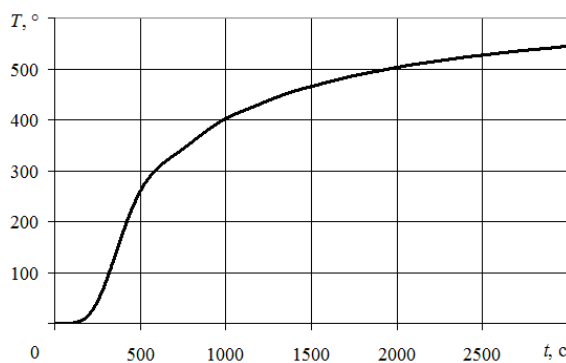


Рисунок 4.17 - Графік зміни температури розрахункової точки на поверхні циліндричного тіла, утвореного з відходів, біля верхньої кришки реактора під час нагріву

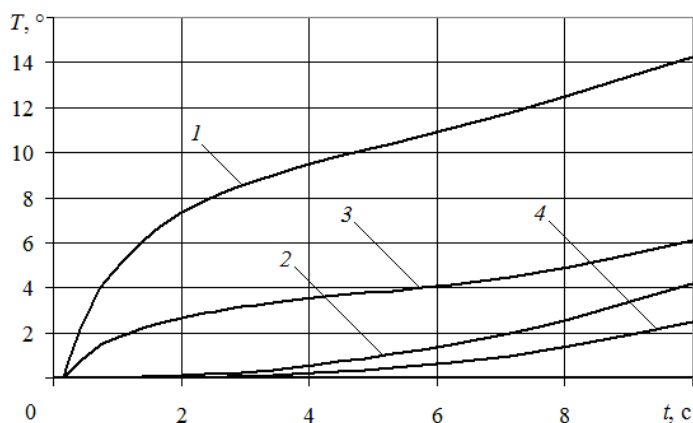


Рисунок 4.18 - Графіки зміни температури реактора під час нагріву: 1 – зовнішньої сторони нижньої стінки; 2 – внутрішньої сторони нижньої стінки; 3 – зовнішньої сторони бокової стінки; 4 – внутрішньої сторони бокової стінки

Для аналізу часових затримок (запізнення) на рисунку 4.18 (при  $t < 10$  c) та рисунку 4.19 (при  $t < 80$  c) деталізовано початкові етапи перехідних процесів нагріву різних точок реактора.

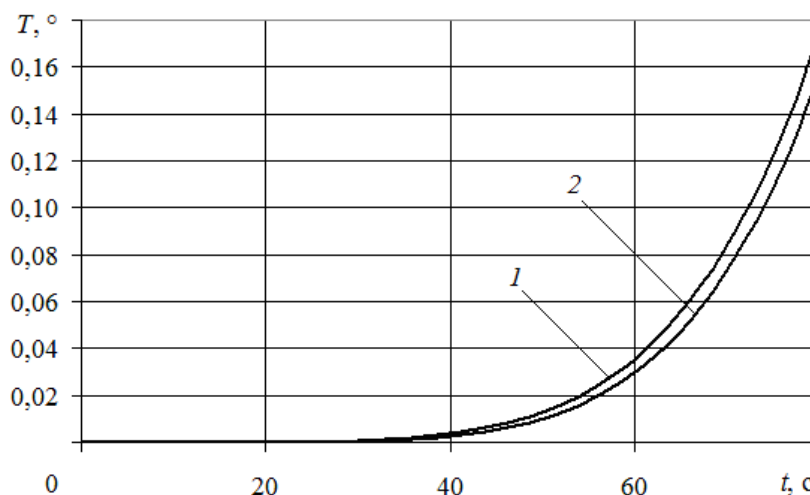


Рисунок 4.19 - Графіки зміни температури реактора під час нагріву: 1 – розрахункової точки циліндричного тіла, утвореного з відходів, біля верхньої кришки реактора; 2 – зовнішньої сторони верхньої кришки

Аналіз результатів моделювання (рис. 4.16 – 4.19) показує, що характеристики перехідних процесів нагріву у різних точках реактора суттєво відрізняються між собою, що підтверджує доцільність розглядання реактора циркуляційного піролізу як об'єкта керування з розподіленими параметрами при його моделюванні.

Перехідні процеси нагріву усіх розрахункових точок реактора мають аперіодичний характер та значну інерційність. Час виходу температурних процесів на усталений режим складає: для зовнішньої сторони нижньої стінки – 2010 с, для внутрішньої сторони нижньої стінки (розрахункової точки на дні реактора) – 2032 с, для зовнішньої сторони бокової стінки – 2018 с, для внутрішньої сторони бокової стінки – 2036 с, для розрахункової точки циліндричного тіла, утвореного з відходів, біля верхньої кришки реактора – 3000 с, для зовнішньої сторони верхньої кришки – 3020 с.

Час запізнення складає: для зовнішньої сторони нижньої стінки – 0,2 с, для внутрішньої сторони нижньої стінки – 2 с, для зовнішньої сторони бокової стінки – 0,2 с, для внутрішньої сторони бокової стінки – 2,5 с, для розрахункової точки циліндричного тіла, утвореного з відходів, біля верхньої кришки реактора – 30 с, для зовнішньої сторони верхньої кришки – 32 с. Зокрема, в усталеному режимі температура нагріву відходів, завантажених до реактора, в його нижній та верхній точках відрізняється приблизно на 400°C.

Вищенаведена математична модель може бути використана при розробці та дослідженні ефективності системи автоматичного керування температурним режимом реактора установки циркуляційного піролізу.

4.2.2. Визначення температурних та часових параметрів здійснення стабільного режиму роботи установки екологічно прийняттого піролізного процесу

За рахунок правильного підбору робочого режиму [198] можливо направити реакцію всередині реактора в бік максимального виходу газоподібного або рідкого продукту, які в подальшому можуть використовуватися як корисні речовини.

В ході дослідження впливу температур на склад вихідних продуктів найважливішою вимірюваною величиною є температура парогазової суміші (ПГС) на виході з третього контуру в конденсатор (К6), яка визначає вихід реактора на стаціонарний режим. Регулювати температуру контурів можливо за допомогою засувки в залежності від поставленої мети проведення процесу циркуляційного



піролізу. На рисунку 4.20 показана зміна температури при закритті дросельної заслінки. З графіку видно, що при закритті засувки температура поступово збільшується. Детальніше вплив засувки був експериментально досліджений у випробуванні 2 (рис. 4.22).

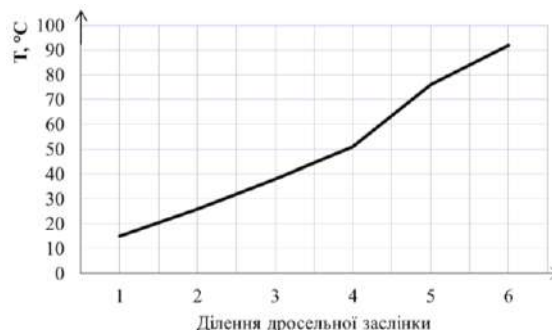


Рисунок 4.20 - Графік залежності температурних режимів при регулюванні температури засувкою

Для визначення режимів процесу циркуляційного піролізу були проведені 12 випробувань, в ході яких в реактор завантажувалися різні види відходів. Оскільки коефіцієнт завантаження реактора дотримувався однаковим приблизно 0,9, то вага різної сировини, що завантажувалась в реактор реактора, була різною.

Були також зафіксовані температура димових газів, які входять в димохід реактора 830°C; температура розплавлених полімерів у корзині всередині реактора складала 480°C; температура ПГС всередині реактора з корзиною – 460°C.

У випробуванні №2 експериментально був досліджений вплив засувки на зміну температури на всіх вимірюваних точках. На рисунку 4.21 зображений графік зміни температур на контурах при закритті-відкритті засувки. На початку проведення випробування засувка була відкрита, спостерігалось поступове збільшення температури в процесі нагрівання реактора. З графіку видно, що при закритті засувки на 65 хв. проведення процесу відбулося різке збільшення температури на всіх вимірюваних точках K4 на 84,2°C, K5 на 39°C, K6 на 78,3°C. При відкритті засувки на 1 ділення спостерігалось поступове зменшення температури приблизно на 0,5°C/хв.

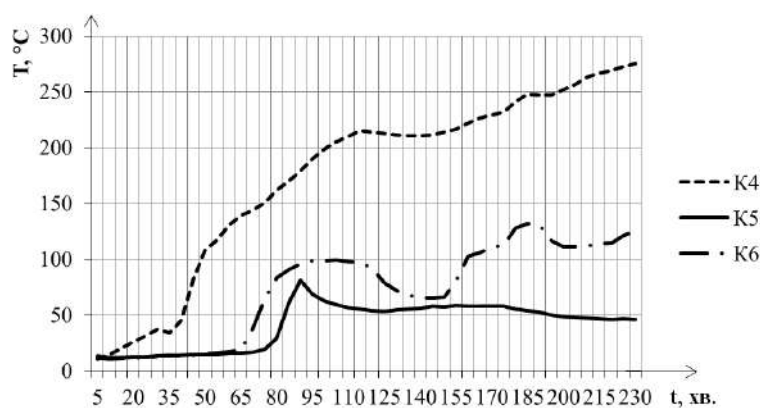


Рисунок 4.21 - Дослідження залежності тривалості процесу при регулюванні температурних режимів

При проведенні досліджень, де в реактор була завантажена досліджувана суміш 5 (шприці одноразові), загальна кількість отриманого піролізного газу складав 19% мас. Стік рідини в розподільну ємність відбувається при збільшенні температури ПГС на виході з третього контуру (K6) до 80-100°C, таким чином для виходу реактору на режим температура на третьому контурі повинна досягти 80°C (рис. 4.22). Загальний обсяг отриманої рідкої фракції - 79% мас. (табл. 4.3).

Отриманий рідкий продукт мав прозора-жовтий колір та різкий запах бензинової фракції. З графіку видно, що температура почала різко збільшуватися на 60 хв. процесу та стабілізувалася на 77 хв. досягши температури 75°C. Це свідчить про вихід реактора на режим. Подальше збільшення температури відбувалося поступово. З графіку помітно, що температура на виході з третього контуру при переробці використаних одноразових медичних шприців встановила 130-135°C.

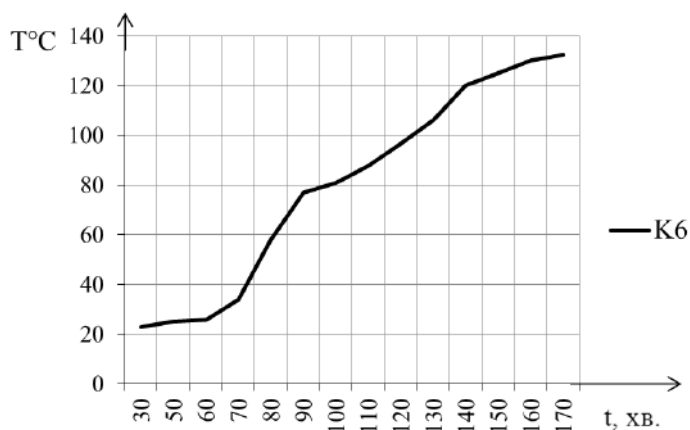


Рисунок 4.22 - Графік показання терморпарі третього контуру (випробування №3)

Таблиця 4.3 - Дані випробування

№ випробування	1	2	3
Загальна вага сировини, г	3100	3300	2900
Загальна тривалість процесу	3 год	4 год	2год 50хв.
Час виходу на режим реактора	1год 21 хв.	1год 25 хв.	1год 17 хв.
Загальний об'єм отриманих продуктів: Рідка фракція, г	2900	3000	2700
Газ, м <sup>3</sup>	0,304	0,309	0,285

В ході даних випробувань було виявлено, що тривалість процесу БЦП для переробки медичних шприців складає 3 год., подальше проведення процесу практично не впливає на кількісний склад кінцевих продуктів.

В ході випробування, при якому в реактор була завантажена досліджувана суміш 7, вихід на режим реактора був зафіксований через 125-151 хв. після початку процесу, що майже вдвічі довше ніж у попередній серії випробувань при переробці суміші 5. Це пояснюється зміною у властивостях поліетилену в результаті зшивання, а саме підвищення міцності і деформованості, зниження температури крихкості і збільшення стійкості до розтріскування, викликаних збільшенням вмісту прохідних ланцюгів, що сприяють дисипації напруг в аморфно-кристалічному полімері за рахунок підвищення сили зв'язку між кристалічними утвореннями. Початок плавлення зшитого полімеру зміщується в область більш високих температур. Графік збільшення температури ПГС легких фракцій на виході з третього контуру представлений на рисунку 4.23.

З графіку видно, що різке збільшення температури відбулося на 80 хвилині проведення процесу. Коливання температури К6 стабілізувалося на 125 хвилині, це вказує, що реактор вийшов на стабільний режим.

Дані випробувань по переробці відходів кабельного виробництва (досліджувана суміш 7) приведені в таблиці 4.4.

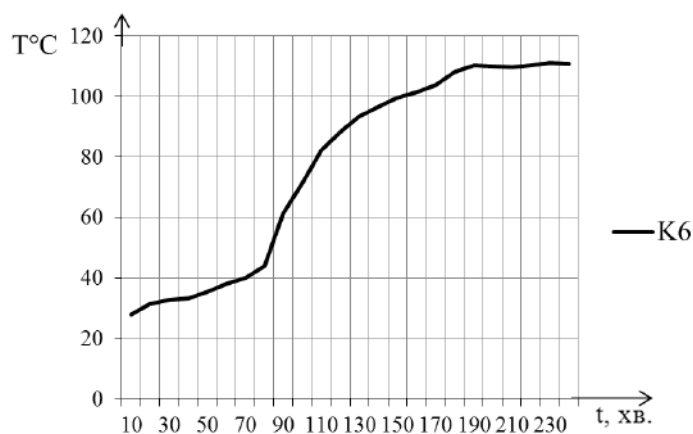


Рисунок 4.23 - Графік показань термопарі К6 випробування №4

Таблиця 4.4 - Данні випробування при переробці суміші 7

№ випробування	4	5	6
Загальна вага відходів, г	3800	4000	4300
Загальна тривалість процесу	4 год	4год 20 хв.	4год 50 хв.
Час виходу на режим реактора	2год 05 хв.	2год 12 хв.	2год 31 хв.
Загальний об'єм отриманих продуктів: Рідка фракція, г	3000	3200	3300
Газ, м <sup>3</sup>	0,369	0,382	0,398

Таким чином, з таблиці видно, що вихід на режим реактора був зафіксований 125-150 хвилин. Для досліджуваної суміші раціональна тривалість процесу встановлюється в межах 4 год. – 4 год. 20 хв., подальше проведення процесу незначно впливає на кількісний склад кінцевих продуктів. Загальний обсяг отриманого піролізного газу склав 21% мас.

Одержаний рідкий продукт темного кольору з різким запахом бензинової фракції в процентному співвідношенні дорівнював 71% мас. від загального об'єму отриманих продуктів.

Отже, збільшення у сировині відходів з вмістом ПЕ збільшує час утилізації на 25%, при чому кількість утвореного рідкого продукту збільшується на 7-9%.

Проводилися випробування, в ході яких в реактор завантажили подрібнені пляшки ПЕТФ (досліджувана суміш 4). Дані випробувань приведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Дані випробування при переробці суміші 4

№ випробування	7	8	9
Загальна вага відходів, г	3000	3200	3500
Загальна тривалість процесу	2год. 10 хв.	3 год. 10 хв.	3год. 50хв.
Час виходу на режим реактора	1год. 40хв.	1год. 47хв.	1год. 53хв.
Загальний об'єм отриманих продуктів: Рідка фракція, г	2800	3000	3300
Газ, м <sup>3</sup>	0,543	0,581	0,639

З таблиці помітно, що спостерігалось інтенсивне виділення піролізного газу, загальним обсягом 23% мас. від виходу всіх продуктів БЦП. Рідкого продукту було отримано 75%.

Одержане рідке паливо мало мутний темно-коричневий колір та різкий запах бензинової фракції. Це пояснюється наявністю в пляшках ПЕТФ забруднювачів, таких як волога, клей, барвники та ін., оскільки в основі даної продукції лежать вторинні полімери. В процесі переробки вторинний матеріал зазнає деяку втрату в'язкості, що викликано температурним та деформуєчим впливом в процесі пластикації полімеру. Також ймовірна присутність в ПЕТФ відходах ПВХ та ПЕ-домішок, що також впливає на характеристики вихідного продукту. Графік коливання температури на вимірюваній точці К6 при переробці представлений на рисунку 4.24.

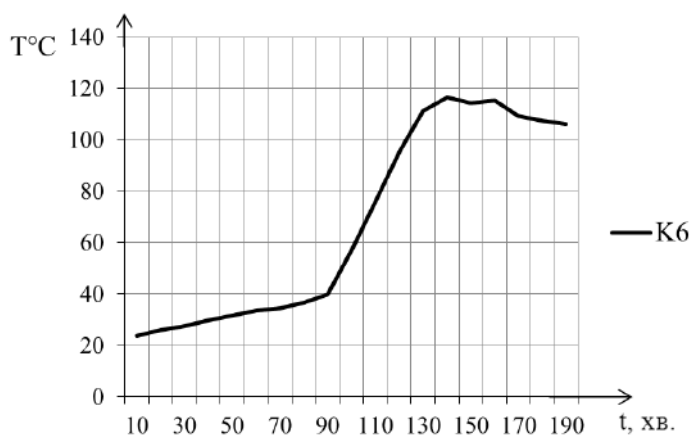


Рисунок 4.24 - Графік показання термопар К6 випробування №8

З графіку видно, що температура різко збільшувалася на 100-130 хвилині. Через 2 години від початку проведення процесу температура на виході з третього контуру стабілізувалася й встановилася 110-117°C. Отже, загальна тривалість переробки для досліджуваної суміші 4 коливається в межах 2 год. 50хв. – 3год.10хв.

Проводилися випробування, в ході яких в реактор було завантажено досліджувану суміш 8. Результати випробувань при циркуляційному піролізі пакувальної клейкої стрічки приведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Результати випробування при переробці пакувальної клейкої стрічки

№ випробування	10	11	12
Загальна вага відходів, г	2900	3200	3600
Загальна тривалість процесу	4 год.	4 год. 15 хв.	4 год. 30 хв.
Час виходу на режим реактора	2год. 15 хв.	2год. 19 хв.	2год. 20 хв.
Загальний об'єм отриманих продуктів: Рідка фракція, г	1900	2000	2200
Газ, м <sup>3</sup>	0,702	0,738	0,812

З таблиці 4.6 видно, що піролізного газу було отримано в процентному співвідношенні 25% мас. Одержане рідке паливо, що складало 68%, мало велику в'язкість, мутний темний колір. Це пояснюється специфічним складом клею, який є одним з основних компонентів клейкої стрічки та наявністю білої або бурої целюлози в складі втулки. Пакувальна клейка стрічка виробляється з двоосно-орієнтованого поліпропілену і клейового шару, на полотно наноситься клей, проходить сушильні вузли та намотується на втулку.

Графік коливання температури на вимірюваній точці К6 при переробці представлений на рисунку 4.25. Видно, що інтенсивне збільшення температури відбулося через 1 годину від початку процесу. Температура К6 стабілізувалася в межах 120-143°C на 135 хвилині проведення процесу. Виходу на стабільний режим реактора був зафіксований на 135-140 хв.

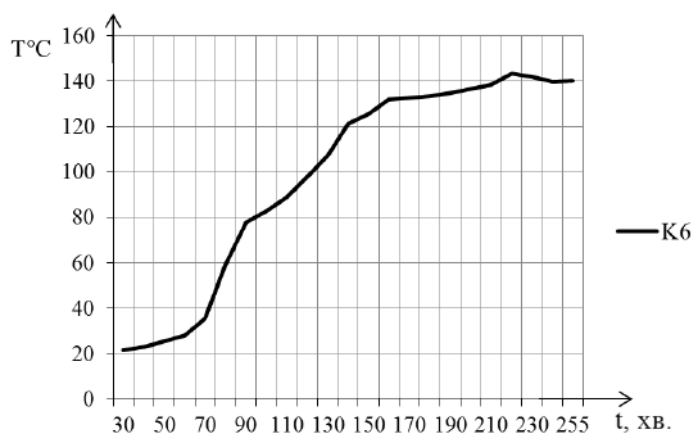


Рисунок 4.25 - Графік показання термопар К6 випробування №11

Отже в ході проведених випробувань було виявлено, що тривалість виходу на режим реактора залежить від складу сировини, складає 90-130 хв. Час збільшується до 40%, якщо у відходах збільшується кількість РЕ. Загальний час повного процесу деструкції складає 180-250 хв. для сумішей композитних матеріалів (суміші полімерних речовин). Найбільший вихід газу був зафіксований при переробці пакувальної клейкої стрічки (РР з домішками) та пляшок (РЕТ), найбільший вихід рідкого продукту і водночас найменший час переробки матеріалу 180-200 хв. – для медичних шприців (РР). Ці показники потрібно враховувати для економії паливних ресурсів для здійснення процесу деструкції та відпрацювання промислових режимів роботи обладнання [198].

#### 4.3 Визначення кінетичних показників термодеструкції твердих органічних відходів

При побудові моделі кінетичних показників найбільш ефективним є експериментально-аналітичний спосіб математичного моделювання кінетики деструкційних перетворень органічних відходів. Для експериментального визначення кінетичних характеристик термічного розкладання відходів було використано дані диференціального термогравіметричного аналізу (ТГА) циркуляційного піролізу [88], при якому реєструється зміна маси зразка в залежності від часу [307, 322].

Аналіз отриманих даних дає можливість розрахувати основні кінетичні та активаційні параметри процесу термодеструкції в реакторі циркуляційного піролізу,

визначати час утворення ПГС для розрахунків енергетичних показників обладнання.

За рівнянням Арреніуса, здійснюється обчислення енергії активації та передекспоненти, що базується на результатах дослідів при температурах 400 °С та 650 °С, що визначаються по краях температурного інтервалу проведення процесу. Значення середнього часу перебування в реакторі не впливає на значення констант швидкості, отриманих під час експерименту. В результаті проведеного експерименту визначено константи швидкості  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  для кожної стадії деструкції органічних відходів у реакторі циркуляційного піролізу з врахуванням повернення ПГС з контурів БЦС та встановлено загальний час проведення процесу для установок циклічної дії. Таким чином, методика розрахунку активаційних параметрів термічного розкладання ТОВ дозволяє вирішувати задачі прогнозування та оптимізації температурних умов проведення процесу. У поєднанні з аналізом продуктів піролізу цей метод дозволяє вивчати кінетику деструктивних процесів.

Експериментальні криві ТГА [201] та обчислені за допомогою моделі для компонентів відходів, наведені на рис. 4.26. Одночасно йдуть три різних процеси деструкції з швидкостями, що різко відрізняються одна від одної:  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$ . З аналізу встановлено, що швидкість термічної деструкції відходів різна, відповідно до стадій процесу піролізу [341]. Після швидкого виділення летких домішок і низькомолекулярних речовин втрачається 15 – 20 % маси початкової речовини відходів, починається стадія I деструкції, що характеризується швидкістю  $R_1$ , при чому втрачається 40 – 55 % маси відходів; при подальшій деструкції спостерігається II стадія зі швидкістю  $R_2$ , в результаті якої відбувається 60 – 80 % втрати маси, крива лінійно убуває, наближаючись до нуля. Точка, в якій крива швидкості перетинає вісь абсцис, характеризує кінцеву точку карбонізації твердого залишку при заданій температурі. Це найповільніша – третя стадія деструкції, в результаті якої залишок відходів (10 – 20 %) зазнає деструкції зі швидкістю  $R_3$  з утворенням твердого залишку.

Похибка отриманих дослідних та розрахункових даних не перевищує 8 %. В результаті визначено значення активаційних величин кінетичної моделі термічної деструкції відходів, які занесені до таблиці 4.7.



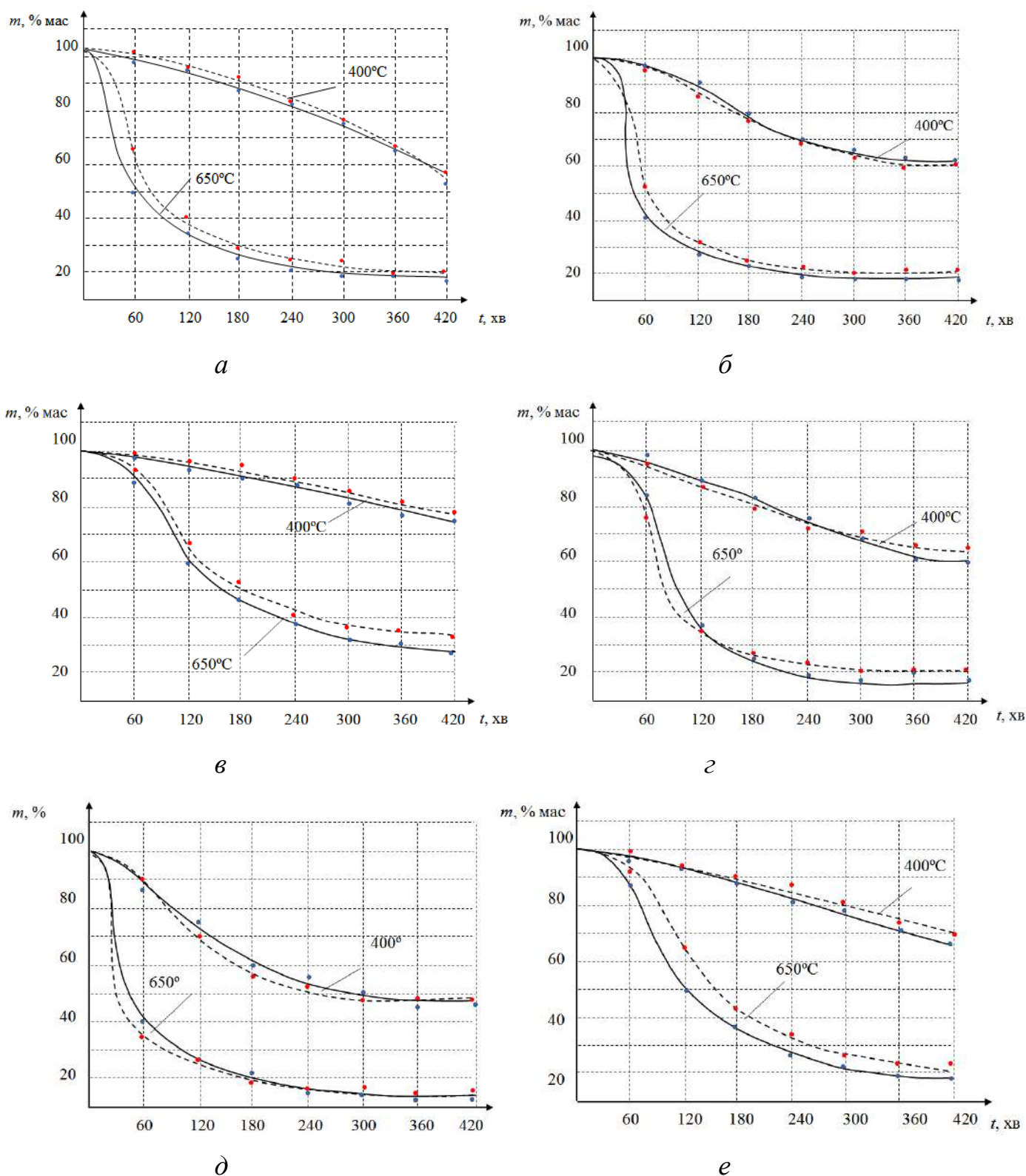


Рисунок 4.26 – Експериментальні ТГА (суцільні лінії) і розраховані (пунктирні лінії) криві компонентів дослідних сумішей: *a* – суміш №1; *б* – суміш №2; *в* – суміш №3; *г* – суміш №4; *д* – суміш №5; *е* – суміш №6 ● - точка досліджень експериментальним методом, ● - точка розрахунків теоретичним методом

Енергія активації першої стадії мала. Друга стадія інтенсивного виділення ПГС, навпаки, має високу енергію активації (табл 4.7). Це пов'язано з багатостадійністю самого процесу утворення газоподібних продуктів (деполімеризація, піроліз, випаровування мономерів та олігомерів, власне деструкція та інші реакції) [211].

Таблиця 4.7 - Розрахункові параметри моделі деструкції компонентів відходів при постійній температурі нагріву в інтервалі температур 400–650 °С

Компоненти відходів	Значення констант швидкостей для кожної стадії процесу $k_1; k_2; k_3$	Енергія активації $E_a$ , кДж/моль	Передекспоненційний множник, $A$
Досліджувана суміш 2	11,97	4,531	1,733
	0,258	7,012	0,66
	0,005	1,927	0,05
Досліджувана суміш 3	10,27	4,087	1,279
	0,214	6,308	0,37
	0,004	1,247	0,03
Досліджувана суміш 4	12,63	5,761	2,739
	0,410	7,826	2,01
	0,008	2,906	0,08
Досліджувана суміш 5	11,07	4,155	1,524
	0,310	6,815	0,42
	0,004	1,679	0,04
Досліджувана суміш 6	12,17	5,011	2,037
	0,308	7,142	1,06
	0,009	2,219	0,07
Досліджувана суміш 7	9,39	4,035	1,163
	0,174	6,451	0,26
	0,003	1,063	0,03

Енергія активації стадії утворення твердого залишку має найменше значення, що відповідає сповільненню процесу піролізу зазначених відходів. Таким чином, визначені активаційні параметри термічного розкладання ТОВ дозволяють вирішувати питання прогнозування та оптимізації температурних умов проведення процесу, а також керування якістю кінцевих продуктів.

Термодинамічні параметри стану системи дозволяють прогнозувати можливість здійснення процесу конденсації і оцінити взаємний вплив речовин, а також представляти відносні швидкості рівноважних реакцій перетворення при конденсації на окремо взятому контурі при порівняно низьких температурах.

Для кількісного опису процесів термічного розкладання та врахування всіх ймовірних деструкційних перетворень в реакторі БЦП необхідно встановити вплив основних кінетико-термодинамічних факторів.

Кінетична складова моделі термічної деструкції БЦП являє собою сукупність елементарних стадій та реакцій деструкції, що характеризується залежністю швидкості хімічного перетворення від концентрацій реагуючих компонентів [201, 204].

Розроблена модель дозволяє визначати склад цільових продуктів, що є метою здійснення процесу утилізації відходів за технологією БЦП. Застосування апарату математичного моделювання, при відомому складі початкової маси вуглеводневих відходів, дозволяє наближено визначити можливі виходи кінцевих продуктів процесу утилізації.

Також до переваг необхідно віднести можливість управління продуктивністю БЦС з метою досягнення заданої якості кінцевих продуктів в поточних умовах. Досягнення мети можливе шляхом постійного контролю концентрації ПГС, що надходить на контури БЦС.

Важливість дослідження не викликає сумнівів, оскільки використання розробленої моделі є основою для подальшого синтезу автоматичних систем управління. Таким чином, застосування моделі процесів деструкції є необхідним аспектом при впровадженні технології у промислових масштабах.

#### 4.4 Визначення максимальної енергетичної ефективності процесу циркуляційного піролізу твердих органічних відходів

Для визначення максимальної енергетичної ефективності роботи циркуляційного піролізу загалом, а також для оцінки втрат енергії використовується загальний термодинамічний метод аналізу – ексергетичний, що враховує не тільки кількість споживаної енергії, та енергії, що віддається термодинамічною системою, але і якість цієї енергії, тобто здатність її бути перетвореною на корисну роботу [12].

Ексергетичний метод є способом термодинамічного дослідження перетворення енергії у енерготехнологічній системі БЦП, що дає можливість підвищити ефективність технології в цілому. Ексергія являє собою важливий показник ефективності енергоресурсів і виробленої продукції [9, 56, 77, 222]. Застосування ексергії, враховуючи її зв'язок з економікою, дозволяє порівняно просто вирішити одне важливе питання – вибір критерію ефективності при оцінці і оптимізації БЦП [106].

Дослідження та розрахунок термодинамічних процесів, що проходять при утилізації відходів за технологією циркуляційного піролізу проводилося на основі комп'ютерного моделювання деструктивних перетворень за допомогою програмного комплексу Астра 4. Комп'ютерна програма Астра 4, основана на принципі максимізації ентропії системи [145, 206], дозволяє в автоматичному режимі розрахувати основні термодинамічні параметри процесу термічного розкладання різних видів органічних відходів при різних умовах здійснення процесу.

Термодинамічні процеси в системі БЦП зумовлюють стан та вихід продуктів деструкції початкової маси відходів, тому було проаналізовано основні екстенсивні термодинамічні параметри, а саме загальний коефіцієнт теплопровідності ( $LT$ ), внутрішню енергію ( $U$ ), ентальпію ( $I$ ) та ентропію ( $S$ ) [190, 222].

Як результат дослідження та розрахунків були побудовані графіки зміни термодинамічних показників в залежності від температури, що представлені нижче.

Подальше дослідження засноване на теоретичному визначенні концентрації основних компонентів ПГС, що показано у вигляді залежності їх концентрації від

температури для різних типів відходів.

Вихід компонентів залежить від виду відходів, так найбільший вихід теплотворних компонентів спостерігається при піролізі гуми, меншою мірою при піролізі харчових відходів, а найменші значення спостерігаються при піролізі відпрацьованого мастила та пластмаси: вихід  $\text{CH}_4$  (рис. 4.27) знаходиться в межах – 1,2–13,778 моль/кг, етану (рис. 4.28) –  $1,8 \times 10^{-5}$  –  $13,8 \times 10^{-5}$  моль/кг [206].

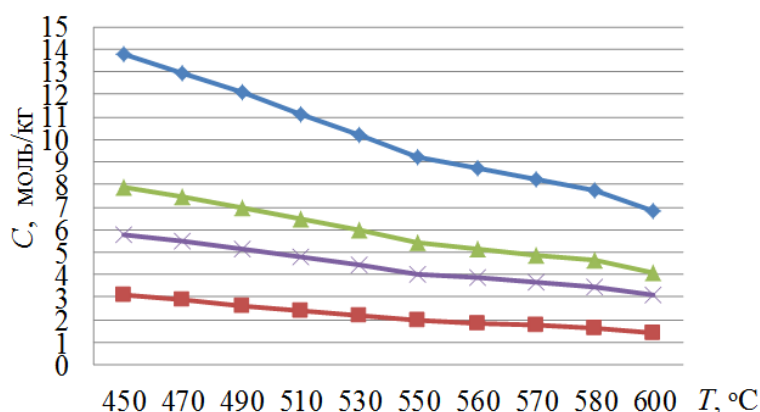


Рисунок 4.27 – Вихід метану при піролізі різних видів відходів:

◆ - гума; ■ - пластмаса; ▲ - харчові відходи; ✕ - відпрацьоване мастило.

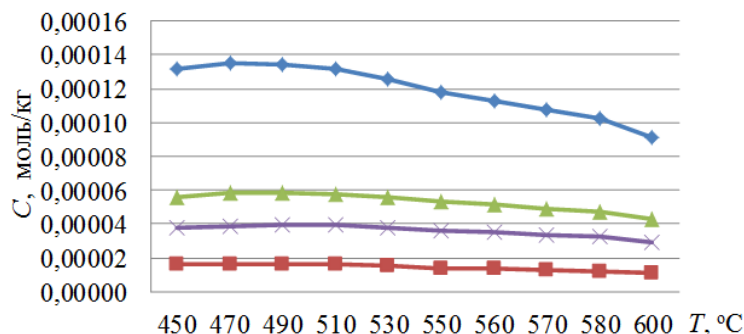


Рисунок 4.28 – Вихід етану при піролізі різних видів відходів:

◆ - гума; ■ - пластмаса; ▲ - харчові відходи; ✕ - відпрацьоване мастило

Також при підвищенні температури збільшується масова концентрація водню ( $\text{H}_2$ ) (рис. 4.29) - 0,9366 – 25,407 моль/кг, оксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ) (рис. 4.30) – 0,11792- 1,7929 моль/кг, проте зменшується вихід сірководню ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (рис. 10), при піролізі гуми 0,13758 -0,1372 моль/кг, пластмаси – 0,1048- 0,1036 моль/кг, та харчових відходів до 0,1286 моль/кг. Це означає, що відбувається глибока деструкція вихідної маси.

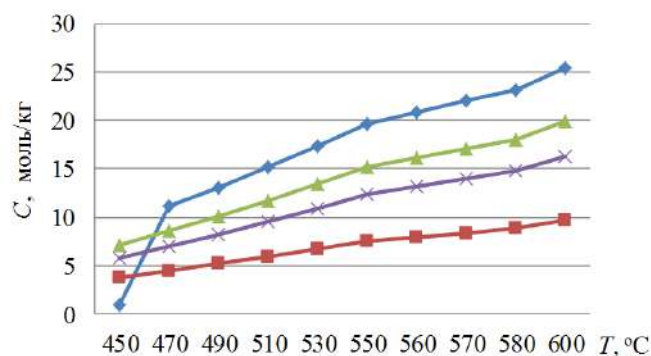


Рисунок 4.29 – Вихід водню при піролізі різних видів відходів:

◆ - гума; ■ - пластмаса; ▲ - харчові відходи; ✕ - відпрацьоване мастило.

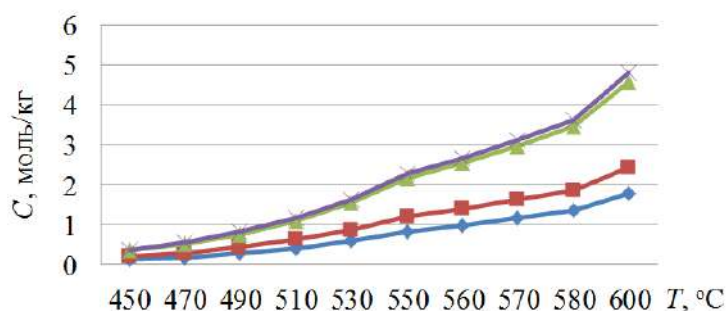


Рисунок 4.30 – Вихід оксиду вуглецю при піролізі різних видів відходів:

◆ - гума; ■ - пластмаса; ▲ - харчові відходи; ✕ - відпрацьоване мастило.

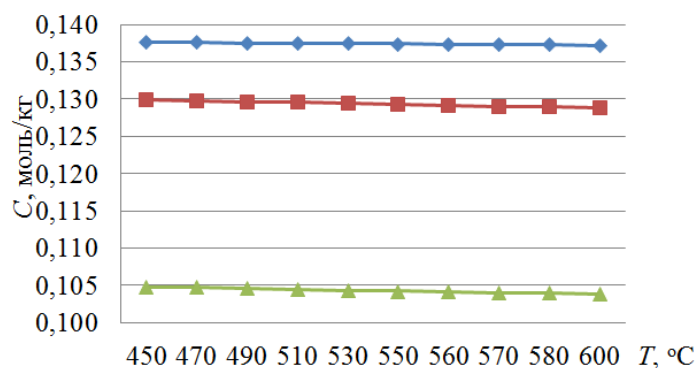


Рисунок 4.31 – Вихід сірководню при піролізі різних видів відходів:

◆ - гума; ■ - пластмаса; ▲ - відпрацьоване мастило.

Встановлено, що при підвищенні температури зменшується концентрація виходу основних теплотворних компонентів пірогазу, а відповідно і зменшується молярна маса ПГС.

Результатом даних розрахунків є підтвердження визначення оптимального температурного інтервалу для утилізації відходів за технологією циркуляційного

піролізу, що складає 560-600 °С, в межах якого здійснюється інтенсифікація деструктивних перетворень, а також спостерігається вихід цільових теплотворних компонентів ПГС.

#### 4.5 Дослідження забезпечення екологічної безпеки обладнання подачі відходів в безперервному процесі роботи піролізної установки

Для забезпечення безперервної роботи установки циркуляційного піролізу в екологічно безпечному режимі необхідно протягом термічного розкладання відходів в герметичному реакторі безперервно подавати всередину нову порцію вихідних подрібнених відходів полімерів. При цьому виникає проблема: в момент подачі нової порції відходів необхідно максимально їх ущільнити і видалити з них залишки повітря, відповідно, максимально зменшити кількість кисню, який при потраплянні в розігрітий реактор може викликати вибух, а також сильно знижує теплові характеристики отриманих продуктів [10, 16, 22, 120, 257]. Разом з тим необхідно забезпечити герметичність реактора, який знаходиться під тиском до 0,15 МПа, і виключити прорив з нього в навколишнє середовище токсичною парогазової суміші. З метою оптимізації геометрії вихідної насадки і, відповідно, полімерної пробки, утвореної різними фракціями подрібнених сумішей ТОВ, були проведені дослідження зусиль стиснення плунжерною системою сировини розміром від 2 до 20 мм в різних вихідних конусних насадках. Дослідження проводилися на установці багатоконтурного циркуляційного піролізу Екопір-18Д [205].

В корпусі системи завантаження розташований поршень, що забезпечує формування потоку сировини, до нього приєднаний рухливий шток гідроциліндра двостороннього дії, який приводиться в дію за допомогою маслостанції, який забезпечує номінальний тиск 16 МПа; максимальний тиск 20 МПа; тиск холостого ходу (не більше) 1,5 МПа; зусилля на штоку 80 кН; зусилля зворотного ходу штока 60 кН, діаметр штока 40 мм; хід поршня 400 мм.

Вихідна насадка плунжерного пристрою виконана у вигляді усіченої піраміди, яка своєю меншою основою з'єднана з реактором. За рахунок конусної насадки при

подачі твердих подрібнених відходів в нагрітий реактор створюється максимальне ущільнення сформованого потоку сировини. Така конструкція насадки дозволяє видалити залишки повітря з сировини, при цьому утворена технологічна сировинна пробка, що герметизує реактор, не дозволяючи проходити ПГС в НС, що забезпечує роботу установки в екологічно безпечному режимі.

Для усунення витoku ПГС через плунжерну систему завантажили досліджувану суміш 7 вагою 3 кг для створення герметичної пробки. Повторно завантажили подрібнену досліджувану суміш 2 вагою 3 кг. Але данні заходи не запобігли витoku ПГС, тому було вирішено допрацювати плунжерну систему завантаження відходів.

В зв'язку з тим, що поршень плунжерної системи завантаження не забезпечував потрібної щільності відходів (рис. 4.32), було вирішено демонтувати його та вдосконалити: для стабілізування тиску в гідроциліндрі на нагнітаючий трубопровід встановили гідрозатвор. В ході випробувань отримані данні нагріву реактора для аналізу теплових характеристик реактора.



Рисунок 4.32 - Конусна насадка системи подачі органічних відходів

Для дослідження ефективності герметизації реактора був розроблений і виготовлений ряд конструкцій вихідних насадок, які забезпечували утворення на виході плунжерної системи пробки з полімерів, при подачі і стисненні яких забезпечуватиметься необхідна герметичність реактора. Під пробкою розуміють сформований (ущільнений) потік сировини, який при подачі нової порції полімерів просувається в реактор, а в результаті штовхаючих зусиль плунжерної системи нова порція сировини формується в нову пробку - даний процес безперервний. Варіанти вихідних конусних насадок представлені на рис. 4.33



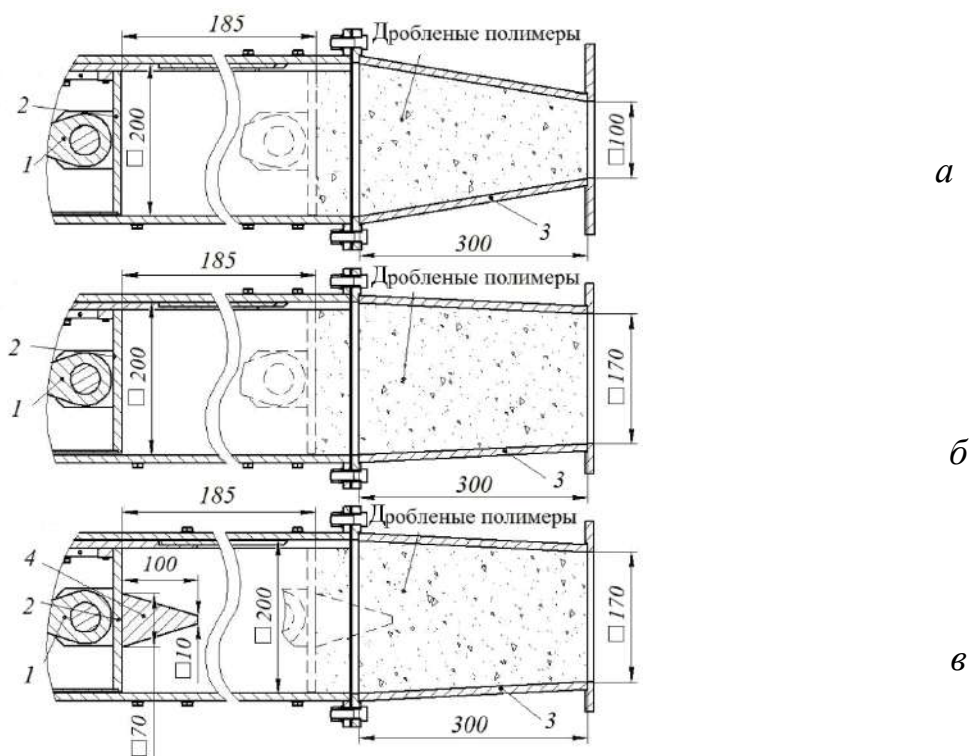


Рисунок 4.33 - Варіанти вихідних насадок плунжерній системи подачі полімерних відходів в газове середовище герметичного реактора: *а* - перший варіант вихідний насадки з конусністю 1:3; *б* - другий варіант вихідний насадки з конусністю 1:10; *в* - третій варіант вихідний насадки з конусністю 1:10 і з наконечником на передній плиті поршня; 1 - гідроциліндр; 2 - передня плита поршня; 3 - вихідна насадка плунжерній системи; 4 - виступ на передній плиті поршня

Всі варіанти конструкцій вихідних конусних насадок були розраховані і експериментально випробувані на установці МЦП Екопір-18.



Рисунок 4.34 - Поршень плунжерній системи подачі полімерних відходів, на передній плиті якого закріплена усічена піраміда (варіант 4.33 *в*)

Для детального дослідження процесів, що відбуваються при стисканні подрібнених відходів у вихідній конусній насадці, досліджено фізичну модель сировини [205], яка представляє собою стислу систему структурно-неоднорідних, щільно упакованих частинок полімерів різної ізометричної форми, що пластично деформується. Пластичність подрібнених полімерних частинок при холодній пластичній деформації залежить в основному від режиму пресування [225].

Під режимом пресування розуміють величину тиску 16 - 20 МПа, створюваного гідроциліндром; тривалість пресування - 15- 45 с; умови застосування тиску - з боку поршня по осі насадки; характер докладання зусиль - наростаючий. Частинки подрібнених полімерів після деформації приймають форму багатогранників, а в суміші утворюють регулярні структури - решітки. У вузлах решітки розташовуються дефекти - пори, заповнені газоповітряною фазою. Передбачається, що всі тетраедри, крім тих, що представляють повітряну частину, є жорсткими тілами і можуть переміщатися один відносно одного в результаті додавання дії штовхають зусиль і ковзання по своїм гранях, на яких діють нормальні і дотичні напруження. Всі ланки пластично стисненого сировини мають однорідні властивості і разом утворюють жорсткий пластичний каркас, що займає певний об'єм.

Дані припущення покладені в основу розрахунків в програмному комплексі ANSYS. Розрахунок проводився з моменту повного заповнення системи завантаження сировиною в процесі одного ходу поршня. Умовою забезпечення необхідного ущільнення сировини було взято максимальне ущільнення гідроциліндра з урахуванням конструктивних особливостей передньої плити поршня, переміщення якої становить 185 мм. Згідно з розрахунком, в кінцевій точці ходу поршня система замикається, сировина в результаті створюваного гідроциліндром тиску розподіляється і заповнює порожнину вихідної усіченої піраміди. Таким чином, відбувається формування технологічної пробки із сировини, що подається в реактор. Стінки вихідного конуса жорстко зафіксовані в двох площинах, що виключає їх переміщення внаслідок деформації, фланцеві з'єднання в розрахунках не враховувалися, тому вся конструкція є суцільна.

У розрахунку була використана модель матеріалу з механічними властивостями подрібненої досліджуваної суміші 5 (табл. 4.8). Оскільки згідно з умовою завдання необхідно визначити мінімальне зусилля поршня, то технологічна пробка розглядається як цілісне тіло з ізотропними властивостями, які припускають сталість фізичних властивостей сировини на всіх напрямках і симетрію щодо вибору напрямку механічного переміщення.

Таблиця 4.8 - Фізико-хімічні властивості матеріалу технологічної пробки при 20 °С

Параметр	Значення
Щільність, $\text{кг}\cdot\text{м}^3$	950
Коефіцієнт теплового розширення, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$2,3\cdot 10^{-4}$
Модуль Юнга, Па	$1,8\cdot 10^9$
Коефіцієнт Пуасона	0,42
Модуль переміщення, Па	$6,338\cdot 10^8$

Розрахунок проводили за методом кінцевих елементів (МКЕ). В результаті розбивки створювалася сітка в межах елементів. Точки перетину цих кордонів утворюють вузли. У середині елементів можуть бути створені додаткові вузлові точки. Сукупність усіх кінцевих елементів і вузлів є основною кінцево-елементної моделі деформованого тіла - технологічної пробки. Розглядалася лінійно-пружна задача деформування ущільненої технологічної пробки.

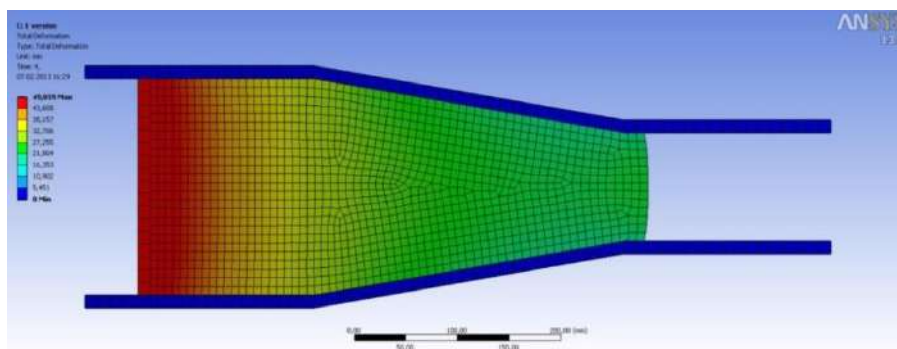


Рисунок 4.35 - Результат розрахунків переміщення подрібненої полімерної сировини в процесі ущільнення

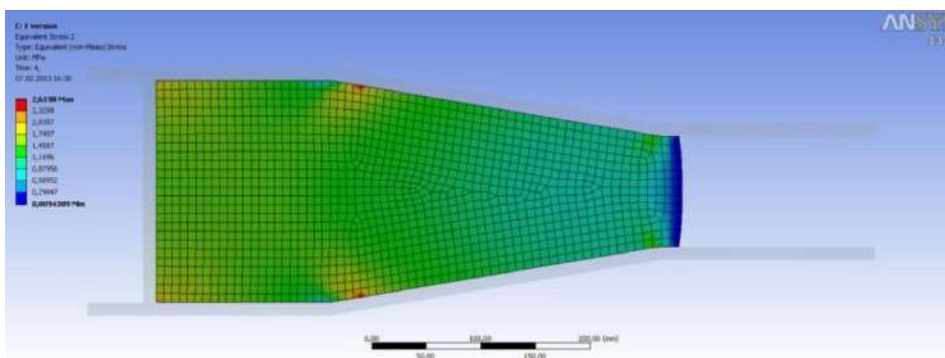


Рисунок 4.36 - Результат розрахунку напружень, які виникають в процесі ущільнення сировини

Згідно з розрахунками величини переміщення подрібненої полімерної сировини в процесі її ущільнення, при зусиллі гідроциліндра 16 МПа забезпечується розрахунковий хід поршня 49,059 мм, що не відповідає заданому переміщенню 185 мм. Малий хід поршня може бути викликаний, по-перше, недостатнім штовхальним зусиллям гідроциліндра, по-друге, великим кутом звуження усіченої піраміди (1: 3), що викликає сильне ущільнення подрібнених полімерів і неможливість їх подальшого проштовхування в реактор. Це було підтверджено експериментально. Досягнутий максимальний хід поршня складає 44 мм, що відповідає результатам розрахунку.

На рисунках зображений спектр величин переміщення і напруження в обсязі сировини, що знаходиться всередині вихідний усіченої піраміди. Градієнтом відтінків позначаються розрахункові величини відповідно до шкали розбиття в лівому верхньому кутку.

Для оцінки впливу кута звуження вихідної усіченої піраміди і величин переміщення і напруження в обсязі сировини була розроблена розрахункова сітка другого варіанту конструкції вихідної усіченої піраміди з меншим кутом звуження. Такий варіант конструкції збільшує прохідний перетин вихідного отвору піраміди, таким чином, дозволяючи докладати менше зусиль для завантаження сировини в реактор. На рисунках 4.37 та 4.38 розглянуті результати розрахунків моделі другого варіанту конструкції вихідної усіченої піраміди плунжерної системи. При аналогічних умовах забезпечується хід поршня 177,11 мм, що відповідає заданій

величині 185 мм і було підтверджено експериментально. Але ущільнення сировини в технологічній пробці недостатньо, в результаті піролізний газ проривався через плунжерну систему в навколишнє середовище, що неприпустимо.

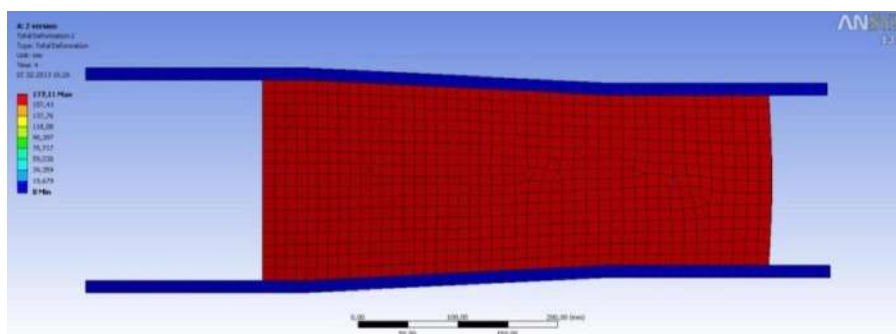


Рисунок 4.37 - Результат розрахунків переміщення подрібненої полімерної сировини в процесі ущільнення

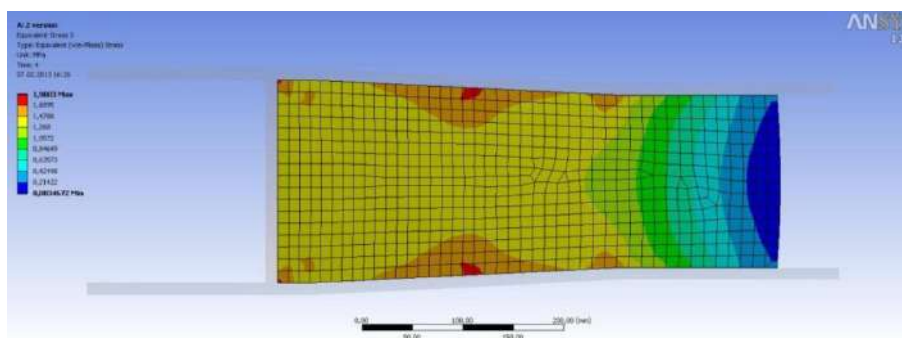


Рисунок 4.38 - Результат розрахунку напружень, які виникають в процесі ущільнення сировини

З метою збільшення щільності технологічної пробки, яка сформована вихідною усіченою піраміди при заданому штовхаючому зусиллі обраного гідроциліндра рівного 16 МПа, була розроблена розрахункова сітка третього варіанту конструкції плунжерної системи, в якій передня стінка поршня була забезпечена зрізаною пірамідою згідно рисунку 4.33в.

На рисунках 4.39 та 4.40 розглянуті результати розрахунків моделі третього варіанту конструкції плунжерної системи. Згідно з розрахунками величини переміщення подрібненої полімерної сировини в процесі її ущільнення в даних умовах забезпечується хід поршня 177,11 мм, що відповідає заданій величині 185 мм, що було підтверджено експериментально. Найбільше ущільнення сировини виникає з боків і на вершині усіченої піраміди (яка закріплена на передній плиті

поршня плунжерної системи), але це не забезпечує необхідної герметичності, і в цьому варіанті піролізний газ проривається в навколишнє середовище через технологічну пробку, що неприпустимо.

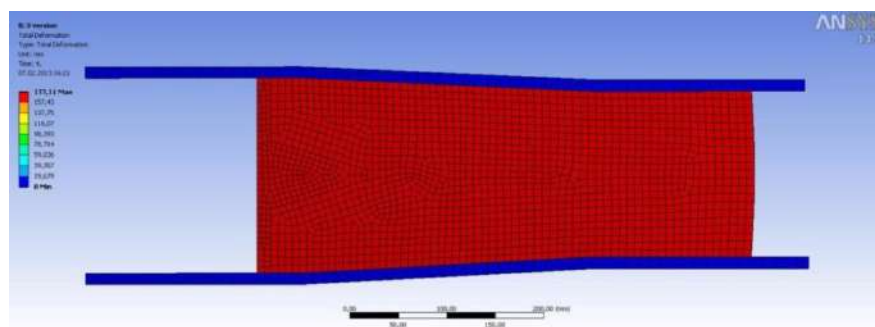


Рисунок 4.39 - Результат розрахунків переміщення подрібненої полімерної сировини в процесі ущільнення

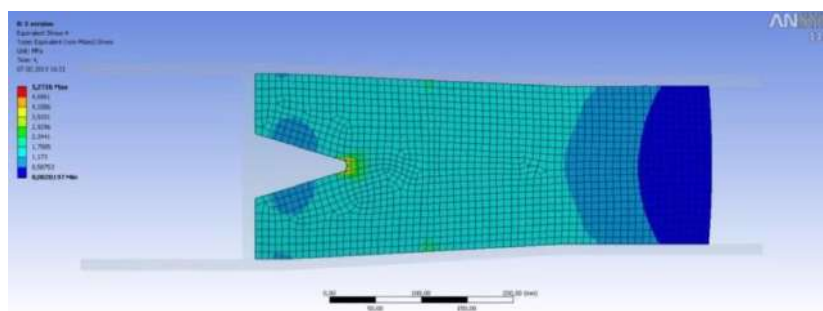


Рисунок 4.40 - Результат розрахунку напружень, які виникають в процесі ущільнення сировини

Таким чином, досліджені конструкції усічених пірамід, коли менша їх основа з'єднана з реактором, а відходи подаються в газове середовище, не виключають прорив газу в навколишнє середовище під час безперервної подачі сировини, що не забезпечує екологічної безпеки процесу. Це пояснюється тим, що недостатньо прикладених гідроциліндром зусиль для стискання полімерів для подолання стану пружних деформацій, в результаті ПГС під дією тиску проривається через бункер в навколишнє середовище. Дані дослідження визначили всі недоліки технологічної пробки, створюваної різними насадками при подачі подрібнених полімерів в газове середовище реактора.

З метою забезпечення поставленого завдання нами запропонована більш досконала конструкція установки для безперервного піролізу твердих органічних відходів - з плунжерною системою подачі подрібнених полімерів не в газове

середовище реактора, а в розплав [120, 262]. Це підвищує надійність герметизації каналу подачі сировини плунжерної системи за рахунок розплавленого полімеру, який, проникаючи в повітряні мікропорожнини технологічної пробки, застигає при додатковому зовнішньому охолодженні. Для зменшення зусилля проштовхування попередньо утвореної технологічної пробки і створення нової пробки вихідний наконечник у вигляді усіченої піраміди розгорнули на  $180^\circ$  і з'єднали більшою підставою піраміди з реактором, а меншою - з плунжерною системою подачі сировини (рис. 4.41).

Основною відмінністю даної конструктивної схеми є, по-перше, мале зусилля проштовхування термопластичних полімерів в реактор, навіть якщо після зупинки реактора розплавлений полімер застигне всередині конусної частини насадки; по-друге, виключена ймовірність прориву парогазової суміші в навколишнє середовище, оскільки тиск на технологічну пробку створює висота стовпа розплаву полімеру, а не газове середовище. Крім того, чим більше тиск стовпа розплаву, тим більше ущільнюються подрібнені полімери в технологічній пробці згідно рис. 4.41.

Одним з важливих конструктивних відмінностей також є наявність у вихідному наконечнику плунжерної системи чотирьох ножів, розміщених на бічних сторонах усіченої піраміди. Ножі кріпляться до поверхні вихідного конуса болтами і розташовані ближче до меншого перетину піраміди, з'єднуючись з корпусом плунжерної системи. Установка ріжучого леза проти потоку руху сировини виконує функцію подрібнення, а за рахунок тепловіддачі між нагрітими полімерами і площиною ножа виникає додатковий контур охолодження сировини. Основний контур охолодження являє собою кожух з водяним охолодженням, який розташовано на бічній поверхні вихідного наконечника.

Враховуючи всі виявлені недоліки фізичної моделі створеної на першому етапі [69, 205], була розроблена нова модель плунжерної системи подачі сировини (рис 4.42) [120, 261]. При розробці фізико – математичної моделі системи завантаження прийняті наступні граничні умови [16, 22]: фракційний склад сировини – досліджувана суміш відходів №1; середня теплопровідність сировини, яка подається в реактор прийнята –  $0,082 \text{ Вт/мК}$ ; насипна щільність сировини в

конусній насадці –  $0,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; щільність розплавленого полімеру (РП) –  $1,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; середня теплопровідність розплавленого полімеру в реакторі прийнята –  $0,35 \text{ Вт/мК}$ ; температура сировини на вході конусної насадки –  $35^\circ\text{C}$ ; температура розплавленого полімеру в реакторі і твердого залишку, який видаляється із реактора –  $(400 - 600)^\circ\text{C}$ ; температура на межі кристалізації полімеру –  $280^\circ\text{C}$ ; передбачається, що подрібнені полімери можуть бути представлені як модель пружно – в'язкого тіла.

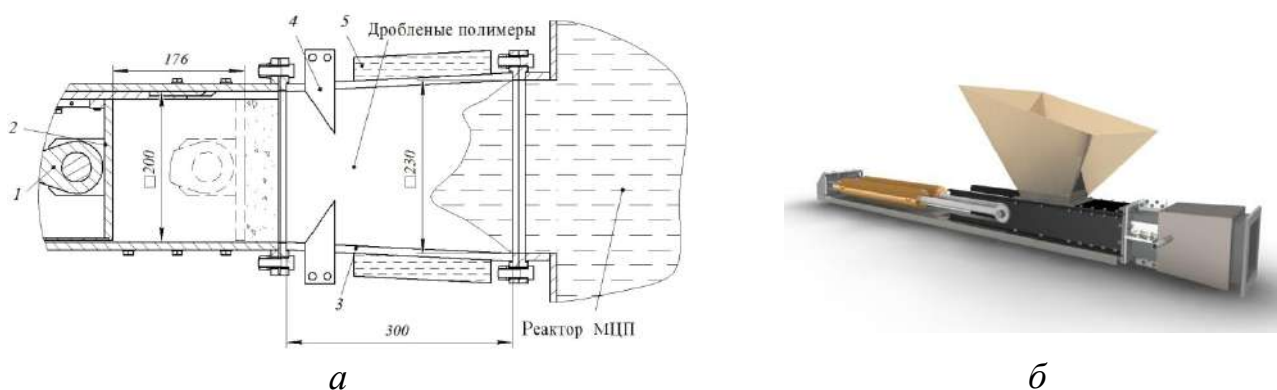


Рисунок 4.41 - Система подачі полімерних відходів в рідку фракцію герметичного реактора: *a* - конструктивна схема побудови вихідної насадки у вигляді усіченої піраміди; *б* - 3D модель плунжерної системи; 1 - гідроциліндр; 2 - передня плита поршня; 3 - конусна насадка; 4 - подрібнювальні ножі-охолоджувачі; 5 - система охолодження

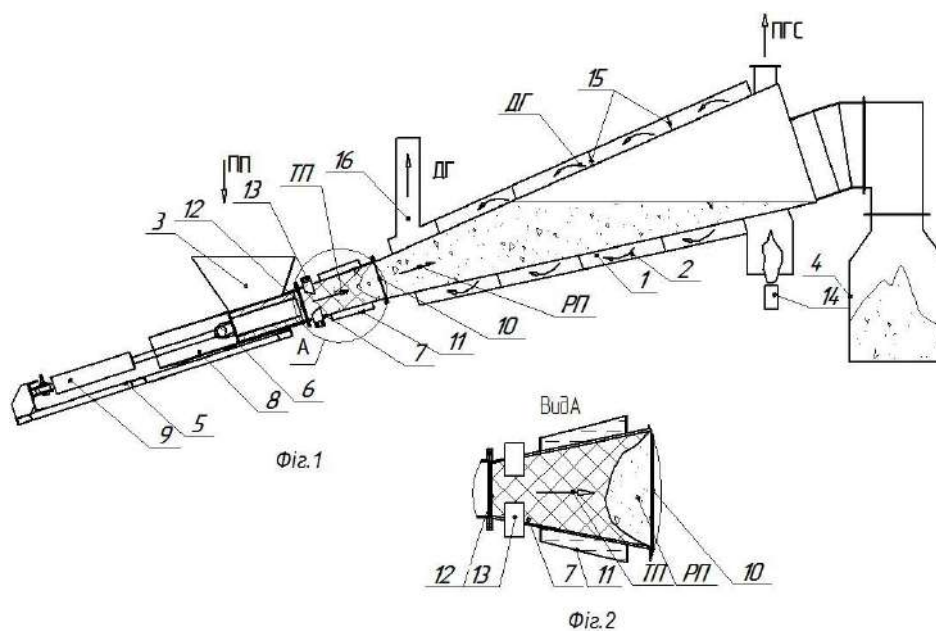


Рисунок 4.42 – Схема реактору Екопір БЦП для безперервного піролізу органічних відходів з системою їх подачі



На рисунку 4.42 наступні позначення: 1 – реактор піролізу; 2 – систему зовнішнього обігріву реактора; 3 – бункер завантаження; 4 – бункер розвантаження; 5 – платформа; 6 – корпус; 7 – вихідний кінець корпусу; 8 – поршень; 9 – гідроциліндр подвійної дії; 10 – отвір; 11 – водяна рубашка; 12 – отвір; 13 – плоскі теплообмінники; 14 – пальник; 15 – система перегородок; 16 – димова труба.

Розглянемо можливі варіанти зміни фізичної моделі системи завантаження сировини в реактор в ланцюгу: плунжерна подача сировини, конусна насадка і реактор (рис. 4.43): 1 - В першому варіанті взаємне розташування різних фаз сировини, яка створює пробку в конусній насадці, при умові, що продуктивність плунжерної системи  $W_{пу}$  дорівнює продуктивності піролізного реактора  $W_p$ . 2 - В другому – стан полімерної пробки в конусній насадці, при умові, що продуктивність плунжерної системи  $W_{пу}$  перевищує продуктивність піролізного реактора  $W_p$ . 3 - В третьому – стан полімерної пробки в конусній насадці, при умові, що продуктивність плунжерної системи  $W_{пу}$  менше продуктивності піролізного реактора  $W_p$ .

На рисунку 4.43 1 - плунжерна система подачі подрібнених полімерів; 2 - конусна насадка з водяним охолодженням; 3 - конусний реактор з розплавленими полімерами, який обігривається димовими газами; 4 -  $W_{пу}$  – продуктивність плунжерної системи по сировині; 5 -  $W_p$  – продуктивність реактора, яка характеризує об'єм ПГС, яка утворюється в реакторі при термічному розкладанні рідких полімерів.

Проведення моделювання процесу ущільнення технологічної пробки із даного середовища – сировини, або пірокарбону, потребує сумісного розгляду математичних моделей стискаючого поршня плунжерної системи і процесу стискання даного середовища [120]. Схема процесу стискання даного середовища з використанням робочого поршня плунжерної системи представлена на рис. 4.44.

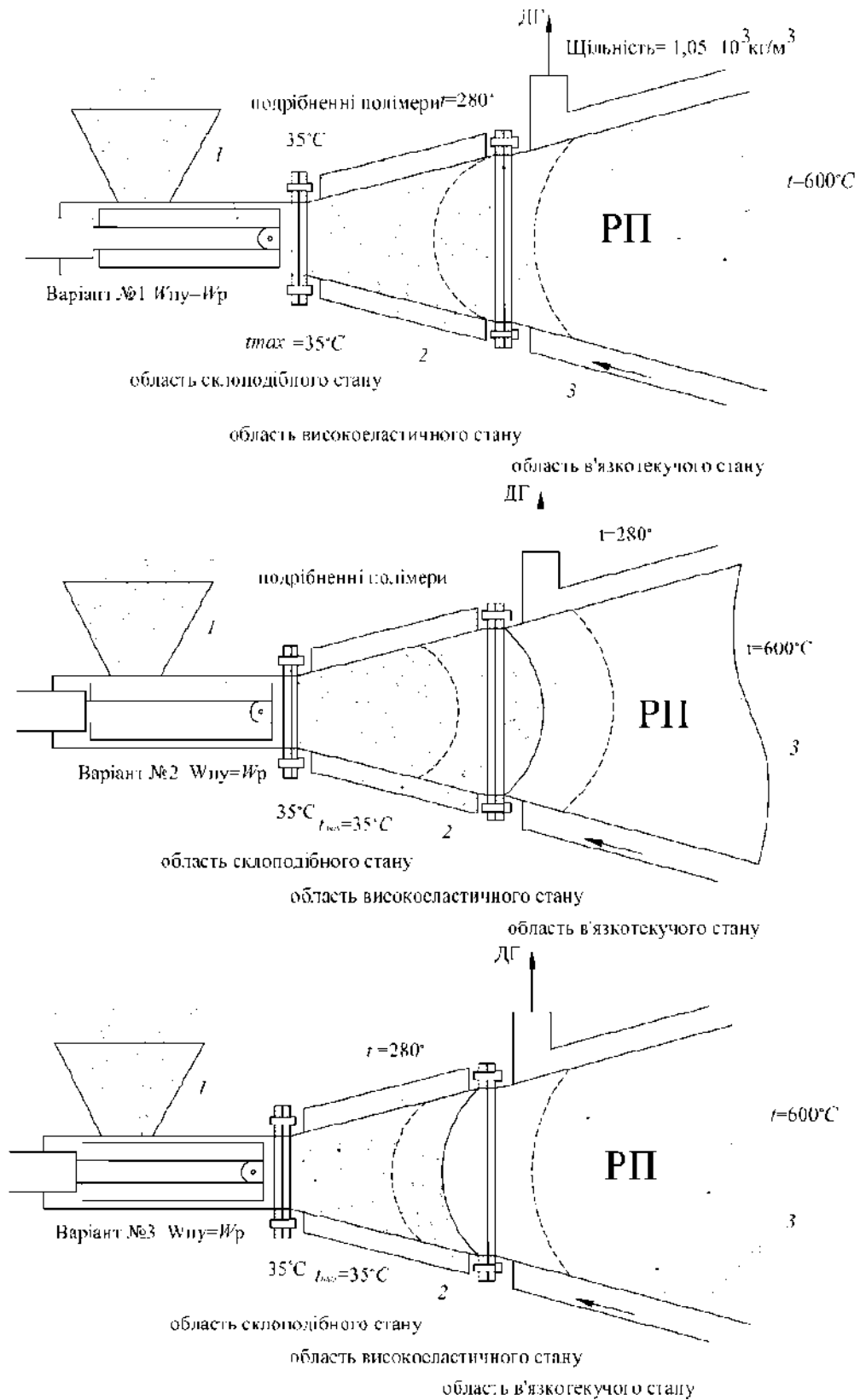


Рисунок 4.43 - Три варіанти фізичної моделі системи завантаження сировини в реактор, при зміні її стану по довжині піролізного реактора, при різних співвідношеннях продуктивності плунжерної системи  $W_{\text{пу}}$  і піролізного реактора  $W_r$

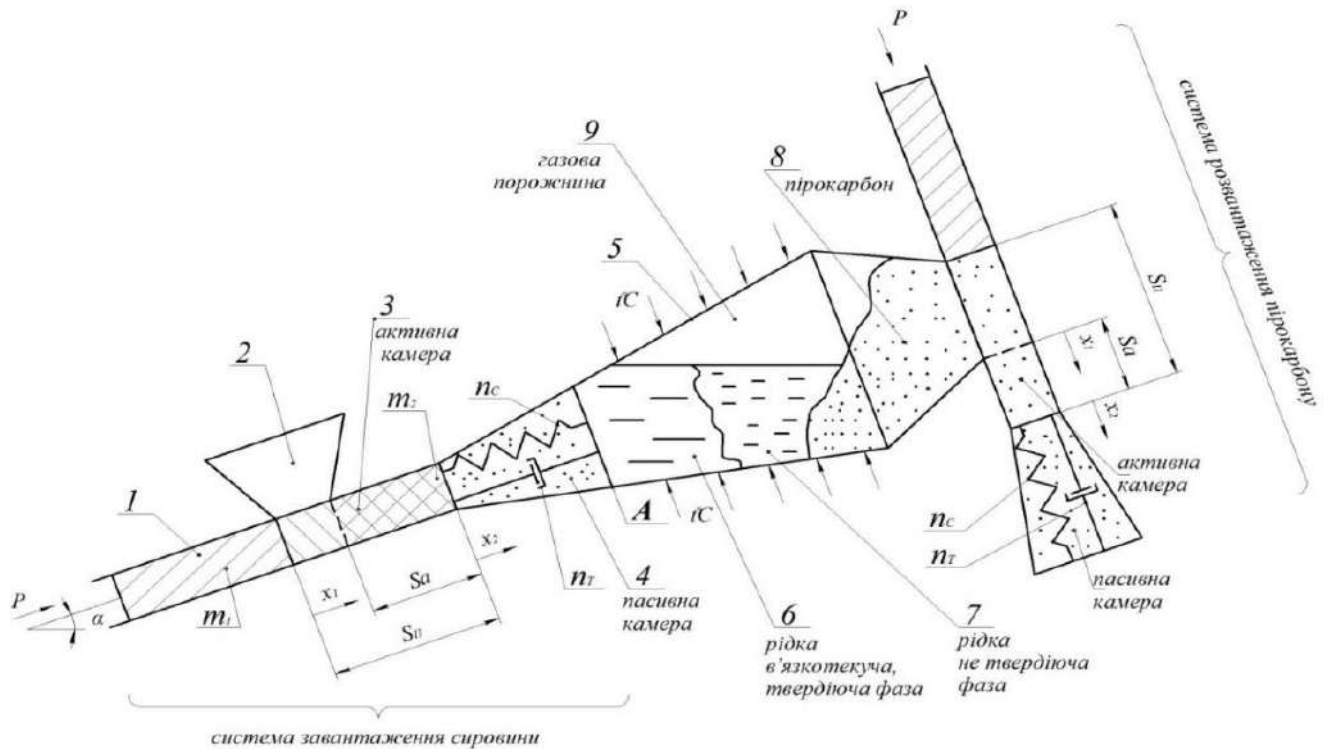


Рисунок 4.44 - Схема процесу динамічного завантаження сировини — подрібнених полімерів при їх різних фазах з використанням плунжерних систем

На рисунку 4.44 1 — поршень плунжерної системи; 2 — бункер завантаження сировини; 3 — активна камера заповнена ущільненою сировиною; 4 — пасивна камера заповнена ущільненою сировиною, яка утворює технологічну пробку; 5 — піролізний реактор з зовнішнім обігрівом ( $t^{\circ}\text{C}$ ); 6 — рідка фаза розплавлених полімерів, в склоподібному стані, яка при охолодженні переходить в тверду фазу; 7 — рідка фаза розплаву полімерів, яка пройшла процес термічного розкладання (деструкції) і яка при охолодженні не твердіє; 8 — твердий залишок (пірокарбон); 9 — газова порожнина в піролізному реакторі; А — границя між подрібненими полімерами і їх склоподібним станом розплавлених полімерів, при умові адіабатичного процесу;  $m_1$  — маса поршня плунжерної системи;  $m_2$  — маса подрібнених полімерів, яка стискається в активній камері і подається в пасивну камеру конусної насадки; P — тиск поршня плунжерної системи;  $S_n$  - повний хід поршня плунжерної системи;  $x_1$  — координата положення поршня;  $x_2$  — координата положення стисненого середовища полімерів, або пірокарбону;  $n_T$  — коефіцієнт демпфірування сировини —

подрібнених полімерів, або пірокарбону в пасивній камері;  $n_c$  – коефіцієнт пружності сировини в пасивній камері.

Деформація маси сировини, яка подається плунжерною системою в піролізний реактор у вигляді подрібнених полімерів і автошин може бути представлена, як модель пружно – в'язкого тіла, деформація якого в активній і пасивній камерах описується наступним рівнянням [23]:

$$F = m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + n_T \frac{dx(t)}{dt} + n_c \cdot x(t),$$

де:  $F$  – тиск, який діє на подрібнені полімери, або гуму плунжерною системою;  $m$  – загальна маса сировини – подрібнених полімерів в активній і пасивній камерах і приєднаної маси розплаву полімерів в реакторі;  $x$  – висота стовпа сировини і розплаву;  $n_T = f(\rho)$  і  $n_c = f(\rho)$  – коефіцієнти демпфірування і пружності відповідно до функції щільності сировини – подрібнених полімерів;  $\rho$  – щільність подрібнених полімерів.

Деформація подрібнених полімерів в активній камері відбувається при осьовому тиску, який ущільнює подрібнені полімери при протидії величини стовпа сировини в конусній насадці ( $x$ ) і стовпа розплаву в реакторі з різними його фазами і їх тертя відповідно зі стінками указаних конструктивних елементів. Цей процес можна описати наступною залежністю:

$$\sigma_z = k[0,4 - \exp(-2\rho_0)]E(\rho),$$

де  $E(\rho)$  – модуль пружності в функції щільності подрібнених полімерів,  $E(\rho) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ ,  $\sigma$  – пружність яка утворюється в технологічній пробці, при дії сили стискання плунжерною системою, рівна силі поділеної на площу поршня плунжера;  $\varepsilon$  – пружна деформація технологічної пробки, яка рівна відношенню довжини пробки після деформації до її первинного розміру.  $\rho_0$  – початковий тиск плунжерної системи,  $k$  – поправочний коефіцієнт визначений експериментально для сировини – подрібнених полімерів рівний 1,2 – 1,34, для пірокарбону 1,4 – 1,8 [23].

На базі аналізу прийнятої реологічної моделі, яка характеризує технологічну пробку із подрібнених полімерів, або пірокарбону з газоутворюючою і газотримуючою здатністю і схильністю до злипання, можна припустити, що в

сталому стані, напруження в об'ємі технологічної пробки, яка ущільнюється динамічним способом, визначається як сума напружень утворених пресуванням і напружень від ущільнення сировини [120]. Після припинення пресування сировини плунжерною системою, в технологічній пробці залишаються напруження утворені реологічним середовищем в якості якого приймається ущільнена сировина.

Враховуючи динаміку стискаючого поршня плунжерної системи і реологічну модель технологічної пробки в пасивній камері, процес динаміки стискання сировини можна записати наступною системою диференціальних рівнянь [23]:

$$(p_1 F_1 - p_2 F_2) + (m_1 + m_2) = m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + n_T \frac{dx_1}{dt} n_c (x_1 - s_n);$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{k}{S_a - x_1} \left( p_2 \frac{dx_1}{dt} - \frac{QRt}{F_2} \right),$$

де  $p_1$  і  $p_2$  – абсолютний тиск відповідно в активній камері з робочим поршнем плунжерної системи і пасивній камері – конусній насадці заповненій подрібненими полімерами,  $F_1$  – робоча активна площа поршня,  $F_2$  – площа перетину на виході пасивної камери,  $m_1$  – маса поршня плунжерної системи,  $m_2$  – маса подрібнених полімерів, яка стискається в активній камері і подається в пасивну камеру конусної насадки,  $S_n$  – повний хід поршня плунжерної системи,  $S_a$  – хід поршня при первинному стисканні середовища в активній камері,  $x_1$  – координата положення поршня,  $x_2$  – координата положення стисненого середовища полімерів, або пірокарбону,  $k$  – показник адіабати,  $Q$  – інтенсивність виходу повітря, або піролізного газу із об'єму сировини, яка стискається в активній камері,  $R$  – газова стала повітря, або піролізного газу,  $t$  – температура повітря, або піролізного газу яке знаходиться в об'ємі сировини, яка стискається в активній камері.

Наявність повітря, або піролізного газу в об'ємі сировини, яка стискається в активній камері підпорядковується адіабатичному процесу, який математично описується ступеневою функцією  $pV^\gamma = \text{const}$ , де  $\gamma$  є показником адіабати (коефіцієнт Пуассона)  $\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{c_p}{c_v}$ , де  $C_p$  – теплоємність при постійному тиску;  $C_V$  – теплоємність при постійному об'ємі;  $c_p$  і  $c_v$  – питома теплоємність (відношення теплоємності до одиниці маси повітря в системі завантаження сировини).

Для аналізу процесів нагріву, або охолодження полімерів на границі (А) допускаємо, що теплофізичні характеристики розплаву і твердого полімеру однакові. Позначимо приховану теплоту плавлення через  $\lambda$ , температуру плавлення –  $T_n$ , а координату поверхні (А) розділу твердої та рідкої фази через  $X_{(t)}$ , тоді перша гранична умова матиме вигляд [13, 14]:  $T_s = T_m = T_n$ , при  $X = X_{(t)}$ . Індекс (s) вказує, що відповідна величина відноситься до твердої фази, а індекс (m) до рідкої фази. Друга гранична умова стосується поглинання прихованої теплоти на поверхні розділу (А). Припустимо, що в області  $x > x_{(t)}$  знаходиться рідина при температурі  $T_{m(x, t)}$ , а в області  $x = x_{(t)}$  тверда фаза при температурі  $T_s(x_{(t)}, t)$ .

На першому етапі розглянемо умови плавлення подрібнених полімерів на границі (А):

Якщо в початковий момент плавлення область  $x > 0$  зайнята твердими подрібненими полімерами з постійною температурою  $T_{s0}$ , то при  $t > 0$  площина (А),  $x = 0$  підтримується при постійній температурі  $T_2 > T_n$ . Для даного випадку положення площини (А) визначається виразом:  $X = 2\theta(\alpha_m t)^{1/2}$ , де:  $\theta$  – корінь рівняння

$$\frac{\exp(-\theta^2)}{\Phi(\theta)} = \frac{k_s \alpha_m^{\frac{1}{2}} T_1 \exp(-\frac{\theta^2 \alpha_m}{\alpha_s})}{k_s \alpha_m^{\frac{1}{2}} (T_2' - T_1) \cdot \Phi^*(\theta \sqrt{\alpha_m} / \alpha_s)} + \frac{\theta \lambda \pi^{1/2}}{C_m (T_2' - T_1)},$$

$$T_2' = T_2 - T_{s0}; \quad T_1 = T_n - T_{s0}$$

При цьому розподіл температур в рідкій та твердій фазі описується виразами, відповідно:

$$T_m = T_2 - \frac{T_2 - T_1}{\Phi(\theta)} \cdot \Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right);$$

$$T_s = T_{s0} - \frac{T_1}{\Phi^*(\theta \sqrt{\alpha_m} / \alpha_s)} \cdot \Phi^*\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right)$$

На рисунку 4.45 представлений розрахунковий розподіл градієнтів температури в об'ємі конусної насадки з твердою фазою сировини, яка характеризується температурою  $T_s$  та рідкій фазі розплаву полімерів з температурою  $T_m$  зі сторони піролізного реактора з чіткою границею між ними. Максимальна температура  $T_m$  біля 636 °С знаходиться в площині більшої основи зрізаного конусу насадки.

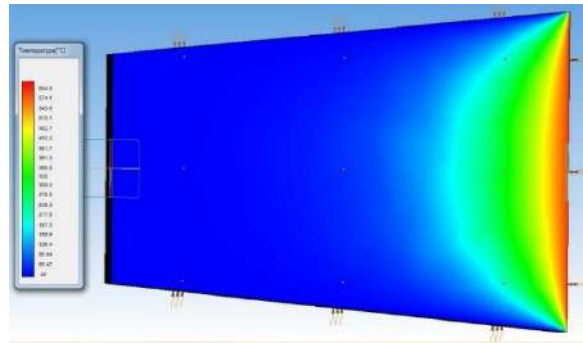


Рисунок 4.45 - Розподіл градієнтів температури в конусній насадці заповненою твердою фазою подрібненої сировини

Із рисунку видно, що полімери які знаходяться в конусній насадці, яка охолоджується водою, зі сторони більшої основи нагріваються від гарячого піролізного реактора і відповідно розплавляються. В даному випадку система водяного охолодження конусної насадки виключає розплавлення вхідних полімерів на 2/3 довжини конусної насадки, незалежно від їх ущільнення, що виключає витік розплаву полімерів в бункер плунжерної системи загрузки.

На другому етапі розглянуто умови затвердіння розплавлених склоподібних полімерів при охолодженні: Допустимо, що в початковий момент область  $x > 0$  представляє собою рідину, а область  $x < 0$  – тверді подрібнені полімери, в цьому випадку поверхня розділу співпадає з початком координат.

Значення розплаву, який тільки що затвердів відрізняється від значень термічних коефіцієнтів твердої фази подрібнених полімерів в області  $x < 0$ , тому присвоїмо термічним коефіцієнтам цієї області індекс ( $s_0$  і  $m_0$ ). Позначимо температуру первинного розплаву –  $T_2$ . Координата поверхні (A) розділу фаз визначається співвідношенням:  $X = 2\theta(\alpha_s t)$ , де  $\theta$  – корінь рівняння;

$$\frac{k_{s_0} \alpha_{s_0}^{1/2} e^{-\theta}}{k_s \alpha_{s_0}^{1/2} + k_{s_0} \alpha_s^{1/2} \Phi(\theta)} - \frac{k_{s_0} \alpha_s^{1/2} (T - T_n) \exp\left(\frac{-\alpha_s \theta^2}{\alpha_m}\right)}{k_s \alpha_m^{1/2} T_n \Phi^*(\theta \sqrt{\alpha_s / \alpha_m})} = \frac{\theta \lambda \pi^{1/2}}{c_s T_n}.$$

Після визначення  $\theta$ , яке може бути виконано будь-яким числовим методом (наприклад, методом ітерації), можна визначити температурні поля в усіх трьох областях (початкова тверда фаза подрібнених полімерів, розплав і розплав, який затвердіє при охолодженні):

$$T = \frac{k_s \alpha_{s0}^{1/2} T_n}{k_s \alpha_{s0}^{1/2} + k_{s0} \alpha_s^{1/2} \Phi(\theta)} \cdot \left( 1 + \Phi \left[ \frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right] \right).$$

На рисунках 4.46 та 4.47 представлено розрахунковий розподіл градієнтів температури при охолодженні піролізного реактора і конусної насадки з максимальною температурою  $T_m$  біля 400 і 280°C в площині більшої основи зрізаного конусу насадки. Як видно із рисунків полімери, які знаходяться біля стінок насадки практично не розплавилась, що виключає адгезію між розплавленими полімерами і стінками насадки, а при повному охолодженні конструкції це не завадить забезпечити повторний запуск піролізної установки при безперервній подачі відходів з допомогою плунжерної системи.

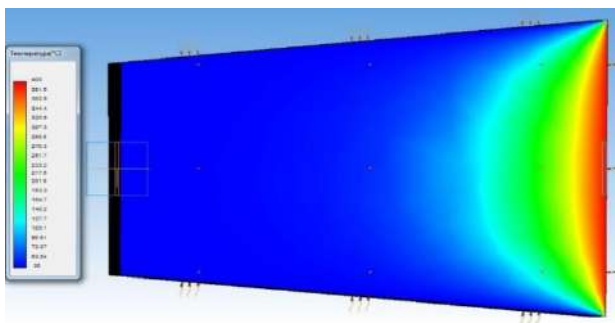


Рисунок 4.46 - Розподіл градієнтів температури при охолодженні піролізного реактора і конусної насадки з твердою фазою подрібненої сировини з максимальною температурою  $T_{m_0}$  біля 400°C в площині більшої основи зрізаного конусу насадки

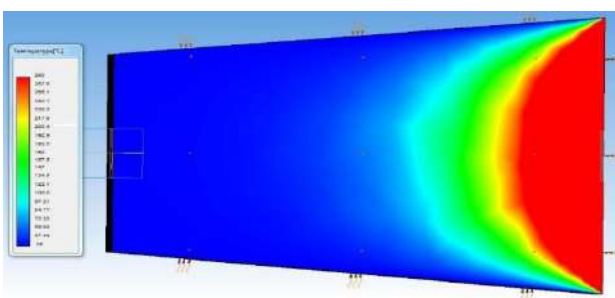


Рисунок 4.47 - Розподіл градієнтів температури при послідуєчому охолодженні піролізного реактора і конусної насадки з максимальною температурою  $T_m$  біля 280°C в площині більшої основи зрізаного конусу насадки

При дослідженні процесів ущільнення подрібнених полімерів в конусній насадці, припускаємо, що процес нагріву сировини носить адіабатичний характер, при якому відсутній теплообмін з навколишнім середовищем, в зв'язку з цим на



представленій схемі (рис. 4.44) границя (А) представлена як пряма лінія. Для спрощення розрахунків, прийемо наступні допущення [23]:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} \rightarrow n_T \rightarrow n_C.$$

Враховуючи загальний характер розвитку напружень і деформацій в сировині подрібнених полімерів як інерційної пружно в'язко пластичного середовища при динамічному стисканні і основні залежності цих величин для класичних реологічних тіл, деформаційна модель сировини представлена на рисунку 4.48 [120].

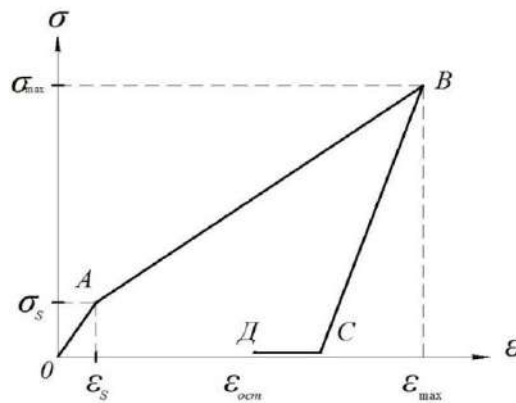


Рисунок 4.48 - Розрахункова схема пружно в'язко пластичного деформування: ОА – ділянка зворотних пружних деформацій; АВ – ділянка пружно пластичного деформування; ВС і СД – у частки відновлення пружної частини деформації після зворотного руху поршня плунжерної системи для повторної подачі сировини

Дана модель може бути представлена наступною системою рівнянь, яка враховує нелінійність при ущільненні і залежність динамічної межі пружності від швидкості деформації [120]:

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon_x + \mu \frac{d\varepsilon}{d\tau}, \quad \text{при } \varepsilon \leq \varepsilon_x \text{ (навантаження і розвантаження);}$$

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon_x + E_1 (\varepsilon - \varepsilon_x)^p, \quad \text{при } \varepsilon > \varepsilon_x; \quad \frac{d\varepsilon}{d\tau} > 0;$$

$$\sigma = \sigma_{max} + E_2 (\varepsilon_{max} - \varepsilon), \quad \text{при } \varepsilon_{max} > \varepsilon; \quad \frac{d\varepsilon}{d\tau} < 0;$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_c + \varphi (d\varepsilon/d\tau), \quad \text{при } \frac{d\varepsilon}{d\tau} > 0. \quad (4.1)$$

Де  $E_0 = \tan \theta_0$  – модуль пружності;  $E_1 = \tan \theta_1$  модуль пластичності;  $E_2 = \tan \theta_2$  – модуль пружного розвантаження (відповідно схеми рис. 4.49);  $\mu$  – коефіцієнт в'язкості;  $\tau$  – час;  $p$  – показник ступеню зміцнення сировини за межею

пружності;  $\sigma_{max}$ ,  $\varepsilon_{max}$  – максимальне напруження і деформація досягнуті при стисканні;  $\varepsilon_x = \sigma_x/E_0$  – межа пружної деформації;  $\sigma_x$  динамічна межа пружності;  $\varepsilon_c = D/E_0$  – константа, яка відповідає статичній межі пружності деформації сировини;  $P$  – зовнішнє навантаження;  $\varphi$  – функція, яка виражає залежність динамічної межі пружності від швидкості деформації сировини при навантаженні.

Розрахунок динамічної границі пружності  $\varepsilon_x$  проводимо відповідно до розрахункової схеми (рис. 4.48). Переміщення подрібнених елементів сировини показане на схемі можна описати диференціальними рівняннями:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x_1}{d\tau^2} + \frac{\mu_1}{m_{\text{пр}}} \left( \frac{dx_1}{d\tau} - \frac{dx_2}{d\tau} \right) + \frac{k_1}{m_{\text{пр}}} (x_1 - x_2) &= 0, \\ \frac{d^2x_2}{d\tau^2} - \frac{\mu_1}{m_2} \left( \frac{dx_1}{d\tau} - \frac{dx_2}{d\tau} \right) - \frac{k_1}{m_2} (x_1 - x_2) + \frac{k_1}{m_2} x_2 + \frac{\mu_1}{m_2} \frac{d_2}{d\tau} &= 0, \end{aligned}$$

де  $x_1$  і  $x_2$  – координати горизонтальних переміщень  $m_{\text{пр}} = m_1 + m$  і  $m_2$ ;  $k_1$  – жорсткість пружного елемента системи.

З урахуванням пропозиції про відсутність в'язких зав'язків в шарі сировини який розташовано безпосередньо на передній стінці поршня плунжерної системи і проведення необхідних перетворень, із даної системи рівнянь одержимо диференціальне рівняння четвертого порядку [120]:

$$\frac{d^4\varepsilon}{d\tau^4} + \frac{\mu_1(m_{\text{пр}}+m_2)}{m_{\text{пр}}m_2} \cdot \frac{d^3\varepsilon}{d\tau^3} + \frac{k_1(m_{\text{пр}}+m_2)+k_1m_{\text{пр}}}{m_{\text{пр}}m_2} \cdot \frac{d^2\varepsilon}{d\tau^2} + \frac{\mu_1k_1}{m_{\text{пр}}m_2} \cdot \frac{d\varepsilon}{d\tau} + \frac{k_1k_1}{m_{\text{пр}}m_2} \cdot \varepsilon = 0. \quad (4.2)$$

Загальне рішення цього рівняння представлено у вигляді:

$$\varepsilon(\tau) = e^{-n_1\tau}(c'_1 \cos\omega_1\tau + c''_1 \sin\omega_1\tau) + e^{-n_2\tau}(c'_2 \cos\omega_2\tau + c''_2 \sin\omega_2\tau) \quad (4.3)$$

Величини  $n_1$  і  $n_2$  являються коефіцієнтами затухання;  $\omega_1$  і  $\omega_2$  власні частоти динамічної системи в конусній насадці;  $c'_1$ ,  $c''_1$ ,  $c'_2$ ,  $c''_2$  – довільні постійні, визначення яких здійснюється методом трикратного диференціювання рівняння (4.3) і рішенням одержаної системи з допомогою визначників. Для рішення даного рівняння необхідно вибрати початкові умови у вигляді значень координат горизонтальних переміщень і їх похідних при  $\tau = 0$ , виходячи з положення, що в початковий момент часу відбувається обмін швидкостями тільки між масами  $m$  і  $m_1$ , які співударяються. Після визначення всіх параметрів рівняння (4.3) підставляємо їх в рівняння (4.1) і одержимо рівняння з одним невідомим  $\tau_c$ , який визначає момент часу при якому

деформація подрібнених полімерів стає рівною динамічній межі пружності, при відповідній швидкості деформування:  $\varepsilon(\tau_c) = \varepsilon_0 + \varphi \left( \frac{d\varepsilon}{d\tau} \right)_{\tau=\tau_c}$ . Вирішивши це рівняння відносно  $\tau_c$ , знаходимо величину  $\varepsilon_s (\sigma_s = E_0 \varepsilon_s)$ .

Для практичного використання математичної моделі створення технологічної пробки із сировини при завантаженні реактора, або із пірокарбону при його розвантаженні необхідно знати параметри, які характеризують їх реологічні властивості, тобто  $n_T = f(\rho)$  і  $n_C = f(\rho)$  – коефіцієнти, які визначають в'язкісні і пружні властивості середовища. Їх визначаємо на основі експериментальних даних, як для подрібнених полімерів при завантаженні, так і для пірокарбону при розвантаженні реактора. Експериментальні дані щодо характеристики в'язкості сировини, яка подається в реактор, в процесі її термічної утилізації методом піролізу, при різних температурах, представлені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 - Експериментальні характеристики в'язкості сировини

Вид сировини	В'язкість, сСт		
	120°C	250°C	400°C
Термопластичні полімери	6,8	0,85	0,41
Гума	12,5	5,8	4,5

Властивості коефіцієнтів в'язкості  $n_T = f(\rho)$  визначаються по формулі:  $n_T(\rho) = 2 \sqrt{\frac{F_1}{\pi}} E(\rho) (1 - \mu^2)$ , де:  $c = f(\rho)$  – швидкість поширення ультразвукової хвилі в середовищі, яке характеризується функцією щільності;  $F_1$  – робоча активна площа поршня;  $\rho$  – щільність середовища;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона. Аналогічно визначаються властивості коефіцієнтів в'язкості  $n_C = f(\rho)$  для пірокарбону в системі розвантаження реактора. Експериментальні характеристики в'язкості пірокарбону в системі розвантаження реактора представлені в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 - Експериментальні характеристики в'язкості пірокарбону

Вид сировини	В'язкість, сСт		
	350°C	550°C	600°C
пірокарбон	28,8	26,4	26,1

Пружні властивості сировини характеризуються модулем пружності, який має фізичний сенс тільки для подрібнених полімерів або гуми з температурою не більше 120°C. При більших температурах вони переходять в аморфний стан, що може бути застосовано і для гарячого пірокарбону, при якому модуль пружності наближається до нуля. Залежність модуля пружності термопластичних подрібнених полімерів і гуми від їх щільності в системі завантаження реактора представлені на рис 4.49.

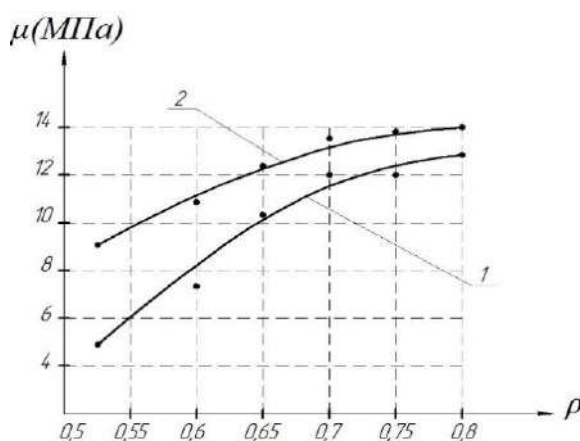


Рисунок 4.49 - Залежність модуля пружності термопластичних подрібнених полімерів (крива 1) і гуми (крива 2) від їх щільності при температурі 35°C в системі завантаження піролізного реактора

Пружні властивості коефіцієнтів  $n_c = f(\rho)$  для термопластичних подрібнених полімерів і гуми визначаються по формулі:  $n_c(\rho) = 0,6F_1 \cdot \rho \cdot v(\rho)$ . Для гарячого пірокарбону, якому властиві якості аморфного тіла, пружні властивості відсутні, при цьому  $n_c(\rho) = 0$ .

Дослідження математичної моделі процесу динамічного стискання сировини в системі завантаження проведено з використанням методів статистичної обробки даних. Адекватність розробленої математичної моделі перевірялась методом

порівняння розрахункових і експериментальних даних. Розбіжність результатів складає на більше 13%, з прийнятною ступеню вірогідності. Результати розрахункових і експериментальних досліджень представлені на рисунках. Дані графіки показують зміну напружень в шарах сировини і пірокарбону розташованих біля передньої стінки поршня плунжерної системи в залежності від тривалості процесу динамічного стискання і розрахункова величина переміщення поршня при заданій величині ущільнення.

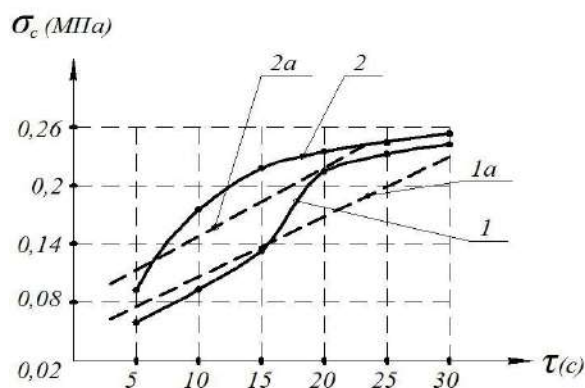


Рисунок 4.50 - Залежність  $\sigma_c = f(\tau)$  для вхідної подрібненої сировини (крива 1, 1a) і кінцевого гарячого пірокарбону (крива 2, 2a) при зусиллі  $P = 1,0$  Мпа (1,2 експериментальні дані, 1a і 2a - розрахункові)

Результати розрахунків напружень які виникають в шарах сировини в процесі її ущільнення представлені на рисунку 4.51.

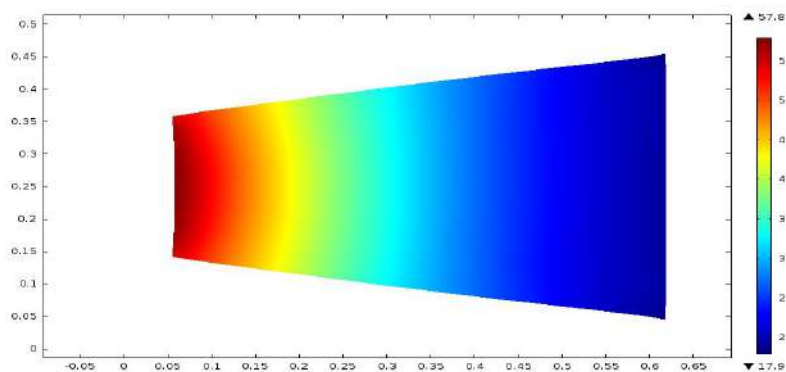


Рисунок 4.51 - Результати розрахунків напружень які виникають в шарах сировини біля поршня в процесі її ущільнення при  $P = 1,0$  Мпа

Розрахункова величина максимального переміщення поршня в процесі ущільнення подрібненої сировини склало 57,8 мм (рис.4.52).

Із рисунків 4.51 – 4.52 видно, що максимальне ущільнення подрібнених полімерів спостерігається зі сторони меншої основи зрізаного конусу, де розташований поршень плунжерної системи подачі полімерів в реактор. Порівнюючи результати розподілу градієнтів температури в конусній насадці (рис. 4.46 та 4.47) і напружень (рис. 4.51) можна стверджувати, що надійність герметизації реактора при безперервній подачі полімерів в основному залежить від інтенсивності охолодження конусної насадки і мало залежить від ущільнення подрібнених полімерів всередині насадки.

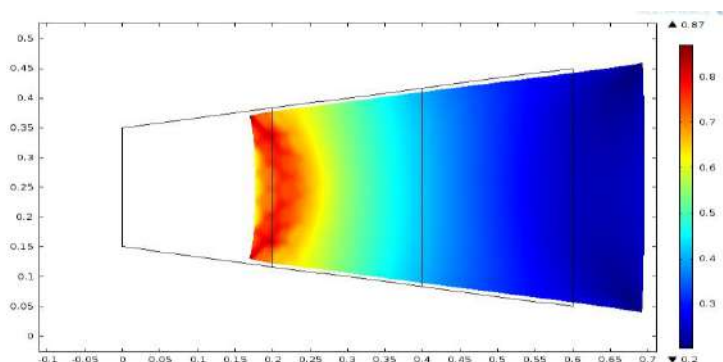


Рисунок 4.52 - Результати розрахунків величини переміщення поршня в процесі ущільнення подрібнених полімерів і подачі їх в реактор при  $P = 1,0$  Мпа

По аналогії системи подачі подрібнених полімерів в піролізний реактор, розглянемо параметри напружень і переміщення пірокарбону в аналогічній плунжерній системі безперервного видалення твердого залишку із піролізного реактора.

Результати розрахунків напружень які виникають в шарі пірокарбону в процесі його ущільнення з зусиллям  $P = 1,0$  Мпа представлені на рисунку 4.53.

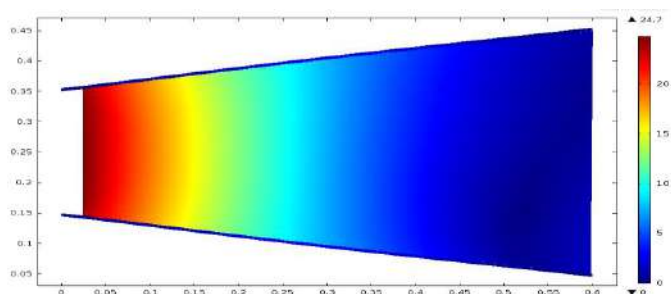


Рисунок 4.53 - Результати розрахунків напружень які виникають в пірокарбоні біля поршня в процесі його ущільнення при  $1,0$  Мпа

При цьому розрахункова величина максимального переміщення поршня в процесі ущільнення пірокарбону склала 24,7мм (рисунок 4.54).

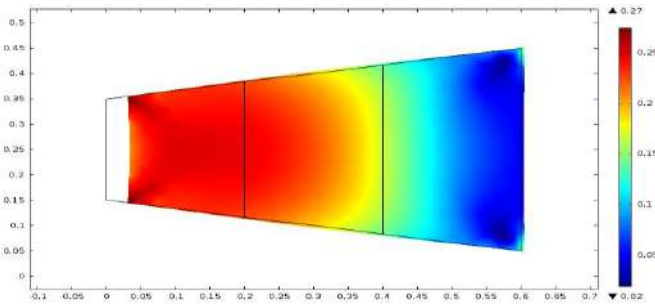


Рисунок 4.54 - Результати розрахунків величини переміщення поршня в процесі ущільнення пірокарбону при видалення його із реактора при  $P = 1,0$  Мпа

Для порівняння приводимо графіки напружень при стисканні початкової сировини і пірокарбону з максимальним зусиллям 4,0 Мпа, рисунки 4.55 – 4.57.

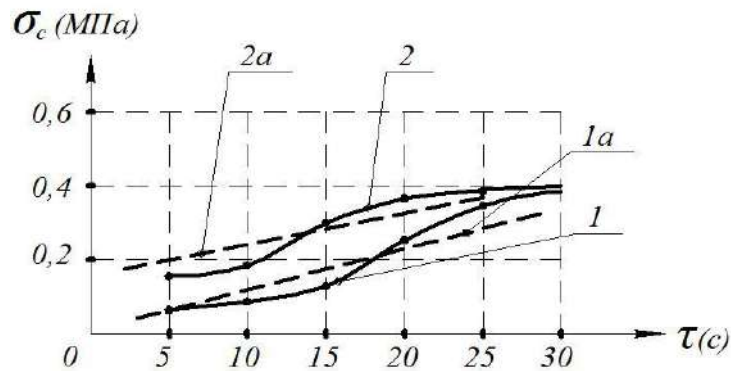


Рисунок 4.55 - Залежність  $\sigma_c = f(\tau)$  для вхідної сировини (крива 1, 1a) і вихідного гарячого пірокарбону (крива 2, 2a) при  $P = 4,0$  Мпа (1, 2 - експериментальні дані, 1a і 2a - розрахункові).

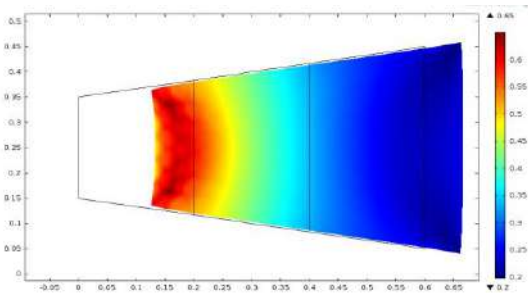


Рисунок 4.56 - Розрахункове напруження в об'ємі вхідної сировини при подачі її в реактор, при величині стискання 4,0 Мпа

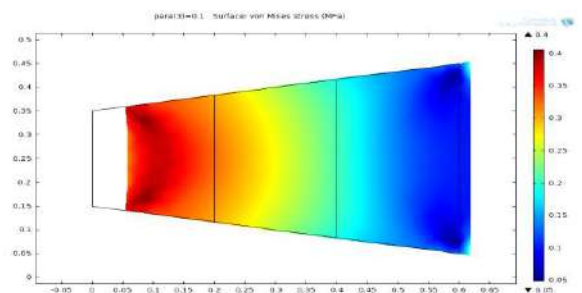


Рисунок 4.57 - Розрахункове напруження в об'ємі пірокарбону при видаленні його із реактора, при величині стискання 4,0 Мпа

Порівнюючи результати розрахунків, можна стверджувати, що збільшувати зусилля стискання як подрібнених полімерів при безперервній подачі їх в реактор, так і пірокарбону при його видаленні із реактора до 4,0 МПа недоцільно, оскільки це приведе до невиправданого ускладнення обладнання і підвищення матеріальних витрат.

#### 4.6 Результати дослідження технологічних параметрів екологічно прийняттого піролізного процесу автошин при додатковому навантаженні

Аналіз хімічного та покомпонентного складу гумових сумішей та відходів гумових виробів (Додаток Л) показує, що до їх складу входять різноманітні компонентів, однак їх сумарний вміст не перевищує 4-6 %. Це свідчить про те, що основними компонентами суміші таких відходів є натуральний каучук та різні типи синтетичних каучуків, основою яких є вуглець і водень, внаслідок чого гумові відходи мають високу теплоту згорання, що дозволяє проводити процес їх утилізації без використання додаткових енергоносіїв.

Низька теплопровідність гуми, що входить до складу покришок, обумовлює високі енергетичні витрати на проведення процесу, що призводить до збільшення вартості переробки і обмежує впровадження піролізних технологій в промисловому масштабі [30, 147, 299, 305, 324].

Для інтенсифікації термічної деструкції, підвищення коефіцієнту корисної дії устаткування, проведення процесу в безперервному режимі роботи, а також для можливості утилізації цілих шин запропоновано поєднання циркуляційного піролізу із додатковим навантаженням [341]. Запатентований метод утилізації гумотехнічних відходів (ГТВ) термічним розкладанням під дією статичного навантаження [253] базується на процесах механотермічної деструкції та залежить від тиску, сили навантаження на масив автошин в реакторі і температури.

Враховуючи, що коефіцієнт заповнення піролізного реактора цілими автошинами низький і кількість каучуку порівняно з пустотами в об'ємі реактора, не перевищує декілька відсотків, основним завданням при піролізі є забезпечення



максимальної теплопередачі і, відповідно, максимальної температури всередині піролізного реактора.

В результаті дії вимушеного силового статичного навантаження на шини в реакторі термопластична гума перетікає і заповнює всі пустоти, утворюючи суцільну масу ущільненої гуми з розташованими в ній бортовими кільцями. За рахунок ущільнення деформується конструкція зношених автошин та змінюється їх об'єм в реакторі, що призводить до збільшення коефіцієнту заповнення нижнього активного об'єму реактора цілими автошинами до 0,97–0,99 % [98, 341].

В основу ідеї було покладено принцип збільшення теплопровідності загального об'єму автошин в реакторі за рахунок досягнення максимального ущільнення цілих автошин в процесі їх піролізу, що дозволяє повністю витіснити надлишок повітря чи іншого газу з низькою теплопровідністю із об'єму призначених для утилізації автошини [123, 264].

Залежно від агрегатного стану гуми й взаємного розташування бортових кілець змінюються і фізичні властивості маси в реакторі, зокрема її щільність і теплопровідність. Перехід термопластичної гуми в газоподібну парогазову суміш вуглеводнів пов'язана з затратою теплоти фазового переходу як на роботу розширення, так і на подолання сил міжмолекулярної взаємодії. Фазовий перехід супроводжується різкою зміною щільності масиву автошин.

Оскільки під дією температури матеріал автошини змінює фізичний стан від твердого до в'язкопластичного, то для вирішення проблеми плинину рідини, в'язкість якої залежить від температури, необхідний фізико-математичний опис при моделюванні реального процесу ущільнення автошин в піролізному реакторі, необхідно вирішити задачу плинину в неізотермічних умовах.

Деструкція гуми відбувається по найменш міцним хімічним зв'язкам, а зі збільшенням температури в поєднанні зі статичним навантаженням зменшується міцність вулканізаційної сітки за рахунок руйнування активних ланцюгів у гумових відходах. Механічні сили, що розтягують, але ще не розривають ланцюгову молекулу, здатні змінювати реакційну здатність хімічних зв'язків і, отже, впливати на швидкість хімічних реакцій. Внаслідок цього знижується енергія активації та

прискорюється термічна деструкція, що супроводжується втратою частини відходів за рахунок реакцій деполімеризації, а відтак здійснюється інтенсифікація процесу утилізації гумових відходів.

Вище температури текучості настає термічний розпад молекулярних ланцюгів еластомеру, що супроводжується виділенням низькомолекулярних летких речовин, утворюючи первинну парогазову суміш (ПГС) важких високомолекулярних сполук

Для аналізу фізичного стану термопластичної гуми з бортовими кільцями під дією температури, в якості аналога були прийняті результати досліджень моделі плину в'язкого середовища, що залежить від температури, і динамічного ущільнення сировини з розсипчастою структурою, які найбільше підходять до аналізу процесу зміни фізичного стану термопластичної гуми при її ущільненні в процесі нагріву [10, 22, 23, 75].

Для опису процесів поширення тепла всередині протяжного реактора з зовнішнім нагрівом розглянуто фізичну модель цілих автошин (рис. 4.58) в трьох зонах реактора з різним фізичним станом термопластичної гуми автошини: перша зона реактора (9) з вихідною автошиною яка прогріта до температури  $100 - 120^{\circ}\text{C}$  і стиснута навантаженням  $P$ ; друга зона реактора (10) з деформованою автошиною при температурі  $250 - 350^{\circ}\text{C}$ ; третя зона реактора (11) з ущільненою масою термопластичної гуми автошин з бортовими кільцями та металокордом при температурі  $550 - 580^{\circ}\text{C}$ .

В фізичній моделі [123] розглядається реактор піролізу (1) з зовнішнім обігрівом  $t$   $^{\circ}\text{C}$  його днища і бокової поверхні і плитою (2), яка створює навантаження  $P$  на автошини в середині реактора. Вихідна автошина (3) з об'ємом повітря чи газу (6), що попередньо підігріта і стиснута навантаженням  $P$ , в подальшому частково деформується (4) з частковим об'ємом повітря чи газу (7). Під дією температури утворюється ущільнена маса термопластичної гуми автошин (5) разом з бортовими кільцями та металокордом. В подальшому, при температурі піролізу, об'єм термопластичної гуми (8) витісняє об'єм повітря чи газу і заповнює вільну порожнину всередині бортових кілець.

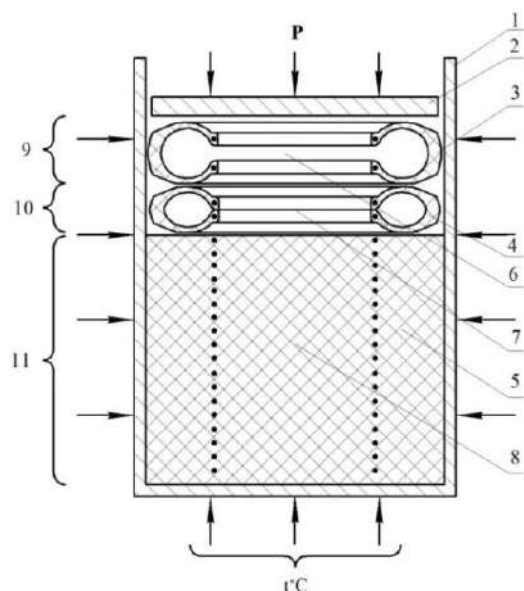


Рисунок 4.58 - Фізична модель піролізного реактора для дослідження реологічних властивостей цілих зношених автошин в процесі нагріву та стискання і вплив фізичного стану автошин на їх щільність при симетричному розташуванні

В першій зоні реактора розташовується вихідна автошина, яка попередньо нагріта утилізаційним теплом димових газів, при цьому із об'єму автошини димовими газами видаляється повітря, яке може спричинити загоряння або навіть вибух при безперервній подачі автошин в гарячий реактор в якому знаходяться пари горючих вуглеводнів.

На рисунку 4.59 представлені отримані експериментальні характеристики динаміки фізичного стану автошин в кожній зоні реактора.

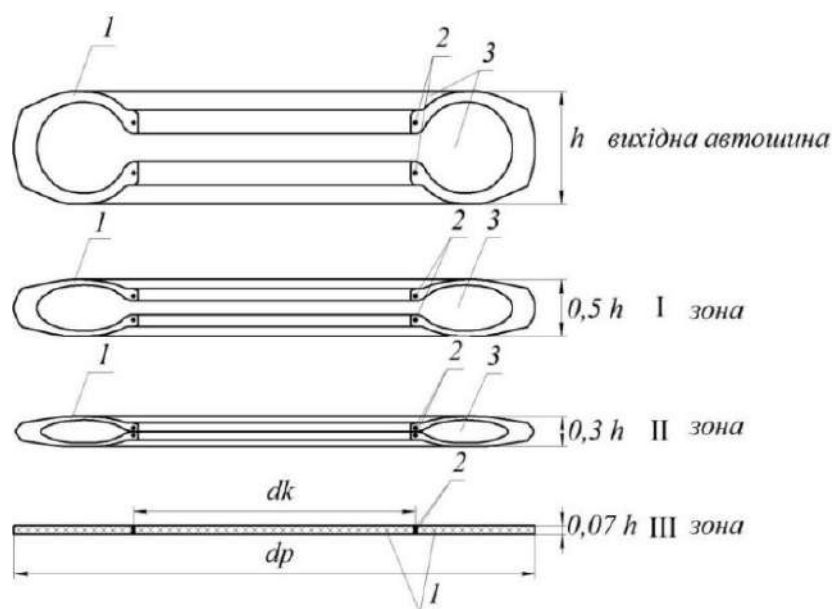


Рисунок 4.59 - Зміна форми і співвідношення компонентів автошин: 1 – гума автошини; 2 – бортові кільця; 3 – об'єм повітря та газів,  $d_k$ - діаметр кільця,  $d_p$  – діаметр реактора

Під дією температури  $t$  і навантаження  $P$  в першій зоні, автошини стискаються по висоті на 50 – 55%, деформація автошини відбувається тільки за рахунок навантаження.

В другій зоні реактора розташовуються наступні шари автошин, які за рахунок теплопередачі в реакторі нагріваються до температури 200 – 350°C, при цьому, під дією температури і сили навантаження  $P$  вони стискаються по висоті на 70 – 75%. В даній зоні гума є еластичною, що забезпечує збільшену деформацію автошини за рахунок навантаження.

В третій зоні реактора шари автошин за рахунок збільшеної теплопередачі в реакторі нагріваються до температури 550-580 °C. Гума під дією температури стає термопластичною, перетікає і заповнює всі порожнини як в реакторі так і між бортових кілець [10, 19, 27, 117, 240]. Під дією сили навантаження автошини стискаються по висоті до 90 – 93%, при цьому висота матеріальної частини автошини зменшується до 7 – 10% по відношенню до вихідної. Під час деструкції утворюються газові порожнини по всьому об'єму гуми, які заповнені леткими вуглеводами, загальний об'єм яких на вході в третю зону складає 7 – 10%. В кінці третьої зони гума повністю розкладається з утворенням твердого залишку – вуглецю, при цьому, під дією зовнішнього навантаження леткі вуглеводні додатково витісняються із об'єму вуглецю.

Ефективна теплопровідність шару автошин в першій і другій зонах може бути прирівняна до теплопровідності комбінованого елемента першого типу з усередненими параметрами трьох компонентів - гума, димові гази, бортові металеві кільця. Перша і друга зони є перехідними, тому при розрахунках температурних полів при переносі тепла, розглядається тільки третя зона. В третій зоні розглядається теплопровідність комбінованого елемента другого типу з усередненими параметрами двох компонентів – термопластичної гуми і бортових металевих кілець. Оскільки в більшості сучасних автошин металокорд відсутній, його функції виконують еластичні полімерні нитки, то в подальшому такий компонент як металокорд в розрахунках теплопровідності не враховується.

Оскільки перша і друга зони фізичного стану автошин в піролізному реакторі

являються перехідними, то для розробки математичної моделі розглядаються як граничні умови для третьої зони ущільнення. Для аналізу фізичного стану термопластичної гуми з бортовими кільцями в реакторі піролізу використано результати дослідження процесу ущільнення сумішей [22, 23]. Термопластична гума з розташованими в ній бортовими кільцями на початковому етапі третьої зони може бути представлена, як модель пружно – в'язкого тіла, деформація якого описується рівнянням:

$$P = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + n_r \frac{dx(t)}{dt} + n_c x(t),$$

де:  $P$  – зовнішнє навантаження на термопластичну гуму в реакторі піролізу;  $m$  – маса всього об'єму термопластичної гуми, яка знаходиться в піролізному реакторі;  $x$  – висота робочої зони реактора заповненої термопластичною гумою;  $n_r = f(P)$  і  $n_c = f(P)$  – коефіцієнти демпфірування (співвідношення коефіцієнту опору до подвоєної маси або подвоєному моменту інерції) і пружності відповідно в функції щільності термопластичної гуми;  $\rho$  – щільність термопластичної гуми.

Представлений механізм процесу термічного розкладання гумових відходів при їх статичному навантаженні дає підстави для моделювання інтенсивності утворення ПГС, що проходить в реакційній зоні, тобто в реакторі. Деформація стовпа термопластичної гуми в реакторі відбувається за рахунок осьового стискання при цьому настає пластична течія гуми і заповнення нею всіх пустот. Але в робочому об'ємі гуми відбуваються процеси з виділенням парогазової суміші легких вуглеводнів, утворюються парогазові порожнини, які характеризують параметр пружності характерний для середовища яке стискається. Цей процес описується наступною формулою:

$$\sigma = k[0,4 - \exp(-2 p_0)]E(\rho),$$

де  $\sigma$  – пружність,  $E(\rho)$  – модуль пружності в функції щільності термопластичної гуми і бортових кілець при різних температурах;  $p_0$  – тиск на термопластичну гуму в реакторі при зовнішньому навантаженні ( $P$ );  $k$  – поправочний коефіцієнт (визначається експериментально).

При аналізі прийнятої моделі припускається, що пружність, яка виникає в

конструкції автошини в першій зоні ущільнення, характеризується динамікою зміни геометричної форми автошини при зовнішньому навантаженні до відповідної температури. Напруженість збільшується (рис. 4.60) і дорівнює сумі напружень, які зазнає пружна конструкція всієї маси автошин в реакторі.

В другій зоні автошини при температурі втрачають пружність геометричної форми. Пружність визначається сумою напружень, які виникають в об'ємі гуми, в якій є порожнини заповнені димовими газами, які залишилися при її нагріві гарячими димовими газами перед подачею її в піролізний реактор, при цьому значення напруження знижується.

Пружність в третій зоні характеризується в основному сталим розвитком, коли гума в конструкції автошини вже втратила пружні властивості геометричної форми автошини і порожнин заповнених димовими газами. В цей час гума автошини переходить в в'язко пластичний стан [3, 53, 98, 115, 205, 240, 313, 346], і в її об'ємі при піролізу проходить інтенсивне термічне розкладання з виділенням ПГС, яка утворює локальні газові пустоти. На даному етапі пружність визначається як сума напружень, утворених силою стискання при ущільненні суміші термопластичної гуми, в об'ємі якої утворилися пружні пустоти з ПГС [52]. Слід відмітити, що з середини третьої зони крива різко падає вниз, це явище супроводжується тим, що в кінці процесу деструкції гуми, різко зменшується об'єм ПГС і відповідно зменшується кількість газових пустот в об'ємі гуми.

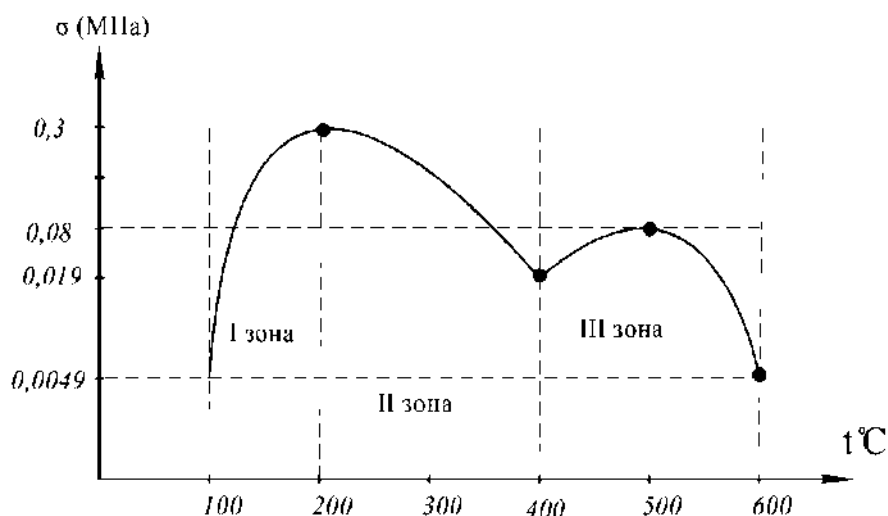


Рисунок 4.60 – Характеристика зміни пружності в масиві автошин в різних зонах піролізного реактора

Кожна із зон умовно характеризується достатньо великим діапазоном температур, величина якого визначається труднощами в оцінці чіткої границі зміни фізичного стану маси автошин в піролізному реакторі при фіксованій температурі.

Проведення моделювання процесу ущільнення потребує спільного розгляду математичних моделей рухомого поршня, який утворює ефект стискання і процесу ущільнення суміші термопластичної гуми і бортових кілець. Схема процесу стискання автошин в піролізному реакторі при взаємодії навантаження і температури представлена на рисунку 4.61.

Враховуючи динаміку рухомого поршня, модель стискання сировини записується наступною системою диференціальних рівнянь [4, 5]:

$$(p_1 F_1 - p_2 F_2) + (m_1 + m_2)g = m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + n_r \frac{dx_1}{dt} n_c (x_1 - S_T),$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{K}{s_T - x_1} \left( p_2 \frac{dx_1}{dt} - \frac{G_2 R T_2}{F_2} \right),$$

де  $p_1$  і  $p_2$  – абсолютний тиск в третій активній зоні реактора і зворотний за рахунок пружності термопластичної гуми в пасивній камері утвореної при відході поршня в момент завантаження нової автошини в реактор;  $F_1$  і  $F_2$  – площа відповідно робочої зони поршня і зворотної (в даному випадку  $F_1 = F_2$ );  $g$  – прискорення поршня за рахунок сили тяжіння;  $m_1$  – маса рухомого поршня;  $m_2$  – маса ущільнених автошин в третій зоні реактора;  $x_1$  – координата верхнього положення поршня;  $x_2$  – координата положення верхнього шару ущільнених автошин;  $S_T$  – робочий шлях поршня при стисканні автошин;  $k$  – показник адіабати – це відношення теплоємності при сталому тиску ( $C_p$ ) до теплоємності при сталому об'ємі ( $C_v$ ),  $G_2$  – інтенсивність видалення парогазової суміші;  $R$  – газова постійна гарячих летких вуглеводнів в складі парогазової суміші розміщеної в об'ємі термопластичної гуми;  $T_2$  – температура летких вуглеводнів в складі парогазової суміші.

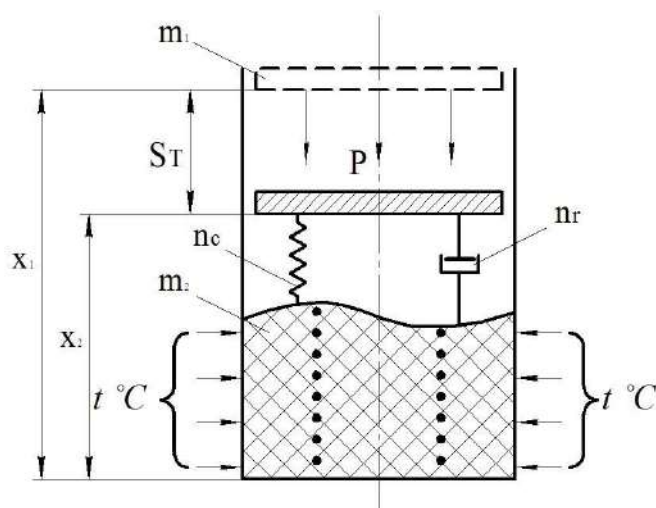


Рисунок 4.61 - Схема процесу динамічного стиснення автошин в піролізному реакторі при симетричній схемі розташування автошин відносно корпусу реактора

Для використання математичної моделі стиснення термопластичної гуми автошин разом з бортовими кільцями необхідно знати коефіцієнти, які характеризують її реологічні властивості у вигляді  $n_r = f(P)$  і  $n_c = f(P)$ . Величини даних коефіцієнтів, які обумовлюють в'язкість і пружність суміші термопластичної гуми насиченої пухирями ПГС визначається на основі експериментальних даних:

$$n_c(p) = 0,42 S_p \cdot \rho \cdot V(\rho);$$

$$n_r(p) = 1,4 \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} E(\rho) (1 - \mu^2),$$

де  $c = f(P)$  швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі в об'ємі ( $V$ ) термопластичної гуми в функції щільності;  $S_p$  – площа рухомого поршня, який стискає автошини;  $\rho$  – щільність суміші термопластичної гуми об'ємом ( $v$ );  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона,  $E(\rho)$  – модуль пружності в функції щільності термопластичної гуми і бортових кілець.

Дослідження математичної моделі процесу ущільнення термопластичної гуми разом з бортовими кільцями проведено з використанням методів статистичної обробки даних. Адекватність розробленої математичної моделі була перевірена методом порівняння розрахункових і експериментальних даних. Розбіжність результатів вкладається до 10%. Результати розрахункових і експериментальних досліджень представлені в графіках (рис. 4.62 та 4.63).



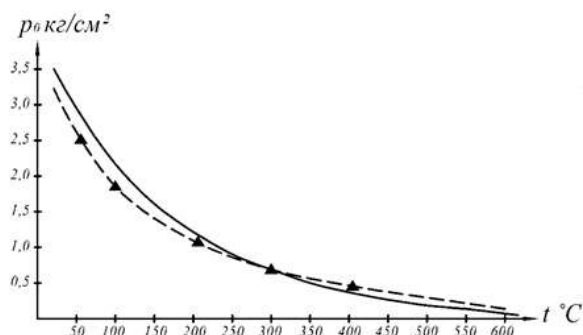


Рисунок 4.62 - Графік залежності зміни навантаження  $p_0$  на стовп автошин в піролізному реакторі при різних температурах нагріву (початкова температура автошини  $25^\circ\text{C}$  рівна температурі НС): — розрахункова крива, —▲— - експериментальна крива

Представлені залежності одержані при різних початкових температурах автошин, які завантажуються в реактор. Попередній прогрів їх до температури  $125^\circ\text{C}$  забезпечується за рахунок утилізації тепла димових газів, після обігріву ними реактора піролізу, що виключає втрати тепла в гарячому реакторі.

Із кривих представлених на рисунках можна стверджувати, що попередній нагрів автошин до температури  $125^\circ\text{C}$  дозволяє різко зменшити ефект стискання при відповідному зменшенні величини навантаження. В допустимих границях стискання, величину навантаження можна приймати постійною, наприклад, для даного випадку величину  $p_0$  можна прийняти в границях  $0,18 - 0,2 \text{ кг/см}^2$ , при цьому час піролізу автошин зменшується на 25 % до показників 6 год.

Для підтвердження теоретичних розрахунків проведено експеримент щодо зміни щільності маси автошин в вертикальному піролізному реакторі, при завантаженні цілими автошинами і постійному стисканні [264]. Розглянемо три характерні етапи, які характеризують різний стан автошин, зміну їх щільності по висоті реактора (рис. 4.64), що приводить до зміни теплопровідності в середині реактора в залежності від його висоти, в процесі піролізу.

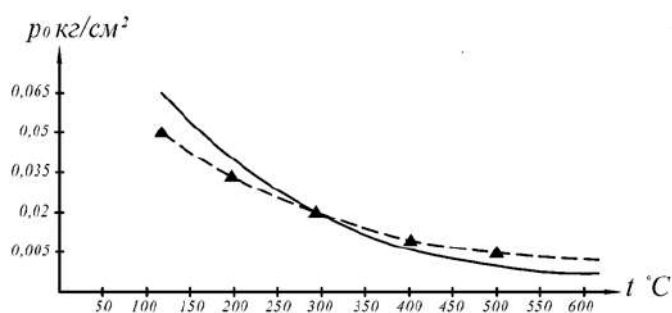


Рисунок 4.63 - Графік залежності зміни навантаження  $p_0$  на стовп автошин в піролізному реакторі при різних температурах нагріву (початкова температура автошини, перед її завантаженням в реактор -  $125^\circ\text{C}$ ): — розрахункова крива, —▲— - експериментальна крива

Діаграма характеризує зміну структури автошин, які подаються в реактор при безперервній роботі в стаціонарному тепловому режимі. Об'єм автошини  $R = 13$  або  $R = 14$  при загальній вазі автошин 6 – 8 кг має наступний розподіл компонентів: гума – 17%; метал бортових кілець – 3%; повітря – 80%.

I зона характеризується впливом температури 100-120°C і стискання з зусиллям порядку 0,2 кг/см<sup>2</sup> на автошини, які проштовхуються на 15% довжини реактора протягом  $\tau = 1,2$  год. При цьому, відбувається перерозподіл співвідношень об'ємів компонентів автошини: 65 - 70% повітря (П); 4,2 - 5% металу (М); 22,5 - 25% гуми (Г). Як видно із рисунку 4.64 перерозподіл об'ємів металу і гуми незначно змінюється, їх відносний об'єм збільшується, а повітря зменшується.

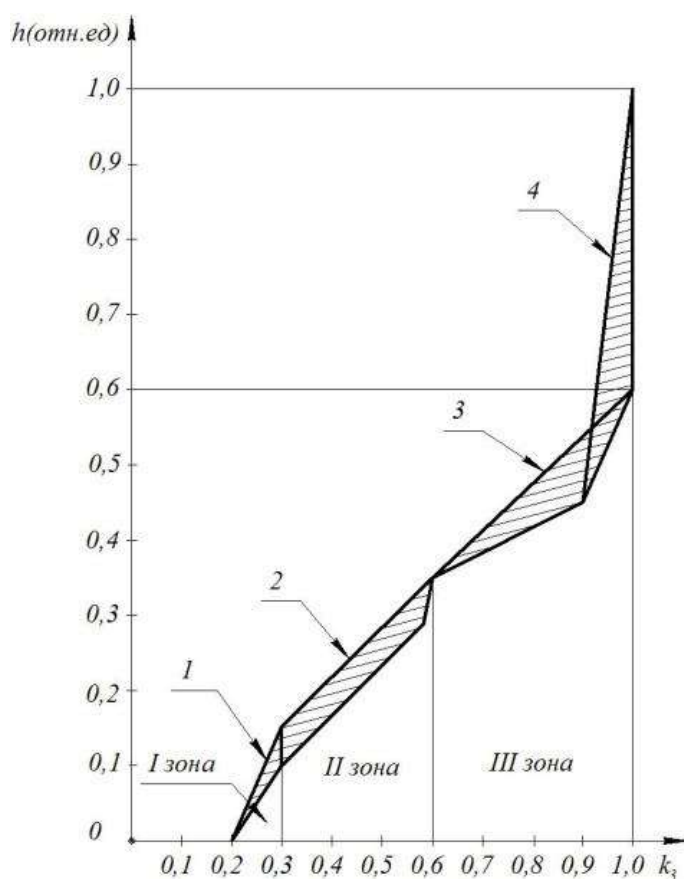


Рисунок 4.64 - Діаграма зміни коефіцієнта заповнення реактора цілими автошинами в процесі їх піролізу з одночасним стисканням: 1 - ділянка зони впливу температури 100-120°C і навантаження на автошини з зусиллям 0,2 кг/см<sup>2</sup> на коефіцієнт заповнення реактора; 2 - ділянка зони впливу навантаження на автошини з температурою 200 - 350°C; 3 - ділянка зони впливу навантаження на шини з температурою 550-580°C; 4 - ділянка зони впливу пористості гуми за рахунок утворення порожнин заповнених ПГС

II зона характеризується впливом температури до 200 – 350 °C при постійному зусиллі стискання всього набору автошин в реакторі 0,2 кг/см<sup>2</sup>, які проштовхуються на 37% довжини реактора протягом  $\tau = 2,5$  год. Загальна маса автошин ущільнюється, об'єм автошин зменшується до 30% від первинного. Відбувається

наступний перерозподіл компонентів в одиниці об'єму: 35-40% (П); 10,5-13% (М); 35-47% (Г).

III зона характеризується впливом температури до  $600^{\circ}\text{C}$  гума стає термопластичною, при стисканні з зусиллям  $0,2 \text{ кг/см}^2$  вона перетікає займаючи вільний об'єм в реакторі і всередині бортових кілець, при цьому повністю видаляється вихідний об'єм повітря чи димовому газу. При постійному зусиллі стискання всього набору автошин в реакторі вони проштовхуються на 60 % довжини реактора на протязі  $\tau = 3,8$  години. Висота профілю автошини, наприклад R14, зменшується з 163 мм до 16-25 мм, а її компоненти в одиниці об'єму перерозподіляються наступним чином: 22,5-24% (М); 70,5-73% (Г). Газові пухирі в масі гуми складають 3 - 5%. Вихідний об'єм повітря повністю видалений із реактора, але в процесі піролізу із ущільненого об'єму гуми продовжує виділятися парогазова суміш (ПГС) легких вуглеводнів.

Загальна щільність маси автошин з урахуванням маси металевих бортових кілець різко збільшується починаючи із температури  $300^{\circ}\text{C}$  (рис. 4.65). Виходячи з того, що процент металу з високою теплопровідністю по відношенню до гуми збільшується, то при несиметричній системі розташування автошин в реакторі це суттєво впливає на загальну теплопровідність всередині реактора.

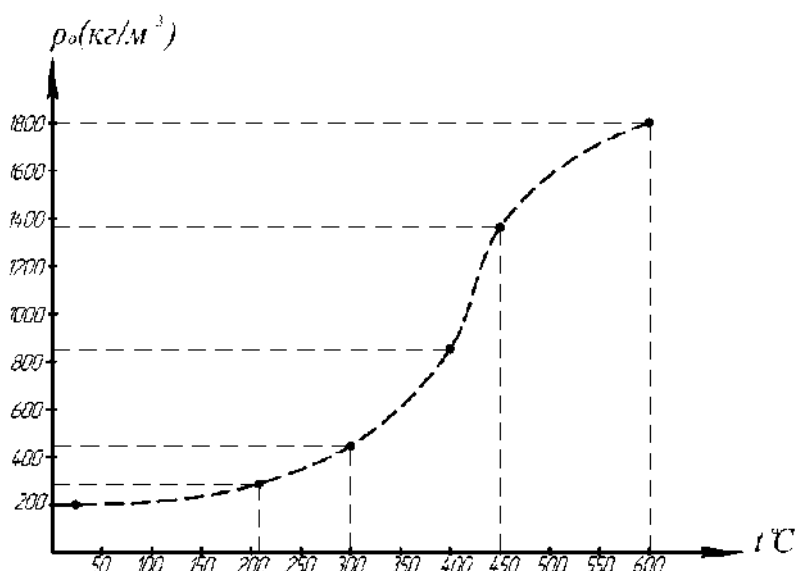


Рисунок 4.65 - Крива зміни щільності маси цілих автошин в циліндричному піролізному реакторі під впливом температури і постійного зовнішнього навантаження  $0,2 \text{ кг/см}^2$

В третій зоні вона різко збільшується за рахунок безпосереднього теплового контакту бортових кілець, які розташовані несиметрично по всій площі перетину реактора. В кінці третьої зони процес піролізу входить в стаціонарний режим, і якщо прийняти твердий залишок за 100% то, при цьому, вуглець (пірокарбон) буде складати – 75%, а металеві бортові кільця – 25%. Залишок вуглеводнів в пірокарбоні не перевищує 2 – 3%, тому він не враховується при моделюванні процесу.

Перенос тепла суттєво залежить від співвідношення гуми та повітря, які мають низьку теплопровідність, і долі бортових металевих кілець з порівняно високою теплопровідністю [123]. Тому загальна теплопровідність автошини в радіальній площині на різних етапах піролізу буде визначатися теплопровідністю запропонованої моделі комбінованої комірки з усередненими параметрами.

Важливою метою дослідження є проведення теоретичних розрахунків загальної теплопровідності анізотропних структур бінарних комірок, які складаються з гуми цілої автошини та розташованими в ній металевими бортовими кільцями, в залежності від їх об'ємної концентрації та геометричного розташування для забезпечення максимальної теплопровідності масиву цілих автошин різного діаметру відносно один одного.

Загальна теплопровідність масиву автошин в зонах реактора можна виразити:

$$c(u, r, t) \frac{du}{dt} = \text{div}[\lambda(u, r, t) \text{grad}u] + q(u, r, t),$$

де  $u$  – температура,  $c$  – питома об'ємна теплоємність,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $q$  – щільність джерела тепла зовнішнього обігріву реактора,  $r, t$  – координати.

Оскільки внутрішнє джерело тепла в реакторі відсутнє, то рівняння можна записати так:

$$c'(T) \frac{dT}{d\tau} = \text{div}[\lambda(T) \text{grad}(T)].$$

Автошини разом з реактором представляють собою тіло обертання, то доцільно використовувати циліндричну систему координат. Разом з тим, з метою підвищення точності рішення для першої та другої зони доцільно використовувати сферичну

систему координат [52, 53, 98].

Рівняння теплопровідності для зон нагріву в сферичній системі координат наступне:

$$c'(T) \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} \left( \lambda(T) r^2 \frac{dT}{dr} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{d}{d\theta} \cdot \left( \lambda(T) \frac{dT}{d\theta} \right).$$

Рівняння теплопровідності для ущільненого масиву компонентів автошин в III зоні деструкції можна представити в циліндричній системі координат:

$$c'(T) \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( \lambda(T) r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{d}{dz} \cdot \left( \lambda(T) \frac{dT}{dz} \right),$$

де  $r, z$  – циліндричні координати;  $r, \theta$  – сферичні координати;  $T$  – температура;  $\tau$  – час,  $c = \rho c$  – питома об'ємна теплоємність;  $\rho$  – щільність суміші компонентів автошини в третій зоні;  $c$  – питома масова теплоємність [252].

Для спрощення розрахунків теплопровідності при допустимій похибці будь-яка багатокомпонентна система може бути послідовно зведена до двокомпонентної, при відповідних граничних умовах. При виборі моделі приймаються наступні припущення і обмеження: матеріал гуми є термопластичним і має однорідну структуру, металокордом нехтуємо, матеріал бортових кілець – однорідний метал, розташований в площині, перпендикулярній тепловому потоку. Симетрична модель автошини і розташування її в піролізному реакторі з урахуванням прийнятих припущень представляє собою набір окремих компонентів, із яких складається автошина і їх співвідношення в одиниці об'єму на кожному із етапів піролізу.

Основою елементарної комірки є ізотермічне стискання, яке характеризується зміною об'єму при постійній температурі і плавленням термопластичної гуми при постійному тиску (рис. 4.66 та 4.67).

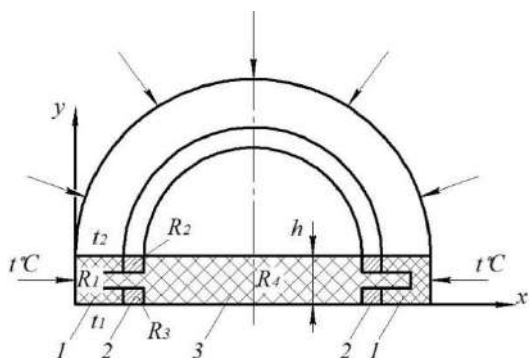


Рисунок 4.66 - Комбінована комірка автошини в першій і другій зонах реактора: 1 – елемент гуми; 2 – елемент металу (бортових кілець); 3 – елемент повітря або димових газів

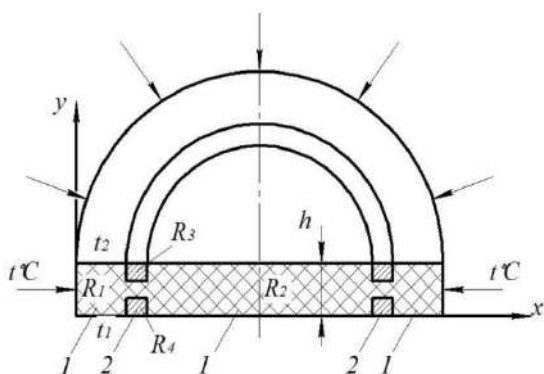


Рисунок 4.67 - Комбінована комірка шару автошини в третій зоні реактора: де 1 – елемент гуми; 2 – елемент металу (бортових кілець); 3 – елемент повітря або димових газів

На рисунках  $R_1$ - $R_4$  – теплові опори гуми та металевих бортових кілець в областях, які досліджуються.

При опису процесу переносу тепла в багатокомпонентній моделі необхідно встановити залежність ефективного коефіцієнту узагальненої теплопровідності  $\theta$  від структури комірки, коефіцієнтів узагальненої теплопровідності компонентів  $\theta_i$  і їх концентрації  $m_i$ , тоді:

$$\theta = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, m_1, m_2, \dots, m_i).$$

Теоретичне дослідження процесу теплопереносу виконується на ідеалізованій моделі структури, яка відображає основні геометричні характеристики реальної комірки автошини враховуючи всі істотні фактори, які визначають процес теплопереносу. Таку модель можна вважати адекватною реальної системі [252].

Кожен варіант відрізняється граничними умовами, які характеризують склад і структуру комірки, при умові повної термопластичної деформації автошини під дією температури і навантаження та при відсутності повітря.

Спочатку досліджується *перший варіант* симетричної структури комірки, яка еквівалентна масиву подрібнених автошин з видаленням бортових кілець; тепловий потік розповсюджується тільки в радіальному напрямку в об'ємі однорідного матеріалу (гуми) в системі координат  $(x, y)$ .

Якщо структура комірки – однорідна термопластична гума, то впливом металевих бортових кілець на температурне поле комірки нехтуємо; тепловий потік розповсюджується тільки в радіальному напрямку. Розрахункова залежність теплопровідності елементарної комірки заповненою термопластичною гумою при різних температурних перепадах в прийнятій комірки представлена на рис. 4.68.

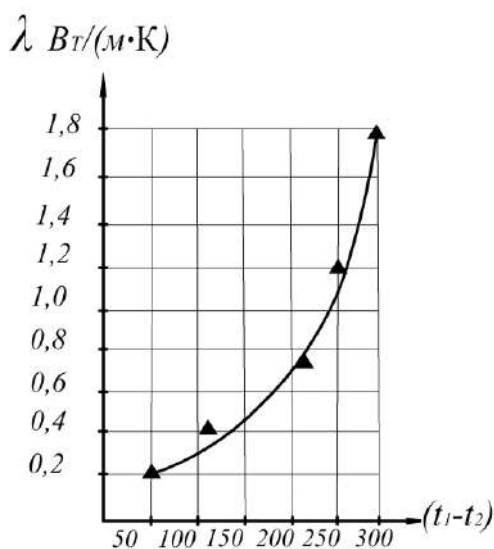


Рисунок 4.68 - Розрахункова залежність теплопровідності елементарної комірки

Теплопровідність монокомпонентної термопластичної гуми не перевищує 1,5 Вт/(м·К) і мало змінюється від перепаду температур в паралельній площині теплового потоку. Одержана розрахункова характеристика теплопровідності за похибки більше 50 % не може використовуватися для аналізу бінарних систем з великим діапазоном вихідної теплопровідності компонентів, які характерні для ущільнених автомобільних шин, а це не дозволяє забезпечити реальну оцінку температурного поля всередині реактора. Оскільки газова порожнина є проміжним елементом, то в подальшому, при аналізі залежності між геометричними параметрами структури і концентрацією компонентів, приймається за основу двокомпонентна структура автошини.

В *другому варіанті* розглядається симетрична бінарна структура двохкомпонентної комірки (термопластична гума з бортовими кільцями).

Для моделювання вводяться наступні позначення:  $\delta$  – половина ширини бортового кільця автошини;  $V$ ,  $V_1$ , і  $V_2$  – об'єми елементарної комірки та її компонентів (бортового кільця та термопластичної гуми);  $L$  – довжина ребра куба,  $C = \delta/L$  – відносний розмір бортового кільця. Залежність між параметром  $C$ , який характеризує геометричні параметри бортового кільця, і об'ємом гуми, в якій він знаходиться, визначається:

$$m_1 = \frac{V_1}{V}; m_2 = \frac{V_2}{V} = \frac{V - V_1}{V} = 1 - m_1; V = V_1 + V_2,$$

$$V^3 - [\delta^3 + 3\delta^2(L - \delta)] = 2\delta^3 - \delta^2L + L^3,$$

$$m_2 = 2C^3 - 3C^2 + 1.$$

Представлена залежність відображає вплив теплопровідності кожного компоненту від його концентрації в одиниці об'єму на загальну теплопровідність елементарної комірки (рис. 4.69).

Враховуючи, що вихідна теплопровідність гуми  $\lambda_1 = 0,13 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , а металу  $\lambda_2 = 58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , то загальна теплопровідність маси автошин в реакторі не перевищує  $0,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Аналізуючи результати теоретичних розрахунків, варіантів 1, 2, видно, що теплопровідність в середині реактора при симетричному розташуванні автошин і їх компонентів відносно циліндричного реактора має низьке значення і не перевищує  $0,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , що не є оптимальним варіантом.

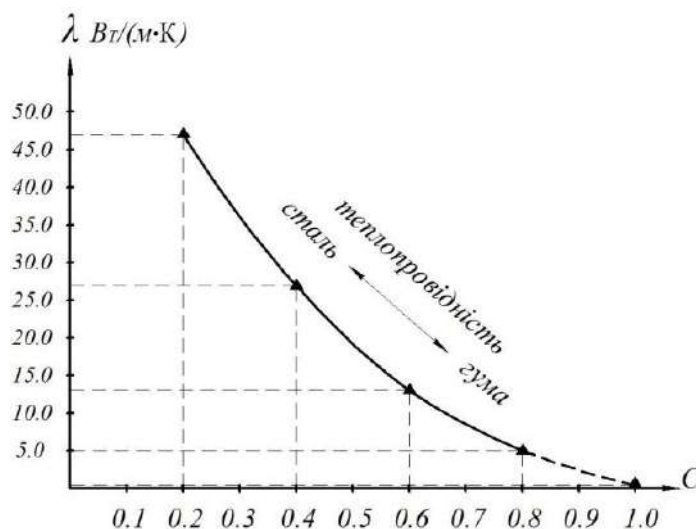


Рисунок 4.69 - Розрахункова залежність уточненої теплопровідності бінарної елементарної комірки (варіант 2)

Розглянемо *третій варіант*, коли діаметр реактора більший за діаметр автошин, які в нього завантажуються, мінімум в 1,5 рази, при цьому автошини разом з бортовими кільцями зміщуються один відносно другого, утворюючи несиметричну систему розподілу металевих бортових кілець у вигляді об'ємної металевої решітки (рис. 4.70).

В *третьому варіанті* проведено теоретичні дослідження в більш реалістичних умовах розташування ущільненої маси автошин відносно реактора з уточненням оцінки загальної теплопровідності анізотропної несиметричної структури елементарної комірки з компонентами гуми і бортових кілець (рис. 4.71).

Об'єм даного елемента характеризується коефіцієнтом заповнення піролізного реактора металевими включеннями до 98 % (бортовими кільцями і металокордом автошин) і гумою.



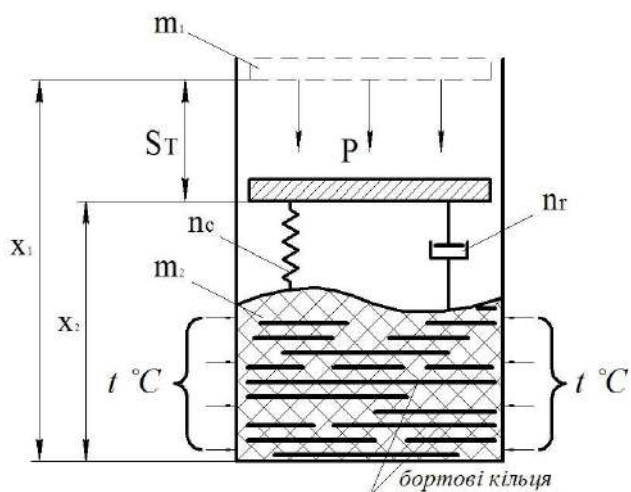


Рисунок 4.70 - Фізична модель процесу динамічного стискання автошин в піролізному реакторі при несиметричній схемі розташування автошин відносно вісі циліндричного реактора



Рисунок 4.71 - Елемент моделювання піролізного реактора з об'ємною решіткою утвореною бортовими кільцями і металокордом автошин під дією статичного навантаження

Розглядається несиметрична структура бінарної комірки, яка складається з термопластичної гуми та з двох бортових кілець. Компоненти в загальній структурі є анізотропними і мають різні властивості; в анізотропній несиметричній структурі компонент – бортові кільця круглої форми.

З фізичної моделі (рис. 4.70) виділяється орієнтована система розташування компонентів елементарної несиметричної комірки і представлено її 1/8 частину [58, 341]. Подальший аналіз проводиться на основі подрібнення елементарної комірки безкінечно тонкими адіабатними вертикальними площинами (паралельно тепловому потоку) на характерні області, в яких теплові опори обчислюються по формулам для плоских стінок:

$$R_1 = \frac{L_x}{\lambda_1(L_y L_z - l_y l_z)}, R_2 = \frac{L_x - l_x}{\lambda_1 L_y L_z}, R_3 = \frac{l_x}{\lambda_2 l_y l_z},$$

де  $L_x, L_y, L_z, l_x, l_y, l_z$  – відповідні розміри комірки із термопластичної гуми і відповідно бортового кільця;  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – коефіцієнти теплопровідності відповідно гуми і металевого бортового кільця.

В зв'язку зі зміною концентрації компонентів в одиниці об'єму автошини вводиться поняття коефіцієнтів концентрації  $k_x, k_y, k_z$  по напрямках:

$$k_x = \frac{l_x}{L_x}, \quad k_y = \frac{l_y}{L_y}, \quad k_z = \frac{l_z}{L_z}.$$

Тоді:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1 - \frac{m_2}{k_x} + \frac{vm_2}{k_x [k_x + v(1 - k_x)]}.$$

Формула задовольняє наступні граничні переходи:

1. У разі відсутності бортових кілець  $k_x = 0$ , тоді  $\lambda = \lambda_1$  теплопровідності термопластичної гуми (*варіант 1*).

2. В разі коли коефіцієнт концентрації компоненту бортових кілець  $k_x = 1$  тоді  $m_2 = 1$  і загальна теплопровідність буде відповідати компоненту бортових кілець  $\lambda = \lambda_2$ .

3. При однаковій теплопровідності двох компонентів  $v = 1, \lambda = \lambda_1 = \lambda_2$ .

4. При  $S = 1$ , бортові кільця можна розглядати як суцільні пластини, паралельні тепловому потоку, якщо  $k_x = 1$  бортові кільця в перетині утворюють прямокутники розташовані перпендикулярно тепловому потоку, в цьому випадку формула буде відображати найбільший чи найменший ефект теплопровідності двохкомпонентної ущільненої маси автошин:

$$\lambda = 1 - \frac{\lambda_2}{vm_1 + (1 - m_1)}; \quad \lambda = \lambda_2(1 - m_1) + \lambda_1 m_1.$$

5. Якщо  $k_x = k_y = k_z = k$ , то  $k = m_2^{1/3}$ , компоненти набувають форми куба, а формула (42) перетворюється в наступний вид:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{v - (v - 1)(1 - m_2^{\frac{2}{3}})m_2^{\frac{1}{3}}}{v - m_2^{\frac{1}{3}}(v - 1)}.$$

Представлена формула теплопровідності анізотропної структури елементарної

бінарної комірки з компонентами металевого бортового кільця і гуми дозволяє визначити теплопровідність масиву з найбільш реалістичною структурою в процесі піролізу цілих автошин, поєднаного з дією на них статичного навантаження.

Розрахунки узагальненої теплопровідності ущільненого двокомпонентного масиву автошин в реакторі за розробленою методикою не виявили обмежень на довжину і товщину шару зв'язуючої термопластичної гуми, оточуючої бортові кільця.

На рисунку 4.72 показані характеристики зміни загальної теплопровідності бінарної комірки в залежності від концентрації термопластичної гуми і сталі бортових кілець.

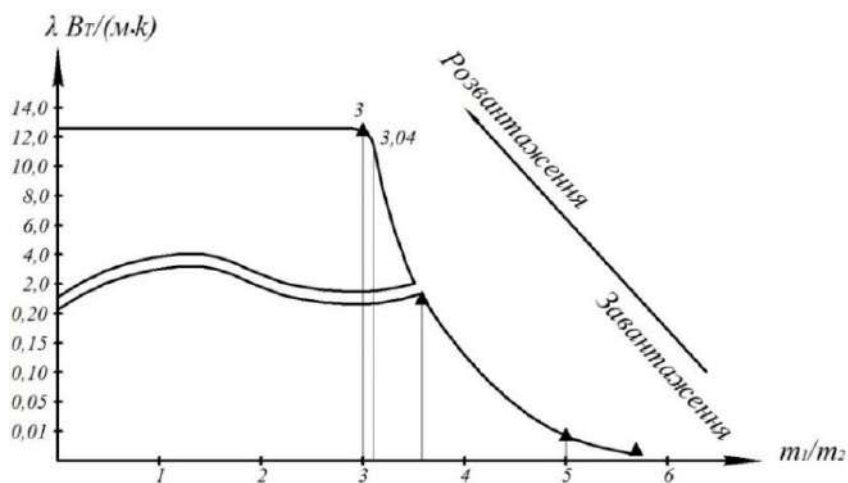


Рисунок 4.72 - Теоретичний уточнений розрахунок загальної теплопровідності анізотропної не симетричної структури бінарної комірки в залежності від об'ємної концентрації компонентів (варіант 3)

Як видно із кривої, загальна теплопровідність масиву автошин під дією температури і статичного навантаження поступово збільшується (справа наліво) відповідно, від моменту завантаження, зменшується об'єм газу (повітря) за рахунок стискання автошин і збільшується концентрація металевих бортових кілець і гуми. Збільшення теплопровідності масиву автошин відбувається по експоненціальному закону до моменту дотику бортових кілець один до одного і утворення теплового контакту між ними, далі до моменту розвантаження, ділянка кривої приймає горизонтальне положення і теплопровідність не збільшується незалежно від температури і величини стискання. Збільшення загальної теплопровідності від

збільшення концентрації сталі бортових кілець, похибка в розрахунках не перевищує 3 %.

Для максимального наближення результатів досліджень температурних характеристик на стенді циклічної дії до результатів, які будуть одержані на промисловій установці безперервної дії, частини подрібнених автошин відбиралися з умовою дотримання співвідношення об'єму гуми до сумарного об'єму металу (металокорд та дріт бортових кілець) відповідно до цілої автошини. Отримані результати дозволять використати їх для адаптації математичної моделі щодо роботи промислової установки безперервної дії утилізації цілих зношених шин.

Проведено серію експериментальних досліджень в двох варіантах: варіант 1 – традиційний піроліз подрібнених автошин в реакторі, коли щільність масиву автошин в реакторі не перевищує 60 %, і варіант 2 – піроліз подрібнених автошин в реакторі з навантаженням (рис. 4.72) [133, 341].



*a*

*б*

*в*

Рисунок 4.72 – Проведення експериментальних досліджень екологічно прийняттого піролізного процесу автошин під дією навантаження: *a* – завантаження автошин в реактор; *б* – розташування навантаження в реакторі; *в* – початок роботи реактора

Порізані на частини розміром 100×100 мм автошини з металокордом завантажували в реактор об'ємом 14 дм<sup>3</sup>, а зверху на них встановлювали різну кількість дисків масою 0,5 кг кожен (таблиця 4.9), які створювали статичне навантаження на шматки автошин, розташованих в реакторі в процесі їх піролізу.

За допомогою програми *COMSOL* було проведено серію розрахунків для оцінювання точності складання математичної моделі та розробки рекомендацій зі

збільшення продуктивності установки для утилізації ГТВ. Програмне забезпечення виконує кінцево-елементний аналіз разом з адаптивним будуванням сітки, використовуючи ряд чисельних рішень.

Таблиця 4.9 - Зміна температурного поля маси автошин в піролізному реакторі при різних статичних навантаженнях

№ експерименту	Маса шматків автошин, кг	Статичне навантаження, кг/см <sup>2</sup>	Температура в центрі реактора, °С	Темп-ра на відстані ¼ діаметра реактора, °С	Темп-тура на внутрішній поверхні корпусу реактора, °С	Темп-ра на зовнішній поверхні реактора, °С
1	3,68	–	310	450	550	582
2	3,75	–	312	462	551	582
3	3,62	–	311	457	551	583
4	3,70	0,08	365	480	550	581
5	3,78	0,08	370	475	550	582
6	3,68	0,08	368	460	552	583
7	3,65	0,1	380	485	551	580
8	3,77	0,1	385	490	550	582
9	3,81	0,1	385	492	551	582
10	3,69	0,2	428	507	551	583
11	3,68	0,2	420	512	550	581
12	3,78	0,2	425	510	550	582
13	3,72	0,3	430	510	552	583
14	3,82	0,3	429	511	551	582
15	3,65	0,3	425	515	562	583

Для розрахунків температурного поля у вертикальному піролізному реакторі, заповненому автошинами з статичним навантаженням, використовувався метод кінцевих елементів. В результаті розв'язання диференціального рівняння теплопровідності, побудовано графіки, що демонструють ущільнення, теплопровідність і процес розподілу температурного поля всередині піролізного реактора (рис. 4.73 – 4.76).

Умови теоретичного розрахунку: варіант 1 - розрахункова модель без статичного навантаження, варіант 2 – розрахункова модель при статичному навантаженні  $0,35 \text{ кг/см}^2$ . Практичні дослідження: варіант 1 — реактор заповнений частинами автошин без статичного навантаження; варіант 2 — реактор заповнений шматками автошин при статичному їх стисканні силою  $0,32 \text{ кг/см}^2$ .

Максимальна щільність шматків автошин в нижній частині реактора у варіанті 1 складає  $1080 \text{ кг/м}^3$ , тоді як у варіанті 2 -  $1800 \text{ кг/м}^3$  (рис. 4.73).

Відповідно змінюється й коефіцієнт теплопровідності масиву автошин в реакторі (рис. 4.74). Порівнюючи графіки двох варіантів видно, що у варіанті 2 максимальна теплопровідність в нижній частині реактора складає  $12,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , а у варіанті 1 –  $0,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , що майже в 100 разів менше, порівняно з варіантом 2. Таке стрімке збільшення теплопровідності виникає не лише через збільшення коефіцієнту ущільнення маси гуми, а в основному за рахунок несиметричного розташування і зближення один до одного металевих бортових кілець, коефіцієнт теплопровідності яких досягає  $50 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

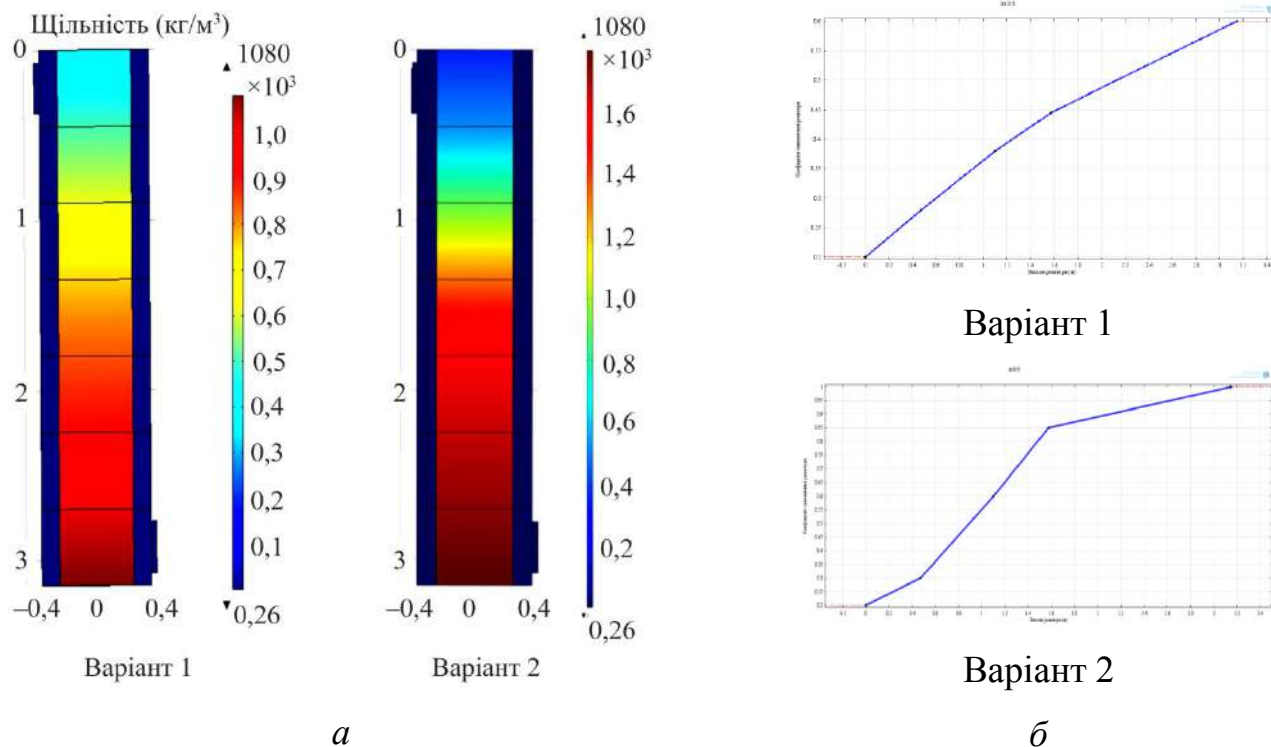


Рисунок 4.73 - Спектральний аналіз щільності (а) та криві зміни щільності автошин (б) залежно від висоти піролізного реактора ретортного типу без навантаження (варіант 1) та при статичному стисканні їх в процесі піролізу (варіант 2)

Відповідно, наведені характеристики впливають на інтенсивність нагрівання реактора, зменшуючи загальну тривалість процесу утилізації відходів.

При порівнянні розподілу температур у варіантах 1 і 2 (рис. 4.75 та 4.76), видно, що зі збільшенням теплопровідності температура в об'ємі ущільнених автошин розподіляється більш рівномірно, а з урахуванням того, що теплоємність масиву також збільшується, то при одній і тій же потужності пристрою, який обігріває реактор, температура в центрі реактора за другого варіанту дослідів зменшується приблизно на 100 °С. Це пояснюється відсутністю різкого піку розподілу температур в центрі реактору (рис. 4.76 варіант 2).

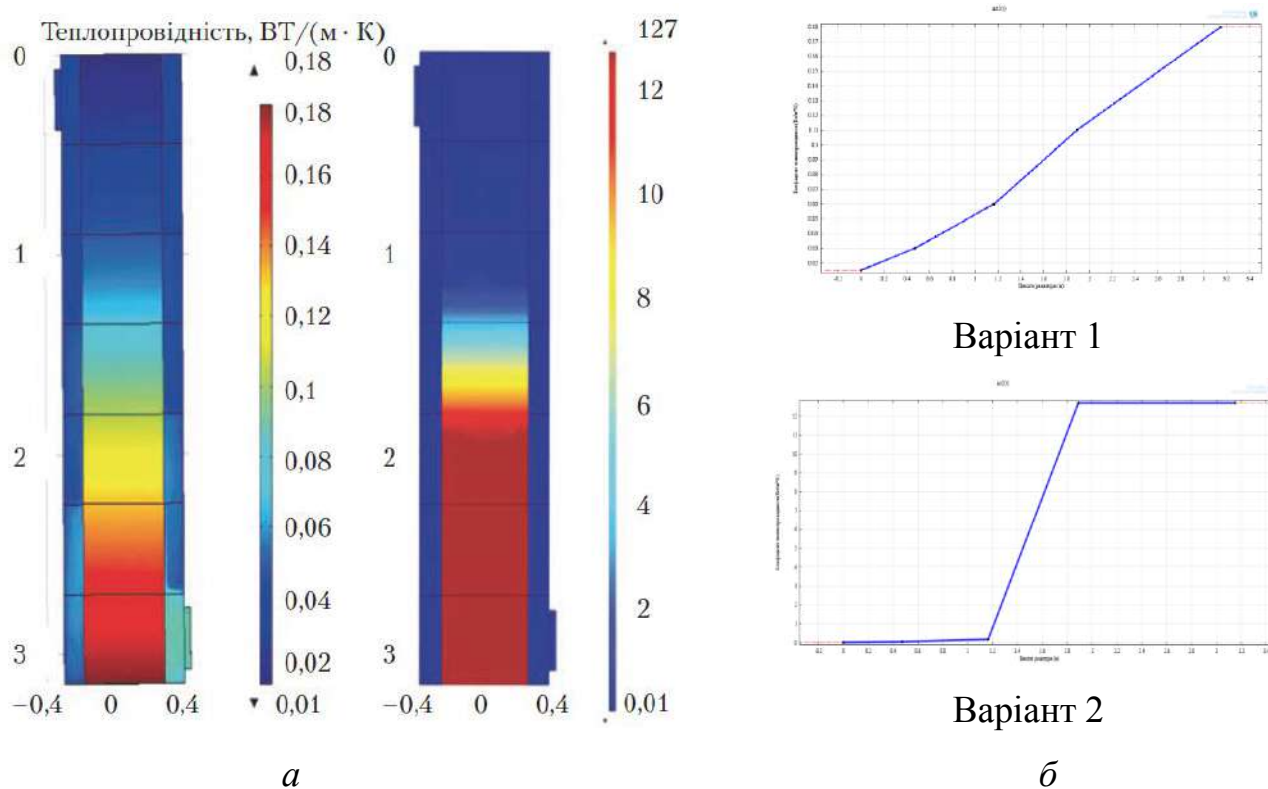


Рисунок 4.74 - Спектральний аналіз теплопровідності (а) та криві зміни коефіцієнту теплопровідності (б) залежно від висоти піролізного реактора ретортного типу без навантаження (варіант 1) та при статичному стисканні автошин в процесі піролізу (варіант 2)

Результати виконаного дослідження технологічних параметрів піролізу зношених автомобільних шин при їх статичному навантаженні та результати експериментальних досліджень узагальнено в таблиці 4.10 та 4.11.

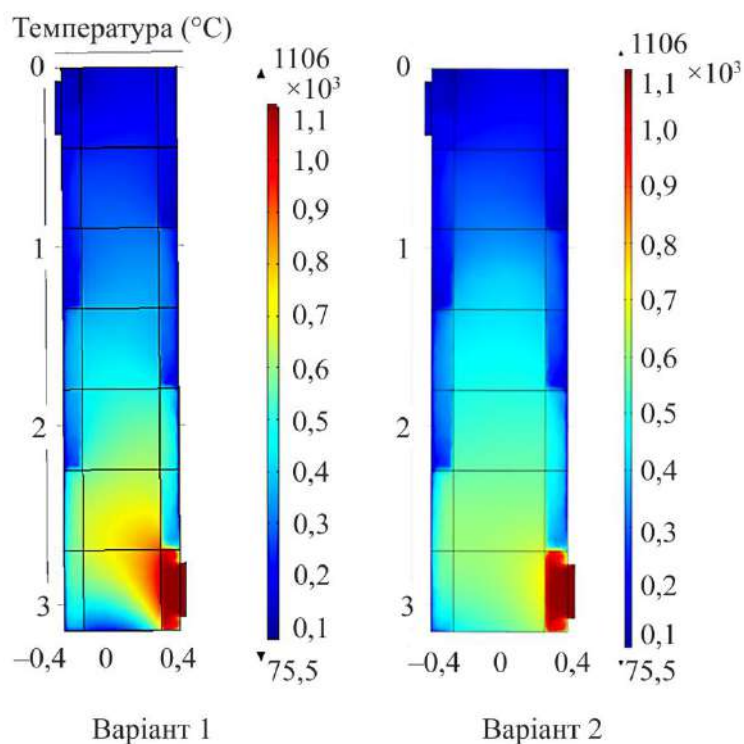


Рисунок 4.75 - Характер розподілення температури по масиву подрібнених автошин в піролізному реакторі ретортного типу без навантаження (варіант 1) та при стисканні їх в процесі піролізу (варіант 2)

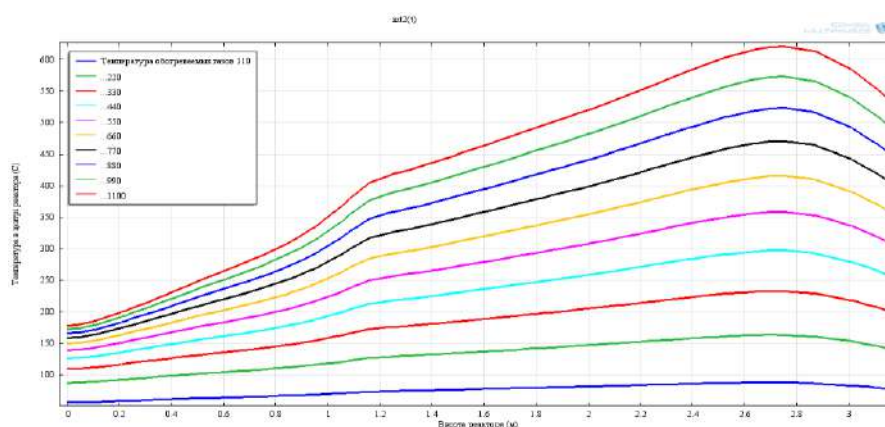
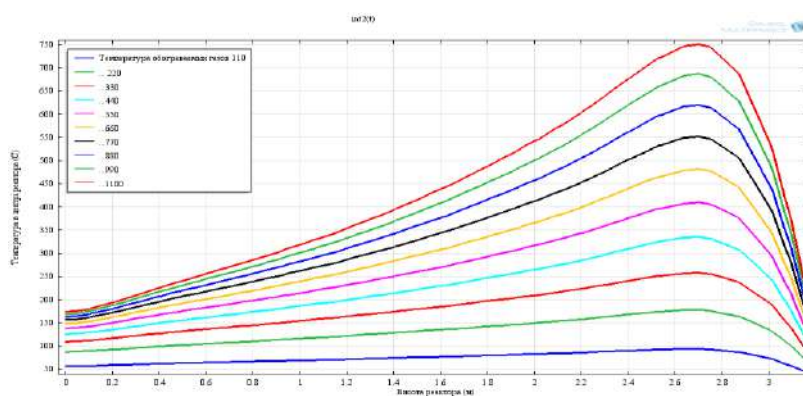


Рисунок 4.76 - Криві розподілу температури в центрі масиву подрібнених автошин в процесі їх нагрівання димовими газами різної температури в піролізному реакторі ретортного типу без навантаження (варіант 1) та при стисканні (варіант 2)



Таблиця 4.10 – Результати експериментальних досліджень та теоретичних розрахунків щільності маси ГТВ в реакторі при різних статичних навантаженнях

Маса шматкі в ГТВ, кг	Статичне навантаження, кг/см <sup>2</sup>	Тем-ра в центрі реактора, °С	Зовнішня тем-ра корпусу реактора, °С	Теор. Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Експер. Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Час повної утилізації відходів, год
3,75	–	312	582	1080	939	6,4
3,70	0,08	365	581	1158	1001	6,1
3,81	0,10	385	582	1475	1383	5,9
3,78	0,20	425	582	1628	1515	5,2
3,82	0,30	429	582	1800	1694	4,7

Таблиця 4.11 - Порівняльна таблиця теоретичних розрахунків та результатів експерименту

Показники	Теор. розрахунки		Експер. дослідження	
	варіант 1	варіант 2	варіант 1	варіант 2
Зовнішня температура корпусу реактора, °С	600	600	800	820
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,07	9,8	0,11	11,5
Температура в центрі реактора, заповненого шматками подрібнених автошин, °С	310	425	415	580

Таким чином, результати експериментальних досліджень довели ефективність застосування статичного навантаження під час утилізації гумових відходів, про що свідчить як збільшення теплопровідності масиву автошин в реакторі, як було передбачено теоретичними розрахунками, так і зменшення загального часу процесу на 29 % [133]. Різниця між результатами теоретичної моделі та практичних досліджень не перевищує 13 %.

Для теоретичного дослідження розрахункової продуктивності реактора

піролізу стиснених автошин в процесі їх безперервного завантаження, який проектується, задаються контрольні параметри експериментального реактора: швидкість просування автошин в реакторі 0,35 – 0,525 м/год; температура теплоносія обігріву реактора 900 – 1100 °С; питома вага навантаження на автошини 0,02 – 0,08 кг/см<sup>2</sup>; еквівалентний діаметр реактора 0,6 – 1,2 м; частота подачі автошин в реактор 10 – 15 шт./год; продуктивність реактора 35 – 50 кг/год.

На основі розробленої математичної моделі циркуляційного процесу піролізу автошин з ефектом стискання в процесі піролізу і аналізу експериментальних даних одержано кінетичне рівняння відносно середнього терміну перебування автошини в реакторі, який достатній для видалення із автошин 80 – 95% летких вуглеводнів. З урахуванням середнього терміну перебування автошини в реакторі згідно числа Фур'є, одержано рівняння відносно продуктивності піролізного реактора:

$$G = 1,6 \cdot 10^{-4} \times Re \times Pr \times \left(\frac{S_1}{S_2}\right) \times \left(\frac{Q - Q_0}{t_{ст} - Q}\right) \times d^2 \times a \times G_3 \approx 32 - 42,4 \text{ кг/год.},$$

де  $Re_{ж}$  – критерій Рейнольдса ( $Re_{ж} = \frac{VD_1 \rho_c}{\mu}$ ,  $V$  - швидкість руху автошин в реакторі 0,15 – 0,25 м/год,  $D_1$  – внутрішній діаметр реактора – 0,6 м,  $\mu$  – динамічна в'язкість маси термопластичної гуми 11,2 Н·с/м<sup>2</sup>,  $\rho_c$  – щільність маси автошин в третій зоні реактора - 0,97);  $Pr$  – критерій Прандтля ( $Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} = 1,48$ ,  $C_p$  – теплоємність ущільненої маси автошин 1,68;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності ущільненої маси автошин – 12,7 Вт/м·К);  $S_1$ ;  $S_2$  – площа внутрішнього перетину реактора і зовнішнього з урахуванням перетину газоходу, відповідно – 0,28 і 0,43 м<sup>2</sup>;  $Q$  – температура пірокарбону на виході на виході із реактора – 300 °С;  $Q_0$  – температура автошини на вході в реактор – 120 °С;  $t_{ст}$  – температура внутрішньої стінки реактора – 400 °С;  $L$  – довжина робочої частини реактора яка обігривається – 3,5 м;  $d$  – діаметр бортових кілець – 0,38 м;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності ущільненої маси автошин –  $8 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/с;  $G_3$  – одночасна маса автошин, яка знаходиться в реакторі – 720 кг.

Межі змін безрозмірних коефіцієнтів в рівнянні:  $Re_{ж}$  (для високов'язкого потоку) =  $7,76 \cdot 10^{-5}$ .

Аналізуючи одержане рівняння задаючись різними параметрами температури

теплоносія, діаметрами реактора, швидкості просування автошин по реактору, різним зусиллям навантаження можна знайти значення продуктивності реактора при проведенні експериментальних досліджень в різних умовах.

Виходячи із продуктивності реактора і одночасної маси автошин, яка знаходиться в реакторі, можна вирахувати термін перебування автошин в реакторі:

$$\tau = \frac{G_3}{G_{\text{пр}}} = \frac{720}{92} = 7,8 \text{ годин,}$$

що згідно експериментальних даних забезпечує 98% видалення летких вуглеводнів з об'єму автошин.

Для оцінки ефективності теплопередачі в реакторі циркуляційного піролізу під час статичного навантаження при утилізації зношених автошин побудовано графік залежності продуктивності даного реактору від величини теплопровідності маси автошин в заданих температурних режимах (рис. 4.77).

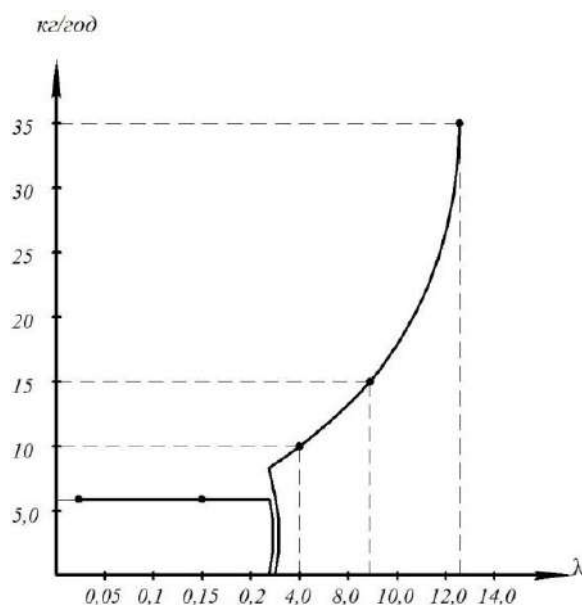


Рисунок 4.77 - Експериментальна залежність продуктивності реактору піролізу безперервної дії від збільшення теплопровідності маси автошин за рахунок зовнішнього навантаження на автошини в процесі піролізу в заданих температурних режимах

Із рисунка видно, що при малих величинах теплопровідності, в разі відсутності зовнішнього навантаження і малого ущільнення при  $\lambda = 0,03 - 0,2$  Вт/(м·К), продуктивність реактору порівняно мала і практично не збільшується. При дії зовнішнього навантаження теплопровідність маси ущільнених автошин збільшується до  $\lambda = 4,0 - 12,0$  Вт/(м·К), кількість автошин, які знаходяться при оптимальній температурі піролізу збільшується і відповідно продуктивність реактору різко збільшується.

Для визначення величини питомого тиску в осьовому напрямку на автошини, які розташовані в циліндричному реакторі, проаналізовано фізичний стан автошини в кожній зоні реактора [120, 133, 341]. Із характеристики фізичного стану гуми видно, що визначаючим параметром при розрахунку сили навантаження ( $P$ ) є коефіцієнт термопластичності гуми в третій зоні реактора.

Для оцінки стискаючого зусилля в першому наближенні розглянемо горизонтальне розташування автошин гладкими шарами. Сила стискання в напрямку вісі любої пари контактуючих шарів автошин площею поперечного перерізу реактора і загальним коефіцієнтом термопластичного стану гуми:

$$P = p'_{\text{пит}} \pi r^2$$

де,  $\pi r^2$  – площа поперечного перерізу автошини на ділянці 1, 2, а на ділянці 3 площа поперечного перерізу реактора;  $p'_{\text{пит}}$  - питомий тиск на масив автошин, які знаходяться в реакторі, який залежить від величини зовнішнього навантаження  $p_{\text{пит}}$ , у разі вертикального реактора враховується сила тяжіння  $G$  пластів автошин розташованих зверху.

Оскільки масив автошин складається із ідеально гладких прошарків, то:

$$p'_{\text{пит}} = p_{\text{пит}} + \frac{G}{\pi r^2}; \quad G = 9,81 \rho_{\text{н}} ; \quad V = 10 \rho_{\text{н}} h_{\text{сл}} \pi r^2$$

де  $\rho_{\text{н}}$  – насипна маса автошин для кожної ділянки реактора,  $h_{\text{сл}}$  – половина висоти ділянки (сила стискання розраховується в середині ділянки).

Виходячи із практичних даних по властивостям термопластичної гуми при максимальній температурі 600 °С і мінімальному терміні заповнення нею вільного об'єму в середині бортових кілець розрахункове зовнішнє навантаження визначається в границях 0,01 – 0,07 кг/см<sup>2</sup> при динамічній в'язкості термопластичної гуми 0,112 П·с.

При дослідженні впливу технологічних параметрів процесу піролізу автошин на продуктивність реактора визначено розподіл градієнтів температур в корпусі реактора і в масі симетрично розташованих автошин в середині реактора, який представлено на рисунку 4.78.

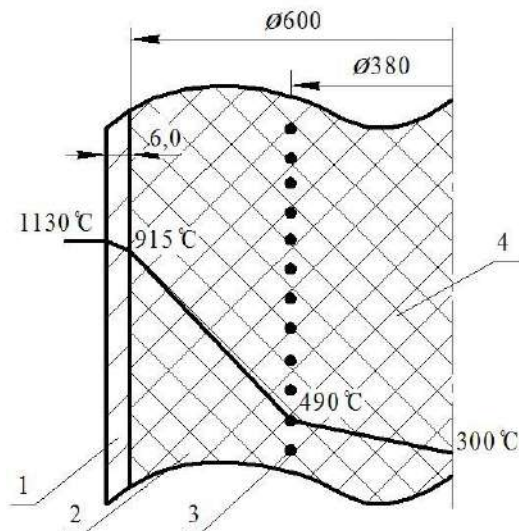


Рисунок 4.78 - Схема розподілу градієнтів температур в симетричній половині циліндричного корпусу експериментального реактора заповненого масою пірокарбону утвореного при піролізу автошин в стабільному тепловому режимі, (третя зона): 1 – стінка корпусу реактора, 2 – товщина пірокарбону від внутрішньої стінки реактора до бортових кілець, 3 – бортові кільця в перетині, 4 – товщина пірокарбону в середині бортових кілець

Із рисунка видно, що в корпусі реактора виготовленого із жаростійкої сталі 10X23Н18 товщиною 6 мм, перепад температур складає 215°C, в той час як всередині реактора в пірокарбоні товщиною 110 мм до бортових кілець перепад 425°C, а до центру реактора перепад складає 615 °C, при діаметрі реактора 600 мм і потужності топкового пристрою 25 – 30 кВт. В той час, як при несиметричному розташуванні автошин різного діаметра в піролізному реакторі діаметром в три рази більше – 1800 мм (рисунок 4.79), перепад в середині реактора складає всього 465°C, при потужності топкового пристрою 75 – 80 кВт.

Із рисунків 4.78 та 4.80 видно, що в реакторі 600 мм з симетричним розташуванням автошин R13 і R14 діаметром 544,2 і 570,1 мм вихід на стабільний тепловий режим складає біля 4-х годин, а температура в центрі реактора складає 300°C. При цьому для не симетричного розташування автошин різного діаметра в реакторі з діаметром 1800 мм (рис. 4.79 та 4.81), що в три рази більший за попередній, термін виходу на стабільний тепловий режим збільшується і складає

біля 6-ти годин, разом з тим температура в центрі реактора збільшується до  $450^{\circ}\text{C}$ . Тому несиметрична система розташування цілих зношених автошин різного діаметра в реакторі значно ефективніша в тепловому відношенні, відповідно продуктивність даного реактора буде більшою, що демонструє графік представленим на рис. 4.77.

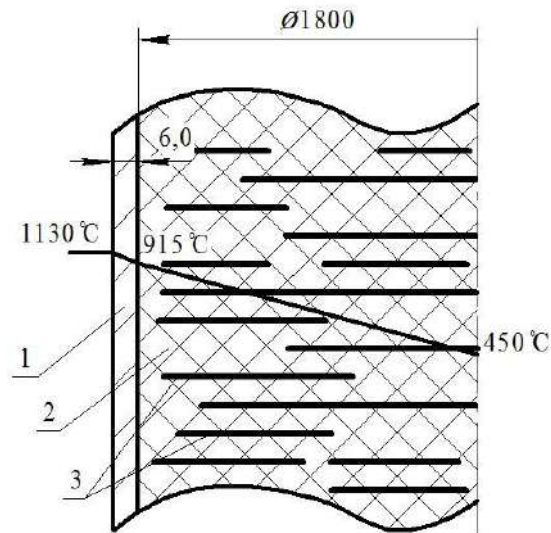


Рисунок 4.79 - Схема розподілу градієнтів температур при несиметричному розташуванні автошин в циліндричному корпусі експериментального піролізного реактора заповненого автошинами різного діаметру, в стабільному тепловому режимі, (третя зона): 1 – стінка корпусу реактора, 2 – товщина пірокарбону від внутрішньої стінки реактора до бортових кілець, 3 – бортові кільця

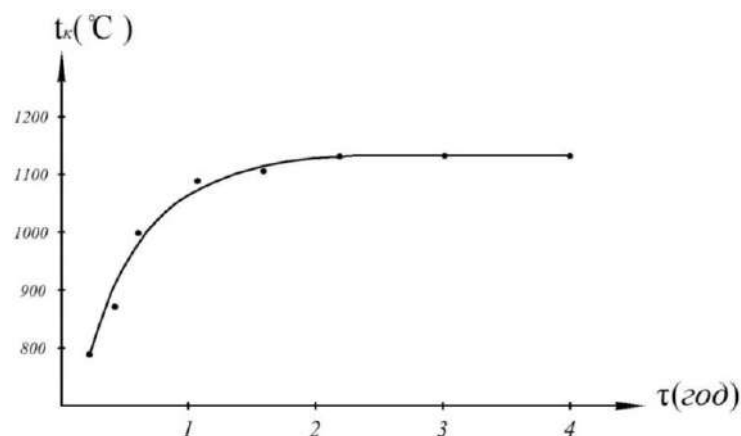


Рисунок 4.80 - Крива інтенсивності нагріву корпусу реактора від температури полум'я при спалюванні пропан – бутану, максимальна температура складає  $1130^{\circ}\text{C}$

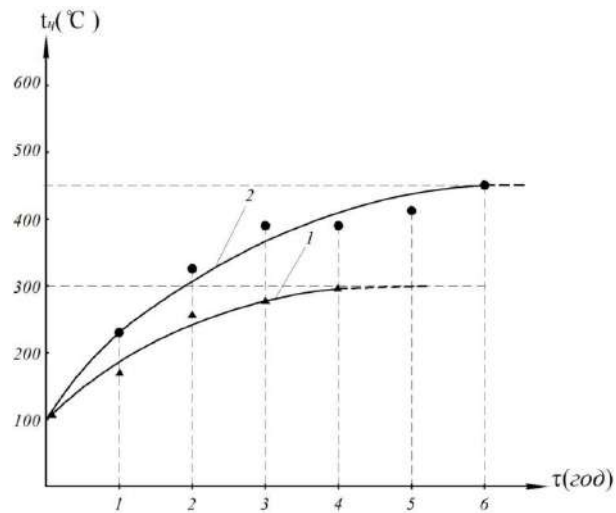


Рисунок 4.81 - Характеристика нагріву центральної частини циліндричного реактора в процесі піролізу автошин: 1 – діаметр реактора 600мм при симетричному розташуванні автошин; 2 - діаметр реактора 1800мм при несиметричному розташуванні автошин різного діаметра

#### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Для відпрацювання робочих режимів, виявлення особливостей процесів деструкції різнорідних органічних відходів, визначення параметрів роботи піролізного обладнання, встановлення екологічної безпеки піролізного процесу розроблено, спроектовано та виготовлено лабораторне та промислове устаткування з роботою в циклічному (продуктивність 10 кг/цикл – ЕУ БЦП - 14) та безперервному режимах (продуктивність 100 кг/добу – ЕКОПІР – 18Д, продуктивність 500 кг/добу – Екопир-БЦП).

2. Проведено комп'ютерне моделювання температурного режиму реактора експериментальної установки ЕУ БЦП-14. Аналіз результатів моделювання показує, що характеристики перехідних процесів нагріву у різних точках реактора суттєво відрізняються між собою, що підтверджує доцільність розглядання реактора циркуляційного піролізу як об'єкта керування з розподіленими параметрами при його моделюванні.

3. В ході дослідження впливу температур на склад вихідних продуктів встановлено, що найважливішою вимірюваною величиною є температура парогазової суміші на виході з третього контуру в конденсатор, яка визначає вихід

реактора на стаціонарний режим. В ході проведених випробувань було виявлено, що тривалість виходу на режим реактора залежить від складу сировини, складає 90-130 хв, час збільшується до 40% якщо у відходах збільшується кількість поліетилену. Загальний час повного процесу деструкції складає 180-250 хв. Найбільший вихід газу був зафіксований при переробці пакувальної клейкої стрічки (PP з домішками) та пляшок (PET), найбільший вихід рідкого продукту, найменший час переробки матеріалу 180-200 хв. – для медичних шприців (PP).

4. Для експериментального визначення кінетичних характеристик термічного розкладання відходів було використано дані диференціального термогравіметричного аналізу. В результаті визначено значення активаційних величин кінетичної моделі термічної деструкції відходів, термодинамічні параметри стану системи, які дозволяють прогнозувати можливість здійснення процесу конденсації і оцінити взаємний вплив речовин, а також представляти відносні швидкості рівноважних реакцій перетворення при конденсації на окремо взятому контурі.

5. Використано ексергетичний метод аналізу для визначення максимальної енергетичної ефективності роботи циркуляційного піролізу, а також для оцінки втрат енергії. Результатом розрахунків стало визначення оптимального температурного інтервалу для утилізації відходів за технологією циркуляційного піролізу, що складає 560-600 °С, в межах якого здійснюється інтенсифікація деструктивних перетворень, а також спостерігається вихід цільових теплотворних компонентів ПГС.

6. Проведені дослідження зусиль стиснення плунжерною системою сировини розміром від 2 до 20 мм в різних вихідних конусних насадках з метою забезпечення екологічної безпеки безперервного процесу циркуляційного піролізу за рахунок оптимізації геометрії вихідної насадки і, відповідно, полімерної пробки, утвореної подрібненою сумішшю твердих органічних відходів. Представлені розрахункові напруження в шарах середовища, яке стискається і величина його переміщення, в залежності від тривалості процесу динамічного стискання, які доводять, що зусилля стискання в 1МПа достатнє для забезпечення надійного безперервного



завантаження реактора з використанням запропонованої конструкції плунжерної системи для управління екологічною безпекою безперервних піролізних процесів.

7. Розроблена фізична модель піролізного реактора для дослідження реологічних властивостей цілих зношених автошин в процесі нагріву та стискання, що дозволяє удосконалити технологію термічної утилізації цілих автошин і збільшити заповнення реактора безперервної дії до 98%, при цьому виникає можливість суттєво збільшити продуктивність установки безперервної дії в порівнянні з установками циклічної дії. Результати розрахунків і експериментальні дослідження підтвердили можливість зменшення величини стискання при попередньому нагріву автошин до температури 125°C при утилізації тепла димових газів з температурою до 250 – 300°C, які виходять після обігріву піролізного реактора. Експериментально встановлено, що величину стискання, можна приймати постійною в границях 0,18 – 0,2 кг/см<sup>2</sup>, при цьому час піролізу автошин зменшується на 25–30% в порівнянні зі стандартним піролізом автошин в ретортних реакторах з циклічним режимом. За допомогою комп'ютерної програми COMSOL Multiphysics визначено фізичні характеристики проведення процесу деструкції автошин: при збільшенні щільності на 60% теплопровідність збільшується майже в 100 раз.

Результати, викладені у розділі 4, опубліковані у роботах [94, 120, 122, 123, 133, 134, 144, 145, 154, 155, 198, 201, 205, 206, 208, 211, 212, 234, 257 - 264, 262, 264, 267, 341].

## РОЗДІЛ 5

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТНОГО ПІРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОТРИМАНИХ ПРОДУКТІВ ПРИ УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

5.1. Комплексна оцінка факторів екологічної небезпеки процесу термічної утилізації відходів, розробка автоматизованої системи управління екологічними ризиками

Як зазначено у [72, 83] рівень екологічної безпеки визначається величиною ризику від можливих техногенних катастроф, аналіз ризиків пов'язаний з аналізом загроз, які визначають рівень безпеки. Основою оцінки ризиків є теорія надійності, відповідно до якої аварійні ситуації доцільно розглядати як відмови елементів системи, що призводять, до порушення їх стійкості [18, 37, 174].

Дослідження факторів екологічної небезпеки та ймовірності виникнення аварійних ситуацій проводилось на стадії проектування експериментального комплексу утилізації ТОВ екологічно безпечним піролізним процесом [218, 329].

Для дослідження факторів екологічної безпеки при функціонуванні заводу з утилізації ТОВ обрано проект заводу за технологією екопірогенезіс, який функціонує за екологічно прийнятним піролізним процесом з одержанням альтернативних джерел енергії (рідкого, твердого та газоподібного продуктів), які можуть використовуватися для покриття власних потреб заводу та часткового покриття потреб мікрорайону.

Підвищення еколого-економічної ефективності піролізного процесу досягається шляхом інтенсифікації деструктивних процесів утилізації шляхом поєднання двох технологічних ліній в загальній технології екопірогенезіс, яка включає технологічні лінії циркуляційного піролізу (БЦП) полімерних відходів і зношених автомобільних шин, та технологічної лінії багатоконтурної двозонної циркуляційної газифікації (БЦДГ) різних видів вологих органічних відходів. В даній загальній технології проміжні вихідні компоненти однієї технологічної лінії взаємопов'язані з вхідними компонентами другої технологічної лінії, що дозволяє за рахунок гарячого пірокарбону із лінії піролізу поліпшити енергетичні параметри

вологих відходів лінії газифікації, та як наслідок, збільшити питомий вихід генераторного газу і його теплотворну здатність [329].

На рис. 5.1 наведено схему встановлених факторів впливу технології термічної деструкції твердих органічних відходів на навколишнє середовище.

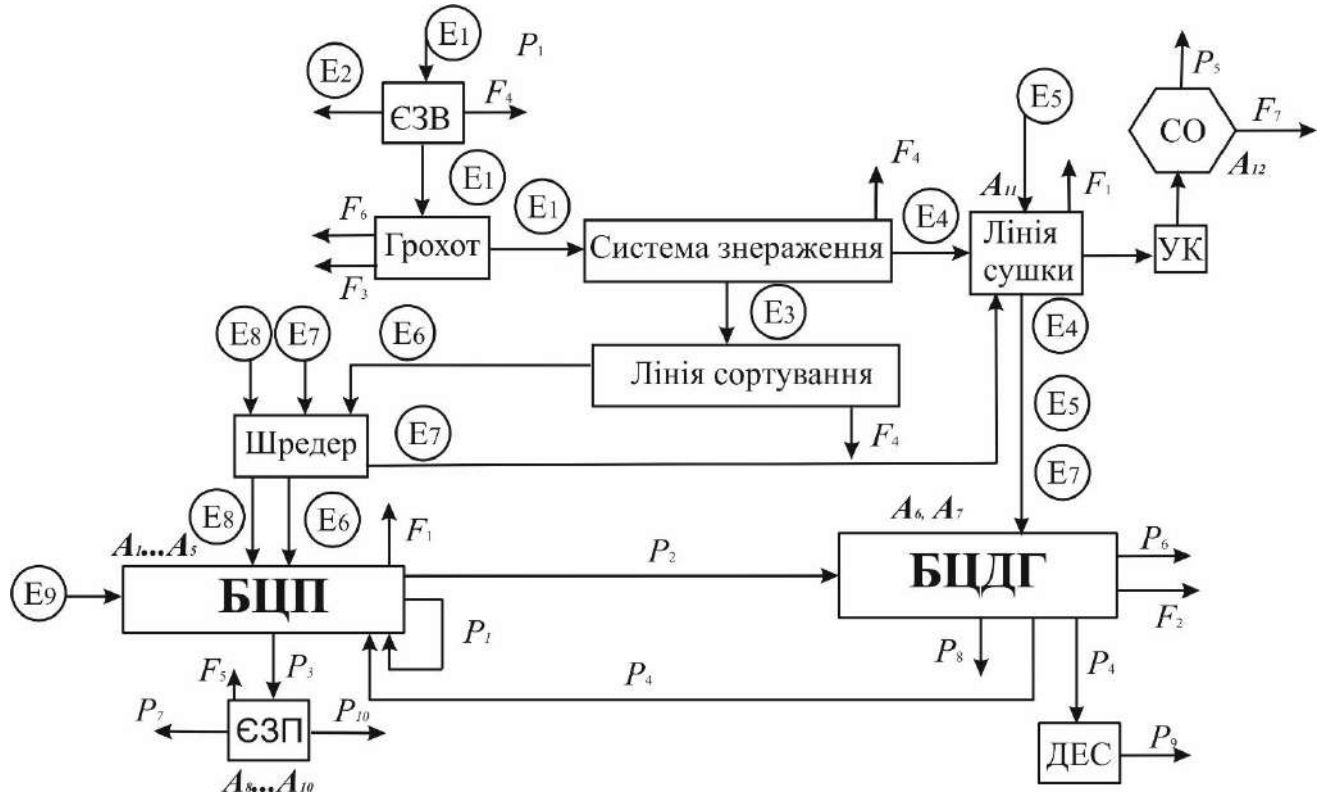


Рисунок 5.1 - Схема факторів екологічної небезпеки процесу утилізації ТОВ за екологічно прийнятним піролізним процесом

Де основне обладнання технологічної лінії:

- грохот, барабан для механізованого сепарування відходів з відбором піску, землі, дрібного сміття та каміння;
- система знезараження забезпечує первинне знезараження всіх ТПВ, що являється необхідною умовою для подальшого ручного сортування;
- лінія сортування, забезпечує відбір сухих полімерних відходів в ручному режимі (РС), від загальної маси вологих ТПВ у відповідності до розробленої технології;
- шредер, пристрій для подрібнення зношених шин, полімерів і деревини;
- утилізаційний котел (УК), в якому вихідні димові гази з температурою  $400^{\circ}\text{C}$  охолоджуються до  $150^{\circ}\text{C}$ .

– лінія сушки, включає сушильну камеру, де вологі відходи сушаться при температурі 100-150°C до вологості не більше 25 %. Конструктивно установка для сушки вологих відходів виконана у вигляді обертового барабана з спеціальними внутрішніми перегородками. Економічність процесу сушки досягається шляхом утилізації тепла димових газів, які виходять із лінії БЦП при безпосередньому контакті їх із вологими відходами;

– система очистки промислових димових газів;

– лінія багатоконтурного циркуляційного піролізу (БЦП) відібраних сухих полімерних відходів;

– лінія багатоконтурної циркуляційної двозонної газифікації (БЦДГ) вологих органічних відходів (хвостів);

– дизельна електростанція, яка працює на генераторному газі, або на альтернативному рідкому продукті (ДЕС);

– ємність для зберігання альтернативного палива - рідкого продукту (ЄЗП);

На рисунку 5.1 позначені наступні потоки: *E* – вхідні і *P* – вихідні (таблиця 5.1), технологічної лінії, які працює за принципом екологічно безпечного піролізного процесу.

Сформовано основні причини виникнення небезпечних ситуацій, фактори безпеки та можливі аварійні ситуації всіх технологічних процесів [34, 92, 108, 126, 129, 146, 196, 199, 207, 213, 223, 278]. Передбачено, що всі дані зберігаються в базі даних та базі знань й постійно оновлюються. Проведена оцінка дозволяє розробити систему управління базою даних. При створенні багаторівневої системи управління ризиками піролізного процесу база даних являє собою перший рівень системи управління.

Встановлено, що в процесі роботи сміттєпереробного комплексу можливі потоки забруднюючих речовин в навколишнє середовище в процесі переробки відходів та ймовірні аварійні ситуації (таблиця 5.2).

Детальний аналіз основних факторів впливу на НС та методи їх усунення або зменшення їх негативних наслідків, наведено в табл. 5.3 та 5.4.

Таблиця 5.1 – Потоки технологічної лінії екопірогенезісу

<i>E</i> – вхідні потоки	<i>P</i> – вихідні потоки
<i>E</i> <sub>1</sub> – тверді побутові відходи;	<i>P</i> <sub>1</sub> – піролізний газ, (використовується для власних потреб);
<i>E</i> <sub>2</sub> – пісок, земля, дрібне сміття та каміння;	<i>P</i> <sub>2</sub> – твердий залишок пірокарбон;
<i>E</i> <sub>3</sub> – знезаражені ТПВ;	<i>P</i> <sub>3</sub> – рідкий продукт легких фракцій;
<i>E</i> <sub>4</sub> – вологі харчові відходи;	<i>P</i> <sub>4</sub> – без смольний генераторний газ;
<i>E</i> <sub>5</sub> – мули міських стічних вод	<i>P</i> <sub>5</sub> – вихідні димові гази видаляються в навколишнє середовище після віддачі частини тепла в процесі сушки вологих відходів і очищенні їх в скруберах або фільтрах;
<i>E</i> <sub>6</sub> – полімерні та композиційні відходи;	<i>P</i> <sub>6</sub> – подача частини генераторного газу в міські котельні, для часткового покриття природного газу, який використовуються жителями мікрорайону для опалення;
<i>E</i> <sub>7</sub> – деревина, гілля дерев, опале листя та ін.;	<i>P</i> <sub>7</sub> – утилізація вихідних газів, які утворюються внаслідок великого та малого дихання клапанів на ЄЗП;
<i>E</i> <sub>8</sub> – зношені автомобільні шини;	<i>P</i> <sub>8</sub> – утилізація вихідної золи з лінії газифікації в асфальто – бетонних сумішах, або виготовленні цементних виробів, технічного скла та інше;
<i>E</i> <sub>9</sub> – дизельне пальне для запуску лінії БЦП;	<i>P</i> <sub>9</sub> – подача електроенергії в мікрорайон міста для освітлення;
	<i>P</i> <sub>10</sub> – подача рідкого продукту в міські котельні, для часткового покриття природнього газу, який використовуються жителями мікрорайону для опалення.

Таблиця 5.2 – Можливі потоки забруднюючих речовин в навколишнє середовище в процесі переробки відходів та ймовірні аварійні ситуації

Потоки забруднюючих речовин в НС в процесі переробки відходів	Ймовірні аварійні ситуації
$F_1$ – надходження димових газів у повітря робочої зони;	$A_1$ – порушення герметичності фланцевих з'єднань на трубопроводах БЦП (вихід піролізного газу в НС);
$F_2$ – утворення відходів у вигляді золи із лінії БЦДГ, яка направляється на звалище або утилізацію;	$A_2$ – порушення герметичності або виникнення тріщини в реакторі БЦП (вихід піролізного газу в навколишнє середовище);
$F_3$ – вібрація і шум в процесі функціонування грохоту;	$A_3$ – гасіння полум'я головного пальника і вільний вихід піролізного газу із реактора через пальник спалювання піролізного газу в НС;
$F_4$ – вихід різкого неприємного запаху при наявності відходів і їх просуванні по технологічній лінії;	$A_4$ – значне підвищення тиску в реакторі БЦП (руйнування реактора і вилив рідкої гарячої реакційної маси у НС);
$F_5$ – надходження в атмосферу токсичних газів в процесі зберігання палива при великому та малому диханні клапанів;	$A_5$ – витік розплавленого полімеру через бункер пристрою завантаження сировини в реактор або розвантажувальний пристрій твердого залишку із реактора;
$F_6$ – надходження на звалище дрібнодисперсних відходів утворених після грохоту;	$A_6$ – порушення герметичності фланцевих з'єднань на виході генераторного газу з БЦДГ;
$F_7$ – утворення забруднених стічних вод після скрубера.	$A_7$ – нестабільний процес газифікації в робочій камері БЦДГ і одержання низькокалорійного газу, що приведе до збоїв процесу їх горіння і викидів токсичних речовин у НС;

## Продовження таблиці 5.2

	$A_8$ – порушення умов зберігання палива (при підвищенні температури навколишнього середовища до температури загоряння, що може привести до пожежі);
	$A_9$ – вихід з ладу дихальних клапанів в ємності для зберігання рідкого піролізного палива, що приведе до викидів у НС токсичних парів вуглеводнів;
	$A_{10}$ – порушення герметичності фланцевих з'єднань на вході ємності для зберігання рідкого палива, що приведе до розливу у НС токсичних рідких вуглеводнів;
	$A_{11}$ – порушення технологічного процесу сушки відходів і самозаймання відходів, що може привести до пожежі і викидів у НС токсичних газів;
	$A_{12}$ – вихід зі ладу системи очистки димових газів, що може привести несанкціоновані викиди у НС токсичних газів;
	$A_{13}$ – порушення процесу сортування відходів (зупинка системи вентиляції індивідуальних кабін персоналу який займається ручним сортуванням, що може забруднити навколишнє повітря робочої зони).

Таблиця 5.3 - Характеристика основних факторів впливу на навколишнє середовище піролізної технології та методи їх усунення

Фактор впливу	Характеристика	Методи зменшення загрози НС
$F_1$ , надходження у повітря та робочу зону забруднених димових газів	Склад димових газів: вода, оксид вуглецю, пил, оксиди азоту, важкі метали, пари газів	Використання: пилових фільтрів; скрубера для поглинання кислих газів; вуглецевих фільтрів (для видалення важких металів)
$F_2$ , утворення токсичних відходів на лінії БЦДГ, які представляють собою золу та направляються на звалище	Токсичні метали, поліароматичні вуглеводні	Контроль складу золи. Утилізація золи в промисловості (у виробках технічного скла, цементних виробках і т.д.)
$F_3$ – збільшена вібрація і шум в процесі функціонування грохоту	Вібраційне та шумове забруднення	Рівень вібрації та шуму зменшується використанням віброізоляції та огороження навколо грохоту, при використанні шумоізоляційних матеріалів
$F_4$ – вплив на НС різких запахів в процесі зберігання відходів	Забруднення НС внаслідок довгострокового зберігання відходів	Розвантаження через низ бункеру або повна очистка бункеру раз в тиждень (для короткочасного зберігання ТПВ). Вентиляція ТПВ при зберіганні
$F_5$ – надходження в атмосферу токсичних газів в процесі зберігання палива при великому та малому диханні клапанів	Токсичні гази	Встановлення відповідних дихальних клапанів необхідної кількості



## Продовження таблиці 5.3

$F_6$ – надходження залишків відходів на звалище	Можливість присутності токсичних компонентів	Контроль відходів, що направляються на звалище
$F_7$ – утворення забруднених стічних вод після скрубера	Токсичні метали, солі та інші речовини	Система очистки (нейтралізація, осадження або інше)

Таблиця 5.4 - Характеристика ймовірних аварійних ситуацій при здійсненні процесу утилізації ТОВ за технологією піролізу

Фактор впливу	Характеристика	Методи зменшення загрози НС
$A_1$ – порушення герметичності фланцевих з'єднань на трубопроводах	Виток горючого газу в НС. Ймовірність виникнення пожежі або вибуху	Своєчасний контроль та перевірка фланцевих з'єднань
$A_2$ – порушення герметичності або виникнення тріщини в реакторі БЦП (втрати горючого піролізного газу)	Витік токсичних газів. Утворення забруднень токсичними речовинами димових газів. Ймовірність виникнення пожежі або вибуху.	Автоматичний контроль тиску в реакторі, цілісності обладнання
$A_3$ - гасіння полум'я пальника і вільний вихід піролізного газу у НС	Витік газу, який подається на пальник спалювання, можлива пожежа, вибух	Постійний контроль процесу горіння пальників та метеорологічних умов
$A_4$ – значне підвищення тиску в реакторі БЦП	Вибухове скипання в реакторі	Автоматичний контроль тиску

## Продовження таблиці 5.4

<p><math>A_5</math> – витік розплавленого полімеру через завантажувальний пристрій сировини в реактор або розвантажувальний пристрій твердого залишку із реактора</p>	<p>Несправність обладнання</p>	<p>Постійний контроль роботи обладнання. Розміщення обладнання в приміщенні, яке добре вентилується.</p>
<p><math>A_6</math> – порушення герметичності фланцевих з'єднань на виході з БЦДГ</p>	<p>Витік горючого генераторного газу. Ймовірність виникнення пожежі або вибуху</p>	<p>Своєчасний контроль та повірка фланцевих з'єднань</p>
<p><math>A_7</math> – нестабільний процес газифікації в робочій камері БЦДГ</p>	<p>Порушення процесу газифікації. Утворення шкідливих відходів.</p>	<p>Контроль процесу подачі повітря для створення середовища з недостатнім об'ємом кисню</p>
<p><math>A_8</math> – порушення умов зберігання та транспортування палива (при підвищенні температури НС до температури загоряння)</p>	<p>Ймовірність пожежі або вибуху</p>	<p>Система охолодження ємностей</p>
<p><math>A_9</math> – вихід з ладу дихальних клапанів в ємності для зберігання рідкого піролізного продукту</p>	<p>Викид токсичних газів в атмосферу та робочу зону</p>	<p>Регулярна повірка та контроль клапанів</p>
<p><math>A_{10}</math> – порушення герметичності фланцевих з'єднань на вході ємності для зберігання рідкого продукту</p>	<p>Витік рідкого палива. Ймовірність виникнення пожежі.</p>	<p>Своєчасний контроль та повірка фланцевих з'єднань</p>

Продовження таблиці 5.4

$A_{11}$ – порушення технологічного процесу сушіння відходів димовими газами і самозаймання відходів	Порушення процесу сушіння	Контроль температури димових газів, які подається в сушильну камеру.
$A_{12}$ – вихід з ладу системи очистки димових газів після сушки	Вихід димових газів в атмосферу та робочу зону	Контроль за станом фільтрів та скрубєрів, своєчасна чистка, встановлення резервного обладнання
$A_{13}$ – порушення процесу сортування відходів (зупинка системи вентиляції індивідуальних кабін персоналу який займається ручним сортуванням)	Попадання піску, каміння, кольорових, чорних металів та ін. речовин в реактор. Порушення процесу піролізу.	Забезпечення безпечним живленням, контроль ручного сортування

Аналіз факторів екологічної небезпеки та характеру ймовірних аварійних ситуацій показує значний рівень екологічної небезпеки комплексу обладнання термічної утилізації ТОВ. Однак врахування цих факторів при проектуванні комплексу екопірогенезісу дозволяє знизити цей рівень до мінімального.

Проведено багатокритеріальну оцінку встановлених факторів екологічної небезпеки з використанням методу аналізу ієрархій [217, 340] з включенням процедури усунення ймовірних некоректних рішень експертів на основі Байєсової схеми [269].

В результаті проведеної оцінки визначено пріоритети факторів за критеріями: ймовірність виникнення тої чи іншої загрози навколишньому середовищу; очікувані наслідки від дії фактору; рівень якості впроваджених технічних або технологічних рішень щодо запобігання прояву цього фактору.

Фактори ранжовано за значенням пріоритету, який характеризує рівень

екологічної небезпеки як:

$$F_1(10) < F_4(9,86) < F_7(6,4) < F_6(2,8) < F_5(2,6) < F_2(2,5) < F_3(2,3);$$

$$A_{12}(10) < A_1(8,4) < A_2(6,4) < A_8(5,9) < A_6(5,1) < A_{13}(3,8) < A_9(3,3) < A_{10}(3,1) < A_{11}(2,4).$$

На рисунку 5.2 а та б наведено результуюче ранжування факторів небезпеки проведене в програмному середовищі МАІ (метод аналізу ієрархій).

При оцінці ймовірності виникнення аварійних ситуацій попередньо експертами одногосно було визначено незначну ймовірність виникнення аварійних ситуацій внаслідок утилізації відходів за піролізної технологією на обладнанні, а саме  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_5$ . Дані фактори не розглядались в оцінці, а одразу зайняли останні місця в ранжованому ряді.

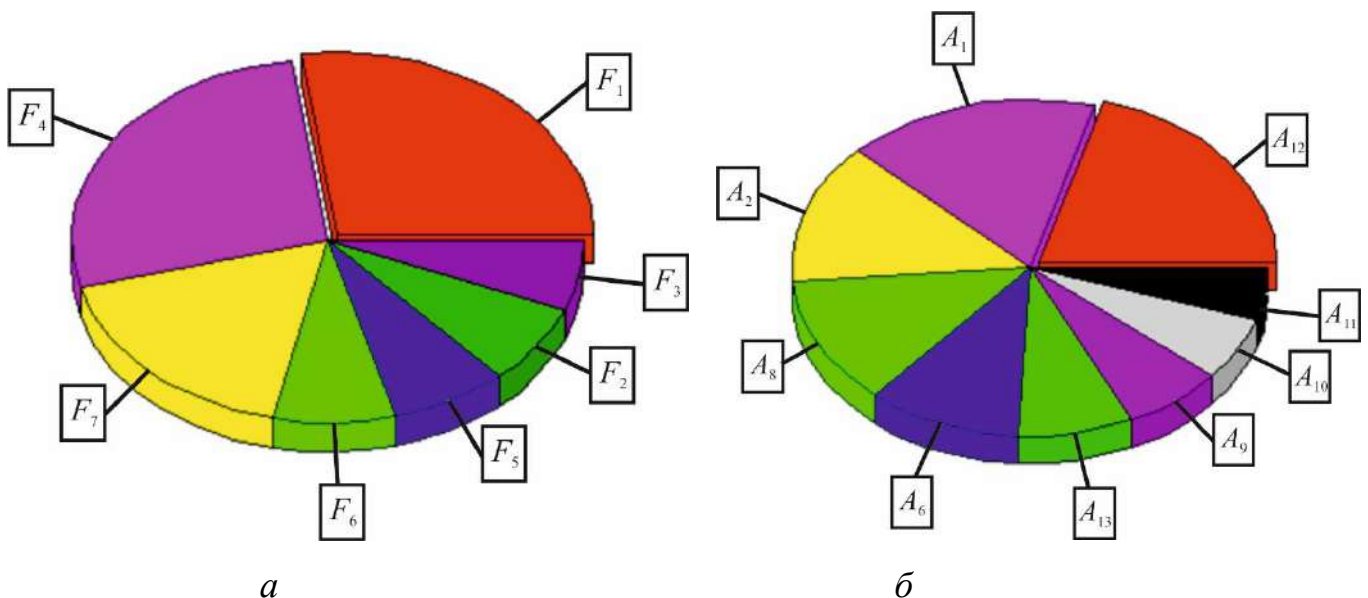


Рисунок 5.2 - Результати ранжування факторів екологічної небезпеки: а – для факторів негативного впливу на НС; б – для аварійних ситуацій

Результати оцінки факторів екологічної небезпеки та їх ранжування за рівнем небезпеки дозволило виділити технологічні вузли та процеси, які супроводжуються найбільшою (відносно один одного) небезпекою для навколишнього середовища, зокрема такі фактори як: надходження у повітря та робочу зону забруднених димових газів, вплив на навколишнє середовище різких запахів в процесі зберігання відходів, утворення забруднених стічних вод після скрубера та такі аварійні

ситуації, як порушення герметичності фланцевих з'єднань на трубопроводах, вихід з ладу системи очистки димових газів після сушки [329].

Експлуатація комплексу, який працює за технологією екопірогенезіс пов'язана з ймовірністю виникнення небезпечних ситуацій різного характеру тому актуальною задачею є прогнозна оцінка рівнів промислової, пожежної та екологічної безпеки на всіх етапах технологічного процесу з метою забезпечення надійної та безпечної роботи обладнання. Це може бути досягнуто створенням автоматизованої системи управління екологічними ризиками, яку планується впровадити на модульних установках, якими комплектуються заводи по термічній утилізації ТОВ за технологією екопірогенезіс з отриманням альтернативних видів палива [136].

Алгоритм функціонування автоматизованої системи управління екологічними ризиками при утилізації відходів з впровадженням екологічно прийняттого піролізного процесу представлено на рисунку 5.3.

Система управління екологічними ризиками функціонує на наступних рівнях:

1. Перший рівень включає методи та засоби ідентифікації екологічної безпеки (формується основні причини виникнення небезпечних ситуацій, фактори безпеки та можливі аварійні ситуації всіх технологічних процесів, будується інформаційна модель та логіко психологічна структура прийняття рішень з забезпеченням екологічної безпеки). Всі дані зберігаються в електронній базі даних та базі знань. Перший рівень системи управління екологічними ризиками представляє собою систему управління базами даних (СУБД).

2. Другий рівень включає методи та засоби кількісної оцінки характеристики екологічної безпеки. Визначення рівня та розрахунок оцінки безпеки для кожного фактору.

Слід зазначити, що визначення рівня екологічного ризику є складним із-за відсутності статистичної інформації та неможливості отримання експериментальних даних.

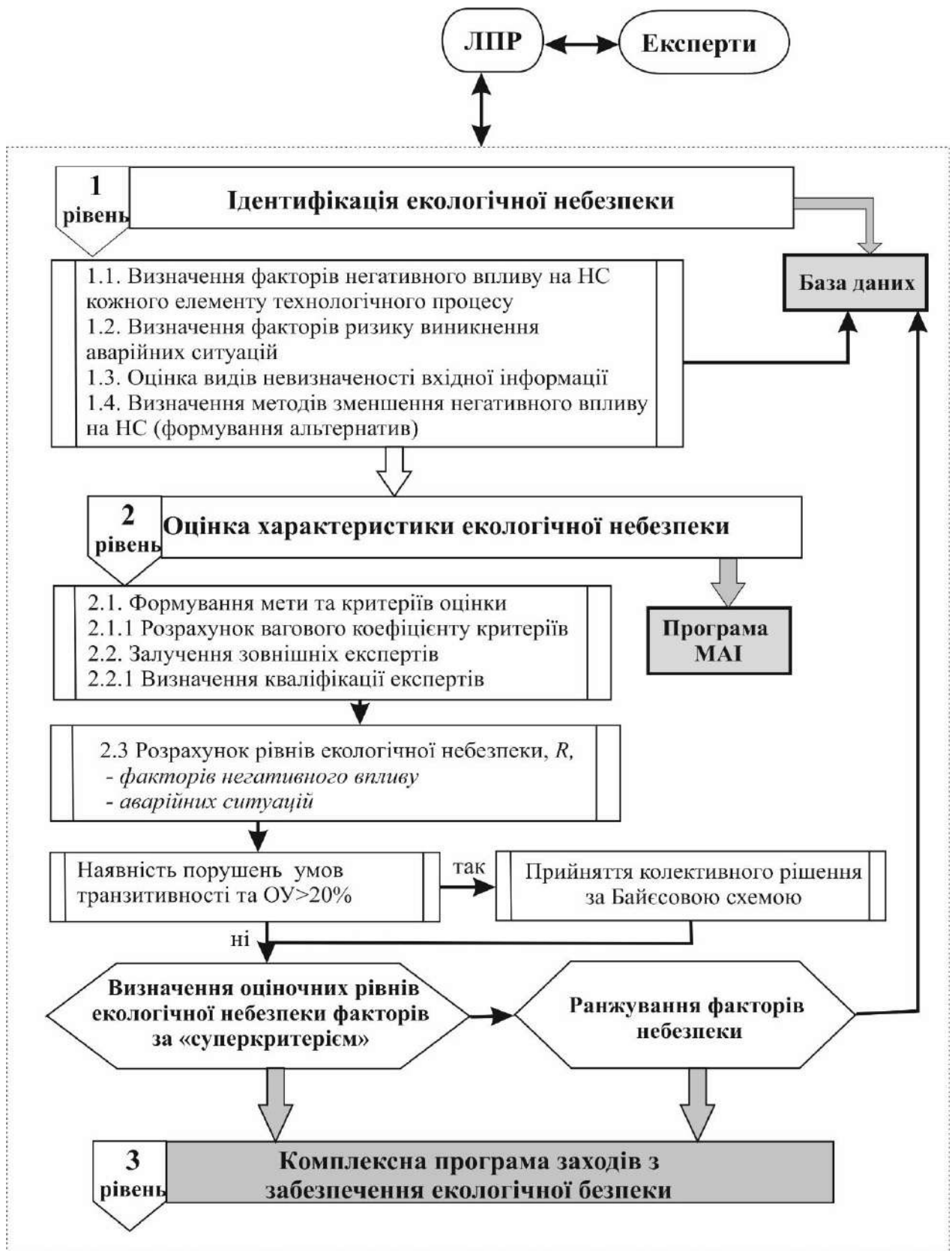


Рисунок 5.3 - Алгоритм функціонування автоматизованої системи управління екологічними ризиками при утилізації органічних відходів за піролізної технологією, де ЛПР – людина, що приймає рішення, МАІ – метод аналізу ієрархій,  $R$  – рівень екологічного ризику,  $OY$  – оцінка узгодженості експертів

Існування такої невизначеності вхідної інформації обумовлює створення альтернативної системи експертних оцінок, яка б дозволила визначити ймовірність виникнення аварійної ситуації, де критеріями оцінювання виступають види аварій, ймовірність виникнення екологічної небезпеки, очікувані наслідки від негативного впливу екологічно небезпечного фактору, технічний стан кожного технологічного вузла установки, якість технологічних та технічних рішень щодо запобігання аварійної ситуації.

Другий рівень системи управління ризиками представляє собою програмне середовище для багатокритеріальної оцінки факторів екологічної небезпеки з використанням методу аналізу ієрархій [18, 109] та включенням процедури усунення ймовірних некоректних рішень експертів [269].

3. На третьому рівні формується комплексна програма заходів щодо запобігання аварійних ситуацій та зменшення негативного впливу на НС екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації відходів за технологією екопірогенезіс. Програма включає технологічні та технічні рішення щодо зменшення впливу негативних факторів, заходи щодо запобігання екологічно небезпечних ситуацій та усунення їх наслідків.

Оцінку та ранжування сформованих факторів екологічної небезпеки за алгоритмом проведено за допомогою методу аналізу ієрархій [217].

На першому етапі побудовано ієрархічну структуру прийняття рішень (рис. 5.4), яка включає визначення кількості ієрархій (розглядається 3 рівня ієрархій), формування мети та критеріїв оцінки, визначення кваліфікації експертів.

Сформовано наступні критерії оцінки:

- а) ймовірність виникнення тої чи іншої загрози навколишньому середовищу (КРИТЕРІЙ 1);
- б) очікувані наслідки від дії фактору (КРИТЕРІЙ 2);
- в) рівень якості впроваджених технічних або технологічних рішень щодо запобігання прояву цього фактору (КРИТЕРІЙ 3).

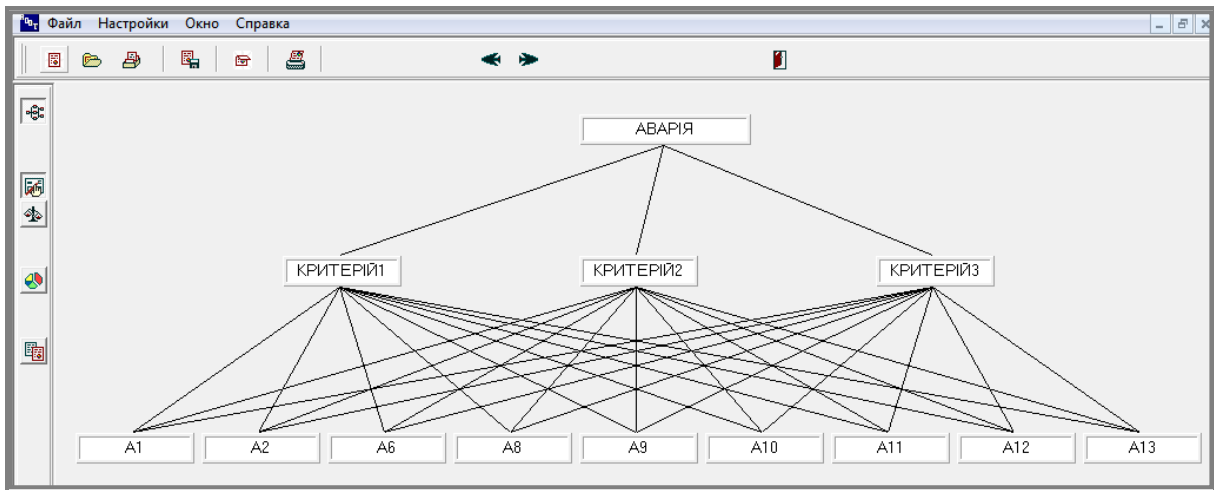


Рисунок 5.4 - Ієрархічна структура прийняття рішень для ранжування аварійних ситуацій

В якості експертів обрано досвідних спеціалістів в галузі поводження з твердими побутовими відходами, всього залучено 5 експертів (інженери, технологи та конструктори в сфері термічної утилізації органічних відходів).

Кваліфікація кожного експерту  $P(W_1), \dots, P(W_M)$ , визначено заздалегідь, за формулою:

$$P(W_k) = E_k / G, \quad (5.1)$$

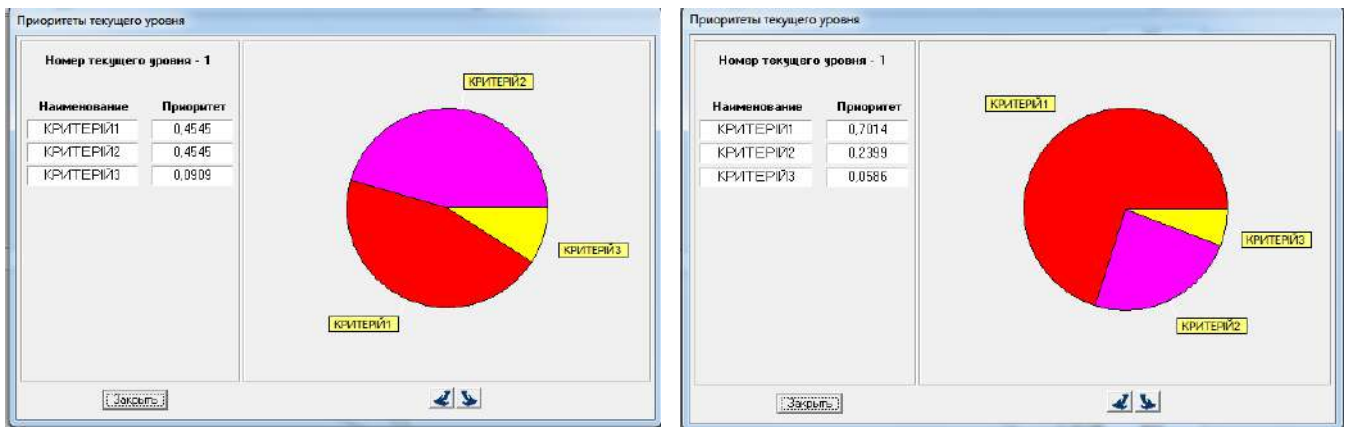
де  $E_k$  – загальна кількість помилок  $k$ -ого експерту в виборці із  $G$  спостережень, складених з досвіду попередніх ситуацій та програвання сценаріїв ситуацій, наслідки яких вже відомі;  $W_k$  – оцінка  $k$ -ого експерта.

Оцінено вагові оцінки критеріїв,  $\omega_1 \dots \omega_3$  (на рис. 5.5 позначено як «Приоритет»). Для спрощення розрахунків використано програмне середовище МАІ, результати наведено на рис. 5.5:

- а) для факторів впливу на НС (рис. 5.5 а),
- б) для аварійних ситуацій (рис. 5.5 б).

На другому етапі проведено безпосередньо визначення кількісної оцінки пріоритетів (за рівнем екологічної небезпеки) експертами за кожним критерієм 1...3. Оцінено фактори екологічної небезпеки технології (окремо аварійні ситуації) за шкалою  $[0,1]$ , шляхом порівняння одного фактору відносно іншого методом аналізу ієрархій Сааті [136, 217].





а

б

Рисунок 5.5 – Вагові коефіцієнти важливості критеріїв оцінки: а – для факторів впливу на НС; б – для аварійних ситуацій

При цьому для кожного  $i$ -го фактору визначено коефіцієнт  $a_j \in Q$  за умови, що при зрівнянні одного фактору  $i$ -го з іншим  $j$ -им отриманні значення  $a_j = b$ , при:

$$b = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-ий фактор та } j\text{-ий рівноправний,} \\ 3, & \text{якщо } i\text{-ий фактор менш важливіший ніж } j\text{-ий,} \\ 5, & \text{якщо } i\text{-ий фактор явно важливіший ніж } j\text{-ий,} \\ 7, & \text{якщо } i\text{-ий фактор значно важливіший ніж } j\text{-ий,} \\ 9, & \text{якщо } i\text{-ий фактор по значимості абсолютно перевершує } j\text{-ий,} \end{cases}$$

а при зрівнянні  $j$ -ого фактору з  $i$ -им отримано

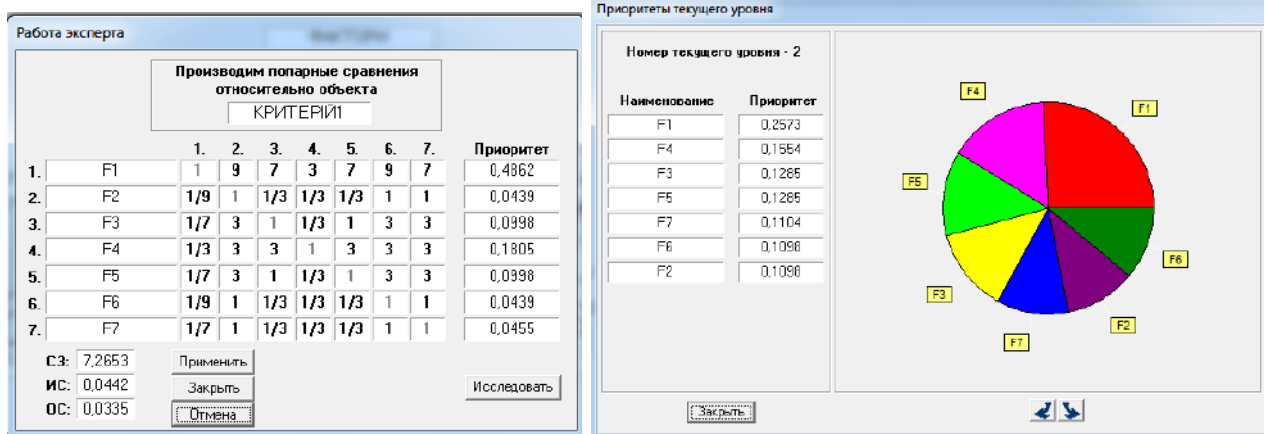
$$a_j = \frac{1}{b}.$$

Значення пріоритету,  $\rho_i$  розраховано як:  $\rho_i = \sum_{i=1}^N a_{ij}$ .

На рисунку 5.6 наведено результати оцінки пріоритетів для визначення рівня небезпеки наступних факторів:  $F_1 \dots F_7$  [329].

Встановлено фактори з найбільшим значенням пріоритету за критерієм 1 для впливу на НС фактор «F1 - надходження димових газів у повітря робочої зони» має пріоритет – 25,73%; для можливості виникнення аварійної ситуації за критерієм 2 найбільше значення пріоритету мають фактори «A1 - порушення герметичності фланцевих з'єднань на трубопроводах БЦП (вихід піролізного газу в навколишнє

середовище)» має пріоритет – 19,04% та «A12 - вихід зі строю системи очистки димових газів» - 17,23%.

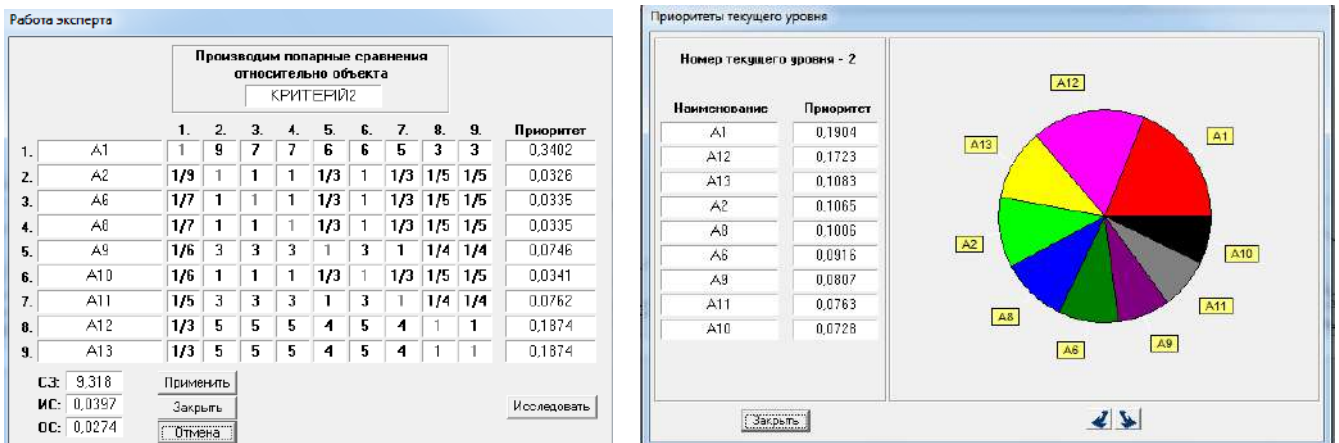


а

б

Рисунок 5.6 – Діалогові вікна програми оцінки пріоритетів (а) та кількісне ранжування факторів екологічної небезпеки (б) відносно ймовірності виникнення загрози навколишньому середовищу

На рисунку 5.7 наведено результати оцінки пріоритетів та ранжування по рівню екологічної небезпеки аварійних ситуацій  $A_1, A_2, A_6, A_8 \dots A_{13}$ .



а

б

Рисунок 5.7 – Діалогові вікна програми оцінки пріоритетів (а) та кількісне ранжування факторів екологічної небезпеки (аварійних ситуацій) відносно очікуваних негативних наслідків (б)

На третьому етапі проведено обробку результатів оцінювання шляхом перевірки порушень умов транзитивності та розрахунку оцінки узгодженості.

Оцінка узгодженості (ОУ), визначається через індекс узгодженості (ІУ), який

дає інформацію про ступінь порушення умов транзитивності, за формулою:

$$IY = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (5.3)$$

де

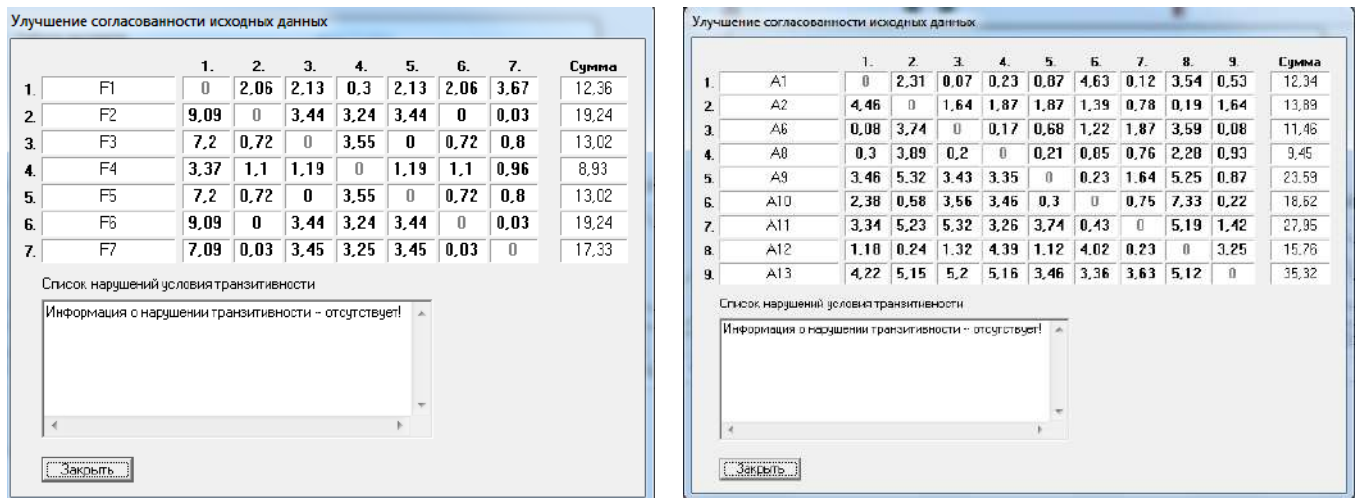
$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^N \rho_i \sum_{j=1}^N a_j, \quad (5.4)$$

та 
$$OY = \frac{IY}{OY_{\text{табл.}}} . \quad (5.5)$$

Табличне значення оцінки узгодженості,  $OY_{\text{табл.}}$  визначається згідно статистичних даних випадкового узгодження матриць різного порядку.

Згідно методу Сааті, якщо  $OY$  більше ніж 20 %, треба перевірити правильність наданих вагових оцінок, в програмі МАІ зазначаються дані про порушення умов транзитивності.

На рисунку 5.8 наведено результати перевірки порушень умови транзитивності (умови не порушені, оцінки узгоджені).



*а*

*б*

Рисунок 5.8 – Результати перевірки порушень умови транзитивності при оцінці факторів екологічної небезпеки (*а*) та оцінці факторів небезпеки при виникненні аварійних ситуацій (*б*) за критерієм 1

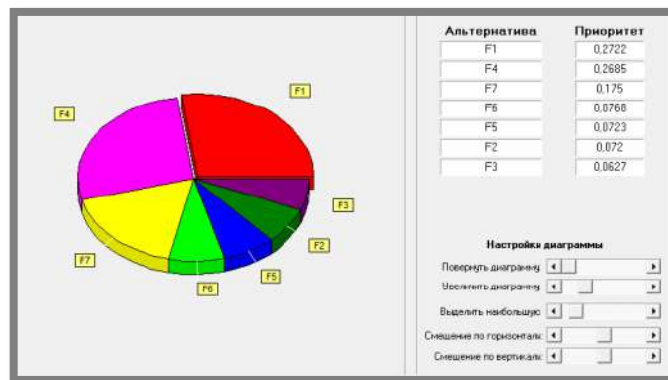
На четвертому етапі визначається результуюча оцінка з урахуванням оцінок за кожний критерій (за суперкритерієм) шляхом застосування методу лінійної згортки, тобто загальний рівень небезпеки  $R$  подається як лінійна комбінація значень

критеріїв:

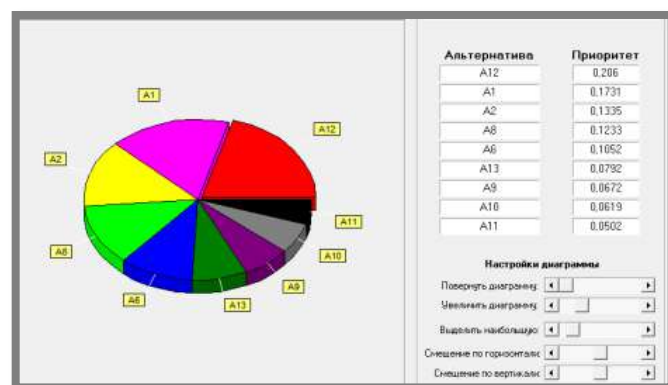
$$\Phi(R) = \max \left\{ \sum_{i=1}^n \omega_i \rho_i = \omega_1 \rho_1 + \omega_2 \rho_2 + \dots + \omega_n \rho_n \right\}, \quad (5.6)$$

де  $n$  – кількість критеріїв,  $\omega_i$  – вага (важливість)  $i$ -го критерію,  $\rho_i$  – оцінка рівня небезпеки фактору  $R$  за  $i$ -м критерієм.

Результати ранжування факторів негативного впливу на навколишнє середовище за ступенем небезпеки (рис. 5.6, 5.7, 5.9) дозволяють ідентифікувати та кількісно оцінити рівні небезпеки технологічних вузлів відносно відповідних критеріїв та суперкритерію (рис. 5.9) в умовах неповної апріорної інформації, а також сформулювати рішення щодо запобігання небезпечних ситуацій на етапі проектування комплексів й визначити пріоритети впровадження заходів при обмежених матеріальних ресурсах.



*a*



*б*

Рисунок 5.9 – Результати багатокритеріальної оцінки та ранжування факторів екологічної небезпеки: *a* – для факторів негативного впливу на НС; *б* – для аварійних ситуацій

Встановлено фактори з найбільшим значенням пріоритету за суперкритерієм для впливу на НС фактор «F1 - надходження димових газів у повітря робочої зони» має пріоритет – 27,22% та «F4 - вихід різкого неприємного запаху при наявності відходів і їх просуванні по технологічній лінії» має пріоритет – 26,85%; для можливості виникнення аварійної ситуації найбільше значення пріоритету мають фактори «A12 - вихід з ладу системи очистки димових газів» - 20,6%, «A1 - порушення герметичності фланцевих з'єднань на трубопроводах БЦП (вихід піролізного газу в навколишнє середовище)» – 17,31% та «A2 - порушення герметичності або виникнення тріщини в реакторі БЦП (вихід піролізного газу в навколишнє середовище)» - 13,35% [136].

Проведені дослідження являються частиною комплексної розробки, що полягає у створенні новітніх екологічно безпечних та енергетично незалежних технологій утилізації органічних відходів піролізним процесом. Запропонований підхід, дозволяє в умовах неповної апріорної інформації про характер та ймовірність аварійних ситуацій кількісно оцінити вклад кожного фактору в загальний рівень небезпеки з мінімальною похибкою та з урахуванням найбільш вагомих критеріїв небезпеки. Недоліком запропонованого підходу є присутність суб'єктивного фактору при проведенні опитування експертів, який зменшується за рахунок створення декількох груп експертів та залучення кваліфікованих іноземних спеціалістів.

5.2. Встановлення кількісного, якісного складу та вмісту шкідливих речовин в отриманих продуктах

#### 5.2.1 Вплив технологічних параметрів на склад рідкого продукту

За рахунок правильного підбору температурного режиму циркуляційної системи можливо направити реакцію в середині реактора в бік максимального виходу газоподібного або рідкого продукту, які в подальшому можуть використовуватися як корисні речовини [138, 147, 202, 216, 330]. Визначення раціональних параметрів процесу піролізу необхідно здійснювати

експериментальним шляхом. Були розроблені програми випробувань на експериментальній установці ЕУ БЦП 14: «Програма проведення дослідження температурних та часових характеристик технології циркуляційного піролізу на установці ЕУ БЦП 14 з різними видами полімерних відходів» та «Програма проведення досліджень хімічного складу рідкої легкої фракції, отриманої методом БЦП на установці БЦП 14, з різних видів полімерних відходів на установці рідкого хроматографу NeoCHROM». Відповідно даним програмам на першому етапі досліджувались технологічні характеристики процесу, а саме температури в контрольних точках (табл. 5.5) та час на експериментальній установці БЦП 14. При дослідженні впливу температур на склад вихідних продуктів визначальним параметром являється температура ПГС на виході з третього контуру ( $T_{\text{вих.}}$ ) багатоконтурної циркуляційної системи (БЦС), яка визначає консистенцію і склад вихідного піролізного палива (від легкої фракції до мазуту).

На другому етапі проводились дослідження хімічного складу отриманої рідкої фракції на рідинному хроматографі NeoCHROM.

Таблиця 5.5 – Позначення контрольних точок вимірювання температури на установці БЦП 14

№	Змінна	Вимірювана величина
1	K1	Температура на головному пальнику
2	K2	Температура ПГС на виході з третього контуру

В ході попередніх випробувань на установці з циклічним режимом роботи [119, 141, 198, 267] було виявлено, що тривалість процесу залежить від складу сировини, загальний час складає 3-4 год. Характеристики різних видів відходів впливають на об'єм кінцевих продуктів, при цьому для різних дослідних сумішей різниця загального об'єму не перевищує 7-9 %. Було виявлено, що для реактору об'ємом 14 дм<sup>3</sup>, на час виходу на режим впливає якісний та кількісний склад органічних відходів, при цьому різниця в часі складає не більше 10-15 хв. і встановлюється в межах 80-100 хв. від початку проведення процесу. На основі результатів попередніх досліджень [119] можливо проведення експериментальних

випробувань з метою дослідження встановлених параметрів на характеристики отриманих рідких продуктів.

В ході першого випробування в реактор завантажили 6 кг суміші полімерних відходів (дослідна суміш 2). Температура навколишнього середовища була 15°C. Тиск зрідженого газу (пропан) на основному пальнику: 2 кг/см<sup>2</sup>. Піролізний газ допалювався на додатковому пальнику розташованому навколо основного пальника. Зміна температури в контрольних точках представлена на рис 5.10.

В ході дослідження впливу температур на склад вихідних продуктів найважливішою вимірюваною величиною є температура ПГС (K2) на виході з третього контуру в конденсатор, яка визначає вихід реактора на режим. Отримана рідка фракція відбиралась при різних температурних режимах процесу БЦП. Перший відбір проб (зразок № 1) відбувся при температурі K2=100°C та тривалості процесу 2 год. 25 хв. Наступний відбір рідкого продукту (зразок № 2), отриманого методом БЦП, був при K2= 150°C та тривалості процесу 2 год.45 хв. Останній зразок № 3 відбирався, коли температура ПГС на виході з третього контуру встановилась 124 °С через 3 год.45 хв. від початку проведення процесу БЦП.

Були отримані данні для побудови кривих (рис. 5.10) та аналізу теплових характеристик реактора.

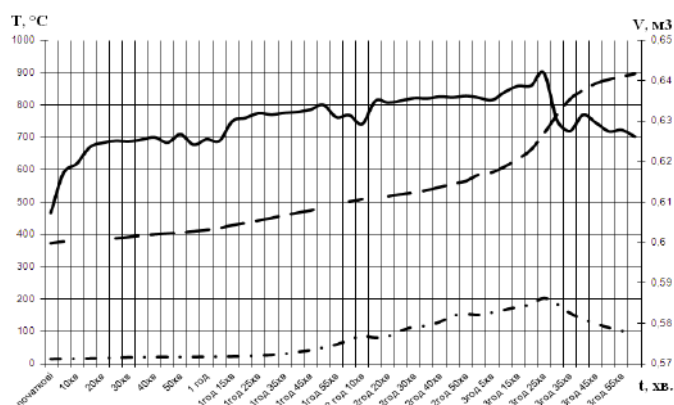


Рисунок 5.10 – Криві теплових характеристик: піролізний газ - пунктирна лінія; K1 – суцільна лінія; K2 – лінія з крапкою

Обсяг отриманого піролізного газу за 4 год. безперервної роботи установки – 0,0419 м<sup>3</sup>, спалювався на додатковому пальнику.

Для визначення якісного складу отриманих продуктів, було відібрано 5,3 л

рідкого палива при різних температурних режимах роботи експериментальної установки БЦП 14 та направлено в лабораторію для аналізу на рідинному хроматографі NeoCHROM [33, 326]. Отримані результати представлені у вигляді хроматограм (рис.5.10-5.13).

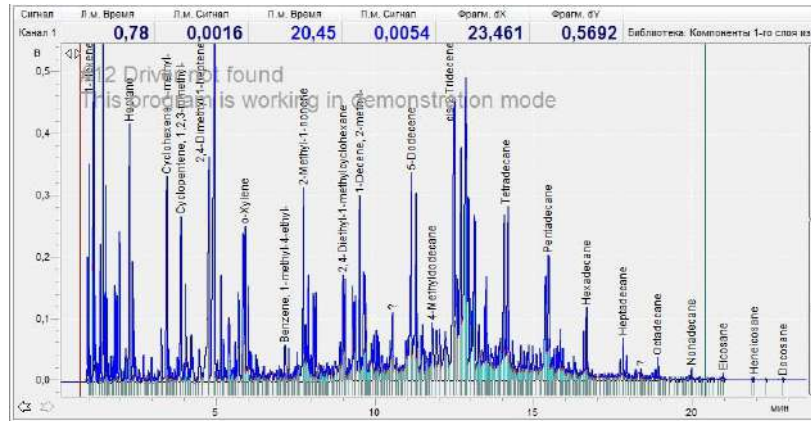


Рисунок 5.11 – Хроматограма зразку № 1

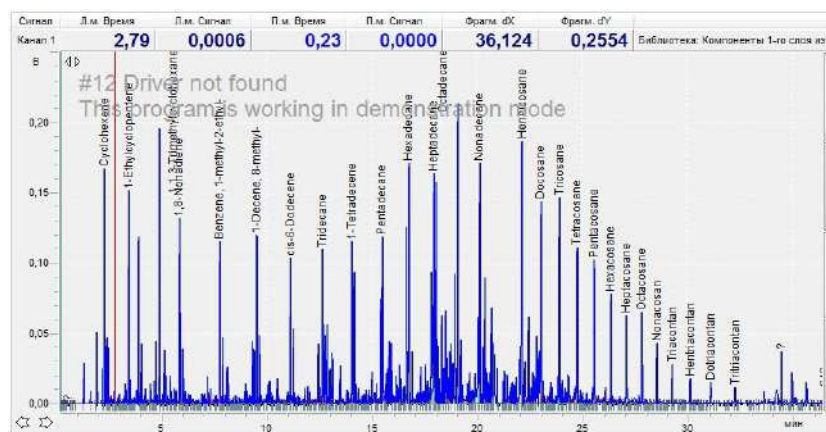


Рисунок 5.12 – Хроматограма зразку № 2

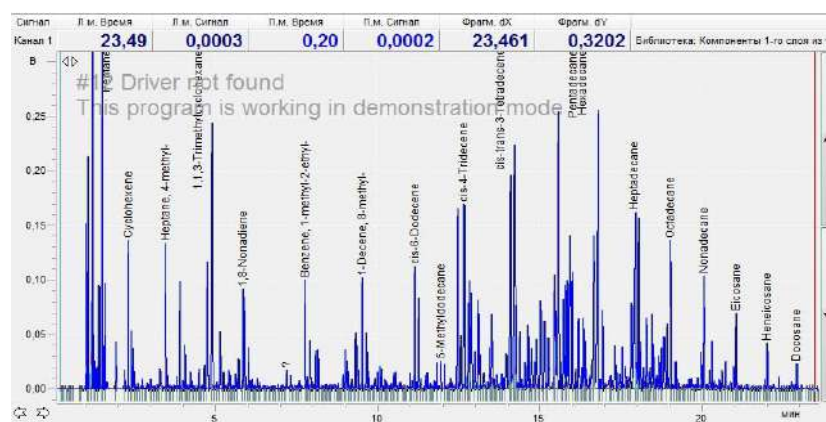


Рисунок 5.13 – Хроматограма зразку № 3

Для виявлення залежностей отримання кінцевих продуктів від технологічних



параметрів процесу циркуляційного піролізу були проаналізовані властивості отриманих зразків вихідного рідкого продукту (рис.5.14 - 5.17).

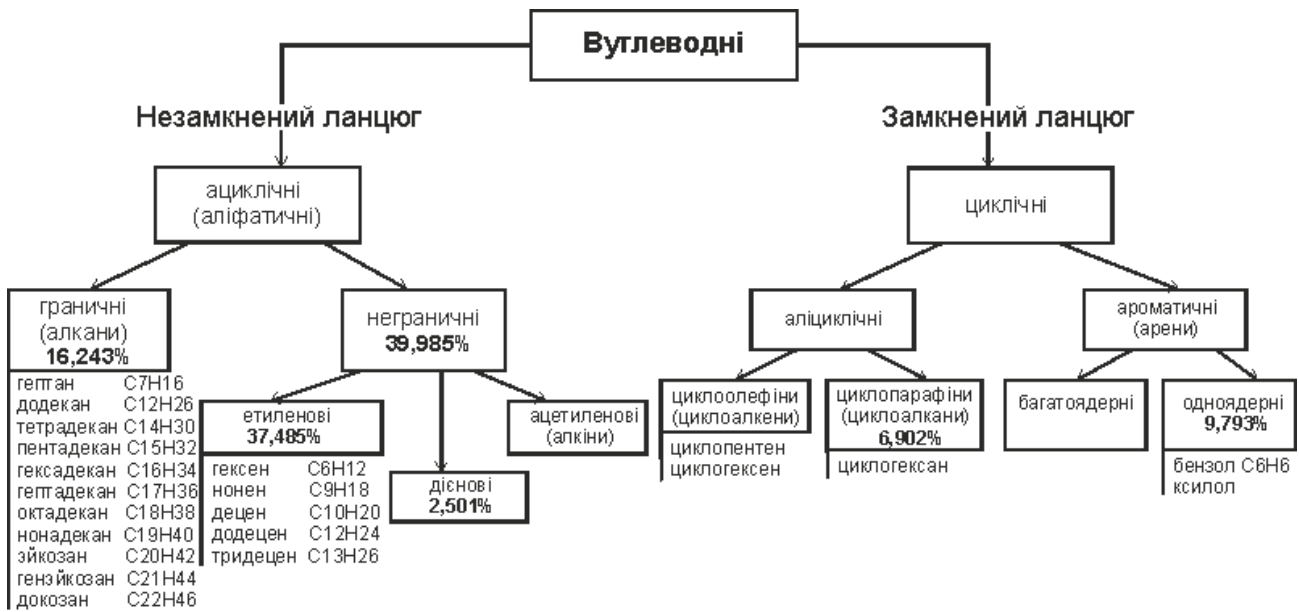


Рисунок 5.14 – Кількісний склад рідкого вихідного продукту (зразок № 1)

Таким чином, при утилізації суміші полімерних відходів методом БЦП при температурі 100°C на 145 хвилині був отриманий рідкий продукт, який має наступний склад: н-алкани 12,913%, ізоалкани 3,329%, циклоалкани 6,901%, алкени 37,485%, дієни 2,501%, арени 9,793%, інші\* 27,078%.

\* – хімічні компоненти, кількість яких не перевищує 0,001% від загальної кількості, та які не були ідентифіковані, але подальше налаштування вимірювального обладнання дозволить скласти індивідуальну бібліотеку для продуктів піролізного процесу.

Для якісної оцінки одержаного рідкого продукту було застосоване арифметичне усереднення молекулярної маси. Для якісної оцінки фракційного складу одержаного рідкого продукту була розрахована його середня молекулярна маса за формулою Б.П.Воїнова:

$$M_{cp.} = 60 + 0,3 \cdot t_{cp.} + 0,001 \cdot t_{cp.}^2,$$

де  $t_{cp.}$  – середня температура кипіння продукту.

Загально середня температура кипіння вуглеводнів зразку № 1 дорівнює 209,75°C, температура застигання -39°C, в'язкість при 20°C 1,4-1,9 сСт (метод визначення – за допомогою капілярного віскозиметру), цетанове число 42

встановлено за розрахунковою методикою (цетанове число палив можна істотно підвищити, якщо збільшити концентрацію нормальних парафінів і знижуючи вміст ароматиків (нормальне значення 40-50)). Тоді середня молекулярна маса за формулою Воїнова буде дорівнювати 185, що відповідає легким фракціям з температурою спалаху 27°C (визначено в відкритому тиглі Клівленда за методикою ASTM D92).

Це свідчить про те, що отриманий при  $T_{\text{вих.}}=100^{\circ}\text{C}$ , рідкий продукт має низьку молекулярну масу, відповідає легким фракціям з температурою спалаху 24°C, а враховуючи те, що робоча температура в реакторі 580-590°C, можна стверджувати, що процес термодеструкції проходить достатньо ефективно.

Аналізуючи зразок № 2 рідкого продукту, отриманого при 150°C на виході з третього контуру на 145 хв. проведення процесу БЦП, був виявлений наступний склад: н-алкани 19,753%, ізоалкани 1,605%, циклоалкани 6,385%, алкени 25,193%, дієни 2,241%, ацени 3,011%, інші\* 41,813%.

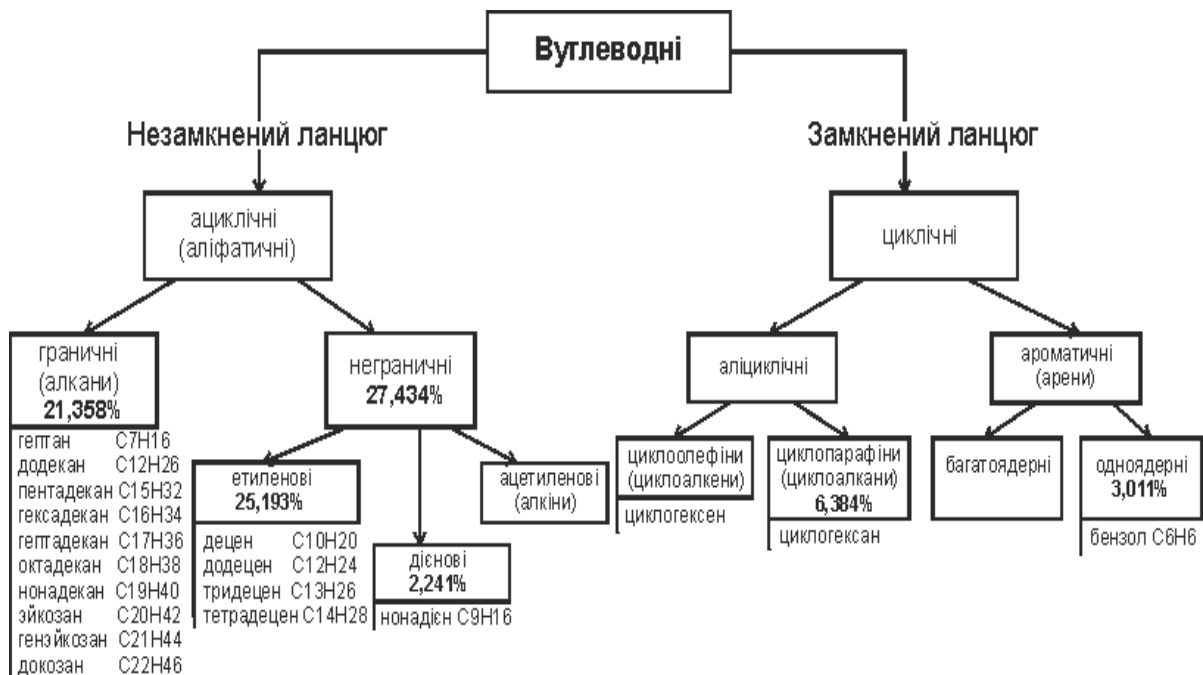


Рисунок 5.15 – Кількісний склад рідкого вихідного продукту (зразок № 2)

Середня температура кипіння вуглеводнів зразку № 2 дорівнює 234,52°C, температура застигання -28°C, в'язкість при 20°C 1,4-1,9 сСт, цетанове число 42. Середня молекулярна маса за формулою Воїнова дорівнює 185, що відповідає легким фракціям з температурою спалаху 27.

При дослідженні хімічного складу рідкої фракції (зразок №3) отриманої при температурі 124°C на 225 хв. від початку проведення процесу, був встановлений її кількісний склад: н-алкани 22,198%, ізоалкани 0,668%, циклоалкани 5,1375%, алкени 13,848%, дієни 2,553%, ацени 3,001%, інші\* 52,595%.

Середня температура кипіння даної фракції дорівнює 311,37°C, температура застигання -19°C, в'язкість при 20°C 1,4-1,9 сСт, цетанове число 38, а середня молекулярна маса зразку №3 дорівнює 250. Температура спалаху 26°C.

Одержана рідка фракція має молекулярну масу, що перевищує установлений діапазон для легких фракцій 100-200, але в її складі ще достатня кількість легких фракцій вуглеводнів, що характеризує достатньо низьку температуру спалаху. Це свідчить, що при утилізації відходів в реакторі циклічної дії від початку процесу до 3 год. видаляються більш легкі фракції, які змінюються в залежності від зміни температури  $T_{\text{вих}}$ . При подальшому проведенні процесу БЦП утворюється рідке паливо з молекулярною масою більше 250, що відповідає більш важким фракціям.

Слід відмітити, що в реакторі безперервної дії Екопір БЦП після виходу на робочій режим збільшення молекулярної маси вихідного продукту при тривалому процесі БЦП, не спостерігається [195]. Збільшення ступеню деструкції здійснюється за рахунок регулювання температурних показників контурів в залежності від значення молекулярної маси (рис. 5.16).

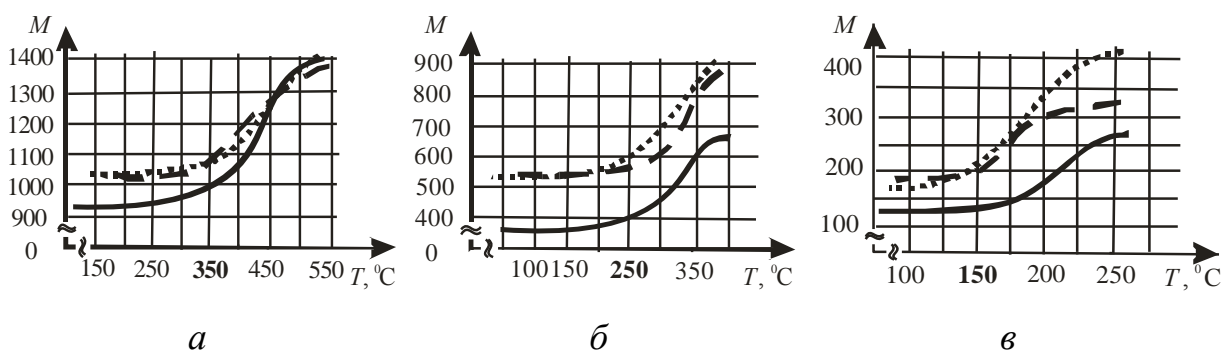


Рис. 5.16 - Залежність зниження молекулярної маси ПГС від зниження температури контурів БЦС: *a* – на першому контурі; *б* – на другому; *в* – на третьому

Різні криві позначають різний склад початкових сумішей, які утилізувалися: пунктирна лінія - досліджувана суміш 1; суцільна лінія - досліджувана суміш 2; лінія з крапок - досліджувана суміш 3.

Як видно з рис. 5.16 *а* різке зниження молекулярної маси відбуваються практично одночасно, незалежно від складу суміші, яка поступає на циркуляційний піроліз. Падіння значення молекулярної маси змінюється значно в районі до температури контуру рівної 330-360 °С, після цієї температури зміни проходять незначно. На другому контурі (рис. 5.16 *б*) також відбувається зниження молекулярної маси і на другому контурі при зниженні температури контуру приблизно до 230 – 250 °С, що супроводжується різкий стрибком утворення кількості важкої рідкої фракції, яка циркулює на контурі.

При визначенні температури третього контуру (рис. 5.16 *в*) задаються такі ж умови ведення процесу піролізу: температура першого контуру дорівнює 340 °С, температура другого контуру дорівнює 230 °С. З урахуванням зниження значення молекулярної маси рідкої фракції, що сконденсувалася, температура визначається контуру приймається в межах 140-160 °С. Що підтверджує розрахункові данні.

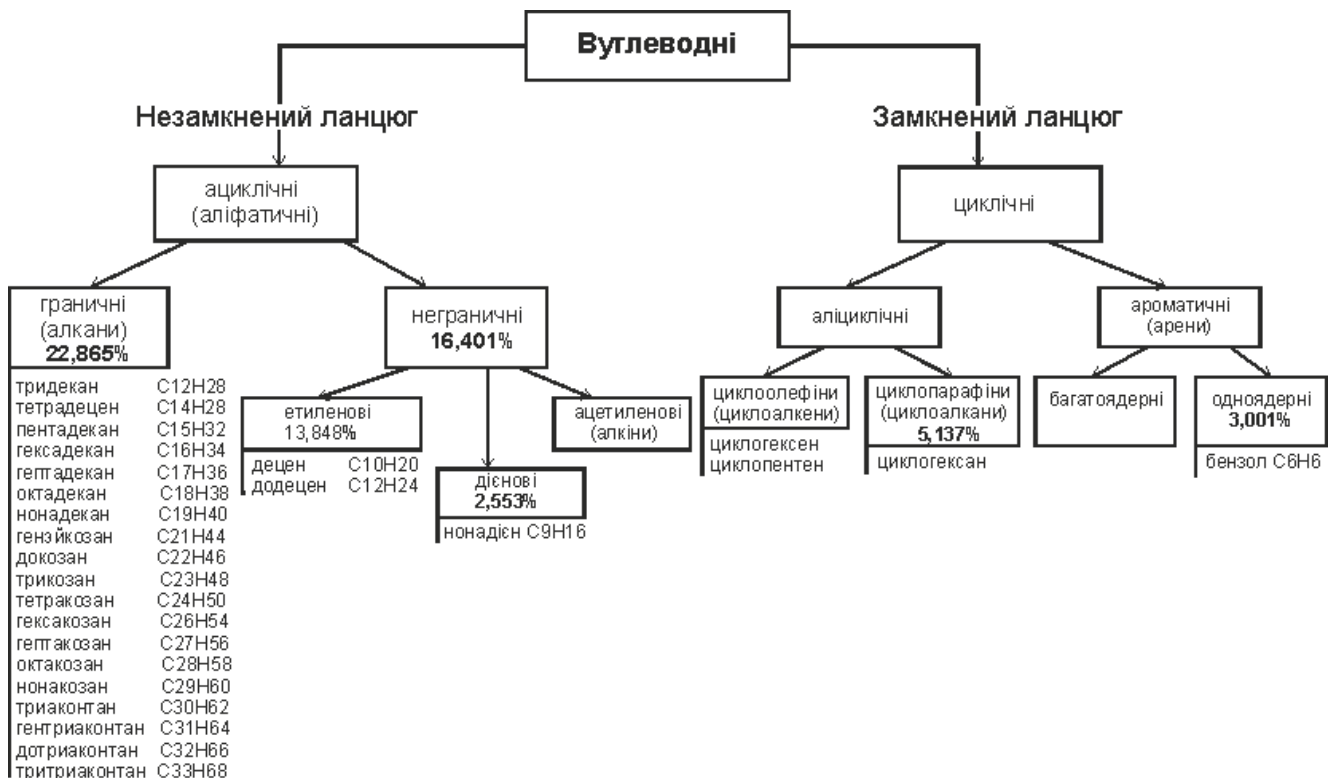


Рисунок 5.17 – Кількісний склад рідкого вихідного продукту (зразок № 3)

Залежність виходу вуглеводнів від зміни температури процесу БЦП в ході першого випробування графічно зображена на рис. 5.18.

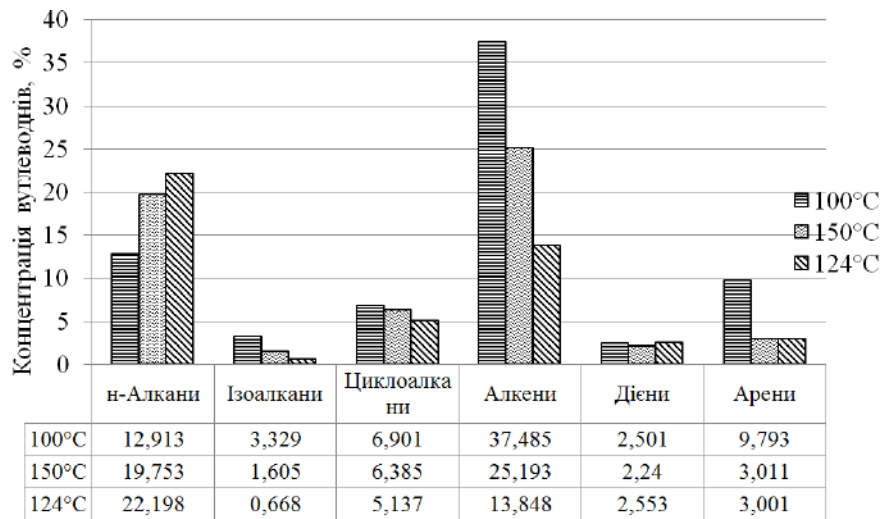


Рисунок 5.18 – Залежність виходу вуглеводнів від температури

З графіку видно, що найбільший вихід нормальних парафінів при температурі процесу 124°C, ізоалканів, циклоалканів, неграничних та ароматичних при температурі 100°C, а при температурі 150°C отримана середня кількість всіх утворених вуглеводнів.

В ході другого випробування в реактор завантажили 5 кг відходів досліджуваної суміші 8. Температура навколишнього середовища була 10°C. Піролізний газ з'явився через 45 хв. Від початку проведення процесу. На 55 хв. процесу спостерігалось різке збільшення температури в контрольній точці К2. Температурні показники в контрольних точках представлені на рис. 5.20.

Відбір проб рідкого продукту БЦП здійснювався при різних температурах К2, в хімічну лабораторію на аналіз був направлений зразок №4, що відбирався при температурі К2=165°C через 2 год. 35 хв. від початку проведення процесу. Хроматограма хімічного складу рідкого продукту представлена на рис. 5.19.

Були отримані данні для побудови кривих (рис. 5.20) та аналізу теплових характеристик реактора.

Для визначення якісного складу отриманих продуктів, було відібрано 4,5 л рідкого палива та направлено в лабораторію для аналізу на рідинному хроматографі. Отриманий за 3 год.30 хв. безперервної роботи установки піролізний газ, обсягом 0,033 м<sup>3</sup>, спалювався на додатковому пальнику.

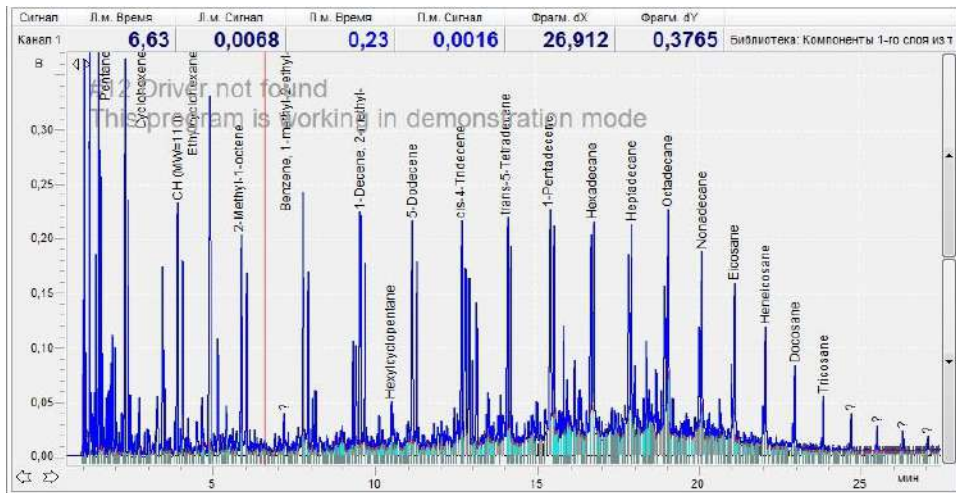


Рисунок 5.19 – Хроматограма зразку № 4

При дослідженні хімічного складу рідкої фракції (зразок №4) отриманої при другому випробуванні при температурі 165°C на 145 хв. від початку проведення процесу, був встановлений її кількісний склад (рис. 5.21): н-алкани 14,330%, ізоалкани 2,033%, циклоалкани 4,594%, алкени 22,968%, дієни 2,003%, арили 4,125%, інші\* 49,947%.

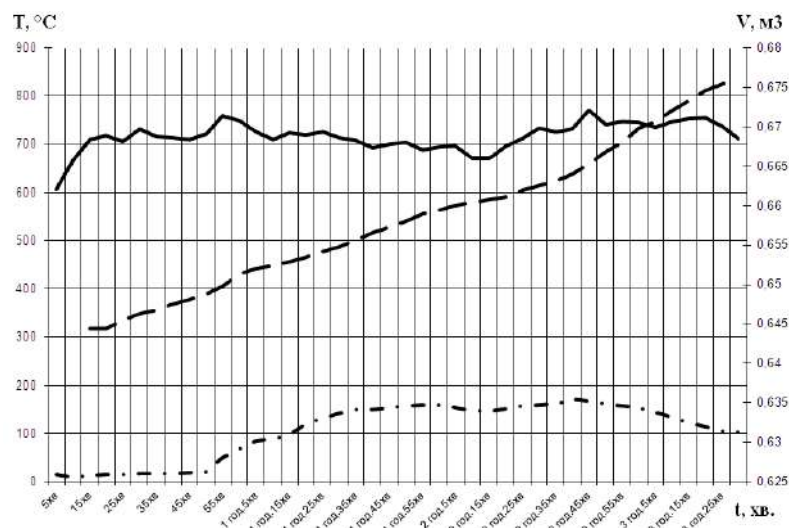


Рисунок 5.20 – Криві теплових характеристик: піролізний газ - пунктирна лінія; K1 – суцільна лінія; K2 – лінія з крапкою

Середня температура кипіння вуглеводнів дорівнює 236,52°C, температура застигання -39°C, в'язкість при 20°C 1,4-1,9 сСт, цетанове число 54, а середня молекулярна маса складає 186.

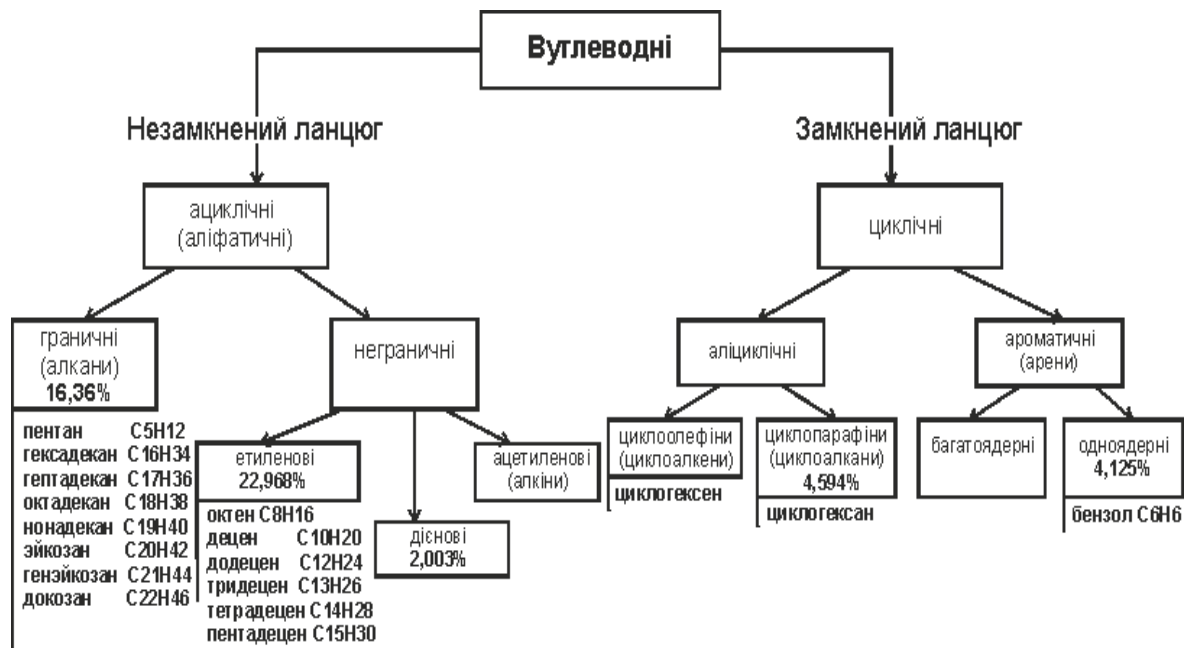


Рисунок 5.21 – Кількісний склад рідкого вихідного продукту (зразок № 4)

Залежність виходу вуглеводнів від зміни температури процесу БЦП в ході другого випробування графічно зображена на рис. 5.22.

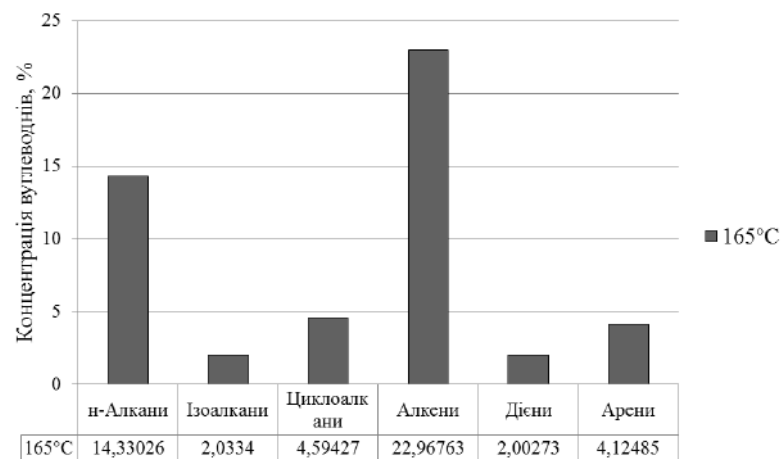


Рисунок 5.22 – Залежність виходу вуглеводнів від температури

Таким чином, з графіку видно, що при температурі процесу 165°C в рідкому продукті переважають неграничні вуглеводні. Ароматичні вуглеводні також перевищують норму для альтернативного палива, яка складає 3%.

В ході третього випробування в реактор завантажили суміш відходів (дослідна суміш 1). Температура навколишнього середовища була 5°C. Тиск зрідженого газу (пропан) на основному пальнику: 2 кг/см<sup>2</sup>. Піролізний газ допалювався на додатковому пальнику розташованому навколо основного пальника. Зміна

температури в контрольних точках представлена на рис. 5.23.

Перший відбір проб (зразок № 5) відбувся при температурі  $K2=100^{\circ}\text{C}$  та тривалості процесу 1 год. 45 хв. Наступний відбір рідкого продукту (зразок № 6), отриманого методом БЦП, був при  $K2=160^{\circ}\text{C}$  та тривалості процесу 3 год.45 хв.

Були отримані данні для побудови кривих (рис. 5.23) та аналізу теплових характеристик реактора.

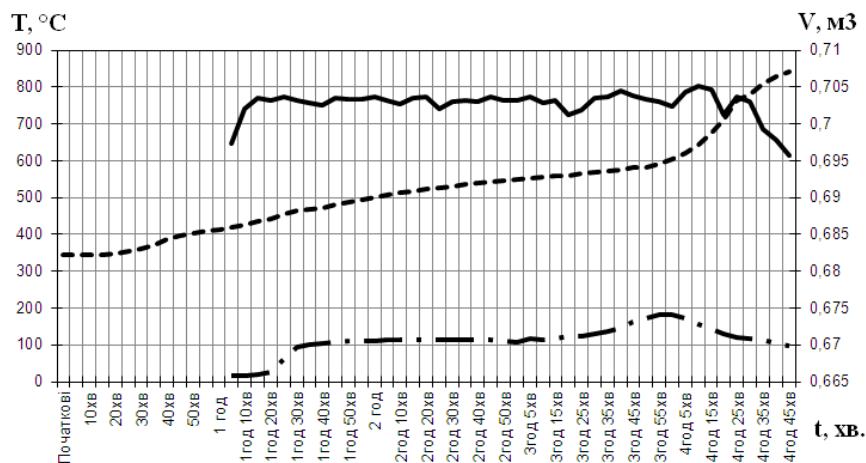


Рисунок 5.23 – Криві теплових характеристик

Для визначення якісного складу отриманих продуктів, було відібрано 6 л рідкого палива при різних температурних режимах роботи експериментальної установки ЕУ БЦП 14 та направлено в лабораторію для аналізу на рідинному хроматографі NeoCHROM. Отримані результати представлені у вигляді хроматограм (рис. 5.24, 5.25).

Обсяг отриманого піролізного газу за 4 год. 45 хв. безперервної роботи установки –  $0,248\text{ м}^3$ , спалювався на додатковому пальнику.

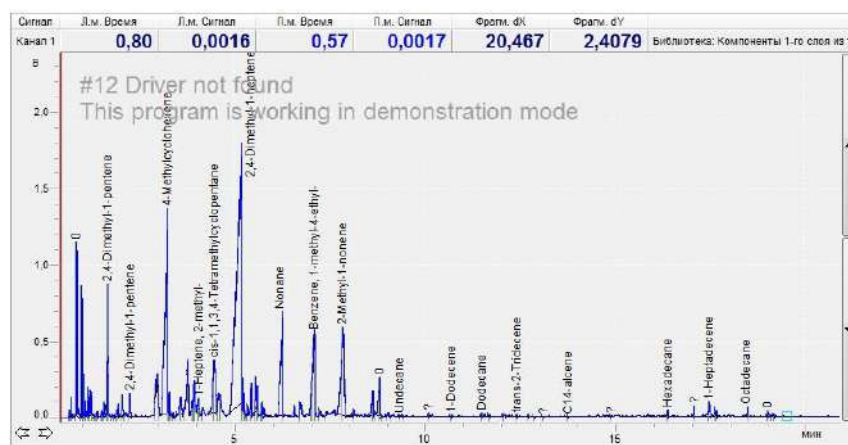


Рисунок 5.24 – Хроматограма зразку № 5



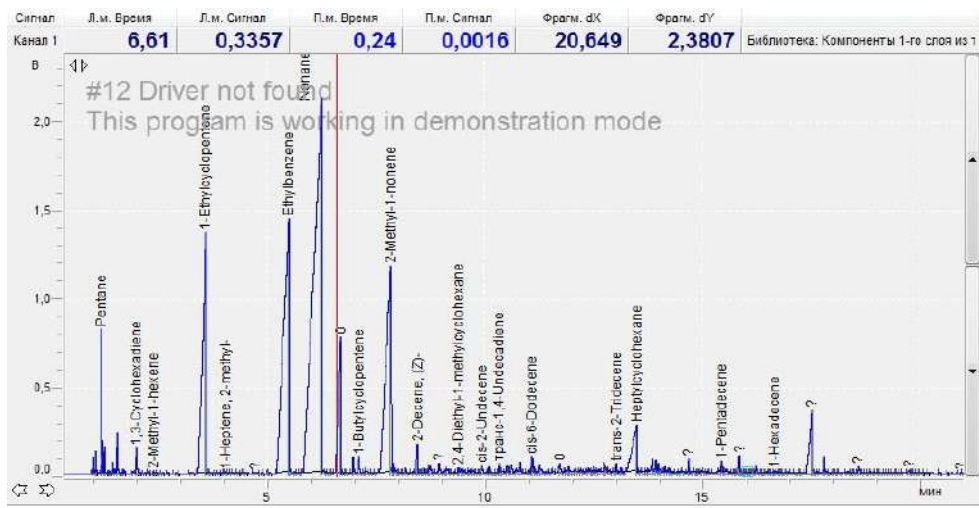


Рисунок 5.25 – Хроматограма зразку № 6

Для дослідження залежностей отримання кінцевих продуктів від технологічних параметрів процесу багатоконтурного циркуляційного піролізу були проаналізовані властивості зразків вихідного рідкого продукту (рис.5.26, 5.27).

В результаті дослідження рідкого продукту (зразок № 5) визначений наступний склад: н-алкани 8,337%, ізоалкани 2,622%, циклоалкани 10,13%, алкени 24,79%, дієни 8,88%, арили 6,649%, інші\* 38,592%.

Середня температура кипіння складає 197,053°C, температура застигання -45, в'язкість при 20°C 1,4-1,9 сСт, цетанове число 36,8. Середня молекулярна маса дорівнює 158.



Рисунок 5.26 – Кількісний склад рідкого вихідного продукту (зразок № 5)

При дослідженні рідкого продукту (зразок № 6) відібраного при температурі 160°C на 225 хв. процесу БЦП був виявлений наступний склад вуглеводнів: н-алкани 37,333%, ізоалкани 0,423%, циклоалкани 0,892%, алкени 25,417%, дієни 0,972%, ариени 17,969%, інші\* 16,994%.



Рисунок 5.27 – Кількісний склад рідкого вихідного продукту (зразок № 6)

Середня температура кипіння 238,23°C, температура застигання -39, в'язкість при 20°C 1,4-1,9 сСт, цетанове число 56,8. Середня молекулярна маса складає 188.

Для аналізу впливу температури на якісний та кількісний вихід вуглеводнів був створений графік, представлений на рис. 5.28.

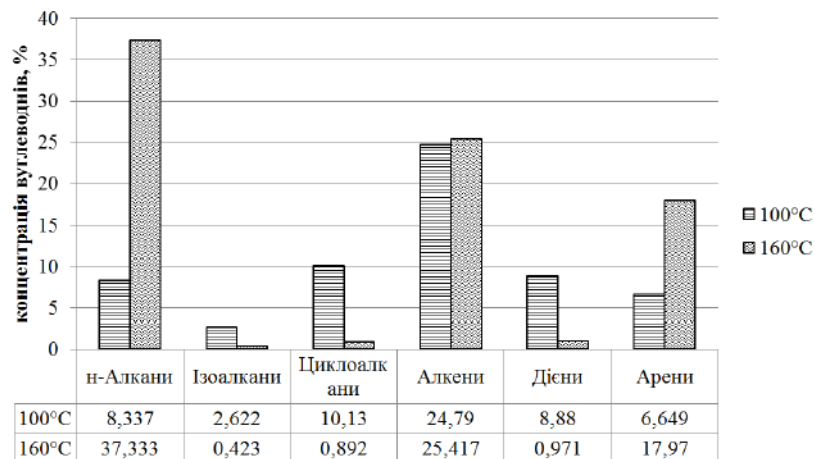


Рисунок 5.28 – Графік залежності виходу вуглеводнів від температури

З графіку видно, що кількість утворених нормальних парафінів насичених та ароматичних вуглеводнів зі збільшення часу та температури збільшується. Тоді як на початку виходу реактору піролізу на стаціонарний режим при температурі 100°C

спостерігається більший вихід ізоалканів, циклоалканів та дієнів.

Для виявлення залежностей кількості вуглеводів від температур процесу БЦП був побудований графік, який представлений на рис. 5.29 [202].

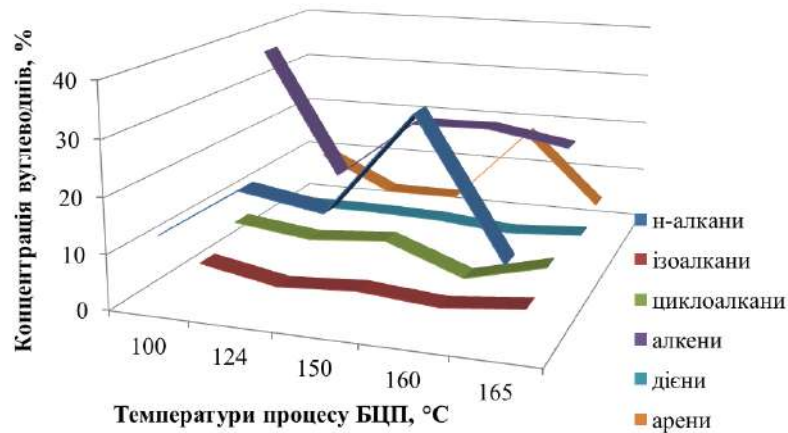


Рисунок 5.29 – Графік залежності кількості вуглеводів від температури третього контуру

З графіку видно, що концентрація ізоалканів, циклоалканів та дієнів в діапазоні температур 100-165°C змінюється не істотно і в подальшому приймаємо, що вони є стабільні при зміні температури  $T_{\text{вих}}$  та тривалості процесу БЦП. Концентрація нормальних парафінів (н-алканів) різко зростає зі збільшенням температури до 160°C. Найбільше число неграничних вуглеводів (алкенів) утворюється при температурі 100°C, зі збільшенням температури до 124°C їх концентрація різко зменшується, а при досягненні температури  $T_{\text{вих}}=150^\circ\text{C}$ , кількість алкенів збільшується та стабілізується. Утворення ароматичних вуглеводів (аренів) в процесі БЦП змінюється не істотно, а при температурі  $T_{\text{вих}}=160^\circ\text{C}$  концентрація їх різко збільшується, а потім поступово зменшується.

На концентрацію вуглеводів при утилізації полімерних відходів методом БЦП впливає тривалість самого процесу. Щоб визначити залежність концентрацію вуглеводів від тривалості процесу був побудований графік (рис.5.30).

З графіку видно, що кількість нормальних парафінів коливається зі зміною температури, найменший вихід н-алканів спостерігається в межах 100-145 хв., далі їх кількість починає зростати. Ізоалкани утворюються шляхом полімеризації, мають властивість підвищувати октанове число, з часом проведення процесу БЦП їх

кількість повільно зменшується, найбільший вихід ізоалканів зафіксований на початку виходу реактора на режим.

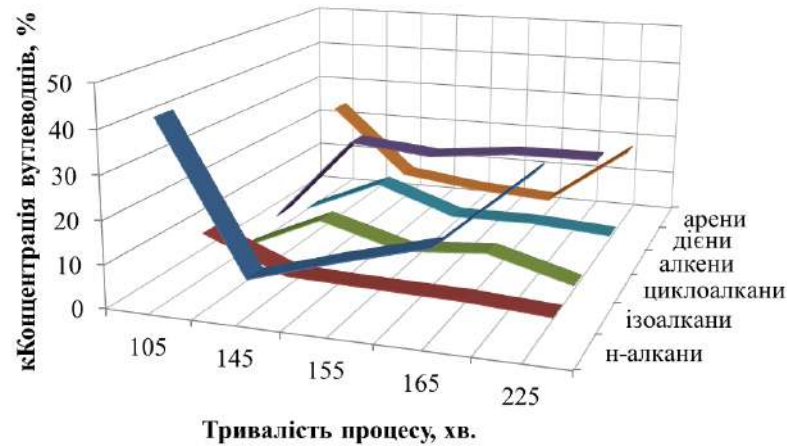


Рисунок 5.30 – Графік залежності виходу вуглеводнів від тривалості процесу БЦП

Спостерігається також коливання кількості циклоалканів: збільшуються на 145 хв. процесу, але зменшуються після трьох годин проведення БЦП. Число алкенів залишається стабільним після виходу реактора на режим і складає 22-25%. Збільшення дієнів спостерігається на 145 хв. проведення БЦП та з часом їх кількість зменшується. На 95 хв. процесу в рідкому продукті знаходиться велика кількість ароматичних, але зі збільшенням тривалості БЦП, їх число зменшується приблизно до 200 хв., далі вони знову зростають.

Враховуючи те, що технологія циркуляційного піролізу дає можливість змінювати якісний та кількісний склад одержаного палива за рахунок керування температурою  $T_{\text{вих.}}$ , в подальшому можливо отримувати модифікацію рідких вуглеводнів піролізного палива наближену до традиційного палива для двигунів внутрішнього згоряння або інших потреб.

Товарні бензини готують, як правило, змішуванням декількох компонентів. Змішування компонентів дозволяє отримувати товарний продукт із заданими показниками якості при раціональному використанні фізичних та хімічних властивостей кожного компонента. Така постановка може суттєво допомогти в практичній реалізації одержаних рідких фракцій методом циркуляційного піролізу твердих органічних відходів.

Розглянемо компонентний склад бензинових фракцій різних процесів переробки нафти і порівняємо його зі складом рідких фракцій одержаних при циркуляційному піролізі органічних відходів (табл.5.6) [202].

Таблиця 5.6 – Вуглеводневий склад бензинових фракцій різних процесів переробки нафти та рідкий продукт БЦП

Бензини	Склад вуглеводнів			
	Арени	Циклоалкани	Алкани	Алкени
Прямогонний бензин з				
- Татарської нафти	3-10	20-30	60-80	1-2
- Західносибірської нафти	7-12	22-35	55-70	1-2
- Бакинської нафти	2-10	40-65	25-50	-
Каталітичний риформінг				
- м'якого режиму	40-50	50-60		1-2
- жорсткого режиму	60-70	30-38		1-2
Бензин термічного крекінгу	15-35	50-60		15-25
Бензин коксування	20-25	25-35		45-60
Легка смола піролізу	45...60	10...18		20...28
Рідкий продукт БЦП*	13-30	41-60	8-37	4-18

\* усереднені дані взяті при різних вищевказаних модифікаціях рідкого продукту циркуляційного піролізу

Бензини термічних процесів поглибленої переробки нафти отримують аналогічно циркуляційного піролізу органічних відходів – розщепленням високомолекулярних вуглеводнів при температурі вище 315°C з утворенням вуглеводнів з меншою молекулярною масою. З таблиці 5.6 видно, що кількість аренив у рідкому продукті відповідає прямогонним бензинам. Кількість алканів при модифікації вуглеводнів, отриманій в ході третього випробування (зразок № 6) найбільш наближений до бензину одержаному за технологією каталітичного риформінгу, а кількість алкенів наближена до термічного крекінгу.

Розрахунок складу та якості кінцевих продуктів технологічного процесу

конденсації та рециркуляції ПГС на контурах БЦС було здійснено на основі моделювання фазової парорідинної рівноваги [201, 341]. Результатом моделювання є оптимізація технологічного процесу з встановленням максимального можливого значення константи рівноваги  $K_p$  та повного матеріального балансу фазових потоків ПГС відносно вмісту гетероатомних з'єднань на кожному контурі БЦС при здійсненні різних температур охолодження контурів [130, 131, 163].

Для кількісного вимірювання компонентів та побудови матеріального балансу використовувались масові витрати компонентів потоку та масові долі конкретного компоненту відносно загального вмісту суми всіх компонентів.

Складання матеріального балансу починається з приходу первинної ПГС на перший контур БЦС, виходячи з умови витрати первинної ПГС, що становить 50 кг/год для досліджуваної суміші 3 (табл. 5.7) та 78 кг/год для досліджуваної суміші 2 (табл. 5.8).

Однак саме за рахунок охолодження контурів та розрахунку константи рівноваги [201] вміст гетерогенних з'єднань у кінцевій фракції, що представлена альтернативним паливом вдалося мінімізувати. Це чітко простежується в даних таблиць 5.7 та 5.8, що демонструє динаміку вмісту небажаних компонентів у конденсованих фракціях на кожному контурі БЦС.

У розподілі хімічних елементів по фракціям спостерігається певна закономірність - вони концентруються в висококиплячих фракціях. В середні та важкі фракції потрапляють найбільш стійкі з'єднання, які не руйнуються при температурі википання фракції в умовах розділення газової фази на контурах.

За рахунок вибору раціональних температур охолодження контурів вміст гетерогенних компонентів у кінцевій фракції в порівнянні з вмістом у первинній ПГС вдалося зменшити на 78-86 %. Це чітко простежується з даних таблиць 5.7 та 5.8, що демонструє динаміку зменшення вмісту небезпечних компонентів у конденсованих фракціях на кожному контурі циркуляційної системи.

Зокрема при деструкції суміші полімерних відходів: для першого контуру за температури 348-355 С° конденсується 39 % нелетких компонентів у вигляді рідкої фракції з масовою часткою гетероатомних компонентів 1,16 % (мас.) від загальної

суми сполук, що містяться в первинній парогазовій суміші; для другого за температури 239-245 С° від парогазової фази, що надійшла з першого контуру відділяється 43 % рідкої фракції з масовою часткою гетероатомних компонентів 0,778 % (мас.); для третього за температури 138-142 С° від газової фази, що надійшла з другого контуру відокремлюється 48 % рідкої фракції з масовою часткою гетероатомних компонентів 0,995 % (мас.). Таким чином, у кінцевих продуктах екологічно прийняттого піролізного процесу досягається вміст гетероатомних компонентів - 0,279 % (мас.) у піролізному газі (тобто кисневмісних - 0,180 %, сірковмісних - 0,033%, та азотовмісних – 0,066%) та 0,260 % (мас.) у рідкій товарній фракції (з них: кисневмісних - 0,167 %, сірковмісних - 0,031%, та азотовмісних – 0,062%),

При деструкції відходів зношених автошин розподілення наступне: для першого контуру за температури 360-365 С° конденсується 43 % нелетких компонентів у вигляді рідкої фракції з масовою часткою гетероатомних компонентів 2,11% (мас.) від загальної суми сполук, що містяться в первинній парогазовій суміші; для другого за температури 245 С° від парогазової фази, що надійшла з першого контуру відділяється 50,8 % рідкої фракції з масовою часткою гетероатомних компонентів 1,074 % (мас.); для третього за температури 165-170 С° від газової фази, що надійшла з другого контуру відокремлюється 27 % рідкої фракції з масовою часткою гетероатомних компонентів 0,448 % (мас.). Таким чином, у кінцевих продуктах екологічно прийняттого піролізного процесу досягається вміст гетероатомних компонентів - 0,271 % (мас.) у піролізному газі (тобто кисневмісних - 0,01 %, сірковмісних - 0,279%, та азотовмісних – 0,01%) та 0,243 % (мас.) у рідкій товарній фракції (з них: кисневмісних - 0,01 %, сірковмісних - 0,223%, та азотовмісних – 0,01%). Що не перевищує значень гранично-допустимих концентрацій для природного газу та дизельного пального, та дає підстави стверджувати про екологічну безпеку під час їх використання, що підтверджено експериментальними випробуваннями [131]. Розбіжність значень, отриманих методами фізико-хімічного аналізу, корелюється з даними теоретичних розрахунків та становить 8 %, що підтверджує адекватність розробленої моделі.

Таблиця 5.7 - Матеріальний баланс циркуляційної системи щодо розподілення вмісту гетероорганічних з'єднань по фракціях для дослідної суміші 3

Температура контуру, Т, °С БЦС	Витрата та масова частка ПГС, яка поступає в контур			Витрата та масова частка первинної газової суміші, яка надходить з контуру до наступного						$K_j$
	$G'_j$ кмоль/ГОД	$G_j$ кг/ГОД	$y_{ij}$ , % мас	$G'_j$ кмоль/ГОД	$G_j$ кг/ГОД	$y_{ij}$ , % мас	$F'_j$ , кмоль/ГОД	$F_j$ кг/ГОД	$x_{ij}$ , % мас	
1 контур, 360	$G'$	$G$	$y_{ij}$ , %	$G'_1$	$G_1$	$y_{i1}$	$F'_1$	$F_1$	$x_{i1}$	$K_{i1}$
Сірковмісні	1004,49	1,28	2,52	572,56	0,73	1,44	431,9	0,55	1,08	0,298
Кисневмісні	502,25	0,59	1,12	286,70	0,33	0,64	215,55	0,24	0,48	
Азотовмісні	286,98	0,38	0,72	163,54	0,22	0,41	123,44	0,16	0,31	
Всього	1793,7	2,25	4,5	1022,8	1,35	2,29	770,89	0,95	2,11	
2 контур, 245	$G'_1$	$G_1$	$y_{i1}$	$G'_2$	$G_2$	$y_{i2}$	$F'_2$	$F_2$	$x_{i2}$	$K_{i2}$
Сірковмісні	572,56	0,73	1,44	280,5	0,36	0,706	292,0	0,37	0,734	6,161
Кисневмісні	286,70	0,33	0,64	140,48	0,16	0,031	146,22	0,17	0,33	
Азотовмісні	163,54	0,22	0,41	80,14	0,11	0,08	83,4	0,11	0,21	
Всього	1022,8	1,35	2,29	501,12	0,63	1,116	521,62	0,72	1,074	
3 контур, 170	$G'_2$	$G_2$	$y_{i2}$	$G'_3$	$G_3$	$y_{i3}$	$F'_3$	$F_3$	$x_{i3}$	$K_{i3}$
Сірковмісні	280,5	0,36	0,706	169,0	0,26	0,502	111,5	0,10	0,198	11,095
Кисневмісні	140,48	0,16	0,031	84,14	0,12	0,020	55,62	0,04	0,09	
Азотовмісні	80,14	0,11	0,08	47,71	0,08	0,019	32,75	0,03	0,06	
Всього	501,12	0,63	1,116	301,85	0,46	0,568	198,47	0,17	0,448	
Розподільна ємність	$G'_3$	$G_3$	$y_{i3}$ %	$G'_3$	$G_4$	$y_{i4}$ %	$F'_4$	$F_4$	$x_{i4}$ %	$K_{i4}$
Сірковмісні	169,0	0,26	0,502	90,9	0,11	0,223	78,5	0,14	0,279	
Кисневмісні	84,14	0,12	0,020	45,5	0,05	0,01	39,3	0,07	0,01	
Азотовмісні	47,71	0,08	0,019	25,9	0,04	0,01	22,4	0,04	0,01	
Всього	301,85	0,46	0,568	162,36	0,20	0,243	135,5	0,25	0,291	

$i$  - компонент;  $j$  - номер контуру;  $M$  - молекулярна маса ПГС, що потрапляє на контур;  $G'_j=1793,7$  кмоль/г - мольна витрата парогазового потоку первинної ПГС в перерахунку на суму гетерогенних з'єднань;  $F'_j$  - мольна витрата сконденсованого потоку;  $G_j$ , кг/год - масова витрата компонентів в парогазовому потоці;  $y_{ij}$  - масова доля компонента в паровій фазі;  $e_j$  - масова доля відгону;  $F_j$ , кг/год - масова витрата компонентів в сконденсованому потоці;  $x_{ij}$  - масова доля компонента в рівноважній рідкій фазі;  $r_j$  - масова доля рециркуляту;  $N$  - загальне число молей компонентів 8968700 моль/кг; середня молярна маса - 1115000 г/моль



Таблиця 5.8 – Матеріальний баланс БЦС щодо розподілення вмісту гетероатомних з'єднань по фракціях (суміш полімерів)

Температура контуру, Т, °С БЦС	Витрата та масова частка ПГС, яка поступає в контур			Витрата та масова частка первинної газової суміші, яка надходить з контуру до наступного						$K_j$
	$G'_j$ кмоль/ГОД	$G_j$ , кг/ГОД	$y_{ij}$ , % мас	$G'_j$ , кмоль/ГОД	$G_j$ , кг/ГОД	$y_{ij}$ , % мас	$F'_j$ , кмоль/ГОД	$F_j$ , кг/ГОД	$x_{ij}$ , % мас	
1 контур, 355	$G'$	$G$	$y_{ij}$ , %	$G'_1$	$G_1$	$y_{i1}$	$F'_1$	$F_1$	$x_{i1}$	$K_{i1}$
Кисневмісні	9842,1	1,41	1,81	6003,7	0,86	1,10	3839,1	0,55	0,71	<b>0,368</b>
Азотовмісні	3233,8	0,73	0,94	1972,6	0,45	0,57	1261,2	0,28	0,37	
Сірковмісні	815,5	0,18	0,23	497,5	0,11	0,14	318,1	0,07	0,09	
Всього	14060,1	2,32	2,98	8576,7	1,45	1,82	5484,4	0,91	1,16	
2 контур, 245	$G'_1$	$G_1$	$y_{i1}$	$G'_2$	$G_2$	$y_{i2}$	$F'_2$	$F_2$	$x_{i2}$	$K_{i2}$
Кисневмісні	6003,7	0,86	1,10	3422,1	0,49	0,627	2581,6	0,37	0,473	<b>8,456</b>
Азотовмісні	1972,6	0,45	0,57	1124,4	0,257	0,325	848,2	0,196	0,245	
Сірковмісні	497,5	0,11	0,14	283,6	0,063	0,079	213,9	0,047	0,060	
Всього	8576,7	1,45	1,82	4888,7	0,827	1,037	3688,0	0,624	0,778	
3 контур, 140	$G'_2$	$G_2$	$y_{i2}$	$G'_3$	$G_3$	$y_{i3}$	$F'_3$	$F_3$	$x_{i3}$	$K_{i3}$
Кисневмісні	3422,1	0,49	0,627	1779,5	0,255	0,347	1642,6	0,235	0,280	<b>10,469</b>
Азотовмісні	1124,4	0,257	0,325	584,7	0,134	0,128	539,7	0,123	0,197	
Сірковмісні	283,6	0,063	0,079	147,5	0,041	0,064	136,1	0,037	0,038	
Всього	4888,7	0,827	1,037	2542,1	0,430	0,539	2346,6	0,397	0,995	
Роздільна ємність	$G'_3$	$G_3$	$y_{i3}$	$G'_3$	$G_3$	$y_{i3}$	$F'_3$	$F_3$	$x_{i3}$	
Кисневмісні	1779,5	0,255	0,347	925,34	0,133	0,180	854,2	0,122	0,167	
Азотовмісні	584,7	0,134	0,128	304,1	0,070	0,066	280,7	0,508	0,062	
Сірковмісні	147,5	0,041	0,064	76,7	0,021	0,033	70,8	0,020	0,031	
Всього	2542,1	0,430	0,539	1321,9	0,223	0,279	1220,2	0,206	0,260	

Залежність оптимального температурного режиму кожного контуру від парорідинної рівноваги безпосередньо визначає фракційний вуглеводневий склад фракцій та вміст гетероатомних з'єднань (табл. 5.9) [130].

Таблиця 5.9 - Фракційний склад сконденсованих рідких фракцій та вміст гетероатомних сполук при деструкції дослідної суміші 3

Груповий вуглеводневий склад	Алкани (парафінові), %	Нафтени (цикло-алкани), %	Ароматичні (арени), %	Олефіни (алкени, диалкени), %	Кисневмісні, %	Азотовмісні, %	Сірковмісні, %
фракція 1 контуру	45,3	9,53	37,4	5,9	0,48	0,31	1,08
фракція 2 контуру	42,3	17,22	32,4	6,8	0,33	0,21	0,74
фракція 3 контуру	25,4	34,1	31,3	7,7	0,09	0,06	0,40
вихідна фракція	20,8	48,23	25,2	5,5	0,01	0,01	0,28

Досягнення значень ряду параметрів та властивостей вихідної рідкої фракції дозволяють максимально наближати її якість до якості основних марок бензинів або дизельного пального та використовувати як альтернативне паливо.

З аналізу таблиці можна стверджувати, що вихідна фракція буде краще протистояти детонації, оскільки в ній за фракційним складом переважають нафтові вуглеводні, потім ароматичні, а доля нормальних парафінових вуглеводнів найменша.

Наявність у кінцевій фракції сірчастих сполук та кисневмісних речовин знижує її октанове число [141, 199], тому вміст їх в строго контролюється за рахунок вторинної деструкції в циркуляційній системі [130].

Проведені розрахунки варіювання температур охолодження від зміни константи рівноваги показали, що саме при температурі 340-350 ° С на першому

контурі конденсується фракція, що містить у своєму складі найбільшу кількість гетерогенних з'єднань. Вміст сірковмісних сполук у фракції значний, представлені у вигляді сульфідів та у вигляді тиофенових кілець. Вміст азоту у фракції змінюється від 0,02 до 0,2 %, частина з них розкладається в реакторі, а решта переходить до більш легких фракцій. Вміст кисневмісних сполук складає 0,4-1,1 %, які представлені нафтовими кислотами.

На другому контурі отримуємо фракцію, що містить у своєму складі сірку, яка представлена в сульфідами циклічної будови та остаточною сіркою. Кисень у фракції міститься у вигляді фенолів і кислот та не перевищує 0,5 %. Кисневмісні з'єднання представлені карбоновими та аліфатичними кислотами  $C_6-C_{16}$ . Вміст з'єднань азоту малий, оскільки основна частина їх міститься в залишках, та не перевищує 0,3 %.

На третьому контурі конденсується фракція, з невеликим вмістом сірчаних з'єднань, які представлені сульфідами, сірководнем, тиолами та іншими простими сполуками з коротким вуглеводневим ланцюгом. Вміст азоту та кисневмісних з'єднань в дуже малий, менше 0,02 %.

Отримані кінцеві цільові продукти, що є альтернативним паливом містить сірку, однак її вміст значно менший 3% від вмісту сірки в первинній масі відходів. Сполуки сірки представлені меркаптанами (тиолами), сульфідами та тиофенами. Вміст азоту та кисневмісних сполук в дуже малий, менше 0,01 % [131].

Парафінові вуглеводні мають найбільшу масову теплоту згоряння завдяки вмісту великої кількості водневих атомів. За нормальних умов парафінові вуглеводні хімічно стабільні, тому палива і оливи, які містять велику їх кількість, стабільні при зберіганні. За високих температур стійкість до окислення повітря у нормальних і ізо-парафінових вуглеводнів відрізняється: стійкішими є ізо-парафінові вуглеводні, і чим більше розгалужена їх молекула, тим більша стійкість до окислення при високих температурах. Тому н-парафінові вуглеводні, як менш стійкі до окислення при високих температурах, є небажаними компонентами бензинів [154].

Нафтові вуглеводні мають меншу теплоту згоряння порівняно з

парафіновими. Вони мають високі октанові числа. Тому в бензині є більш бажаними компонентами, ніж парафінові вуглеводні.

Ароматичні вуглеводні мають високу хімічну стабільність, тому є бажаними компонентами з точки зору антидетонаційних властивостей. Але ароматичні вуглеводні мають підвищену здатність до утворення нагарів та лаків. У зв'язку з високою термічною стабільністю ароматичні вуглеводні є небажаними компонентами дизельних палив. Ароматичні вуглеводні мають високу розчинну здатність щодо гумових та полімерних виробів [214].

Дослідження температур дистилювання фракційного складу легкого рідкого продукту було перевірено в Державному підприємстві України науково-дослідному інституті нафтопереробної промисловості "МАСМА" та наведено в табл. 5.10 згідно з ГОСТ 2177-82 (СТ СЭВ 758-77) [141].

Таблиця 5.10 – Фракційний склад легкої рідкої фракції піролізу дослідної суміші відходів №2 [2]

Фракційний склад	Рідка фракція циркуляційного піролізу	Проба бензину А-92	Дизельне пальне
Температура початку перегонки, °С	34	34	127
10% перегонки при температурі, °С	50	47	145
50% перегонки при температурі, °С	86	72	191,5
90% перегонки при температурі, °С	192	188	259
Кінець кипіння, °С	253	203	300

Фракційний склад бензинів визначають для виявлення вуглеводневого складу палива, при цьому відзначають температуру початку перегонки, температуру

випаровування 10, 50, 90 % фракції і кінця кипіння. Пускові властивості бензину залежать від вмісту в ньому легких фракцій, які можуть бути визначені по температурі перегонки 10% та 50% фракції, що википають при температурі до 75 °С. Чим нижче температура навколишнього повітря, тим більше легких фракцій потрібно для запуску двигуна. За даними таблиці 2 температура випаровування 10% рідкої фракції БЦП складає 50 °С, а 50% - 86 °С. Це свідчить про середній вміст легких вуглеводнів у паливі. Тобто використання альтернативного рідкого палива при низьких температурах не повинно викликати труднощів при запуску двигуна, понизити час прогріву, зносостійкість двигуна, повноту згоряння палива та випаровуваність палива.

Для нормальної роботи двигуна велике значення має повнота випаровування палива, яка характеризується температурою перегонки 90% бензину і температурою кінця кипіння. При неповному випаровуванні бензину у впускній системі частина його може надходити в камеру згоряння в рідкому вигляді, змиваючи масло зі стінок циліндрів. Рідка плівка через зазори поршневих кілець може проникати в картер, при цьому відбувається розрідження масл. Температурні показники перегонки 90% та кінця кипіння енергетичного рідкого продукту циркуляційного піролізу складають 192 та 253 °С відповідно. Представлені значення перевищують стандартні вимоги для дизельних палив (90% переганяється за температури 190°С, кінець кипіння – 215°С), але для мазутів (температура перегонки 90% дорівнює 240 °С, кінець перегонки – 292 °С), температурні режими не перевищуються.

Як видно з таблиць 5.7 та 5.8 в складі одержаного продукту в наявності є всі складові традиційних сортів бензинів, а з урахуванням того, що товарні бензини готують, як правило, змішуванням декількох компонентів, то практичне використання одержаного продукту в даній області має перспективу. Але вже сьогодні можна стверджувати, що змінюючи технологічні параметри екологічно прийняттого піролізного процесу, можна отримати у складі рідкого продукту різні модифікації рідких вуглеводнів з метою його використання як добавки до традиційних видів пального.

Наприклад, попередні дослідження [154, 212] показали, що наявність в

отриманому паливі великої концентрації н-алканів, які збільшують температуру замерзання, свідчить про доцільність в подальшому використанні одержаного палива як добавки до традиційного дизельного палива з метою збільшення його морозостійкості, оскільки окремі його компоненти сприяють розчиненню важких парафінів в традиційному дизельному пальному, які при низьких температурах забивають фільтри паливної системи ДВЗ.

Ймовірність виникнення детонації при роботі на даному двигуні істотно залежить від хімічного складу застосовуваного автобензину. Так, фракції з легшим фракційним складом мають більш високе октанове число. Найбільш стійкі до детонації ароматичні та ізопарафінові вуглеводні, а схильні до детонації нормальні парафінові вуглеводні бензину.

Антидетонаційні властивості бензинових фракцій визначаються в основному співвідношенням груп алканів, ізоалканів, циклопентанів, циклогексанів та аренів. Високі октанові числа бензинів можуть бути забезпечені тільки при великому вмісті аренів.

Для підтвердження адекватності моделі було проведено серію експериментальних досліджень [130], в ході яких, відповідно до розрахункових даних щодо оптимальних температур охолодження контурів, були відібрані зразки сконденсованих рідких фракцій з кожного контуру.

Для узагальнення отриманих результатів, а також порівняння фізико-хімічних показників, що характеризують властивості та якість отриманих рідких фракцій з кожного контуру сформовано в таблицю 5.11.

Так, за рахунок оптимізації температур охолодження для кожного контуру отримано кінцеву товарну фракцію з допустимим вмістом гетерогенних з'єднань, не перевищуючи граничних концентрацій та забезпечуючи екологічну безпеку отриманих палив та всього процесу в цілому.

Згідно з дослідженнями лабораторії Чеського науково-дослідницького інституту неорганічної хімії (табл. 5.12) рідкий цільовий продукт, отриманий методом циркуляційного піролізу має стабільні фізичні характеристики [18].

Таблиця 5.11 - Фізико-хімічні показники та характеристика сконденсованих рідких фракцій з кожного контуру (досліджувана суміш 3)

Показники	1 контур	2 контур	3 контур	Кінцевий продукт
Температура охолодження контуру °С	360	245	170	60
Молекулярна маса	836	691	363	218
Вихід продуктів, % мас.	44	51	28	22
Теплота згорання, МДж/кг	23,5	31	40,2	42
Показник заломлення при 20 °С	1,5800	1,5630	1,5235	1,4715
Вміст сірки, % (мас)	3,44	1,89	0,95	0,05
Густина при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	1032	948	881	837
В'язкість при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с вище в сСТ	48,39	26,36	15,13	5,95
Зольність, %	0,16	0,11	0,06	0,01
Октанове число дослідний метод, окт. од.	20,6	48,1	67,3	98,1
Октанове число моторний метод, окт. од.	19,8	43,4	62,7	95,7
Цетановий індекс	84,6	79,4	63,1	38,9
Коксівність по Конрадсону, % (мас)	4,32	2,67	0,89	0,31

Порівнявши цільовий продукт отриманий методом циркуляційного піролізу з стандартними вуглеводневими паливами спостерігається різниця між показниками температури спалаху, температури застигання та вмістом механічних домішок. На даному етапі досліджень альтернативного палива було виявлено, що вміст механічних домішок залежить від якості та хімічного складу первинної сировини. Низька температура спалаху свідчить про високий ступінь пожежебезпеки і вибухонебезпеки легкої рідкої фракції і вказує на високий вміст легколетких

фракцій, тобто дана фракція має недовгостроковий термін зберігання.

Таблиця 5.12 - Характеристика фізичних показників легкої рідкої фракції отриманої методом БЦП

Назва характеристики	Рідка легка фракція БЦП (досліджувана суміш 2)	Дизельне паливо Л ДСТУ 3868-99
Густина за температури 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	837	840
Температура спалаху в відритому тиглі	24	40
Температура застигання, °С	<-60	-10
Вміст сірки, %	0,05	0,05 – 0,01
Вміст механічних домішок, %	0,01	Відсутні
Вміст води, %	0,09	Сліди
Зольність, %	<0,01	0,01

Легка рідка фракція має температуру застигання -60 °С, що свідчить про малий вміст парафінових вуглеводнів у рідкому продукті. Високий показник даної характеристики дає можливість транспортувати альтернативне паливо на далекі відстані, також, при використанні його як пічного палива воно не потребує додаткового підігріву, для кращого розпилення у форсунках теплоустановок, в зимовий період року.

Вимоги, що пред'являються до якості котельного палива встановлюють найбільш сприятливі умови застосування одержаної рідкої фракції і визначаються такими показниками якості як в'язкість, вміст сірки, теплота згоряння, температура застигання та спалаху, зольність, вміст домішок і води. Слід відмітити, що при відповідних режимах можна одержувати більш важку рідку фракцію з температурою спалаху до 57°С, що спрощує умови зберігання її котельного палива



відповідно до умов пожежної безпеки.

Отримання піролізного газу методом піролізного процесу можливе з широкого спектру твердих вуглецевмісних матеріалів, що підлягають утилізації.

В розподільній ємності для дослідної суміші 3 відділяється газова суміш з наступним вмістом (таблиця 5.13): метан – 40%; етан - 15,5%; пропан – 6%; н-бутан – 2%; і-бутан -2,5%; пропилен - 1,8%; етилен – 2%; бутен - 1,2%; водень - 18,5%; оксид вуглецю - 5%; діоксид вуглецю - 5,5%, отже, має цінність як альтернативне газове паливо для комунально-побутового призначення. З огляду на великий вміст водню, даний потік газової суміші буде використано як енергоносії для підтримки процесу утилізації відходів за технологією циркуляційного піролізу.

Таблиця 5.13 - Склад компонентів піролізного газу у порівнянні з природним газом

Назва компоненту	Вміст компонентів у газовому продукті циркуляційного піролізу автошин, %	Вміст компонентів у пірогазі від автошин, % [162]	Вміст компонентів у природному газі (родовище Передкарпатського прогину),% [107]
CH <sub>4</sub>	65,01	30,4	95-98
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,01	-	-
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	9,5	14,3	0,1-0,8
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4,77	5,0	0,1-0,2
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1,01	-	-
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,1	3,1	-
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,4	-	-
H <sub>2</sub>	7,5	17,9	-
CO	3,0	4,2	-
CO <sub>2</sub>	4,5	9,9	0,1-0,8
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	0,2	-	-
N <sub>2</sub>	-	-	0,7-3,8

За даними таблиці можна зробити висновки, що отриманий піролізний газ має схожі характеристики з природним паливом, а за деякими показниками (вмістом  $C_2H_6$  та  $C_3H_8$ ) навіть вищі. Підвищений вміст етану ( $C_2H_6$ ) та пропану ( $C_3H_8$ ) збільшує теплотворну здатність пірогазу.

Теплотворна здатність піролізного газу 38,6 – 47 МДж/кг (визначено розрахунковим методом за складом компонентів) та вище, ніж у природного газу 35,5 – 37,1 МДж/кг, це означає, що отриманого тепла вистачає не тільки на самозабезпечення реакції піролізу, а й на вироблення товарного тепла та електроенергії.

Високий відсоток виділення піролізного газу мінімізує кількість твердого залишку у вигляді твердого залишку [119].

Для підтвердження екологічної безпеки отриманих цільових продуктів було проведено теоретичний розрахунок викиду  $NO_2$  при їх спалюванні у тепловій установці, оскільки оксиди азоту утворюються під час спалювання будь-якого з викопних видів палива [142]. Як приклад теплової установки був обраний водогрійний котел КВГ(М) – 4,65. Для розрахунку було обрано навантаження котла, що складає 91% від його потужності. Оскільки при даному навантаженні котлоагрегат має найбільшу витрату палива, а отже і більший вихід продуктів згорання.

Після перерахунку масової концентрації діоксиду азоту у вологих продуктах горіння на стандартні умови, при надлишку повітря, отримали наступні значення [199]:

- при спалюванні пірогазу:  $NO_2^{ст.у} = 0,15 \text{ г/м}^3$ ;
- при спалюванні рідкої фракції:  $NO_2^{ст.у} = 0,2 \text{ г/м}^3$ .

При проведенні практичних досліджень спалювання цільових продуктів піролізу ТОВ, за допомогою газового хроматографа на основі водню та азоту відповідно були отримані експериментальні дані (табл. 5.14) концентрацій токсичних продуктів горіння.

За результатами практичних вимірювань можна стверджувати, що при використанні у якості палива пірогазу та рідкої енергетичної фракції у тепловій

установці, концентрації токсичних продуктів горіння у вихідних продуктах не перевищують ГДК. Це свідчить про екологічну чистоту та безпечність використання альтернативних видів палив для отримання теплової та інших видів енергії.

Таблиця 5.14 - Порівняння токсичних продуктів горіння різних палив (мг/м<sup>3</sup>)

Назва продукту	Піролізний газ	Природний газ	Рідка фракція	Мазут М40	ГДК
CO	200	150	260	290	300
SO <sub>2</sub>	20	-	45	32	50
NO <sub>2</sub>	170	100	200	280	300

Розрахункова похибка теоретично отриманих даних з експериментальними результатами при спалюванні піролізного газу складає 0,2 г/м<sup>3</sup>, при спалюванні рідкого енергетичного продукту похибка відсутня.

#### 5.2.2 Дослідження вмісту токсичних компонентів металів в отриманому рідкому та твердому продуктах

Для визначення наявності важких металів у продуктах екологічно прийняттого піролізного процесу були проведені дослідження методами атомно-абсорбційної спектрометрії та спектрофотометрії. Важкі метали є токсичними домішками у паливі, що також є джерелом забруднення в містах і в районах поблизу доріг [99, 141, 228]. Крім того, присутність таких домішок, навіть у низькій концентрації, може привести до високого споживання палива та інших порушень у роботі двигунів.

За результатами аналізу концентрація важких металів в продуктах піролізу залежить від вихідного складу сировини циркуляційного піролізу та обумовлена різними технологічними режимами, а саме часом і температурою перебування суміші в реакторі установки [249]. Отримані результати показали наявність важких металів в пробах рідкого залишку отриманого рідкого продукту (табл. 5.15). Вміст Cu, Zn, Ni не відповідає нормативам для дизельного палива, проте задовольняє

вимогам для палива нафтового (мазут).

Таблиця 5.15 - Вміст важких металів у рідкій фракції, отриманої методом циркуляційного піролізу (суміш 1)

Компоненти	Концентрація у пробі №1, мг/л n=3	Концентрація у пробі №2, мг/л n=3	Результати (за відношенням до ДСТУ 3868-99 «Паливо дизельне»)	Результати (за відношенням до ДСТУ 4058-2001 «Паливо нафтове. Мазут»)
Мідь	0,14	<0,1	не відповідає	відповідає
Свинець	не виявлено	<0,1	відповідає	відповідає
Цинк	< 0,1	0,17	не відповідає	відповідає
Нікель	0,21	0,22	не відповідає	відповідає
Кобальт	не виявлено	не виявлено	відповідає	відповідає

n – кількість дослідів.

Результати атомно-абсорбційного аналізу концентрації важких металів в пробі №1 та градувальні графіки для Cu і Ni наведені на рис. 1, 2.

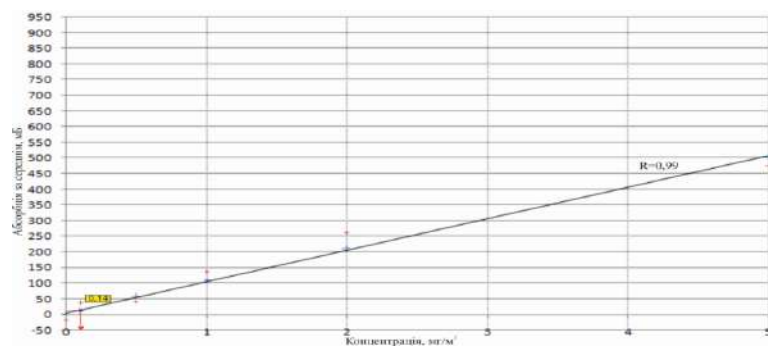


Рисунок 5.31 - Результати дослідження вмісту міді у рідкій фракції проби №1

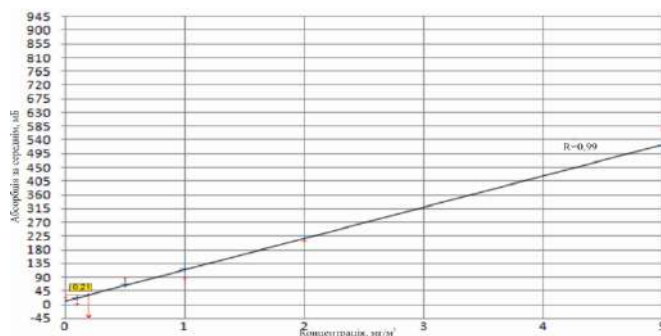


Рисунок 5.32 - Результати дослідження вмісту нікелю у рідкій фракції проби №1, отриманої методом циркуляційного піролізу досліджуваної суміші 1

Спектрофотометричний аналіз підтвердив отримані результати атомно-абсорбційним методом (табл. 5.16). Різниця в отриманих результатах пояснюється відносною похибкою приладів.

Таблиця 5.16 - Вміст важких металів у рідкій фракції (суміш 1)

№	Компоненти	Концентрація у пробі №1, мг/л n=3	Концентрація у пробі №2, мг/л n=3	Результати (за відношенням до ДСТУ 3868-99 «Паливо дизельне»)	Результати (за відношенням до ДСТУ 4058-2001 «Паливо нафтове. Мазут»)
1	Мідь	0,15	<0,1	не відповідає	відповідає
2	Свинець	<0,1	не виявлено	відповідає	відповідає
3	Цинк	< 0,1	0,18	не відповідає	відповідає
4	Нікель	0,20	0,22	не відповідає	відповідає
5	Кобальт	не виявлено	не виявлено	відповідає	відповідає

n – кількість дослідів.

Результати спектрофотометричного аналізу концентрації важких металів в пробі №1 та градувальні графіки для Ni і Cu представлені у вигляді графіків (рис. 5.33, 5.34).

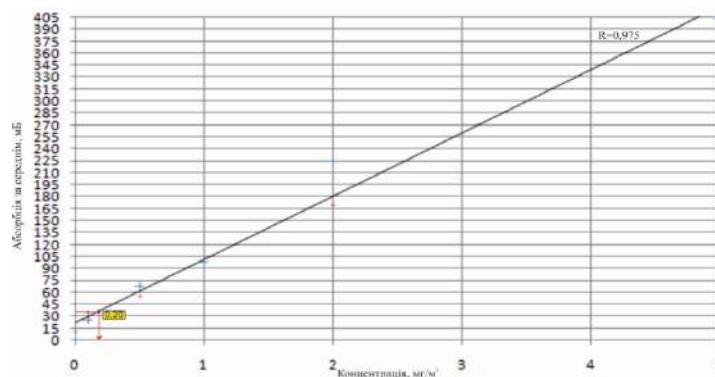


Рисунок 5.33 - Результати дослідження вмісту нікелю у рідкій фракції проби №1

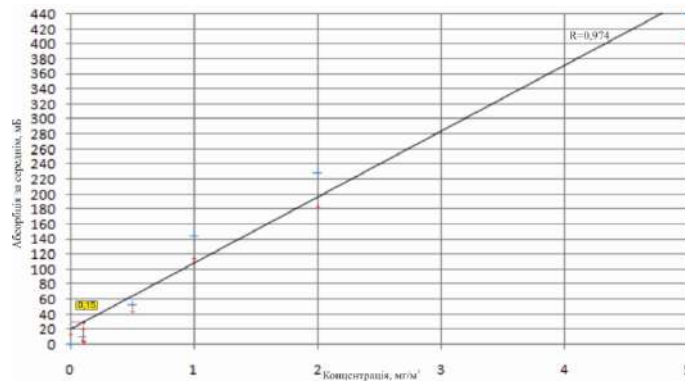


Рисунок 5.34 - Результати дослідження вмісту міді у рідкій фракції проби №1

Використання оригінальної методики для атомно-абсорбційного аналізу в порівнянні зі стандартною методикою спектрофотометрії при дослідженні наявності ВМ у продуктах циркуляційного піролізу надає ряд переваг, таких як:

1) Висока точність та селективність вимірювання:

- атомно-абсорбційний спектрофотометр –  $\delta_x = 1-2 \%$ ;
- спектрофотометр – ( $\delta_x = 3-5 \%$ ).

2) Менша трудомісткість за рахунок легшої пробопідготовки.

3) Порівняно малий час проведення аналізу від підготовки проб до отримання результатів:

- атомно-абсорбційний аналіз – 2 робочих дні;
- спектрофотометричний аналіз – 3 робочих дні.

4) Економічна ефективність за рахунок використання меншої кількості реактивів. Собівартість одного дослідження методом:

- атомно-абсорбційної спектрофотометрії – 1123,97 (грн.);
- спектрофотометрії – 1245,34-1387,65 (грн.).

Проведені експериментальні дослідження підтвердили наявність важких металів (Pb, Ni, Cu, Zn, Co) у рідкій фракції методом атомно-абсорбційної спектрометрії та спектрофотометрії. Порівняльний аналіз концентрацій важких металів в продуктах циркуляційного піролізу з ДСТУ «Паливо нафтове. Мазут» та ДСТУ «Паливо дизельне» показали, що: концентрації Pb, Ni, Cu, Zn, Co у рідкій фракції БЦП при дослідженні на ААС С115-М1 та спектрофотометрі ВАСКМЕН

повністю відповідають ДСТУ «Паливо нафтове. Мазут»; при порівнянні концентрації Pb, Ni, Cu, Zn, Co у рідкій фракції БЦП при дослідження на ААС С115-М1 та спектрофотометрії концентрації Ni, Cu, Zn перевищують значення ДСТУ «Паливо дизельне» (Додаток Н, С). Тому потрібно проводити жорсткий та постійний контроль концентрацій Ni, Cu, Zn у рідких фракції продуктів БЦП.

Атомно-абсорбційний метод у порівнянні з спектрофотометричним методом є більш раціональним та економічно вигідним методом дослідження вмісту важких металів в продуктах піролізної технології.

Для визначення наявності важких металів у твердому залишку екологічно прийняттого піролізного процесу були проведені дослідження методом атомно-абсорбційної спектрометрії за розробленою методикою (табл. 5.17) [256]. Найкращим методом для виявлення важких металів вважається атомно-абсорбційний метод, оскільки він дозволяє встановлювати низьку межу виявлення концентрацій елемента, має високу селективність та можливість визначення великої кількості елементів, добру відтворюваність, потрібно мінімальний об'єм проби, порівняно не велика вартість обладнання.

Таблиця 5.17 - Вміст шкідливих речовин у твердій фракції [ 4]

Компоненти	Фактичне значення, мг/л	Гігієнічний норматив, ГДК СанПін 4630-88	Результати (по відношенню до нормативів)
Цинк	0,005	1,0	відповідає
Мідь	0,015	1,0	відповідає
Нікель	0,01	0,1	відповідає
Свинець	0,01	0,03	відповідає
Кобальт	0,05	0,1	відповідає

Проведений експеримент підтвердив наявність важких металів у твердому залишку при утилізації відходів методом циркуляційного піролізу. На рисунку 5.35 вказані результати аналізу твердого залишку на мідь.

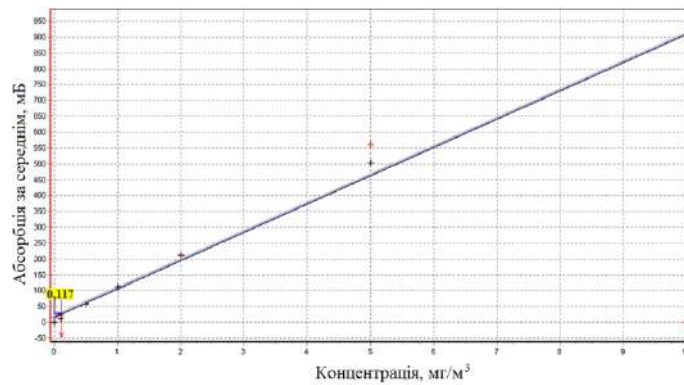


Рисунок 5.35 - Градувальний графік на мідь

В результаті аналізу твердої фракції на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С-115-М1 підтвердилась наявність Fe, Cu, Ni, Mg. Також помічені сліди Pb, Al та відсутність V. Встановлена концентрація міді, яка дорівнює  $0,11655 \text{ мг/дм}^3$ , що не перевищує встановлені ГДК в ґрунті та відповідають нормам СанПін 4630-88.

## ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 5

1. У результаті проведеної багатокритеріальної оцінки факторів екологічної небезпеки визначено пріоритети факторів за наступними критеріями: ймовірність виникнення тої чи іншої загрози навколишньому середовищу; очікувані наслідки від дії фактору; рівень якості впроваджених технічних або технологічних рішень щодо запобігання прояву цього фактору. Це дозволило виділити технологічні вузли та процеси, які супроводжуються найбільшою небезпекою для навколишнього середовища.

2. Побудовано ієрархічну структуру прийняття рішень та сформовано наступні критерії оцінки, а саме: ймовірність виникнення тої чи іншої загрози навколишньому середовищу, очікувані наслідки від дії фактору та рівень якості впроваджених технічних або технологічних рішень щодо запобігання прояву цього фактору.

3. Завдяки проведеним розрахункам залежності температур охолодження від зміни константи рівноваги показали, що саме при температурі  $340\text{-}350 \text{ }^\circ \text{C}$  на



першому контурі конденсується фракція, що містить у своєму складі найбільшу кількість гетерогенних з'єднань. Однак, в отриманому кінцевому продукті вміст сірки значно менший 3% від вмісту сірки в первинній масі відходів. Сполуки сірки представлені меркаптанами (тиолами), сульфідами та тиофенами. Вміст азоту та кисневмісних сполук в дуже малий, менше 0,01 %

4. За рахунок оптимізації температур охолодження для кожного контуру отримано кінцеву товарну фракцію з допустимим вмістом гетерогенних з'єднань, що не перевищують граничних концентрацій та забезпечують екологічну безпеку отриманого палива та всього процесу в цілому.

5. Виявлено, що концентрація важких металів в продуктах піролізу залежить від вихідного складу сировини циркуляційного піролізу та обумовлена різними технологічними режимами, а саме часом і температурою перебування суміші в реакторі установки. Отримані результати показали наявність важких металів в пробах рідкого залишку отриманого рідкого продукту. Вміст Cu, Zn, Ni не відповідає нормативам для дизельного палива, проте задовольняє вимогам для палива нафтового (мазут).

6. В результаті проведеного аналізу твердої фракції на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С-115-М1 було підтверджено наявність Fe, Cu, Ni, Mg. Також помічені сліди Pb, Al та відсутність V. Встановлена концентрація міді, яка дорівнює 0,11655 мг/дм<sup>3</sup>, що не перевищує встановлені ГДК в ґрунті та відповідають нормам СанПін 4630-88.

Результати, викладені у розділі 5, опубліковані у роботах [126, 129, 130, 136, 138, 141, 142, 146, 154, 195, 196, 198, 199, 201, 202, 207, 212, 214, 218, 250, 329, 330, 341].

## РОЗДІЛ 6

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ЕКОНОМІЧНИХ  
ПОКАЗНИКІВ ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТНОГО ПІРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ  
УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

6.1 Комплексна автоматизація технологічних об'єктів та основні задачі контролю і автоматичного керування технологічним комплексом екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних відходів

Для реалізації технології безперервної термічної утилізації цілих зношених АШ використовуються спеціалізовані технологічні комплекси, які, в свою чергу, являють собою складні багатокомпонентні технічні об'єкти і потребують наявності спеціальних комп'ютеризованих систем контролю і керування (КСКК) [253].

Розв'язання задач синтезу КСКК технологічними комплексами утилізації цілих зношених АШ доцільно здійснювати на основі аналізу основних властивостей та технічних характеристик технологічного процесу утилізації АШ з селекцією параметрів (сигналів, координат), що підлягають контролю та керуванню [90].

Для забезпечення безперервного проходження технологічного процесу утилізації цілих зношених АШ, отримання на виході рідкого палива та піролізного газу високої якості необхідно з певною точністю в автоматичному режимі керувати процесом завантаження АШ у ВЗР, рівнем завантаження реактора та вертикальним переміщенням рухомого вантажу, температурними режимами в реакторі, в контурах БЦС, в ВК та на виході ВВР, процесом вивантаження твердого залишку з ВВР, а також здійснювати поточний контроль усіх робочих параметрів технологічного комплексу утилізації АШ. Розглядаючи даний технологічний комплекс як багатокомпонентний об'єкт керування і контролю можна сформулювати наступні задачі його автоматичного керування і контролю: автоматичне керування та контроль швидкості руху ПТ; автоматичне керування та контроль положення ЕК31 та ЕК32; контроль швидкості руху АШ у першій, другій та третій секціях ВЗР; автоматичне керування та контроль температури в реакторі; автоматичне керування

та контроль вертикального переміщення рухомого вантажу в корпусі реактора; контроль рівня завантаження реактора; автоматичне керування та контроль температури першого, другого та третього контурів БЦС; автоматичне керування та контроль температури ВК; автоматичне керування та контроль лінійного переміщення поршня АГП у ВВР; автоматичне керування та контроль температури на виході ВВР; автоматичне керування процесом утилізації цілих зношених АШ згідно керуючої програми. (Додаток Ж)

Промисловий комп'ютер виконує функції диспетчерської станції, він містить в собі людино-машинний інтерфейс (мнемосхему технологічного процесу утилізації АШ) з зображенням основних агрегатів та їх технічних параметрів, що вимірюються за допомогою різноманітних датчиків. ПК також здійснює автоматичне керування процесом утилізації цілих зношених АШ згідно, встановленої в ньому, керуючої програми. При цьому в автоматичному режимі в певні моменти часу встановлюються задані значення основних керованих параметрів комплексу, які є вхідними для підсистем автоматичного керування (ПСАК), що входять до складу КСКК. Крім того функціями ПК є отримання інформації від периферійних пристроїв КСКК, її архівування в базу даних системи та наочне відображення на екрані оператора.

Функціональна структура математичної моделі узагальненого технологічного комплексу утилізації цілих зношених АШ як багатокоординатного об'єкта керування наведена на рисунку 6.1 [93] де позначення 1К, 2К, 3К – перший, другий, третій контури охолодження БЦС, відповідно; ЕПРВ – електропривод рухомого вантажу, до складу якого входить привідний двигун та лебідка підйому рухомого вантажу; ЛРВ1, ЛРВ5 – лінійні регулятори витрати води, що застосовуються в системах охолодження ВВР та ВК; ЛРВ2-ЛРВ4 – лінійні регулятори витрати повітря, що застосовуються в системах охолодження першого, другого та третього контурів БЦС, відповідно;  $u_{\text{ПТ}}$ ,  $u_{\text{ЕК31}}$ ,  $u_{\text{ЕК32}}$ ,  $u_{\text{АП}}$ ,  $u_{\text{ЕПРВ}}$ ,  $u_{\text{АГП}}$  – сигнали керування ПТ, ЕК31, ЕК32, АП, ЕПРВ та АГП, відповідно;  $u_{\text{ЛРВ1}}$ - $u_{\text{ЛРВ5}}$  – сигнали керування ЛРВ1-ЛРВ5;  $v_{\text{ПТ}}$  – швидкість руху транспортеру;  $X_{\text{ЕК31}}$ ,  $X_{\text{ЕК32}}$ ,  $X_{\text{П}}$  – лінійні переміщення ЕК31, ЕК32 та поршня АГП у ВВР,  $P_{\text{АП}}$  – потужність автоматичного пальника;  $Y_{\text{РВ}}$  –

вертикальне переміщення рухомого вантажа у реакторі;  $T_p$ ,  $L_p$  – температура нагріву та рівень завантаження реактора;  $Q_{в1}$ ,  $Q_{в2}$  – витрати охолоджувальної води в системах охолодження ВВР та ВК, відповідно;  $T_{ТЗ}$  – температура твердого залишку на виході ВВР;  $Q_{п1}$ ,  $Q_{п2}$ ,  $Q_{п3}$  – витрати охолоджувального повітря в системах охолодження першого, другого та третього контурів БЦС, відповідно;  $T_{1к}$ ,  $T_{2к}$ ,  $T_{3к}$ ,  $T_{ВК}$  – температури першого, другого та третього контурів БЦС, а також на виході ВК.

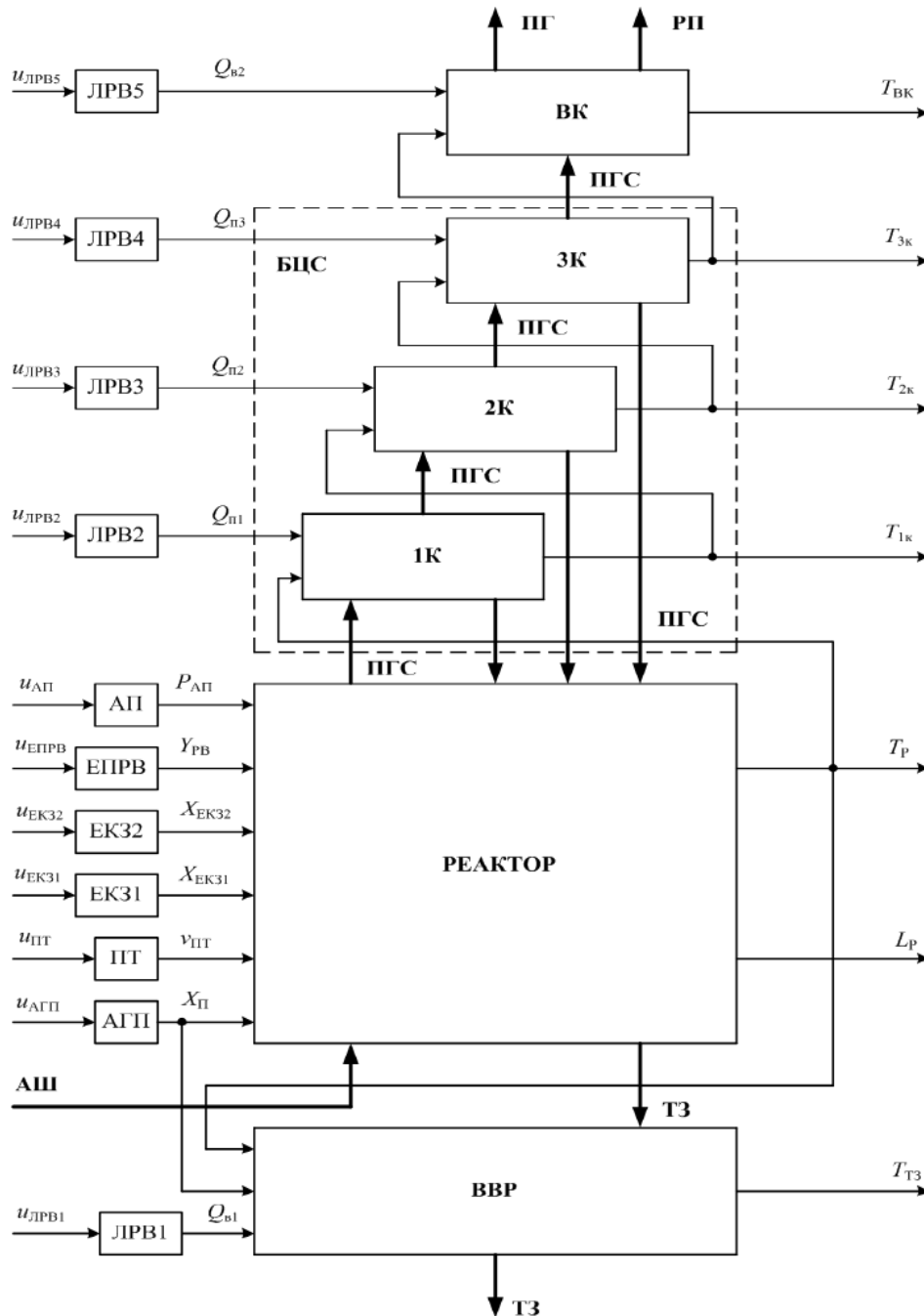


Рисунок 6.1 - Функціональна структура математичної моделі узагальненого технологічного комплексу утилізації АШ

Дана математична модель складається з наступних математичних моделей: моделі ЛРВ1-ЛРВ5 як об'єктів керування витратою води та повітря; моделі АГП, ЕК31, ЕК32 як об'єктів керування лінійним переміщенням; модель ПТ як об'єкту керування лінійною швидкістю; модель ЕПРВ як об'єкту керування вертикальним переміщенням; модель АП як об'єкту керування потужністю нагріву; модель ВВР як об'єкту керування температурою охолодження; моделі реактора як об'єктів керування температурою нагріву та рівнем завантаження; моделі першого, другого та третього контурів БЦС, а також ВК як об'єктів керування температурою охолодження.

## 6.2 Розробка зразку промислової установки БЦП – 5

Розроблена і виготовлена установка БЦП – 5 призначена для термічної утилізації органічних відходів з отриманням товарних продуктів, які використовуються як альтернативні види палива в промислових масштабах, має безперервний режим утилізації відходів (рис. 6.2 - 6.4). Продуктивність установки БЦП-5 по об'єму відходів до 5000 кг/добу, вона розроблена відповідно до ТУ У 28.9-36487146-001:2016 «Установки піролізні» від 08.12.2016р (Додаток Г.3, К).



Рисунок 6.2 – Маркування піролізної установки БЦП – 5

Основними конструктивними вузлами, якої є: Г – подібний герметичний котел (1) з плунжерною системою (2) подачі подрібнених полімерів в котел, вхідний конусний наконечник з водяним охолодженням (3), система зовнішнього обігріву (4) герметичного котла (1) з двома топковими пристроями (5), система видалення

димових газів з димовою трубою (6), багатоконтурна циркуляційна система (7), вихідний конденсатор (8), розподільчий бак (9) – розподільча ємність (накопичувач вихідних продуктів), компенсаційна ємність (10) та система видалення твердого залишку (11) з герметичного котла. Бункер завантаження (12), датчик рівня розплавлених полімерів в котлі (13), перегородки (14) в димоході для зигзагоподібного руху димових газів навколо котла, високонапірний вентилятор для ежекції димових газів, герметична ємність (16) для збору твердого залишку, масло станція (17) для привода гідроциліндра плунжерної системи (2), вентилятор (18) для охолодження багатоконтурної циркуляційної системи (7)

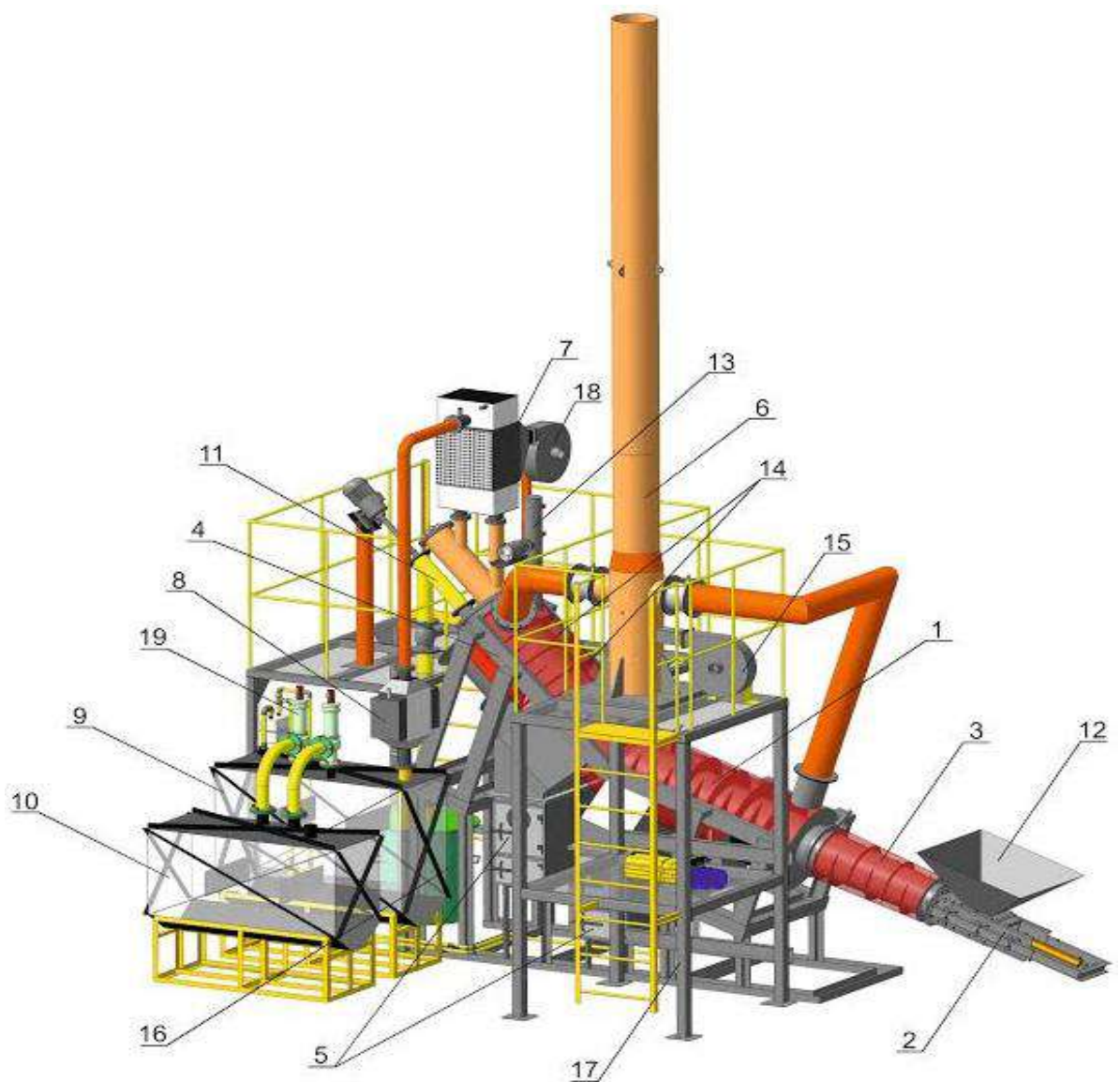


Рисунок 6.3 – Конструкція установки БЦП – 5



Рисунок 6.4 – Виготовлення та збирання устаткування БЦП - 5

1 перша секція котла 1 і плунжерна система 2 розташовані під кутом  $18^\circ$  до горизонту, а друга секція котла 1 розташована під кутом  $45^\circ$ . Вхідний конусний наконечник 3 з водяною системою охолодження забезпечує утворення із подрібнених відходів відновлювальної технологічної пробки, яка герметизує котел 1 при безперервній подачі сировини в нього і виключає прорив розплавлених полімерів, які знаходяться в першій і другій секціях котла 1, через бункер завантаження 12 в навколишнє середовище.

#### Принцип роботи установки БЦП-5:

Подрібнені відходи завантажуються в котел за допомогою плунжерної системи. При первинному заповненні відходів в котел плунжерна система 2 працює безперервно, термін циклу поршня, який подає відходи «вперед» - «назад» і визначається кінцевими індуктивними вимикачами вмонтованими на плунжерній системі 2. При повторних запусках котла плунжерна система 2 включається після підвищення температури в котлі більше  $300^\circ\text{C}$  і в залежності від показників датчика 13 рівня розплаву полімерів в котлі 1. Водяна система охолодження конусного наконечника 3 включається, якщо температура на датчику 1 перевищує  $100^\circ\text{C}$ . Об'єм відходів, які подаються в котел контролюється датчиком рівня розплаву 13 в другій секції котла, при спрацьовуванні кінцевого індукційного вимикача, який встановлений на верхньому рівні датчика, при цьому плунжерна система 2 виключається і подача відходів в котел зупиняється до моменту коли не спрацює кінцевий вимикач нижнього рівня датчика 13 розплавлених полімерів в другій

секції. При повторних запусках установки включення плунжерної системи подачі відходів і системи шнекового видалення із котла твердого залишку дозволяється при температурі нагріву котла вище  $300^{\circ}\text{C}$  (по показникам термодатчика розташованому в середній частині котла). Зовнішній обігрів котла 1 забезпечують топкові пристрої 5, в яких установлені дизельні пальники (рис. 6.6. Обігрів котла забезпечується димовими газами, які рухаються між перегородками 14 в об'ємі газоходу впоперек циліндричного тіла котла. Розрідження в газоході визначається відповідною тягою в димоході і забезпечується за допомогою вентилятора 15 і системою ежекції в димоході. Вентилятор 15 включається перед включенням дизельного пальника топкового пристрою 5, а тяга від кожного топкового пристрою регулюється відповідними шиберами розташованими на газоходах. Термопластичні полімери, які знаходяться в середині котла, під дією температури ( $400 - 600^{\circ}\text{C}$ ), розплавляються і розкладаються з утворенням парогазової суміші (ПГС) відбувається процес термічного розкладання. Продукти розкладу високомолекулярних полімерів, що утворюються при підвищеній температурі, потрапляють в систему багатоконтурної циркуляційної системи (7), де відбувається їх розділення на важкі і легкі фракції. Після конденсації легкі рідкі фракції стікають в низ розподільчого бака 9, а газ заповнює верхню частину розподільчого бака 9. В подальшому газ проходить через лічильник газу і поступає в топкові пристрої 5, де він спалюється, при цьому тепло іде на нагрів котла. Для створення стехіометричної суміші газ – повітря, збоку топкового пристрою встановлений вентилятор з дросельною засувкою. Видалення твердого залишку із котла 1 забезпечується шнеком з електричним приводом - мотор редуктор, який включається при повторних включеннях, при досягненні температури в середині котла не менше  $300^{\circ}\text{C}$ , яку контролює відповідний термодатчик розташований в середній частині котла. Твердий залишок накопичується в герметичній ємності 16 з щупом для контролю його заповнення. При підвищенні тиску в реакторі до  $0,4 \text{ кг/см}^2$  система управління виключає дизельні пальники і масло станцію 17.

Робоча температура реактора  $600^{\circ}\text{C}$  при робочому тиску  $0,01 \text{ кг/см}^2$ , надлишковий тиск в реакторі (max)  $0,2 \text{ кг/см}^2$ , випробувальний тиск герметичного



устаткування  $1,25 \text{ кг/см}^2$ , тиск спрацьовування запобіжних клапанів  $1,25 \text{ кг/см}^2$ .

Кількість контурів циркуляційної системи 3 шт. Температурні режими контурів мають наступні показники: температура 1-го контуру  $320 \pm 50^\circ\text{C}$  - охолодження природне; температура 2-го контуру  $220 \pm 50^\circ\text{C}$  - охолодження примусове повітряне, температура 3-го контуру  $120 \pm 50^\circ\text{C}$  - охолодження водяне.

Система управління і контролю забезпечується комп'ютерним пультом управління, паралельно встановлено пульт управління в ручному режимі (рис 6.5). Установа має 2 пальники з тепловою потужністю пальника на альтернативному паливі 95 – 150 кВт (рис. 6.6). Габаритні розміри устаткування: довжина 6000 мм; ширина 2300 мм; висота 5100 мм. Маса не більше 5,6 т.



Рисунок 6.5 – Система управління і контролю



Рисунок 6.6 – Пальники на альтернативному паливі

Автоматичне управління і контроль робочих параметрів БЦП – 5:

На рисунку 6.7 зображена блок-схема електричних елементів в системі контрольно-вимірювальних пристроїв і автоматики установки БЦП-5 з розміщенням термопар і електрообладнання, а вимірювані величини і позначення термопар та інших датчиків наведено в табл. 6.1.

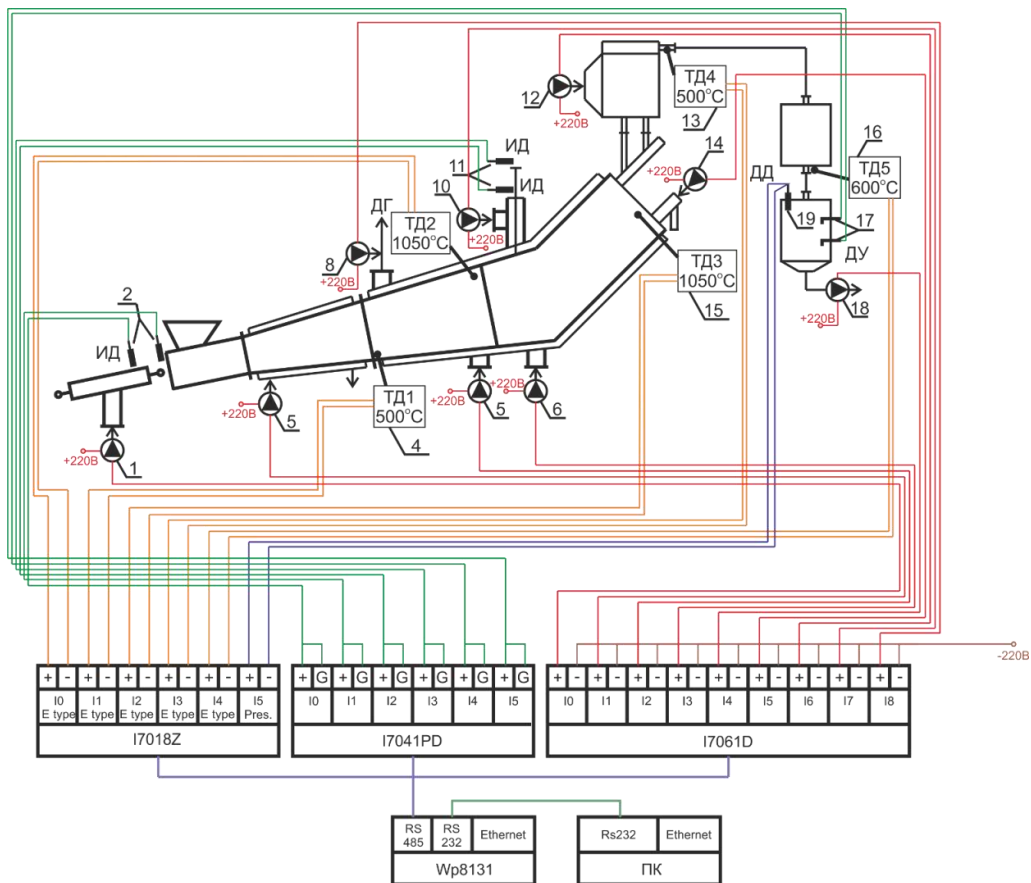


Рисунок 6.7 - Блок-схема електричних елементів автоматики установки БЦП-5

Таблиця 6.1 - Розміщення термопар та інших датчиків

№	Вимірювана величина
1	Температура суміші полімерних відходів на вході в котел – ТД1
2	Температура розплаву термопластичних полімерів в середній частині котла – ТД2
3	Температура ПГС на виході із котла – ТД3
4	Температура ПГС на виході із багатоконтурної циркуляційної системи – ТД4
5	Температура сконденсованої рідкої фракції і піролізного газу–ТД5
6	Рівень завантаження котла (по радарному датчику)
7	Нижній та верхній рівень завантаження котла (за безконтактними індуктивними датчиками ПІП-8-3)
8	Нижній та верхній рівень рідкого палива у ємності з паливом (за поплавковими датчиками рівня ПДУ 1.1)
9	Надлишковий тиск в ємності з рідким паливом (за датчиком тиску ПД100)

Параметри термодатчиків використаних в системі управління:

Термодатчик ТД1 №4 ТКХ1- 40 – 600 °С довжиною 250мм, розташований на вході першої секції котла. Термодатчик ТД2 ТХА1- 23 – 950 °С довжиною 320мм, розташований в середній частині котла. Термодатчик ТД3 №15 ТХА1- 23 – 950 °С довжиною 320мм, розташований на виході з котла. Термодатчик ТД4 №13 ТКХ1- 40 – 600 °С довжиною 60мм, розташований на виході багатоконтурної циркуляційної системи. Термодатчик ТД5 №16 ТКХ1- 40 – 600 °С довжиною 60мм, розташований на виході вихідного конденсатора.

Система управління установки призначена для здійснення операцій моніторингу та керування технологічним процесом БЦП в режимі реального часу (рис 6.8). Система складається з 3 рівнів: виконуючих пристроїв, пристроїв контролю та людини-оператора.



Рисунок 6.8 - Відео система управління людини-оператора технологічним процесом установки БЦП-5

- Рівень виконуючих пристроїв включає в себе всі виконавчі елементи системи: виконавчі електродвигуни (1, 3, 5, 6, 8, 14 рис. 6.3), двигуни високо напірних вентиляторів (10, 12), насос рідкого палива 18, безконтактні індуктивні датчики (2, 11), термопари (4, 9, 13, 15, 16), датчики рівня рідини (17).
- Рівень пристроїв контролю складається з програмованого логічного контролера (ПЛК) ICP DAS WP8131 з вбудованою SCADA-системою Trace Mode 6, а також зовнішніми модулями збору даних аналогових сигналів ICP DAS I7018Z, дискретних сигналів ICP DAS I7041PD та дискретного виводу ICP DAS I7061D.
- Рівень людини-оператора складається з персонального комп'ютера з

встановленою інструментальною системою SCADA Trace Mode 6 RTM.

- Модуль I7018Z використовується для збору інформації з термопар (4, 9, 13, 15, 16 - тип термопари налаштовується індивідуально для кожного виводу) та датчику тиску (19).

- Модуль I7041PD для контролю стану дискретних датчиків системи (2, 11, 17).

- Модуль I7061D дозволяє здійснювати керування дискретними виконавчими пристроями. Модуль обладнано реле, що комутує навантаження силою току не більше 5 А та напругою 220 В для змінного струму та 5 А, 30 В для постійного струму.

- ПЛК WP8131 є головним виконавчим модулем системи. На нього покладені задачі збору інформації з периферійних модулів, її обробки, формування виконавчих сигналів та пересилки поточних даних до ПК. Обмін інформацією з модулями збору даних відбувається по протоколу DCON з використанням мережі RS485. Комунікація з ПК підтримується з використанням мереж Ethernet та RS232.

- ПК людини-оператора отримує від ПЛК дані щодо поточного стану установки та здійснює їх наочне відображення, а також збереження в архівну базу даних. За допомогою розробленого інтерфейсу оператор може здійснювати контроль роботи установки безпосередньо зі свого ПК.

Апаратура і засоби автоматизації відповідають:

- по виконанню і стійкості до механічних дій ГОСТ 12997-76;
- по надійності ГОСТ 13216-74;
- по стійкості до дії температури і вологості ГОСТ 15150-69.

Також в системі використано індуктивні датчики SN04-N, які забезпечують зворотно-поступальне переміщення плунжера, індуктивні датчики ПІП-8-3, для контролю верхнього та нижнього рівня розплаву в котлі, поплавкові датчики рівня ПДУ 1.1, які показують верхній та нижній рівень рідкого палива в розподільчій ємності, датчик тиску ПД100, що вимірює надлишковий тиск в котлі та радарний датчик для виміру рівня розплавлених відходів в котлі.

### 6.3 Розробка та впровадження технології «Екопірогенезіс», практичні рекомендації з використання в системах теплопостачання України

З відомих технологій утилізації органічних відходів піроліз і газифікація привабливі тим, що дозволяють отримувати дешеві енергоносії, і роблять екологічними і економічно доцільним цілий ряд виробництв.

Дана технологія може бути використана в комунальному господарстві, хімічній, нафтохімічній та інших галузях промисловості для регенерації органічних відходів у низькомолекулярне рідке та газоподібне паливо.

Ґрунтуючись на відомих технологіях піролізу і газифікації створена нова технологія «Екопірогенезіс» (ЕПГ), яка об'єднує багатоконтурний циркуляційний піроліз (БЦП) з багатоконтурною циркуляційною двозонною газифікацією (БЦДГ), що забезпечило глибоке розкладання високотоксичних складових високомолекулярних полімерних відходів з одержанням низькомолекулярного рідкого палива і генераторного газу без токсичних компонентів [126, 232]. Особливо слід підкреслити, що поєднання в один технологічний процес утилізації відходів – піролізної установки і газогенератора дозволить довести використання вуглецю, що міститься в них, практично до 100%.

Основний принцип екопірогенезісу показано на технологічній схемі (рис. 6.9) та на комп'ютерному зображенні 3 – D загальний вигляд обладнання (рис. 6.10). Два потоки ТПВ подають кожен на відповідну лінію. Сухі відходи (потік В) направляються шнеком 2 з електроприводом 3 на першу лінію, на якій проводять багатоконтурний циркуляційний піроліз (БЦП), без доступу повітря у герметичному реакторі 1 при діапазоні температур 550-750°C в залежності від фізико-хімічних основ первинної сировини. При термічній деструкції органічні відходи розкладаються з утворенням летких компонентів парогазової суміші (ПГС), які зображені як потік М, М<sub>1</sub>, М<sub>2</sub> і МЛ, з поверненням у реактор потоків рідких важких фракцій (потоки N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>) для подальшого їх розкладання, і гарячого вуглецевого залишку (пірокарбону) (потік С).

На другу лінію газифікації направляються вологі відходи (потік ВВ) в

газогенератор двозонний (ТСГ-2з) 4 для розкладання при нестачі кисню. В процесі газифікації в газогенераторі утворюється зола (потік 3) і гарячий генераторний газ (потік ГГ) з температурою 600°C. Слід відмітити, що в лінії ТСГ-2з значну частку в склад генераторного газу вносить водяний газ, який утворюється в результаті проходження перегрітого водяного пару через гарячий кокс після зворотного процесу.

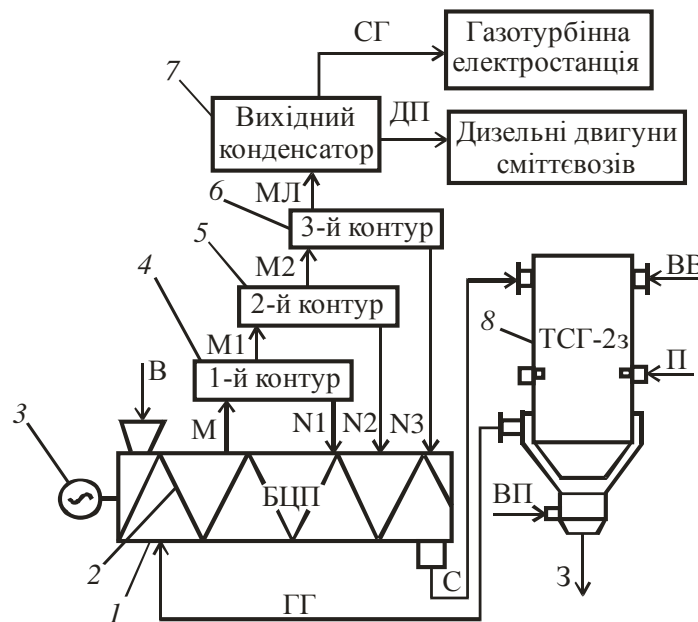


Рисунок 6.9 - Технологічна схема обладнання технології екопірогенезису: 1 – реактор; 2 – шнек; 3 – електропривод; 4 – газогенератор двозонний; 5 – перший контур охолодження; 6 – другий контур; 7 – третій контур; 8 – вихідний конденсатор

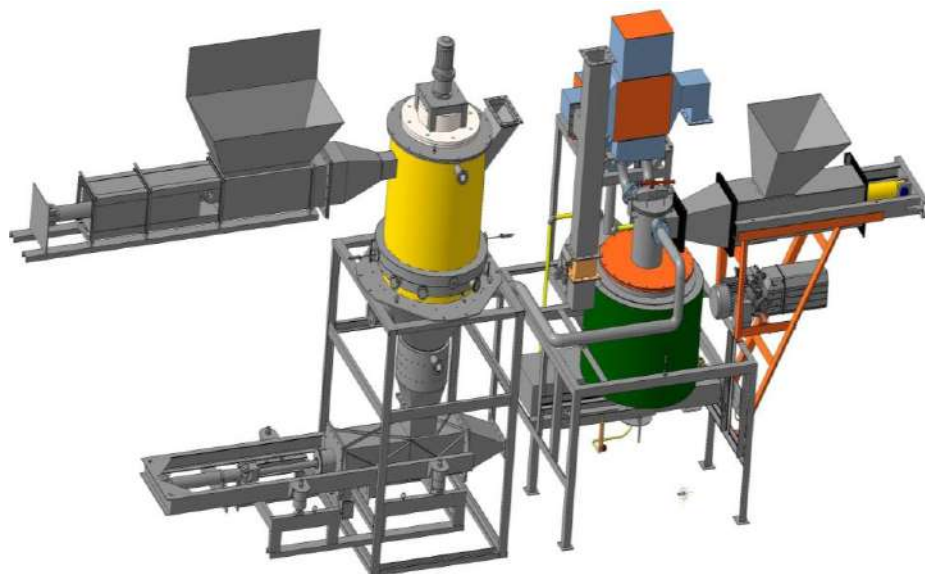


Рисунок 6.10 - Зображення 3-D обладнання ЕПГ



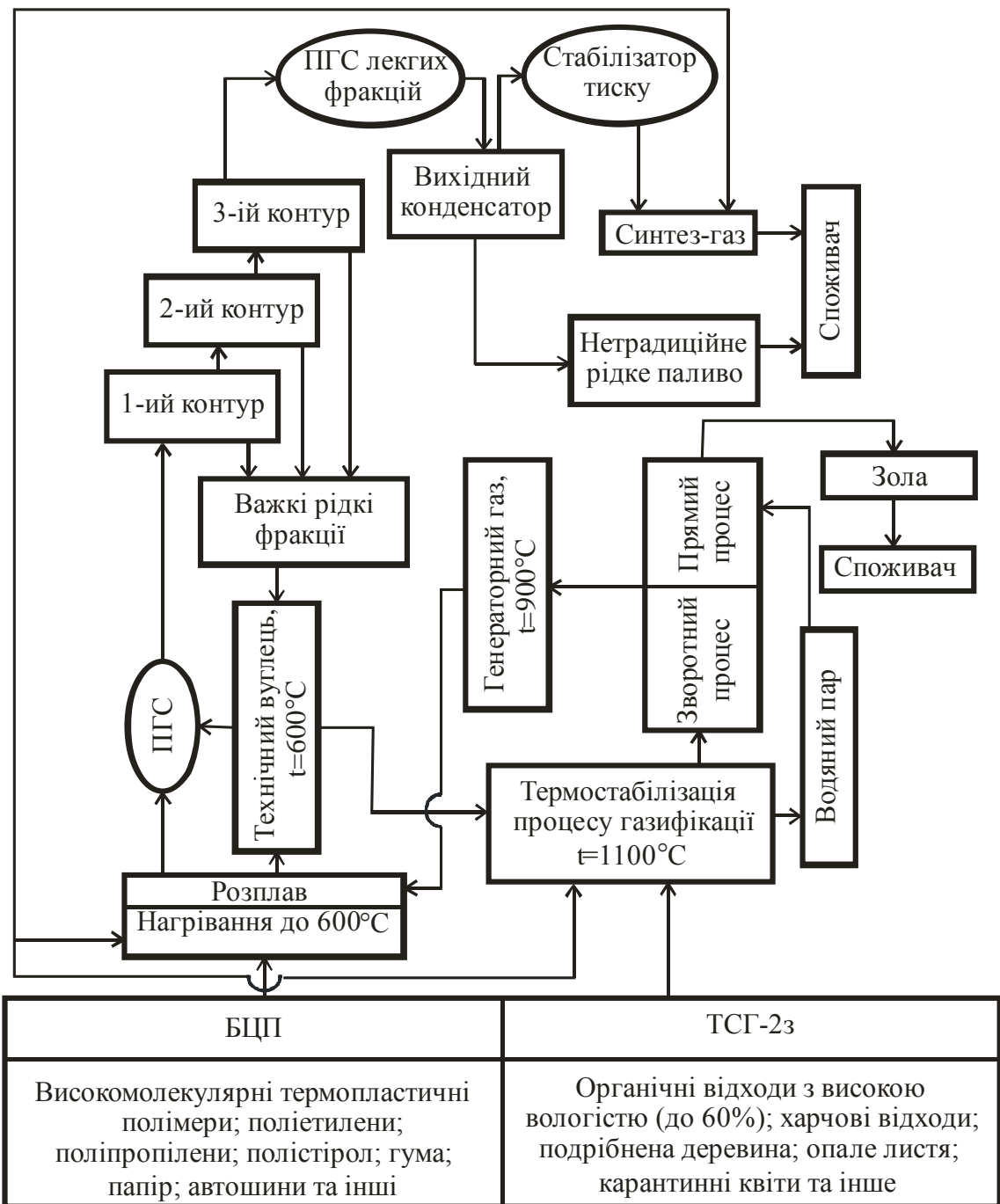


Рисунок 6.12 - Схема матеріальних потоків технології ЕПГ

З однієї сторони гарячий пірокарбон використовується, як енергетична добавка до енергетично збіднених вологих відходів, а з другої – виконує роль твердого теплоносія, який забезпечує додатковий нагрів холодних вологих відходів, а при подальшому проходженню по газогенератору, він разом з вологими відходами піддається високотемпературному окисленню при температурі 950-1100 °С з утворенням більш калорійного генераторного газу в порівнянні з відомим одержаним по традиційній схемі. Теплота згорання одержаного генераторного газу



досягає  $6,0-8,5 \text{ МДж/м}^3$ , незалежно від того, що в ньому міститься баласт у вигляді азоту до 40-50% (об).

2. Потік неочищеного генераторного газу (потік ГГ), який містить шкідливі важкі смоли вуглеводнів і діоксину, з температурою  $650-950^\circ\text{C}$ , поступає з лінії ТСГ-2з на лінію БЦП.

З однієї сторони гарячий генераторний газ використовується, як проміжний газовий теплоносій, який поступає в середину реактора БЦП, що забезпечує ефективний контактний нагрів вхідних холодних відходів, а з іншої сторони високомолекулярні рідкі вуглеводні (смоли) і діоксини, які разом з генераторним газом поступають в реактор, піддаються глибокій термодеструкції до рівня екологічно безпечних легких фракцій вихідного альтернативного палива. Таким чином, в процесі термодеструкції сухої органічної сировини і важких смол сконденсованих з генераторного газу утворюється піролізний газ, який має високу теплоту згоряння – від  $30,0$  до  $35,0 \text{ МДж/м}^3$ ;

3. Змішування піролізного газу з генераторним утворює потік синтез газу, без залишків шкідливих смолянистих вуглеводнів і діоксинів, теплота згорання якого коливається від  $12,0$  до  $18,0 \text{ МДж/м}^3$ .

Отриманий синтез – газ частково використовується для стабілізації процесу газифікації вологих відходів лінії ТСГ-2з і для нагріву реактора лінії БЦП, а основна його частина використовується для вироблення електроенергії в дизельних або газотурбінних електростанціях.

Якщо укомплектувати установку автономною електростанцією або когенераційною установкою, при використанні в якості палива піролізний чи генераторний газ, рідке піролізне паливо легких фракцій, а також пірокарбон (коксний залишок), то можна забезпечити в автономному енергетичному режимі всі технологічні процеси як утилізації так і теплопостачання [241, 243]. Економічна ефективність запропонованого комплексу Екопірогенезису буде ще більше, якщо рідкі легкі фракції піролізу піддати переробці по відомим хімічним технологіям, що дозволить вирішити екологічні, економічні, технологічні та управлінські питання.

Схема енергетичної установки з внутрішньоцикловим БЦП (рис. 6.13),

спалюванням отриманого синтез-газу в турбогенераторі (ТГ) і використанням скидної теплоти конденсації важких фракцій ПГС на конденсаторно-циркуляційних ступенях БЦП для кондиціонування (охолодження) повітря на вході ТГ, який працює на отриманому альтернативному газоподібному паливі (синтез-газі), на рис. 6.14 [200, 203].

Розглянута ежекторна тепловикористовуюча холодильна машина (ТХМ (ТЕХМ)) як конструктивно найбільш проста та надійна в експлуатації, в якій функцію компресора виконує ежектор. Як робоче тіло в ТЕХМ застосовують низькокиплячі робочі тіла, наприклад озонобезпечні хладони R142B і R600 (н-бутан), що забезпечує глибоку утилізацію скидної теплоти та охолодження зовнішнього повітря до низьких температур без підтримання вакууму у випарнику низькокиплячого робочого тіла (НРТ)-повітроохолоджувачі. Теплота конденсації ПГС важких вуглеводнів на ступенях конденсаторів К1, К2 і К3 відводиться спочатку до води (проміжного теплоносія), яка випаровується в теплообмінниках. Утворена водяна пара конденсується потім з відведенням теплоти на випаровування НРТ у генераторі Г–Кн пари НРТ (він же конденсатор водяної пари Кн). Утворена пара низькокиплячого робочого тіла високого тиску використовується як силова в ежекторі ТГ–ТХМ для ежекування пари НРТ низького тиску з випарника-повітроохолоджувача на вході ТГ.

Ефективність ежектора характеризується коефіцієнтом ежекції  $U = G_0/G_{\Gamma}$ , де  $G_0$  і  $G_{\Gamma}$  — витрати НРТ через В-ПО (всмоктуваний НРТ низького тиску) та генератор (силовий НРТ високого тиску), а ТЕХМ — тепловим коефіцієнтом  $\zeta$ . Він являє собою відношення холодопродуктивності  $Q_0$  (теплоти, відведеної від повітря на вході турбогенератора до НРТ, що кипить у В-ПО) до теплоти конденсації пароподібних фракцій ТПВ  $Q_{\Gamma}$ , підведеної в генераторі до киплячого НРТ високого тиску на відповідному ступені конденсації:  $\zeta = Q_0/Q_{\Gamma}$ . Коефіцієнти  $U$  і  $\zeta$  залежать від параметрів циклу ТЕХМ, збільшуючись із підвищенням температур кипіння НРТ у генераторі  $t_{\Gamma}$  і В-ПО  $t_0$  та зниженням температури конденсації  $t_{\kappa}$ .

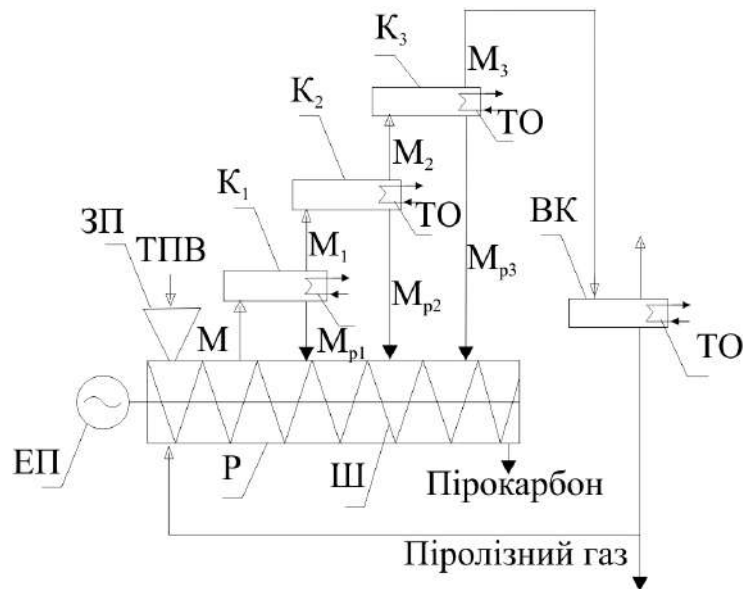


Рис. 6.13 - Схема циркуляційного піролізу: Р — реактор; ЕП — електропривід; ЗП — завантажувальний пристрій; К1, К2, К3 — перший, другий і третій контури БЦП (високо-, середньо- та низькотемпературні ступені конденсатора); ВК — вихідний конденсатор; ТО — теплообмінник водяного охолодження конденсатора; Ш — шнекова подача відходів

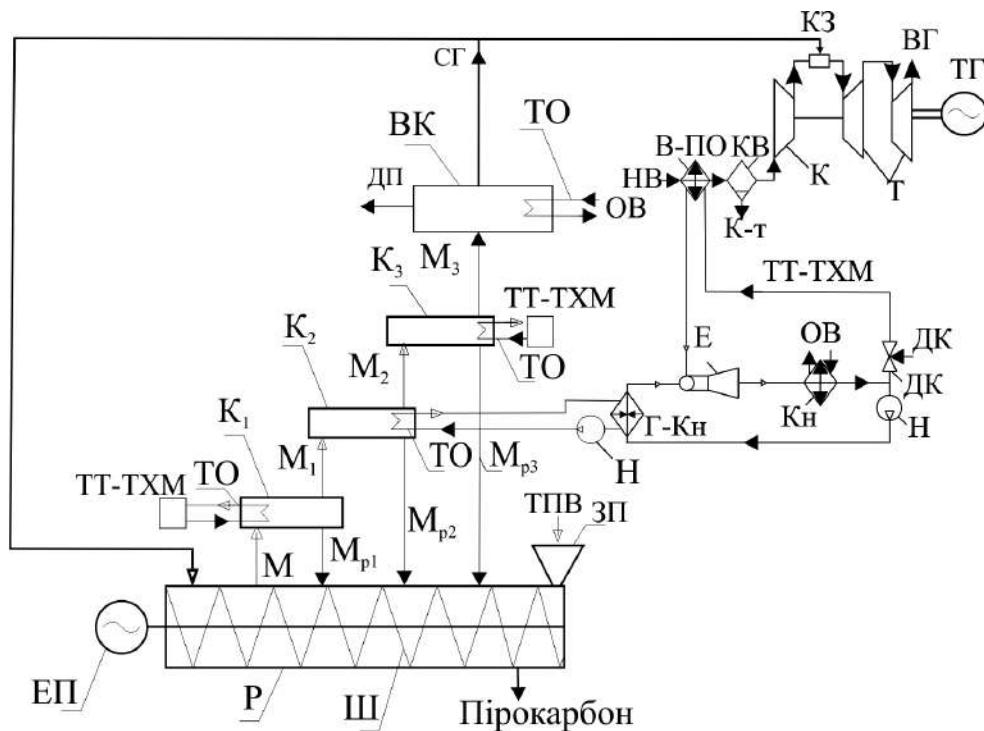


Рис. 6.14 - Схема енергоустановки з внутрішньоцикловим багатоконтурним циркуляційним піролізом: К — компресор; КЗ — камера згоряння; Т — турбіна; В-ПО — випарник-повітроохолоджувач; КВ — конденсатовіддільник; К-т — конденсат; ТТ-ТХМ — термотрансформатор-тепловикористовуюча холодильна

машина; Е — ежектор; Кн — конденсатор низькокиплячого робочого тіла (НРТ); Г–Кн — генератор пари НРТ–конденсатор водяної пари; Н — насос; ДК — дросельний клапан; НП — навколишнє повітря; ВГ — відхідні гази; ОВ — охолоджувальна вода; СГ — синтез-газ; решта позначень, як на рис. 6.13

Виходячи з кількості теплоти, відведеної на ступенях конденсації БЦП  $Q_{\Gamma}$ , та значення  $\zeta$ , розраховують холодопродуктивність ТЕХМ:  $Q_0 = \zeta Q_{\Gamma}$ , де  $Q_{\Gamma} = M_p r$ , де  $r$  — питома теплота конденсації пароподібних фракцій ТПВ на відповідному ступені конденсації піролізу.

Зниження температури повітря у В-ПО ежекторної ТХМ на вході турбогенератора  $\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{п1}} - t_{\text{п2}}$  знаходять з теплового балансу:  $Q_0 = G_{\text{п}} c_{\text{п}} (t_{\text{п1}} - t_{\text{п2}}) \xi$ , де  $c_{\text{п}}$  — теплоємність вологого повітря;  $\xi$  — коефіцієнт вологого випадання, який являє собою відношення загальної кількості теплоти (різниці ентальпій повітря на вході та виході з В-ПО), відведеної від вологого повітря у В-ПО, — холодопродуктивності ТЕХМ  $Q_0$ , до кількості явної теплоти, яка визначається різницею температур повітря по сухому термометру:  $\xi = Q_0 / [G_{\text{п}} c_{\text{п}} (t_{\text{п1}} - t_{\text{п2}})]$ .

Значення питомих (що припадають на одиницю витрати повітря через ТГ) кількості скидної теплоти конденсації парогазової суміші фракцій ТПВ на відповідному ступені конденсації БЦП, підведеної до НРТ високого тиску в генераторі ТЕХМ  $q_{\Gamma}$ , та холодопродуктивності ежекторної ТХМ  $q_0$ , зниження температури  $\Delta t_{\text{п}}$  повітря у В-ПО ТЕХМ, коефіцієнтів  $U$  і  $\zeta$  в залежності від температури  $t_{\Gamma}$  та тиску  $P_{\Gamma}$  кипіння НРТ у генераторі при  $\xi = 1,0; 2,0; 2,5$  і  $3,0$  та температурі кипіння R142В у В-ПО  $t_0 = 0$  °С наведені на рис. 6.15. Як низькокипляче робоче тіло у ТЕХМ застосований хладон R142В.

Як видно, при  $t_{\Gamma} = 120$  °С зниження температури  $\Delta t_{\text{п}}$  повітря у В-ПО найбільше і складає при  $t_0 = 0$  °С:  $\Delta t_{\text{п}} = 25, 30, 35$  і  $65$  °С при  $\xi = 3,0; 2,5; 2,0$  і  $1,0$  відповідно. Чим більше  $\xi$ , тим більше теплоти необхідно відвести від вологого повітря на конденсацію водяної пари, відповідно й зниження його температури  $\Delta t_{\text{п}}$  менше. Величина  $\xi = 1$  відповідає охолодженню без вологовипадання (рис. 6.15).

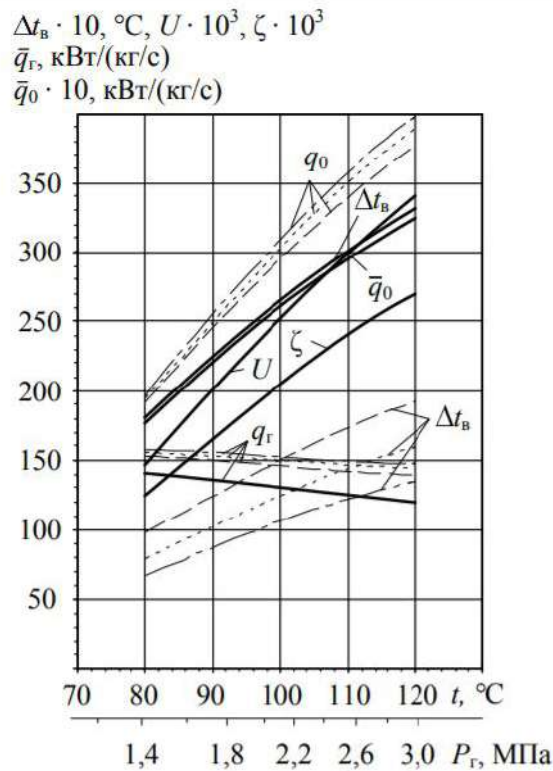


Рисунок 6.15 - Питомі кількості  $q_{\text{г}}$  та  $q_0$ , зниження температури  $\Delta t_{\text{п}}$  повітря, коефіцієнтів  $U$  і  $\zeta$  в залежності від температури  $t_{\text{г}}$  і тиску  $P_{\text{г}}$  кипіння НРТ у генераторі при  $t_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ : — —  $\xi = 1,0$ ; - - -  $\xi = 2,0$ ; - - -  $\xi = 2,5$ ; - · - · -  $\xi = 3,0$

Результати розрахунку процесів охолодження повітря у В-ПО на вході ТГ показують, що при температурах зовнішнього повітря на вході В-ПО  $t_{\text{п1}} = 25, 30$  і  $35 \text{ } ^\circ\text{C}$  (влітку) і його відносній вологості  $\varphi_1 = 70 \%$  процеси охолодження повітря до температури на виході В-ПО  $t_{\text{п2}} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$  (температура кипіння R142В у В-ПО  $t_0 = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) проходять при коефіцієнтах вологовипадання  $\xi = 2,0; 2,5$  і  $3,0$  відповідно (рис. 6.16).

Таким чином, улітку при температурах зовнішнього повітря  $t_{\text{п1}} = 30\text{-}40 \text{ } ^\circ\text{C}$ , а відтак і повітря на вході ТГ, воно може бути охолодженим на величину  $\Delta t_{\text{п}} = 20\text{-}35 \text{ } ^\circ\text{C}$  (при температурах кипіння R142В у В-ПО  $t_0 = 0\text{-}5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), що забезпечує зменшення питомої витрати паливного газу приблизно на  $1,5\text{-}2,5 \%$ .

Блок-схема запропонованої технології при утилізації твердих органічних відходів мікрорайону міста представлена на рисунку 6.17.

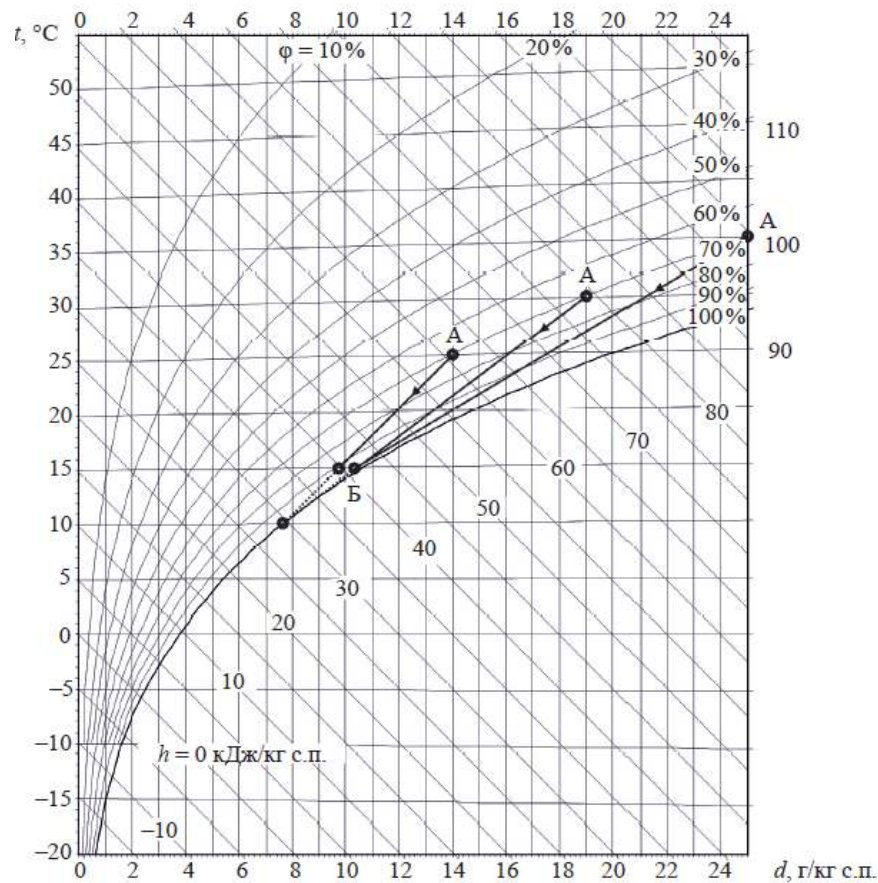


Рисунок 6.16 - Процеси охолодження повітря у В-ПО на вході турбогенератора: А — зовнішнє повітря на вході В-ПО; Б — повітря на виході з В-ПО; АБ — охолодження повітря у В-ПО;  $h$  — ентальпія, кДж/кг сухого повітря;  $d$  — вологовміст, г/кг сухого повітря

Потоки сировини, проміжних та вихідних продуктів утилізації: ТПВ – тверді побутові відходи; СК – будівельне сміття, камені; П – папір, картон; С – скло; М – чорний і кольоровий метал; Д – деревина (гілки дерев, колоди); ПД – подрібнена деревина; ПЛ – високомолекулярні полімери (поліетилен, поліпропілен, полістирол, поліетилентерефталат); ДП – подрібнені полімери; АШ – цілі зношені автомобільні шини; Х – «хвости» (частина ТПВ, що залишилася після сортування); СХ – «хвости» після сушіння димовими газами; ПГ – піролізний газ; ГГ – генераторний газ; ДГ – вихідні димові гази після обігріву реакторів БЦП; ПК – пірокарбон (твердий залишок після БЦП у вигляді технічного вуглецю); РП(ЛФ) – рідке паливо легких фракцій; РП – рідке паливо без домішок важких смол; ТПП – тверде пічне паливо; ЕЕ – електроенергія; ТЗ – твердий залишок.



Після повного завантаження реактора автошинами і його герметизації, забезпечують зовнішній обігрів корпусу реактора до температури 750 - 950°C. Піролізний газ ПГ подають на окремий пальник спалювання. В результаті піролізний газ використовують в повному обсязі для власних потреб. Для одержання рідкого палива РП легких фракцій, первинну ПГС подають у багатоконтурну циркуляційну систему (БЦС), у якій високомолекулярні важкі компоненти, що не повністю розклалися, циркулюють між реактором і контурами до одержання на виході загальної рідкої фракції, яка використовується споживачем у якості РП для котелень. Виходячи з експериментальних даних, із 1кг АШ можна одержати 40-48% рідкого палива легких фракцій, яке не вимагає подальшого його фракціонування.

На сортувальній транспортерній стрічці, відходи розподіляють рівномірним шаром, товщиною близько 150 – 200мм, спочатку вони проходять через магнітно-індукційні пристрої, що забезпечують відбір чорних і кольорових металів (М), а далі, після попереднього знезаражування їх вручну сортують із відбором в окремі контейнери, наприклад, вироби зі скла (С), пляшки та інше, вироби із паперу (П) з подальшим його пакуванням і наступним відправленням С, П и М на серійні заводи для їхньої переробки по традиційним технологіям. Далі відсівають будівельне сміття, камені з піском і землею (БС) і вивозять усе на міський полігон смітника. В окремі контейнери відбирають (ПЛ) високомолекулярні полімерні відходи (поліпропілен - ПП, полістирол - ПС, поліетилен - ПЕ, поліетилентерефталат - ПЕТФ), негабаритні деталі з полімерів відбирають і подрібнюють, а потім подрібнені полімери (ДПЛ) подають на лінію багатоконтурного циркуляційного піролізу БЦП. Суміш полімерних відходів подають у реактор циклічної або безперервної дії за допомогою плунжерної системи з гідроциліндрами. Після повного завантаження реактора і його герметизації, включають зовнішній обігрів реактора при температурі 750 - 950 °С. У процесі нагрівання високомолекулярні полімери плавляться і термічно розкладаються з утворенням первинної парогазової суміші (ПГС), при охолодженні якої утворюється піролізний газ і рідке паливо та твердий залишок (ТЗ) у вигляді вуглецю в кількості 1 – 4%. Якщо у вуглеці залишається частина горючих вуглеводнів, не менш ніж 1%,



то твердий залишок – пірокарбон (ПК) при певних умовах може підтримувати горіння, при цьому він по своїм теплотворним характеристикам наближається до характеристик бурого вугілля і його можна використовувати як добавку до твердого пічного палива. Піролізний газ ПГ у кількості 5 – 23% у повному обсязі використовують для власних потреб, його допалюють на додатковому пальнику, який розташований в топковому пристрої, паралельно з основним пальником, а тепло димових газів використовують для обігріву реактора БЦП. В процесі термічної деструкції високомолекулярних полімерів ПЛ первинна ПГС містить важкі компоненти, що є проміжним продуктом не повного розкладання високомолекулярних полімерів, що потребує більш глибокої деструкції. Для одержання рідкого палива легких фракцій, первинну ПГС подають у багатоконтурну циркуляційну систему (БЦС), у якій важкі компоненти з молекулярною масою 1500 і більш конденсуються і повертаються в реактор, при цьому вони циркулюють між реактором і контурами до одержання на виході загальної рідкої фракції РП(ЛФ) з молекулярною масою менше 200, яке використовується споживачем у якості рідкого палива у міських котельнях. Виходячи з експериментальних даних, з 1кг полімерних відходів можна одержати 65 – 85% рідкого палива легких фракцій.

Частина ТПВ, що залишилася, після сортування, так звані «хвости» (Х) разом із подрібненою деревиною (ПД) подають на лінію сушки ЛС. Сушіння забезпечується димовими газами ДГ із температурою 140 - 250°C, які утворюються після обігріву реакторів ліній БЦП(ПЛ) і БЦП(АШ). Після доведення вологості хвостів Х до 15 – 25%, сухі відходи СХ змішують із гарячим пірокарбоном ПК, який надходить від лінії БЦП (ПЛ) і з гарячим пірокарбоном ПК від лінії БЦП(АШ) і суміш подають на лінію багатоконтурної двозонної газифікації «хвостів» (БЦДГ(Х)). При газифікації «хвостів» утворюється генераторний газ ГГ в обсязі 1,8 – 2,7м<sup>3</sup> з 1кг. відходів. Частина, 22,5% від загального обсягу отриманого генераторного газу ГГ іде на нагрівання реактора БЦП(ПЛ), а 18,8% його іде на нагрівання реактора БЦП(АШ), частина генераторного газу яка залишилася, в об'ємі 57,7% надходить у дизельну електростанцію, що виробляє електроенергію ЕЕ, при цьому 35% виробленої електроенергії іде на власні потреби, а 65% подають у міську електричну

мережу. Після газифікації X утворюється твердий залишок ТЗ, в обсязі 5 – 8%, який вивозиться на міський смітник.

Відмінними рисами запропонованої технології від відомих технологій утилізації ТПВ є те, що вона являє собою закінчений цикл утилізації всього об'єму ТПВ, від сортування відходів, до повного термічного розкладання органічної частини із включенням у цикл глибокого розкладання проміжних високотоксичних важких високомолекулярних продуктів з одержанням екологічно безпечних комерційних вихідних продуктів. Характерною рисою даної технології є наявність власного рідкого та газоподібного палива, і електроенергії, що дозволяє забезпечити автономну роботу даного комплексу, без використання традиційних енергоресурсів, що особливо важливо для України в момент енергетичної кризи.

Екологічність і економічність комплексу досягається шляхом введення нової послідовності операцій при поєднанні технології БЦП полімерних відходів і зношених АШ, і двозонної циркуляційної газифікації різних видів вологих відходів, при цьому проміжні вихідні компоненти однієї технології взаємопов'язані з вхідними компонентами другої технології, що дозволить, по – перше, за рахунок гарячого пірокарбону поліпшити енергетичні параметри вологих відходів, що дозволить збільшити питомий вихід генераторного газу і його теплотворну здатність, по – друге, за рахунок утилізації тепла димових газів, зменшити енергозатрати на сушку вологих відходів, по – третє, за рахунок використання власного генераторного газу в газопоршневих електростанціях забезпечити енергетично незалежну технологію термічної утилізації всього об'єму органічних відходів і додатково постачати електроенергією даний мікрорайон. А використання рідкого палива в міських котельнях забезпечить жителів мікрорайону дешевим опаленням та гарячим водопостачанням. Крім того, відбір важких смол із генераторного газу і глибоке їх розкладання в процесі газифікації та відбір високомолекулярних вуглеводнів і інших токсичних компонентів в процесі багатоконтурного циркуляційного піролізу полімерних відходів з глибоким термічним їх розкладанням забезпечують екологічну безпеку даного способу термічної утилізації органічних відходів, що особливо важливо для обмеженої

площі мікрорайону.

Попередньо ТПВ загальним об'ємом 130000 т/рік = 10833 т/міс = 360 т/добу = 15 т/год піддають сортуванню на сортувальній лінії відбирають і сортують на компоненти згідно таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Компоненти сортування сміттепереробного комплексу

Вид відходів	% від маси	Кількість, тон на добу	Метод переробки і утилізації
Харчові відходи	38%	136,8 т/добу	Газифікація БЦДГ
Відходи деревини	4%	14,4 т/добу	Газифікація БЦДГ
Текстиль	5%	18,0 т/добу	Переробка на спец підприємств, або газифікація БЦДГ
Папір, картон	30%	108 т/добу	Переробка на спец підприємств, або газифікація БЦДГ
Відходи полімерів	10%	36 т/добу	Піроліз – БЦП
Скло	6%	21,6т/добу	Переробка на спец підприємств
Кольорові і чорні метали	2%	7,2т/добу	Переробка на спец підприємств
Будівельні відходи, пісок,земля,каміння	5%	18,0 т/добу	Захоронення на місцевому сміттєзвалищу
Загальна маса		Σ360т/добу	

У якості споживача вихідних продуктів можуть виступати місцеві міські та селищні влади, які використовують одержане рідке паливо в місцевих котельнях для опалення житлового масиву, що може суттєво знизити оплату опалення й гарячої води для жителів даного району. А частина отриманої електроенергії можна подавати в міській електричній мережі, причому за рахунок цього, вартість електроенергії для жителів даного житлового масиву може бути також суттєво знижена.

Структурна схема сміттепереробного комплексу за технологією

Екопірогенезіс представлена на рис.6.18.

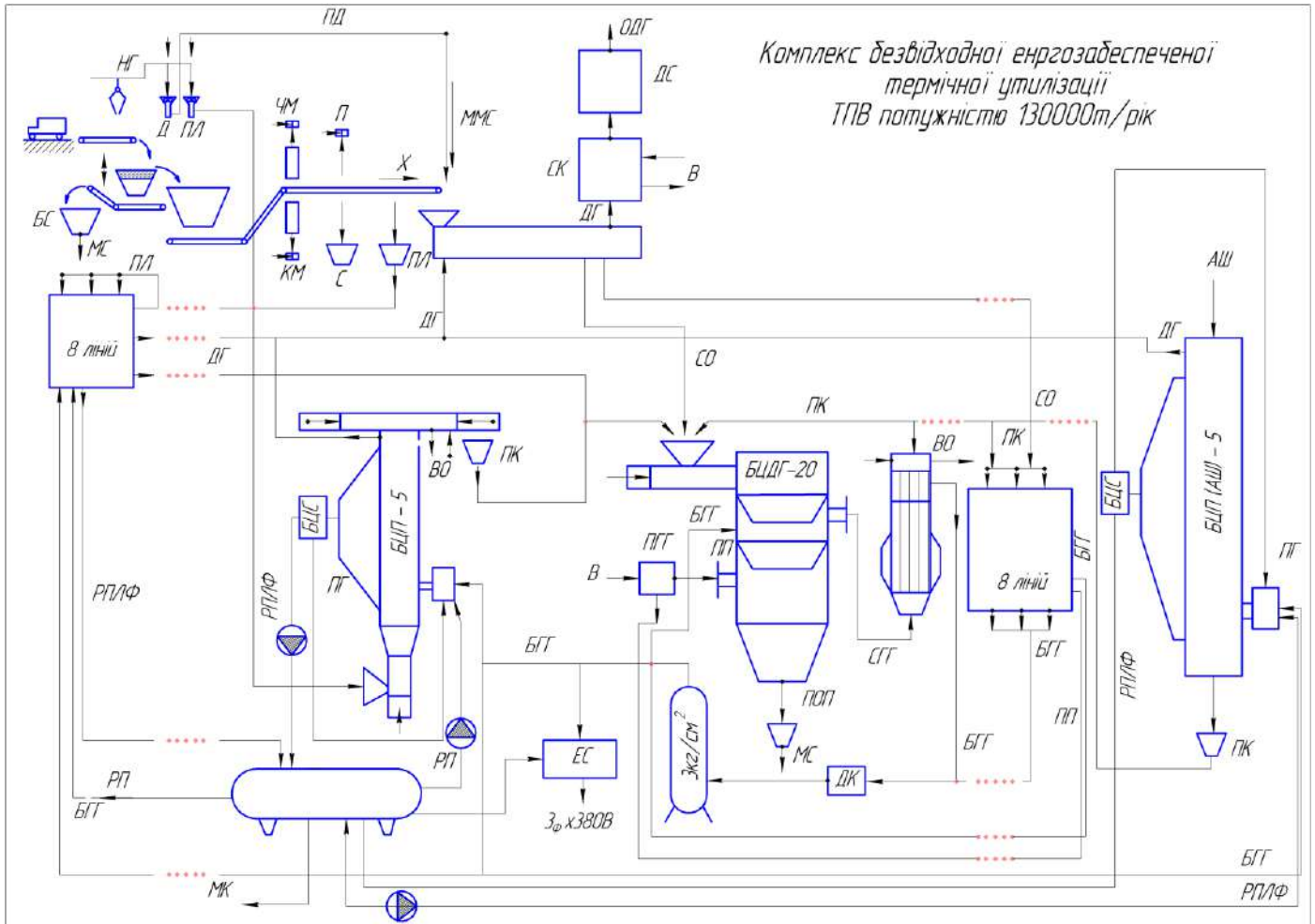


Рисунок 6.18 – Структурна схема сміттєпереробного комплексу термічної утилізації ТПВ мікрорайону потужністю 130 000 т/рік

Позначення потоків: НГ - негабарити органічних відходів, Д - деревина, ПЛ – полімери, БС - будівельне сміття, МС - міський смітник, ЧМ - чорні метали, КМ - кольорові метали, П- папір, С – скло, Х – хвости, МК - міські котельні, ПД - подрібнена деревина, ММС - мули міських стоків, ДГ - димові гази, ОДГ - очищені димові гази, ДС – димосос, СК – скруббер, ОБ - обертальний барабан для сушки, ВО - водяне охолодження, ПК – пірокарбон, БЦП-5 - лінія багатоконтурного циркуляційного, піролізу, потужністю 5т /добу, БЦС - багатоконтурна циркуляційна система, ПГ - піролізний газ, СР - суха органіка, РПЛФ - рідке паливо легких фракцій, БЦДГ-20 - лінія багатоконтурної циркуляційної двозонної газифікації потужністю 20т/добу., СГГ - генераторний газ з домішками смоли, БГГ - безсмольний генераторний газ, ПГГ – парогенератор, ПП - перегрітий пар, В – вода,

ПОП - попіл (твердий залишок), ДК - дотискаючий компресор, БЦП (АШ) - лінія багатоконтурного циркуляційного піролізу зношених автошин потужністю 5т/добу R=13, ЕС – електростанція.

Зібрані з міських контейнерів тверді побутові відходи, сміттєвозами доставляють на комплекс по термічній утилізації органічних відходів. Комплекс забезпечує утилізацію з використанням екологічно безпечних і енергетично незалежних методів термічної утилізації суміші твердих побутових відходів, мулів міських стічних вод, зношених автомобільних шин та відходів деревини лісопаркової зони житлового мікрорайону і може бути використаний в міському комунальному господарстві для знешкодження екологічно шкідливих органічних відходів, що забруднюють навколишнє середовище та одержання альтернативних джерел енергії (рідке та газоподібне паливо і електроенергія), які можуть використовуватися для покриття власних потреб та часткового покриття енергоресурсів які використовуються жителями даного мікрорайону (освітлення, опалення та гаряче водопостачання).

Попередньо ТПВ на сортувальній лінії відбирають і сортують на наступні компоненти: відбирають негабаритні відходи: гілля та стовбури дерев, металеві вироби, великогабаритні вироби із пластмас, картону та інше. Відходи деревини подрібнюють до 2-3 мм і подають на лінію газифікації. Негабаритні вироби із пластмас (поліетилен, полістирол, поліпропілен, поліетилентерефталат) подрібнюють до 3 – 5мм і подають на першу лінію БЦП. Пластмасу (ПВХ та інші, які містять компоненти хлору) відбирають в окремі контейнери, пресують і відправляють для переробки на спеціалізовані підприємства.

Окремо відбирають зношені автошини, класифікують їх по розмірам і подають на другу лінію БЦП. Кількість відходів зношених автомобільних шин одного типорозміру, наприклад R=13, які необхідно утилізувати, приймаємо 5,0 т/добу (без урахування накопичених. В процесі проектних робіт загальна кількість зношених шин кожного типорозміру може бути уточнена, відповідно буде спроектована установка під вибраний типорозмір автошини)

Відходи чорних та кольорових металів, папір та картон відбирають в окремі

контейнери, і пресують їх в тюки, скло збирають в окремі контейнери і всі ці відходи відправляють для переробки на спеціалізовані підприємства.

Відходи які залишилися, їх називають «хвости» представляють собою вологі харчові відходи, які подрібнюють, на виході із загального бункеру в який скидають відходи, після видалення негабаритів, за рахунок голкових барабанів, які обертаються з різною швидкістю назустріч один одному з пристроєм їх очищення, що забезпечить розрив пакетів і подрібнення відходів, які в ньому знаходяться. Далі, подрібнені відходи розподіляють на транспортерну стрічку, на якій їх знезаражують і піддають подальшому сортуванню. З допомогою індукційно-магнітних пристроїв відбирають кольорові і чорні метали, збирають їх в окремі контейнери, пресують і відправляють для переробки на спеціалізовані підприємства. Далі вручну відбирають в окремі контейнери тільки чисті текстиль, папір, картон, полімери, скло. Полімери подають на першу лінію термічної утилізації. Скло відправляють для переробки на спеціалізовані підприємства. Текстиль, папір, картон частково пресують і відправляють для переробки на спеціалізовані підприємства, а неякісні (брудні, замаслені і т. д.) текстиль, папір, картон остаються в складі «хвостів» і їх відправляють на третю лінію газифікації.

Будівельні відходи, пісок, земля, каміння відбирають і вивозять на міський полігон.

Харчові відходи з різними домішками, «хвости», які залишилися змішують з подрібненою деревиною, холодним пірокарбоном та іншими органічними відходами, наприклад мулами міських стічних вод, суміш подають на лінію сушки. Можливий варіант подачі гарячого пірокарбону безпосередньо в газогенератор. Сушка забезпечується за рахунок утилізації тепла димових газів з температурою 150 – 160°C, які виходять із першої і другої лінії утилізації, їх подають безпосередньо в обертовий барабан в якому знаходяться «хвости», що забезпечує суттєве зниження енергозатрат на сушку вологих відходів. Конструктивно установка для сушки вологих відходів виконана у вигляді обертового барабана з спеціальними внутрішніми перегородками, можливо використати серійну конструкцію сушарки з розрахунковою потужністю 160,65т/добу суміші вологих відходів. Сушу органіку

подають на третю лінію, в двозонний газогенератор.

Установки для БЦП з одержанням рідкого палива легких фракцій та пірокарбону (перша лінія).

- Загальна маса полімерних відходів 36 т/добу (без урахування полімерів із ПВХ).

- Виходячи із конструктивних і технологічних особливостей і практичного досвіду експлуатації установок БЦП циклічної дії і умов до мінімального ризику при проектуванні установки безперервної дії, приймаємо одиничну потужність установки безперервної дії – 5,0 т/добу (після випробувань першої установки одинична потужність буде уточнена). При цьому, посадочні місця на фундаменті для кріплення установки, а також комунікації для її функціонування будуть підібрані універсальні і не будуть змінюватися.

- Кількість установок виходячи із загальної маси 36 т/добу – 7...8шт.

- Кількість рідкого палива легких фракцій, яке буде одержано на виході 65 – 85% від маси, приймаємо середній коефіцієнт 70%, тоді  
 $36 \times 0,7 = 25,2$  т/добу рідкого палива легких фракцій.

Одержане рідке паливо має температуру спалаху плюс 25 – 27°C. що накладає певні вимоги до умов його зберігання при забезпеченні пожежевибухобезпеки.

- Кількість твердого залишку (пірокарбону) 1 – 3%, загальна маса рівна:  $36 \times 0,2 = 7,2$  т/добу.

При змішуванні гарячого пірокарбону з температурою 400 – 650°C з вологими відходами в газогенераторі, він сприяє інтенсивному висушуванню останніх, а оскільки у пірокарбоні залишається до 1,5% горючих вуглеводнів, то за певних умов він може підтримувати горіння, при цьому по своїм теплотворним характеристикам він наближається до характеристик бурого вугілля, що збільшує енергетичні показники вологих відходів. Суміш харчових відходів з пірокарбоном від полімерів і автошин і подрібненою деревиною мають збільшену енергетичну складову, при цьому кількість генераторного газу збільшується з 1,8 – 2,0 м<sup>3</sup> /кг до 2,4 – 3,2 м<sup>3</sup> /кг, крім того, теплотворна здатність його також збільшується з 4 – 6 мДж/м<sup>3</sup> до 10 - 12 мДж/м<sup>3</sup>.

Установка для БЦП зношених АШ (цілих, не подрібнених) з одержанням рідкого палива легких фракцій і пірокарбону (друга лінія).

- Виходячи із конструктивних і технологічних особливостей і практичного досвіду проектування установок БЦП цілих зношених шин безперервної дії, приймаємо одиничну потужність установки – 5,0 т/добу (після випробувань першої установки одинична потужність буде уточнена). При цьому, посадочні місця на фундаменті для кріплення установки, а також комунікації для її функціонування будуть підібрані універсальні і не будуть змінюватися.

- Кількість рідкого палива легких фракцій, яке буде одержано на виході 45 – 52%, від загальної маси, приймаємо середній коефіцієнт 47%, тоді  $5,0 \times 0,47 = 2,35$  т/добу рідкого палива.

- Кількість твердого залишку (пірокарбону) 42 – 48%, від загальної маси рівна:  $5 \times 0,45 = 2,25$  т/добу.

При роботі як першої так і другої лінії БЦП можна одержувати як гарячий пірокарбон, так і холодний. При одержанні, наприклад холодного пірокарбону його доцільно змішувати з «хвостами» перед сушкою, а при гарячому пірокарбоні з температурою 300 – 450°C, необхідно його подавати безпосередньо в газогенератор, при цьому він також сприяє інтенсивному висушуванню останніх, а оскільки у пірокарбоні з автошин залишається до 5% горючих вуглеводнів, то за певних умов він може підтримувати горіння, при цьому по своїм теплотворним характеристикам він наближається до характеристик кам'яного вугілля, що суттєво збільшує енергетичні показники вологих відходів.

В пірокарбоні із автошин знаходяться металеві частини – проволока з ободу і металевого корду, які видаляють перед змішуванням його з вологими органічними відходами і передають спеціалізованим підприємствам на переробку .

Запуск установки БЦП автошин і її робота відбувається аналогічно установці БЦП полімерів.

Установки БЦДГ для двозонної газифікації вологих органічних відходів з одержанням генераторного газу (третя лінія).

- Виходячи із конструктивних і технологічних особливостей і практичного



досвіду проектування газогенераторів безперервної дії, приймаємо одиничну потужність установки БЦДГ – 20,0 т/добу (після випробувань першої установки одинична потужність буде уточнена). При цьому, посадочні місця на фундаменті для кріплення установки, а також комунікації для її функціонування будуть підібрані універсальні і не будуть змінюватися.

Загальна кількість вологих відходів складається із наступних складових:

- «хвостів» – 136,8т/добу;
- подрібненої деревини – 14,4т/добу;
- пірокарбон від першої лінії – 7,2 т/добу;
- пірокарбон від другої лінії – 2,25 т/добу.

Всього: вологих відходів – 160,65т/добу.

Кількість установок необхідних для утилізації даного об'єму вологих відходів:

$$N = 160,65 : 20,0 = 8 \text{ установок.}$$

Сумарна кількість генераторного газу, який буде одержано на виході, виходячи із того, що із одного кілограма відходів можна одержати  $2,2\text{м}^3/\text{кг}$  генераторного газу.

$$M = 160650 \times 2,2 = 353430\text{м}^3/\text{добу.}$$

Розрахункова теплотворна здатність одержаного генераторного газу рівна 9,2 – 10,5 мДж/м<sup>3</sup>.

Сумарна кількість твердого залишку після газифікації (попелу) 4 – 6%.

$$C = 160,65 \times 0,05 = 8,03\text{т/добу,}$$

відбирають і вивозять на міський смітник.

Частину генераторного газу, до 22,5% спалюють в системі обігріву піролізних реакторів першої лінії, другу частину, до 18,8% спалюють в системі обігріву піролізного реактора другої лінії, а третю частину, до 57,7% можливо подавати в котельню мікрорайону для опалення і гарячого водопостачання, або на газопоршневу електростанцію для вироблення електричної енергії, частину якої, до 35% буде використано для власних потреб, електропостачання системи управління і контролю даним комплексом, а решту, до 65% можливо подати в міську електричну мережу для часткового освітлення житлового мікрорайону [243]. Такий розподіл дозволить, по – перше, раціонально розподіляти і використовувати одержані

енергетичні ресурси на місці їх виробництва, по – друге, за рахунок подачі виробленої електроенергії в міську електричну мережу, виникає можливість зниження оплати за спожиту електроенергію і тепла жителями даного мікрорайону, що сприятиме матеріальному заохочуванню його жителів до роздільного збору твердих побутових відходів, що в свою чергу знизить експлуатаційні витрати самого виробництва. Рідке паливо легких фракцій можливо використовувати для заправки сміттєвозів, що суттєво зменшить загальні енергозатрати на утилізацію і поліпшить умови регулярності вивезення ТПВ із мікрорайону, а це в свою чергу зробить наше місто більш чистим

Для раціонального використання генераторного газу в пальниках і газопоршневій електростанції, його необхідно попередньо стиснути до 0,5 – 3.0кг/см<sup>2</sup> використовуючи серійний компресор горючих газів.

Перерозподіл і подача підсушених вологих відходів (сухої органіки) від лінії сушки до 8–ми газогенераторів може виконуватися транспортерними стрічками або шнеками.

- Лінія сортування повинна знаходитись в опалювальній будівлі з припливно – витяжною вентиляцією;

- Лінії БЦП і БЦГ повинні знаходитися знадвору під накриттям;

- Система управління і контролю кожною лінією повинна розташовуватися в безпосередній близькості від виконавчих механізмів. Допускається використовувати необмежену кількість пультів управління, центральний пост управління повинен знаходитись в опалювальному приміщенні;

- Необхідно максимально механізувати процеси загрузки відходів в першу і другу лінії БЦП і лінію БЦДГ, транспортування пірокарбону з першої і другої лінії БЦП і загрузки його в барабан сушки, або в газогенератор, а також видалення золи після лінії БЦДГ;

- Система очищення димових газів передбачає установку стандартних скрубєрів;

- В проекті необхідно передбачити утилізацію відходів очищення димових газів;

- Витрати оборотної води для охолодження обладнання 8 – 15,5м<sup>3</sup>/год;
- Ємність для зберігання оборотної води – 1000м<sup>3</sup>;
- Температура оборотної води в ємності не повинна перевищувати 35°С;
- Твердий остаток (попіл) після газогенератора збирають в контейнери і вивозять на міський смітник;

Схема установки для здійснення даного способу представлена на рис 6.19.

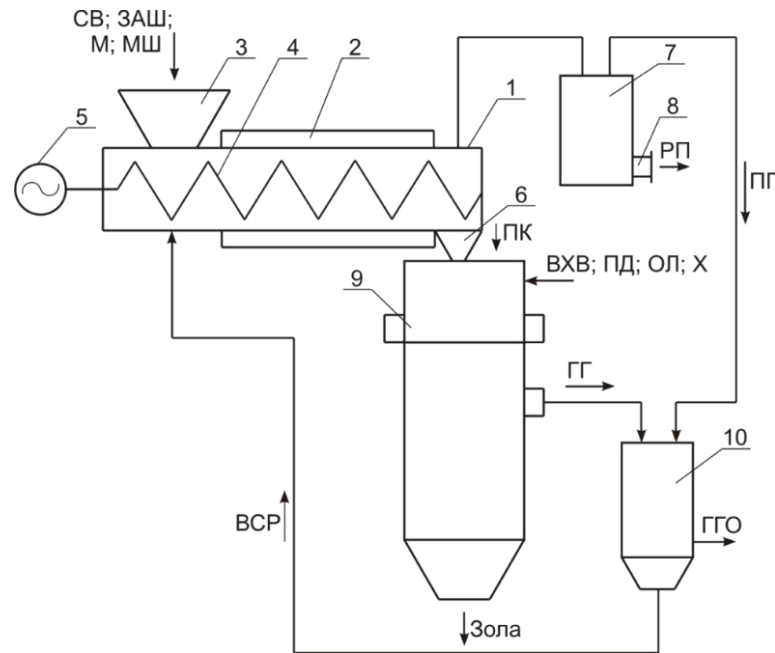


Рисунок 6.19 – Структурна схема установки піролізу та газифікації яка забезпечує утилізацію органічних відходів з урахуванням їх сезонності

Установка містить герметичний реактор піролізу 1, з системою зовнішнього обігріву 2, і бункером 3. Всередині реактора вмонтований шнек 4 з електроприводом 5, а в кінці реактора 1 в нижній його частині розташований бункер 6 для видалення твердого залишку (пірокарбону), а верхня його частина з'єднана з вихідним конденсатором 7 з патрубком 8 для видалення рідкого палива. Бункер 6 з'єднаний з газогенератором 9, який постачений теплообмінником 10 для охолодження гарячого генераторного газу.

Стрілками позначені потоки: ТБО – тверді побутові відходи; СВ – сухі органічні відходи; ВХВ – вологі харчові відходи; Д – деревина, гілки дерев; ПД – подрібнена деревина; ОП – опале листя дерев; Х – «хвости» попередньо сортованих твердих побутових відходів; ЗАШ – зношені автомобільні шини; М – відпрацьовані

мастила; МШ – медичні шприці та інші медичні відходи; ПГ – піролізний газ; ПК – твердий залишок (пірокарбон); ВСП – важка смолоподібна речовина; ГГ гарячий генераторний газ; ГГО – охолоджений і очищений від смоли генераторний газ; РП – рідке паливо. ОП – теплопостачання в зимовий період; ГВ – гаряче теплопостачання на протязі року. Попередньо потоки твердих побутових органічних відходів (ТБО), зібрані в даному мікрорайоні представлені на рисунку 6.20.

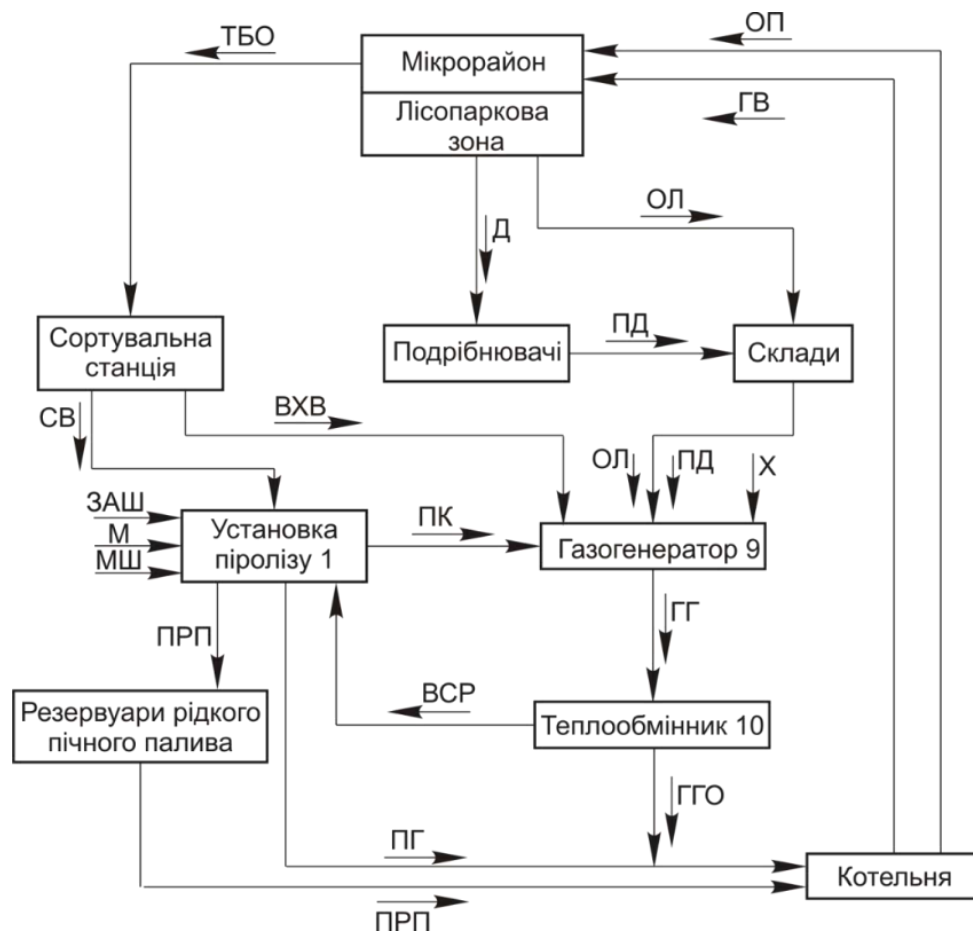


Рисунок 6.20 – Блок схема інфраструктури мікрорайону з потоками органічних відходів та установками для їх утилізації з одержанням альтернативних палив і спалювання їх в котельні

Алгоритм використання одержаних альтернативних видів палив полягає в тому, що рідке паливо ПРП одержане при утилізації СВ в літні місяці накопичують в резервуарі (рис. 6.21).

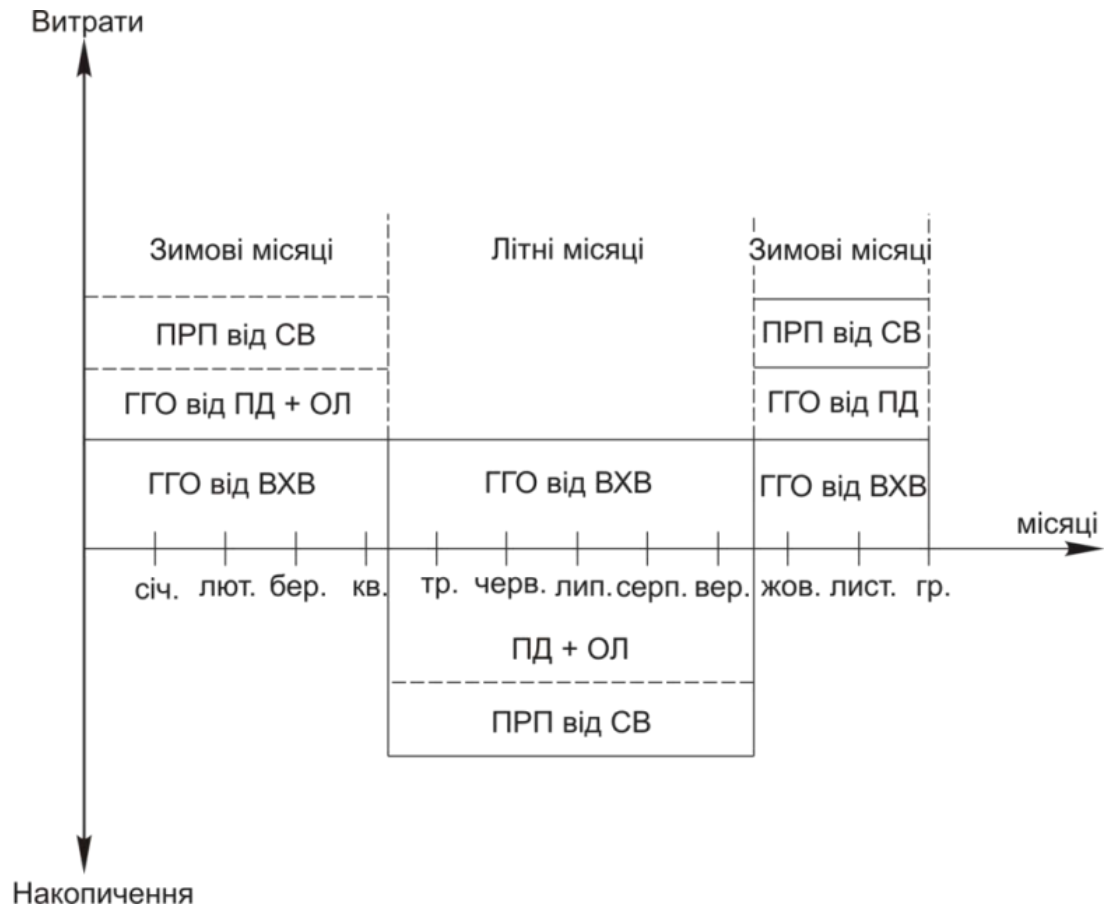


Рисунок 6.21 – Діаграма використання органічних відходів з одержанням альтернативних палив, які спалюються для покриття теплового навантаження в даному мікрорайоні

Деревину (Д) з лісопаркової зони подрібнюють і подрібнену деревину (ПД) та опале листя (ОЛ) накопичують в буртах на складах. При цьому в зимовий період одержане ПРП використовують як додаткове паливо в системі теплопостачання в залежності від теплового навантаження.

#### 6.4 Розрахунок матеріального та енергетичного балансу теплопостачання мікрорайону з використанням технології Екопірогенезису

Для виконання поточних розрахунків, складання енергетичного та матеріального балансів ми розглянемо заданий мікрорайон з наступними характеристиками: Наприклад, розглянемо можливість теплопостачання і гарячого водопостачання конкретного мікрорайону що займає загальну площу 20 гектарів, у тому числі житловий масив з 6000 жителів розташований на 4 гектарах і 16 гектарів

лісопаркової зони

Кількість домів у мікрорайоні  $N_{\text{дом}} = 12$  шт; Кількість квартир у мікрорайоні (із розрахунку що у одному домі 140 квартир)  $N_{\text{кв}} = 1680$  шт; Середні розміри квартири наступні(прийнято за статистичними даними): Висота, м:  $h_{\text{кв}} = 2.5$ ; Площа,  $\text{м}^2$ :  $S_{\text{кв}} = 50$ ; Об'єм,  $\text{м}^3$ :  $V_{\text{кв}} = 125$ .

Кількість жителів у мікрорайоні(прийнято із розрахунку що на 1 квартиру за статистичними даними приходиться 3.57 мешканця)  $N_{\text{жит}} = 6000$  чоловік.

Для аналізу необхідної кількості тепла, що споживається жилими мікрорайонами півдня України, ми розглядаємо заданий мікрорайон з описаними вище характеристиками.

Теплотехнічні параметри будівель та вихідні дані для розрахунку тепловтрат вибираються згідно СНіП 2.04.05-91, СНіП 2.08.01-8:

Питоме теплове навантаження будівлі,  $\text{ккал}/\text{м}^3 \text{ ч}$  :  $q_0 = 0.45$

Коефіцієнт збільшення теплових втрат:  $A = 1.2$

Середня температура в приміщеннях,  $^{\circ}\text{C}$ :  $t_{\text{вн}} = 20$

Норма витрати води на одного жителя,  $\text{м}^3/\text{год}$ :  $G_{\text{ГВС}} = 0.00416$

В заданому мікрорайоні потрібно забезпечувати гаряче водопостачання (ГВС) впродовж всього року та теплопостачання в опалювальний період. Для розрахунку необхідної кількості теплоти на забезпечення даних видів навантаження досліджено наступні дані: Графік середньодобової температури навколишнього повітря впродовж року; графік опалювального навантаження по місяцям; графік залежності температури вхідної води ГВС по місяцям; графік розподілення витрати води ГВС за добою.

Для розрахунку витрати тепла на ГВС необхідно враховувати зміну температури вхідної води до теплообмінників по місяцям для заданого кліматичного регіону.

Витрата води на ГВС змінюється впродовж доби, так часи максимального водо розбору припадають на 6.00 - 10.00 годин ранку та 17.00 - 21.00 годин вечора, а часи мінімального водо розбору – на 00.00 – 05.00 (витрата практично дорівнює 0) та 11.00 – 16.00 (коли більшість населення на роботі, навчанні, та ін.). Як було

зазначено вище, в тепловій схемі котельні застосовується бак-акумулятор гарячої води, який використовується для накопичення надлишку гарячої води в часи мінімального водо розбору.

Таким чином, ПРП додатково спалюють в пальниках котлів, а ПД та ОЛ із складів газифікують, а додатково вироблений генераторний газ використовують по мірі необхідності для покриття пікових навантажень в зимовий період згідно діаграми теплового навантаження мікрорайону протягом року. Котельня забезпечує подачу теплої води для опалення (ОП) квартир і гаряче водопостачання (ГВ) всього мікрорайону (рис. 6.22).

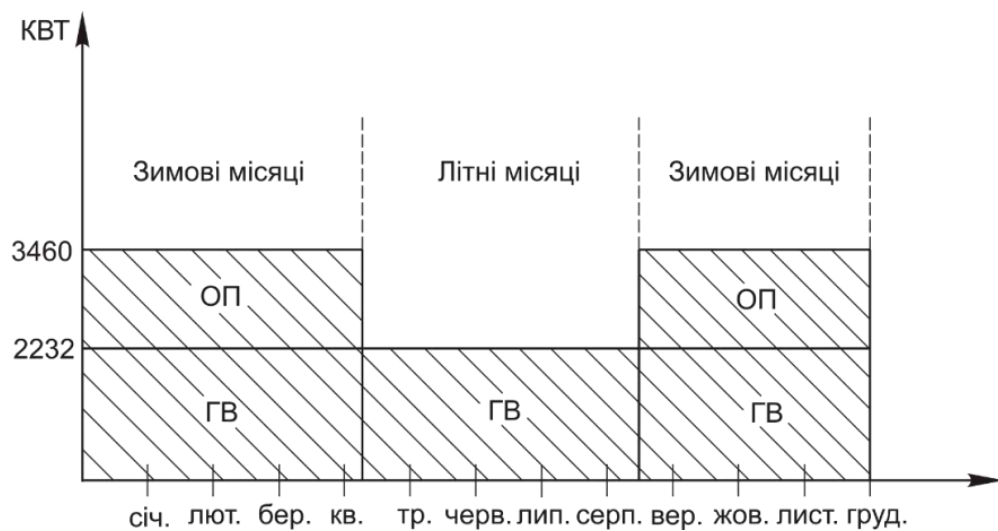


Рисунок 6.22 – Статистична діаграма теплового навантаження мікрорайону по опаленню та гарячому водопостачанню протягом року

Виходячи зі встановлених норм, сумарна потужність теплопостачання і гарячого водопостачання мікрорайону в зимовий період складає близько 3460 кВт, а в літній період складає близько 2232 кВт. Для покриття вказаних потужностей за традиційною схемою необхідно витратити в зимовий час 9276 м<sup>3</sup>/добу, а в літній час 5553 м<sup>3</sup>/добу природного газу,. А оскільки теплотворна здатність генераторного газу в 5 – 7 разів менше в порівнянні з природним газом, то і кількість його для покриття даних потужностей буде відповідно збільшена.

Для енергетичного балансу використовуємо весь річний об'єм накопичених ТБО в даному мікрорайоні, виходячи з денного накопичення 3,2 кілограма ТБО на одну людину, то за рік загальна кількість ТБО мікрорайону складатиме 7000 т/рік,

де сухих відходів 36,2.37,7%, вологих 54,3.56,55%, деревних відходів 6000 т/рік, опалого листя дерев 4000 т/рік, зношених автомобільних шин 7,2 т/рік і ін.

Із середньостатистичних даних з 1 кілограма вологих відходів можна отримати в середньому  $2\text{ м}^3$  генераторного газу. Таким чином, із загальної кількості вологих відходів отримуємо  $77332\text{ м}^3/\text{добу}$  генераторного газу, що в зимовий період в 8,34 рази більше, а в літній в 13,9 рази більше в порівнянні з розрахунковим об'ємом природного газу, а з урахуванням того, що його потрібно в 5 разів більше, то надлишок його складатиме відповідно  $8,34 - 7 = 1,34$  рази і  $13,9 - 7 = 6,9$  рази.

Виходячи з сезонності теплопостачання мікрорайону і алгоритму використання альтернативних видів палива, по даному способу передбачається вироблення необхідного об'єму генераторного газу отриманого з вологих відходів ТБО для гарячого водопостачання, тоді як рідке паливо і частина деревних відходів в літній період накопичується і використовується для покриття пікових теплових навантажень, як в літній, так і в зимовий період.

Таким чином, запропонований спосіб дозволяє в екологічно безпечному і енергозберігаючому режимі повністю утилізувати весь об'єм органічної частини твердих побутових відходів і за рахунок запропонованого способу з алгоритмом використання одержаних альтернативних видів палив забезпечити автономне теплопостачання і гаряче водопостачання даного мікрорайону на протязі року.

Задача, яку вирішує дана схема (рис. 6.23), полягає в удосконаленні способу теплопостачання житлового мікрорайону з використанням власних альтернативних видів палива, одержаних при утилізації органічної частини ТПВ даного мікрорайону (табл. 6.3) шляхом додаткової обробки генераторного газу і легкої рідкої фракції і розробкою оптимального алгоритму використання двох різних альтернативних видів палива, газоподібного і рідкого, в зимовий і літній періоди і за рахунок цього забезпечити теплопостачання і гаряче водопостачання даного мікрорайону.



Таблиця 6.3 – Тверді побутові відходи, які виробляє мікрорайон

Назва ТПВ	Кількість, %
Сухі органічні відходи	36,2..37,7
Вологі органічні відходи	54,3..56,55
Подрібнена деревина	5..7,5
Подрібнені автошини	0,25..0,8
Опале листя	0,5..1,2

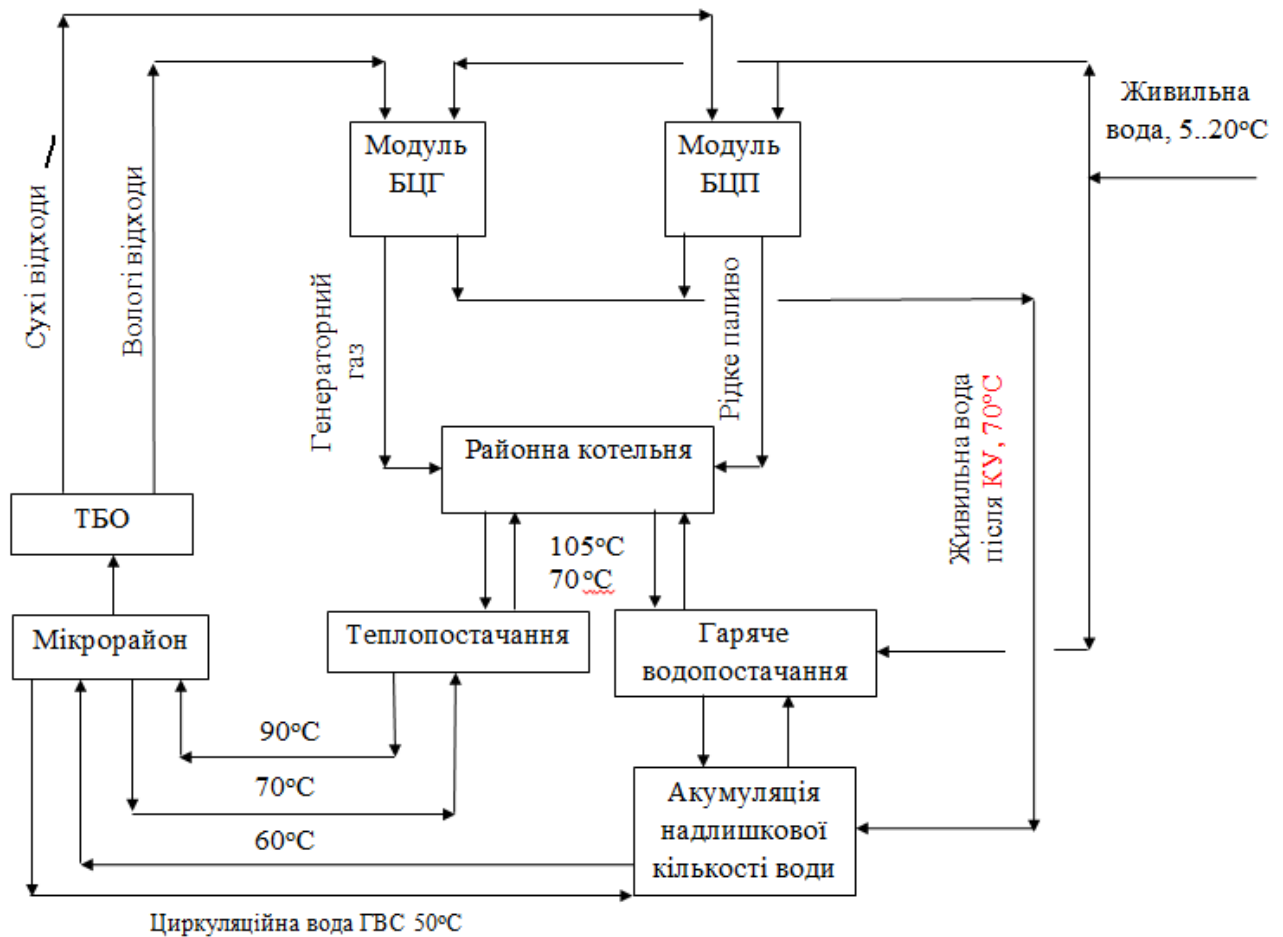


Рисунок 6.23 – Загальна схема системи теплопостачання житлового мікрорайону з котельнею на альтернативному паливі з використанням технології Екопірогенезісу

Районна котельня повинна забезпечувати житловий мікрорайон гарячою водою та теплом для систем опалення. З огляду на вищеописану загальну схему системи тепlopостачання житлового мікрорайону з котельнею на альтернативному паливі з використанням технології Екопірогенезісу, можна запропонувати використання двоконтурної котельні з швидкісним водо підігрівником та баком-акумулятором надлишкової гарячої води. Схема котельні наведена на рис.6.24. Перший контур котельні працює за температурним режимом 105-70°C. Вода з котла поступає на швидкісні теплообмінники системи опалення та ГВС. Теплообмінний апарат системи опалення працює за температурним режимом 90-70°C, а системи ГВС 60-50°C. В системі передбачено підживлення холодною водою з нитки водопроводу після блоку хімводопідготовки для компенсації втрат в системах.

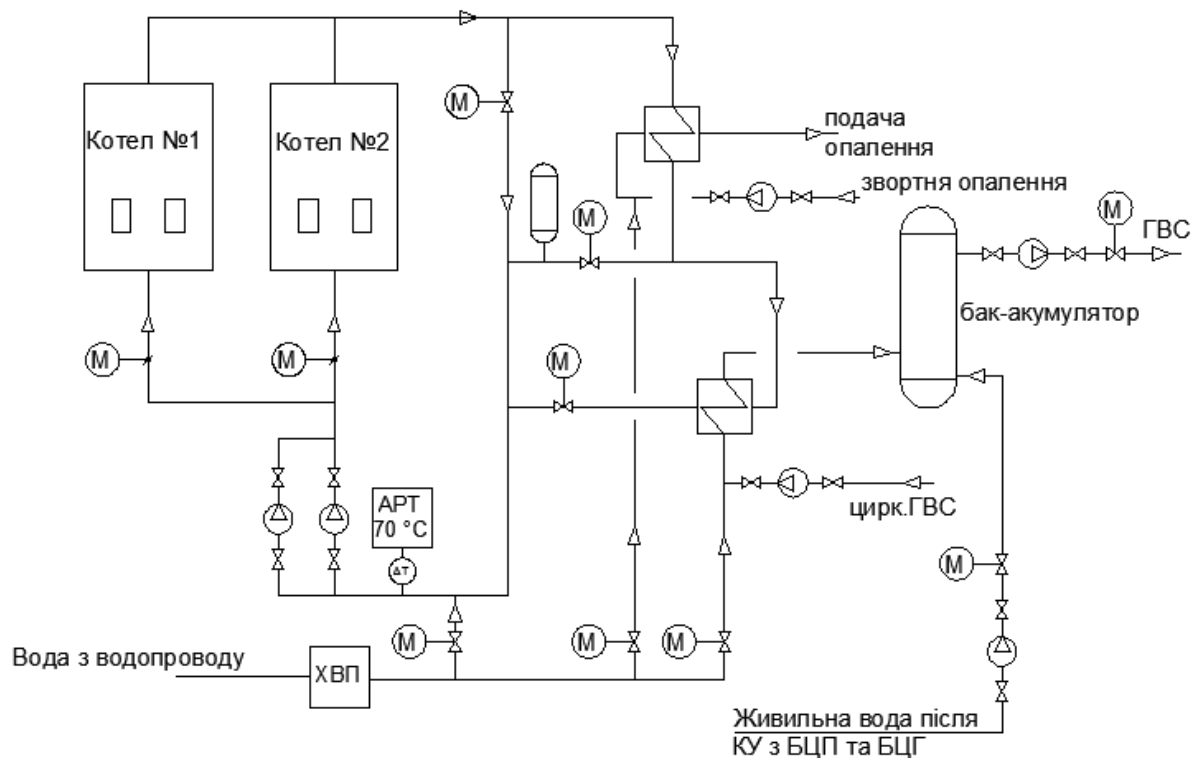


Рисунок 6.24 – Теплова схема двоконтурної котельні на альтернативному паливі з використанням технології Екопірогенезісу

На вході в котел ставиться автоматичне реле температури для регулювання температури на вході в котел, яка не повинна бути менше 70°C. На всіх місцях де необхідно вимірювати тиск встановлені манометричні крани. Для акумуляції надлишкової кількості гарячої води в часи мінімального водорозбору передбачено

встановлення бака-акумулятора.

В системі акумуляції теплоти передбачено надходження додаткової кількості гарячої води з температурою 70°C безпосередньо в бак акумулятор з системи котла-утилізатора в модулях Екопірогенезіса.

Реконструкція діючих котелень шляхом впровадження передового устаткування при повній автоматизації, дозволяє збільшити кількість виробленого тепла з меншими витратами та у більш короткий термін у порівнянні з будівництвом нових котелень та економію енергетичних ресурсів, що у наш час є актуальною проблемою. Практика показує, середній строк окупності інвестицій при переході котелень з традиційного палива на альтернативне – 2-3 роки.

У результаті модернізації, експлуатаційні витрати на виробництво тепла котельні, скорочуються не менш чим на 20%.

Вирішення проблеми утилізації органічних відходів життєдіяльності підприємств і населених пунктів дозволить перетворити органічні відходи в сировинний придаток промисловості, і, на цій основі, постачання на ринки України та зарубіжжя високоліквідних, конкурентно спроможних товарів, таких як:

- горючі гази; рідке паливо (бензин, дизпаливо, котельне паливо);
- технічний вуглець; електроенергія; теплова енергія; сорбенти;
- будівельні матеріали і т.д.

Як показують розрахунки, базуючись на Законі України від 14.01.2000г. «Про альтернативні види рідкого та газового палива», такий підхід дозволить не тільки мінімізувати витрати на утилізацію різних відходів і шкідливих речовин, але і значно поліпшити економічне становище регіону, оздоровити екологічну обстановку і створити нові робочі місця.

## 6.5 Економічні аспекти впровадження екологічно безпечної технології «Екопірогенезіс»

Проект комплексу за технологією «Екопірогенезіс» є фінансово-витратним проектом з терміном окупності більше трьох років.

Управління проектом базується на діалектичній єдності економічних, організаційних і адміністративних методів управління. Більш детальна декомпозиція функцій управління забезпечує побудова організаційної структури (OBS) [7] управління проектом переробки органічних відходів. Основними завданнями управління комплексом за технологією «Екопірогенезіс» є:

1. Пошук стратегічних та тактичних інвесторів, включаючи приплив іноземних інвестицій.
2. Збільшення державних інвестицій і підтримки в розвитку переробки органічних відходів.
3. Підвищення технологічності та довговічності ліній обладнання, їх безпеки і якості кінцевої продукції.
4. Пошук і вдосконалення ринків збуту кінцевої продукції.
5. Розширення зв'язків з сегментами ринку об'єктів утилізації та споживачами кінцевої продукції.
6. Розробка і реалізація ефективних методів прогнозування і планування кількісних і якісних показників проекту.

Економічна оцінка проекту ЕПГ за сировинно–енергетичними аспектами з врахуванням екологічної безпеки:

Економічна привабливість проекту збільшується зі збільшенням кількості сировини, яка утилізується, відповідно збільшується кількість отриманих корисних енергетичних продуктів та знижується строк окупності обладнання.

Для розрахунку економічної ефективності технології ЕПГ і устаткування, розглянемо варіанти енергоємності ТОВ при різній вологості (табл. 6.4), з урахуванням продуктивності обладнання близько 5 т/добу частка рідкого палива й частка синтез газу зазначені в таблиці через ризику.

Для розрахунків було прийнято показники за середнім варіантом.

Наприклад, при добовій продуктивності 24 тонн ТПВ на модульному блоці «БЦП - 24» і 5 тонн відходів на газогенераторі, на виході можна отримати наступні об'єми вихідних продуктів на місяць (30 календарних днів), при переробці 648 тон ТОВ: рідкого палива – 162 тони; синтез газу – 103,68 т (піролізного газу) = 138 240

м<sup>3</sup>; твердого залишку - 151,2 тон; конденсаційної води – 231,12 тон.

Загальні капітальні витрати – 12 578 730 грн.

При вартості вихідних продуктів: рідкого палива – 6 000 грн. за тону; синтез газу – 0,484 грн. за м<sup>3</sup>; вартість утилізації 1-го м<sup>3</sup> ТПВ – 80 грн. можна отримати прибуткову частину на рік: за реалізацію рідкого палива – 11 664 000 грн.; за реалізацію синтез газу (50%) – 1 087 257 грн.; оплата за утилізацію 19 440 м<sup>3</sup> ТПВ – 1 555 200 грн. Разом: 14 306 457 грн.

Таблиця 6.4 Розподіл вихідних продуктів при утилізації за технологією ЕПГ

№ п/п	Вологість ТПВ, %	Частка горючої маси, %	Частка мінеральної речовини, %	Теоретична теплотворність, ккал	Частка рідкого палива %	Частка синтез газу, %
1	52	33	15	1730	8,5/25	24,5/8,0
2	45	41	14	2040	15,0/25	26,0/16,0
3	15	72	13	4040	39,5/25	32,5/47,0

Розрахунок терміну окупності проекту:

Річний прибуток від виробництва  $14\,306\,457 - 3\,680\,689 = 10\,625\,768$  грн.

Прибуток без ПДВ  $10\,625\,768 : 1,2 = 8\,854\,806$  грн.

Податок на прибуток  $8\,854\,806 \times 0,25 = 2\,213\,701$  грн.

Чистий прибуток, що залишається в розпорядженні підприємства  $8\,854\,806 - 2\,213\,701 = 6\,641\,105$  грн.

Термін окупності проекту становить  $12\,578\,730 : 6\,641\,105 = 1,9$  роки.

Загальна вартість установок циклічної дії від 350 000 до 15 500 000 грн. за технологіями БЦП та двостадійної газифікації, а вартість заводів неперервної дії з можливістю встановлення лінії сортування ТПВ за технологією ЕПГ від 7 000 000 грн.

Зроблені виміри та розрахунки основних показників екологічної безпеки технології ЕПГ і зрівняні із ПДВ по конкретних викидах показали, що всі показники вихідних продуктів і технологічних викидів відповідають екологічним нормам

європейських країн.

Економічна виправданість розроблених схем має високий рівень за рахунок доходів від продажу отриманих альтернативних палив, економії природного палива та заміні його на синтез-газ та енергетичну рідину ЕПГ [8]. Розроблені проекти мають можливість використання в технологічній лінії газотурбінної та дизельної електростанцій при роботі їх на рідкому паливі одержуваному за технологією БЦП або ЕПГ з відходів полімерних матеріалів, з додатковими доходами від продажу теплової та електричної енергії.

Імплементация проекту матиме ряд позитивних соціально-економічних наслідків для України та Південного регіону: матиме демонстративний ефект, тому що для України впровадження високопродуктивних установок для утилізації ТПВ буде виконуватись вперше; призведе до покращення екологічного клімату в регіоні, збільшить відрахування до бюджетів всіх рівнів, у тому числі для соціальних потреб; пожвавить економічну діяльність шляхом залучення місцевих конструкторів, інженерів, підрядників та виробників для імплементации проекту; покращить загальну ефективність щодо переробки вторинних ресурсів та, таким чином, поліпшить становище споріднених підприємств на цьому ринку; матиме позитивний вплив на збереження робочих місць працівників, безпосередньо чи опосередковано залежних від діяльності споріднених підприємств.

6.6 Оцінка екологічно орієнтованих управлінських рішень проектів підприємств з утилізації ТПВ за технологією «Екопірігенезіс» шляхом визначення можливих інноваційних та економічних ризиків

Перш за все в проектах за технологією «Екопірігенезіс» використовуються нові ідеї, наукові теорії та концепції. Цей ресурс має істотну специфіку, пов'язану з тим, що використання результатів наукових досліджень в якості ресурсу вимагає використання спеціальних методів і процедур, що дозволяють ефективно застосовувати досягнення науки і техніки при реалізації наукомістких проектів. Такі підприємства найбільш уразливі, так як ця сфера відрізняється високою вартістю і

тривалістю науково-дослідних та дослідницько-конструкторських робіт (НДДКР), використанням дорогого устаткування, великою тривалістю виробничого циклу, залежністю від співвиконавців і постачальників, необхідністю і високою вартістю захисту інтелектуальної власності та складністю прогнозу ринку.

Експлуатація такого підприємства пов'язана з ймовірністю виникнення небезпечних ситуацій різного характеру, тому актуальною задачею є оцінка рівнів небезпек на всіх етапах процесу управління з метою забезпечення надійної, безпечної роботи та управління всього підприємства в цілому.

Важливою складовою визначення ризиків підприємств з утилізації ТПВ за технологією ЕПГ, є співпраця з гілками системи поводження з відходами (зі стейкхолдерами), а саме: підприємствами зі збору та транспортування відходів; полігонами ТПВ; підприємствами з прибирання вулиць та обслуговування парків; з населенням та підприємствами, постачальниками сировини (тобто відходів); підприємствами-споживачами продукції; державними органами, які здійснюють контролюючу, природоохоронну функції, екологічний моніторинг, облік впливів та іншими.

В ході аналізу ризиків важливим є вивчення природи ризику з врахуванням впливу кожної складової та детальним змістовним описом типу ризику.

На першому етапі проведемо попередній аналіз факторів, що призводять до неефективного управління підприємства з утилізації ТПВ за технологією ЕПГ з використанням методу причинно-наслідкової діаграми Ісікави (рис. 6.25) [29].

Ідентифікація ризику не є однократною подією, вона має здійснюватися на постійній основі протягом усього процесу підготовки, виконання робіт у рамках проектів, а також на етапі реалізації кінцевої продукції підприємством.

На основі особливостей підприємств з утилізації відходів за технологією ЕПГ [24-26], специфіки управління їх проектами [3] і, виходячи з класифікацій ризиків представлених в [1, 4, 28] та розробленої попередньо Діаграми Ісікави «Причини неефективного управління підприємств з переробки ТПВ за технологією ЕПГ (рис. 6.26), можна ідентифіковані наступні групи ризиків (таблиця 6.5).

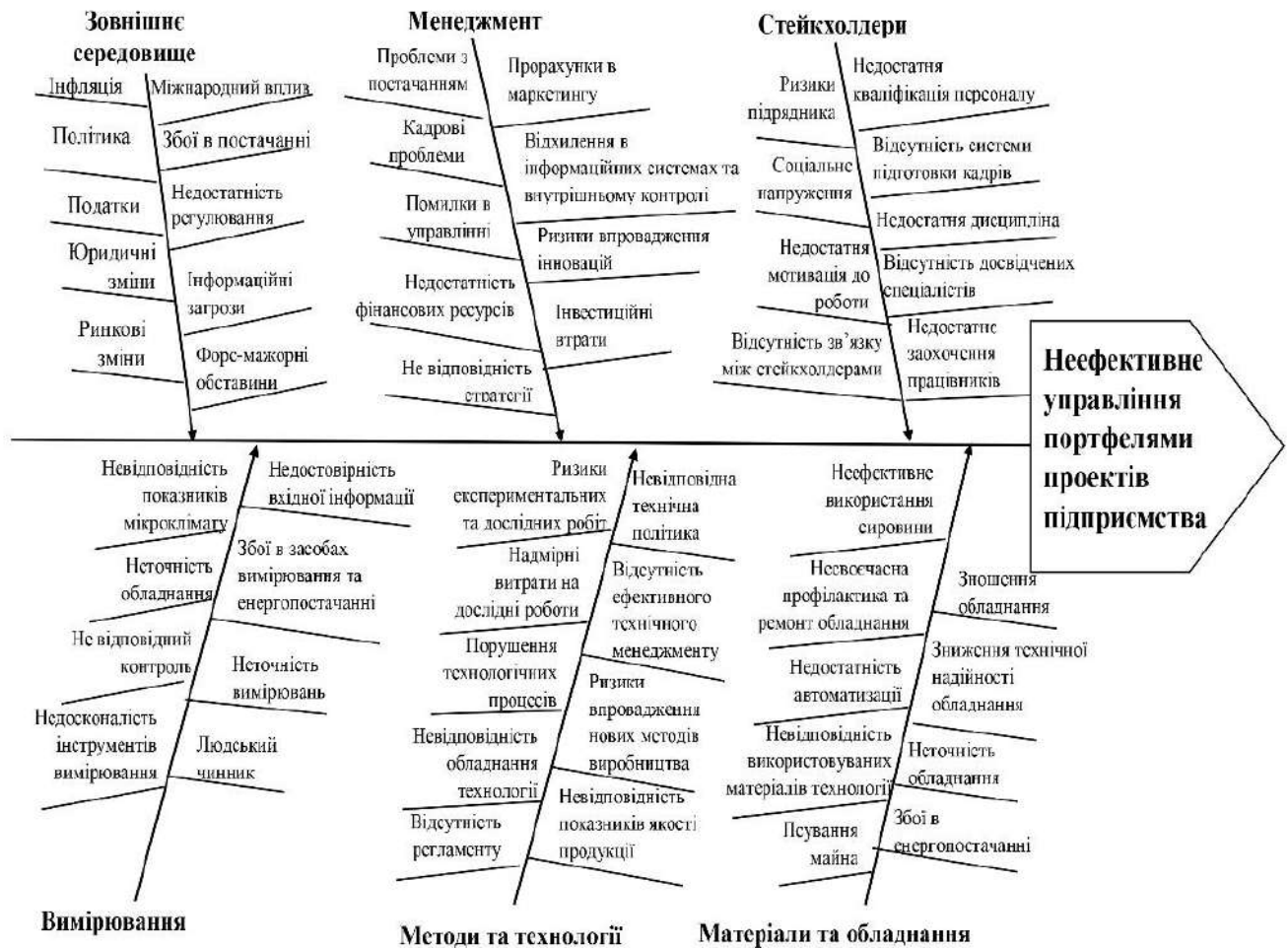


Рисунок 6.25 – Діаграма Ісікави «Причини неефективного управління підприємства з утилізації ТПВ за технологією «Екопірогенезіс»

Таблиця 6.5 - Групи ризиків підприємства з утилізації ТПВ за технологією «Екопірогенезіс»

№ п/п	Групи ризиків	Складові та характеристики груп ризиків
<b>Зовнішні ризики</b>		
1.	Ринкові ризики	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ризик недоотримання розрахункових прибутків через завищення проектної потужності комплексу, зміни кон'юнктури ринку та цін на паливо,</li> <li>2. ризик змін вартісного капіталу;</li> <li>3. ризики викликані коливаннями цін в конкурентних секторах ринку, ліквідністю, кореляцією, в тому числі: ризики, пов'язаний з</li> </ol>



		<p>невідповідністю пропозиції нових товарів і послуг платоспроможного попиту;</p> <p>4. ризики, пов'язані з низькими тарифами і витратами, тобто можливістю покриття за допомогою платоспроможного попиту витрат з виробництва, розподілу і реалізації енергії або інших товарів чи послуг;</p> <p>5. ризики, пов'язані з ростом цін на сировину, тобто відходи, та транспортні послуги; ризики, пов'язаний з реалізацією товару, тобто альтернативного палива та вторинної сировини на експорт;</p> <p>6. великий період окупності;</p> <p>7. високий рівень капіталізації інвестицій.</p>
8.	Інформаційні ризики	<p>1. Ризики пов'язані із фінансовим шахрайством, промисловим шпionaжем, що є дуже важливим для наукомістких інноваційних підприємств,</p> <p>2. розголошенням конфіденційної інформації,</p> <p>3. похибками в програмному забезпеченні,</p> <p>4. комп'ютерними вірусами.</p>
9.	Інфляційні ризики	<p>1. Характеризуються можливістю знецінення реальної вартості ПП НП в умовах інфляції,</p> <p>2. валютні ризики, що пов'язані з розширенням сфери зовнішньо-економічної діяльності, які в сучасних умовах носять постійний характер і супроводжують практично всі фінансові операції.</p>
10.	Податкові ризики	<p>1. Ймовірність введення нових видів податків і зборів на здійснення окремих видів діяльності в сфері управління відходами;</p> <p>2. можливість збільшення рівня ставок чинних податків і зборів;</p> <p>3. зміна строків і умов здійснення окремих податкових платежів;</p> <p>4. ймовірність скасування чинних податкових пільг у сфері</p>

		діяльності підприємства.
11.	Політичні ризики	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Політична нестабільність,</li> <li>2. нестабільність законодавчої бази,</li> <li>3. можливі помилкові рішеннями з питань реформування та розвитку сміттєпереробної галузі,</li> <li>4. лібералізації енергетичного ринку для введення продукції;</li> <li>5. зміна митної політики, внаслідок вимушених простоїв у роботі, наприклад постачання оригінального обладнання або запчастин;</li> <li>6. непостачання палива;</li> <li>7. ризики через страйки та інше.</li> <li>8. Низький рівень державної підтримки.</li> <li>9. Органи державної влади можуть вимагати додаткових платежів або затягувати узгодження ключових рішень.</li> <li>10. Представники природних монополій можуть вимагати додаткових платежів або затягувати узгодження як на етапі отримання технічних умов, так і при введенні в експлуатацію підприємства.</li> </ol>
12.	Ризики підрядника	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пов'язані з можливістю виникнення проблем під час виконання робіт та послуг, що надаються зі сторони – затягування строків проектування або похибки в проекті.</li> <li>2. Завищені ціни на землю власниками земельних ділянок та органами державної влади.</li> <li>3. Різке збільшення строків підключення комунікацій та витрат на створення відповідної інфраструктури.</li> </ol>
13.	Ризики постачання	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пов'язані з можливістю виникнення проблем під час постачання сировини та товарів, що закуповуються зі сторони;</li> <li>2. ризики, що стосуються питань своєчасності термінів оплати;</li> <li>3. банкрутство постачальників, що спричиняють затримки з постачанням, недотримання гарантій та страхових зобов'язань</li> </ol>

		<p>тощо.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. Ризики, пов'язані з віддаленістю від транспортних вузлів, що веде до підвищення транспортних та експлуатаційних витрат;</li> <li>5. ризики, пов'язані з віддаленістю від інженерних споруд.</li> <li>6. Додаткові витрати на підключення електроенергії, води та системи водовідведення.</li> <li>7. Ризики, пов'язані з віддаленістю підрядних організацій, в результаті підвищення вартості підрядних робіт.</li> </ol>
14.	Регульовані ризики	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ризики тарифного регулювання (це самі погані та значущі ризики при поводженні з відходами),</li> <li>2. регулювання в області безпеки (зміна законодавства та нормативних документів в сфері провадження з ТПВ),</li> <li>3. ризики антимонопольного регулювання,</li> <li>4. ризики екологічного регулювання,</li> <li>5. ризики недотримання стандартів,</li> <li>6. правил роботи на ринках,</li> <li>7. раптові зміни галузевої політики або норм регулювання (наприклад, припинення або скорочення державної підтримки) та ін.</li> </ol>
15.	Міжнародні ризики	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Можливі ризики, пов'язані з діяльністю міжнародних корпорацій,</li> <li>2. доступ до фінансових, трудових ринків і ринків сировини та продукції.</li> </ol>
16.	Юридичний ризик	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Проявляються у вигляді внесення змін до чинного законодавства України стосовно наукової, науково-технічної діяльності та роботи наукомісткого підприємства,</li> <li>2. правові ризики, пов'язані з можливими негативними наслідками для наукомісткого підприємства щодо прийняття ними неправомірних юридичних актів;</li> <li>3. забруднення навколишнього середовища і заподіяння шкоди</li> </ol>

		<p>майну третіх осіб;</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. недотримання договору поставок;</li> <li>5. розірвання договору з орендарем;</li> <li>6. шкоду, заподіяну життю та здоров'ю працівників компанії, забудовників і т. д.</li> </ol>
17.	Соціальні ризики	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ризик негативного ставлення постачальників сировини, тобто населення, споживачів продукції у зв'язку з підвищенням ціни на продукцію та розміщення об'єкту;</li> <li>2. зменшення соціальних виплат та захищеності працівників і населення, непопулярність професії у сфері поводження з відходами.</li> </ol>
18.	Форс-мажорні ризики	Ризики, як результат пожежі, стихійних лих, пошкодження продукції при транспортуванні та інше.
<b>Внутрішні ризики</b>		
19.	Кадрові ризики	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пов'язані з виникненням організаційних проблем під час формування команди проекту, а також в процесі виконання робіт проекту.</li> <li>2. Низький рівень кваліфікації працівників, низький іміджевий рівень робочих посад.</li> <li>3. Труднощі з набором кваліфікованої робочої сили: недостатній рівень заробітної плати, непопулярність професії.</li> </ol>
20.	Ризики управління	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пов'язані з помилками планування проекту, із невизначеністю та недостатнім обсягом інформації про джерела фінансування проектів, помилками в управлінні ПП;</li> <li>2. ризики, що стосуються бізнес-адміністрування, операційної, комерційної політики підприємства, системи управління проектом,</li> <li>3. ризики незадоволеності клієнта, пов'язані з недостатнім розумінням вимог клієнта, методів впровадження проекту, технічними можливостями тощо.</li> </ol>

		<p>4. Заплутані шляхи проходження документації, помилки маркетингу, недоліки внутрішнього контролю.</p> <p>5. Несвоєчасне реагування на виявлені ризики та зменшення їх наслідків.</p> <p>6. Проблеми системи внутрішнього контролю, погано розроблені правила робіт;</p> <p>7. відсутність або низька якість регламентів передачі управлінських впливів, розподіл повноважень і відповідальність;</p> <p>8. низька якість збору, обліку, обміну інформацією;</p> <p>9. недостатня якість документообігу.</p>
21.	Фінансові ризики	<p>1. Пов'язані із недостатнім загальним обсягом фінансових ресурсів, що необхідні для реалізації ПП, тобто інвестицій;</p> <p>2. несвоєчасним надходженням фінансових ресурсів із окремих джерел;</p> <p>3. недосконалістю структури джерел формування позикових фінансових коштів;</p> <p>4. ризики невиконання фінансових зобов'язань;</p> <p>5. ризики боргових зобов'язань, фінансування та інвестицій,</p> <p>6. ризики неповернення кредиту,</p> <p>7. ризики зміни купівельної спроможності грошей і т. д.</p>
22.	Стратегічні ризики	<p>1. Пов'язані з розробкою та впровадженням хибних бізнес-рішень, нездатністю управлінського апарату приймати правильні рішення з урахуванням змін зовнішніх факторів.</p> <p>2. Нелогічний розподіл відповідальності.</p>
23.	Інноваційні ризики	<p>1. Ризики впровадження інновацій, використання передових та інноваційних технологій випуску кінцевої продукції;</p> <p>2. Ризики втрати володіння правом на використання у власному виробництві перспективних розробок та можливості передачі стороннім організаціям їх результатів;</p> <p>3. Ризики частотої зміни асортименту, у зв'язку з невідповідністю</p>

		<p>ринковим умовам і вимогам;</p> <p>4. Нестабільність економічної кон'юнктури (фінансові втрати через зміну ціни товару, зниження або відсутність попиту на продукцію та ін.);</p> <p>5. Ризики пов'язані з системою планування і проектування інноваційної діяльності та випуску продукту (невірно задані (завищені або занижені) планові показники і проектні величини можуть згодом привести до дефіциту фінансових ресурсів при вичерпанні лімітів кредитоспроможності, до недофінансування діяльності, побудованої на фінансових потоках від інноваційного проекту, до кредитного ризику позичальника і кредитора);</p> <p>6. Конкурентним фактором (випередження конкурентами в просуванні нового продукту на ринок, втрата конкурентних переваг та ін.);</p> <p>7. Невизначеність в частині реалізації всього циклу наукових розробок - від початкової ідеї до готового продукту, що має потенційну ринкову привабливість, і формування попиту на нього.</p>
24.	Наукові ризики	<p>1. Ризики експериментальних і дослідних робіт;</p> <p>2. ризики недостатності висококваліфікованих науково-технічних кадрів виробничих і науково-технічних спеціальностей;</p> <p>3. ризики застосування, освоєння та використання результатів науково-технічного прогресу;</p> <p>4. ризики витрат на НДДКР у структурі собівартості.</p>
25.	Виробничі ризики	<p>1. Ризики неефективного використання сировини, тобто ТПВ, зростання їх собівартості, впровадження нових методів та засобів виробництва;</p> <p>2. ризики постачання (відсутність можливостей знайти постачальника необхідного для виробництва обладнання, постачальника з вигідними для виробництва цінами, відмова постачальників від укладених контрактів, збільшення строків</p>

		<p>організації закупівель, порушення планових строків, нестабільність виробництва);</p> <p>3. ризики в процесі розробки стратегії сміттєпереробного підприємства та галузі, поєднаної з ним;</p> <p>4. ризики порушень планових строків (недотримання запланованого графіка витрат;</p> <p>5. недотримання наміченого графіка доходів);</p> <p>6. ризики невідповідності показників якості продукції, недовантажень обладнання;</p> <p>7. транспортні ризики, які пов'язані з імовірністю втрат або пошкоджень необхідного вантажу під час перевезення різними видами транспорту;</p> <p>8. Ризики, пов'язані зі станом і використанням:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- засобів праці (устаткування, нематеріальних активів та ін.);</li> <li>- предметів праці (запасів сировини, матеріалів, готової продукції, витрат у незавершеному виробництві, витрат майбутніх періодів);</li> <li>- праці (використовуваної робочої сили з точки зору кваліфікації, плинності, дотримання трудової дисципліни, розкрадання, недбалості, мотивації та ін.);</li> <li>- капіталу (власного, позикового, оборотного);</li> <li>- підприємницьких здібностей;</li> <li>- інформації;</li> <li>- особливостями технологічного циклу.</li> </ul>
26.	Технологічні ризики	<p>1. Непередбачені та непрораховані збої в роботі наукомісткого сміттєпереробного підприємства,</p> <p>2. порушення технологічних процесів;</p> <p>3. несвоєчасна профілактика та ремонт обладнання;</p> <p>4. втрати в результаті збоїв та поломок, псування майна;</p> <p>5. внаслідок зміни кон'юнктури ринку.</p>
27.	Маркети	<p>1. Виникають внаслідок неправильного вибору ринку збуту</p>

	нгові ризики	<p>продукції (альтернативного палива та вторсировини);</p> <p>2. порушень в розрахунках обсягу ринку та ін.</p>
28.	Операційні ризики	<p>1. Виникають за рахунок відхилень в інформаційних системах та системах внутрішнього контролю, що ведуть до фінансових втрат;</p> <p>2. ризики, що пов'язані з людським фактором;</p> <p>3. наявність недостатньої системи контролю;</p> <p>4. не відповідність якості товарів і послуг, що поставляються на ринки.</p>
29.	Технічні ризики	<p>1. Визначаються ступенем організації виробництва (наявності на підприємстві відповідної технічної політики та висококваліфікованого технічного менеджменту);</p> <p>2. проведенням попереджувальних заходів, пов'язаних з: експлуатацією новітнього оригінального обладнання, будівельно-монтажними роботами, перервами подачі енергії споживання, зниженням технічної надійності техніки, електро- та тепло-споживання;</p> <p>3. ризики внаслідок негативних результатів науково-дослідних робіт; в результаті недосягнення запланованих технічних параметрів у ході конструкторських та технологічних розробок;</p> <p>4. внаслідок виникнення побічних або відтермінованих за часом проблем у процесі використання новітніх технологій; внаслідок низьких технологічних можливостей виробництва, що не дає можливості впроваджувати результати нових розробок в ПП наукомісткого підприємства.</p>
30.	Інвестиційні ризики	<p>1. Недоотримання інвестиційних ресурсів для реалізації проекту, імовірність виникнення фінансових втрат при здійсненні інвестиційної діяльності підприємства;</p> <p>2. ризики проектного фінансування;</p>



		<p>3. ризики незавершеності проекту, що є дуже важливим для сміттєпереробних підприємств;</p> <p>4. ризики недоотримання ресурсів для забезпеченості рентабельності проекту;</p> <p>5. ризики технічних ускладнень при конструюванні та виявленні дефектів у ході операційної діяльності;</p> <p>6. ризики у прогнозі постачання сировини та споживання продукції, у виборі стандартного обладнання та джерел фінансування і т. д.</p>
--	--	--

На сьогодні, для сміттєпереробного підприємства, адміністративні чинники мають серйозні впливи, насамперед, це існуюча узгодженість дій муніципальних, обласних, державних структур, які здійснюють контроль, нагляд і регламентацію діяльності підприємств - учасників ринку поводження з відходами. Подібна неузгодженість призводить до «подвійного контролю», перешкоджає господарської діяльності учасників ринку. Крім того, відсутній нормативний механізм «абсолютної прозорості» утворення і руху відходів в циклі збору, переробки та отримання вторинного продукту з цих відходів, виникнення регіональних і муніципальних протекціоністських заходів, спрямованих на збереження існуючої системи поводження з відходами.

Джерелом виникнення нових ризиків може бути імовірність зіткнення інтересів стейкхолдерів (конструкторів, менеджерів, робітників, зайнятих виробництвом, постачальників, споживачів продукції різних груп та категорій) в процесі прийняття рішень.

Доповнюються ризики непрозорим контролем за дотриманням санітарно-екологічного законодавства й не забезпеченням відповідальності порушників, існуванням додаткових, дублюючих функцій і повноважень різних відомств, що перетинаються, та в кінцевому результаті, призводять до непрозорості системи управління і контролю поводження з відходами та ускладнення ведення бізнесу в цій галузі.

Заходи адміністративного впливу на порушників екологічного законодавства недостатні: низькі розміри штрафів та слабкий контроль поліції не здатні серйозно впливати на ситуацію і вчасно виявляти порушників, витіки шкідливих речовин, контролювати очисне обладнання підприємств, застосовувати серйозні санкції до порушників.

Важливим соціальним питанням є виникнення протестних настроїв жителів тих територій, на яких передбачається будівництво нового підприємства з утилізації ТПВ. Крім того, на підприємствах по сортуванню і транспортуванню відходів для значної частини робочих місць і спеціальностей потрібно низько кваліфікована робоча сила. Ці робочі місця не є престижними для місцевого населення, але поява іноземної робочої сили в період безробіття створить додаткову соціальну напругу. Причому слід враховувати, що при реалізації підприємства з утилізації ТПВ протестні настрої в суспільстві будуть тільки посилюватися незалежно від місця їх дислокації.

Прояв зазначених ризиків призводить до порушення строків реалізації будівництва, перевитрат коштів, невиконання вимог до кінцевого результату, погіршення якості проекту, продуктів і послуг, що в свою чергу призводить до зменшення прибутку, а нерідко й до великих збитків. Протягом життєвого циклу проектів необхідно постійно проводити переоцінку ризиків та підвищувати ефективність управління, зосередивши зусилля на ризиках, що мають найвищий пріоритет.

Під час якісної оцінки ризиків визначались пріоритети ідентифікованих ризиків на підставі ймовірності їх виникнення та впливу на досягнення цілей методом експертних оцінок. До експертної групи були запрошені фахівці та топ-менеджери підприємств зі збору та переробки ТПВ.

Зведені результати якісної оцінки ризиків представлено у таблиці 6.6.

За результатами якісної оцінки ризиків можна зробити висновок, що для зовнішніх ризиків 7-12 та внутрішнього 24 на цьому етапі дослідження можна було б припинити дослідження.

Таблиця 6.6 - Якісна оцінка груп ризиків підприємств з утилізації ТПВ за технологією ЕПГ

№ п/п	Групи ризиків	Ранг ризику	Вплив на реалізацію проекту		
			Якість	Час	Вартість
<b>Зовнішні ризики</b>					
1.	Інфляційні ризики	високий		+	+
2.	Ризики підрядника	середній	+	+	+
3.	Соціальні ризики	середній	+		
4.	Інформаційні ризики	середній	+	+	+
5.	Ринкові ризики	середній	+	+	+
6.	Ризики постачання	середній	+	+	+
7.	Політичні ризики	низький		+	+
8.	Регульовані ризики	низький	+		+
9.	Податкові ризики	низький			+
10.	Міжнародні ризики	низький			+
11.	Юридичний ризик	низький			+
12.	Форс-мажорні ризики	низький		+	+
<b>Внутрішні ризики</b>					
13.	Фінансові ризики	високий		+	+
14.	Технологічні ризики	високий	+	+	+
15.	Технічні ризики	високий	+	+	+
16.	Виробничі ризики	середній	+	+	+
17.	Інвестиційні ризики	середній		+	+
18.	Кадрові ризики	середній	+	+	+
19.	Ризики управління	середній		+	
20.	Інноваційні ризики	середній	+	+	+
21.	Стратегічні ризики	середній	+	+	+
22.	Наукові ризики	середній	+		+
23.	Маркетингові ризики	середній	+	+	+
24.	Операційні ризики	низький	+	+	+

Результати проведеної за допомогою статистичного методу кількісної оцінки ризиків виходячи з опитувань-анкетувань фахівців експертів представлено на рис. 6.26.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2													
3	<b>Зовнішні ризики портфелів проектів наукомістких підприємств з утилізації відходів за технологією "Екопірогенезис"</b>												
4		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	Експерти	Ринкові	Інформаційні	Інфляційні	Податкові	Політичні	Підприємства	Постачання	Регульовані	Міжнародні	Юридичні	Соціальні	Форс-мажорні
6	Експерт 1	0,3	0,2	0,65	0,2	0,15	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,6	0,1
7	Експерт 2	0,2	0,3	0,7	0,3	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,5	0,15
8	Експерт 3	0,3	0,3	0,7	0,1	0,2	0,45	0,35	0,15	0,2	0,1	0,6	0,1
9	Експерт 4	0,3	0,3	0,7	0,2	0,2	0,5	0,4	0,1	0,15	0,15	0,55	0,1
10	<b>Показники:</b>												
11	Середнє арифметичне	0,275	0,275	0,6875	0,2	0,2125	0,4625	0,3375	0,1375	0,1625	0,1125	0,5625	0,1125
12	Середнє відх <sup>2</sup>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13		0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14		0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	Gz <sup>2</sup>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	Gz	0,05	0,05	0,03	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,05	0,03
18	Коефіцієнт варіації	0,18	0,18	0,04	0,41	0,30	0,10	0,14	0,35	0,29	0,22	0,09	0,22
19	<small>(однорідні оцінки з коефіцієнтом варіації &lt; 0,33)</small>												
20													

Рис. 6.26 – Експертне оцінювання зовнішніх ризиків підприємства з утилізації ТПВ за технологією ЕПГ та його оцінка

Виходячи з досліджень практики експлуатації підприємств з утилізації ТПВ, досліджень експертних оцінок фахівців, щодо реалізації та впровадження проекту «Екопірогенезис», отримано інформацію про усереднену імовірність виникнення ризиків та вплив їх (усереднений показник) на реалізацію проекту, які наведені в таблиці 6.7.




Оцінка важливості ризиків, тобто пріоритетності для обробки здійснюється за допомогою матриці імовірності (дані таблиці 2 перенесено до матриці ймовірностей) (таблиця 6.8).

Таблиця 6.7 - Кількісна оцінка ризиків підприємства з утилізації ТПВ за технологією «Екопірогенезис»

№ п/п	Найменування групи ризиків	Усереднена імовірність виникнення (0 ÷ 1)	Усереднений вплив на реалізацію проекту (0 ÷ 1)
<b>Зовнішні ризики</b>			
1.	Ринкові ризики	0,3	0,5
2.	Інформаційні ризики	0,3	0,4
3.	Інфляційні ризики	0,7	0,65
4.	Податкові ризики	0,2	0,5
5.	Політичні ризики	0,2	0,4
6.	Ризики підрядника	0,5	0,6
7.	Ризики постачання	0,3	0,4
8.	Регульовані ризики	0,1	0,2
9.	Міжнародні ризики	0,2	0,3
10.	Юридичний ризик	0,1	0,2
11.	Соціальні ризики	0,6	0,6
12.	Форс-мажорні ризики	0,1	0,2
<b>Внутрішні ризики</b>			
13.	Технологічні ризики	0,85	0,9
14.	Технічні ризики	0,7	0,75
15.	Інвестиційні ризики	0,65	0,7
16.	Виробничі ризики	0,6	0,65
17.	Фінансові ризики	0,8	0,95
18.	Інноваційні ризики	0,45	0,7
19.	Маркетингові ризики	0,45	0,5
20.	Ризики управління	0,5	0,7
21.	Кадрові ризики	0,45	0,8
22.	Операційні ризики	0,25	0,3
23.	Наукові ризики	0,3	0,5
24.	Стратегічні ризики	0,3	0,5

Таблиця 6.8 - Матриця ймовірностей виникнення ризиків підприємств з утилізації ТПВ за технологією «Екопірогенезіс»

Імовірність	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
0,8 ÷ 1,0					13, 17
0,6 ÷ 0,8			3, 16	14, 15	
0,4 ÷ 0,6			6, 11, 19	18, 20, 21	
0,2 ÷ 0,4		2, 7, 9, 22	1, 23, 24		
0,0 ÷ 0,2	8, 10, 12	5	4		

де  – зона високих ризиків;  
 – зона помірних ризиків;  
 – зона низьких ризиків.

Згідно даних таблиці 6.8, видно, до яких типів ризиків можна віднести ризики підприємства з утилізації ТПВ за технологією «Екопірогенезіс»:

- високі ризики – 13, 14, 15, 17, 18, 20, 21;
- помірні ризики – 1, 3, 6, 11, 16, 19, 23, 24;
- низькі ризики – 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 22.

Отже, до високих ризиків відносяться: технологічні, технічні, інвестиційні, фінансові, інноваційні, ризики управління та кадрові ризики, які потребують обов'язкового планування реагування на них, тоді як низькі можна прийняти.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 6

1. Проведено формалізацію основних задач автоматичного керування та контролю узагальненого технологічного комплексу утилізації цілих зношених АШ. Визначено, що застосування автоматики з запропонованою функціональною структурою дає змогу повністю автоматизувати процеси контролю і керування технологічними комплексами утилізації, що, дозволяє суттєво підвищити

ефективність роботи та економічні показники даних комплексів.

2. Розроблена нова технологія ЕПГ і нестандартне обладнання для неї. Виходячи із представлених вимог, розроблена структурна блок–схема комплексу за безвідхідною технологією утилізації ТПВ. Запропонована технологія ЕПГ об'єднує сукупність процесів властивих багатоконтурному циркуляційному піролізу (БЦП) і процесів багатоконтурної двозонної газифікації (БЦДГ) органічних відходів наявних в даному мікрорайоні. Зазначені процеси супроводжуються формуванням внутрішніх перетворень при глибокому термічному розкладанні проміжних токсичних речовин з одержанням екологічно безпечних вихідних продуктів (піролізного газу, генераторного газу, рідкого палива легких фракцій при мінімальному обсязі твердого залишку, який можна піддати безпечному захороненню на смітнику за традиційною схемою). Основні блоки та вузли нестандартного устаткування, що входить в дану технологічну схему випробувані у вигляді експериментальних установок.

5. Визначено, що ринки збуту альтернативного палива не розвинені через нестійкі умови виробництва, що є причиною складності прогнозування майбутніх сценаріїв попиту і пропозиції

6. Визначено, що проблемами проекту «Екопірогенезіс» вважаються відсутність в країні досвіду впровадження проектів такого роду, нерозвиненість законодавчої бази, недостатньо чітке формулювання правил функціонування ринку альтернативного палива і характеристик якості палива.

7. Запропоновано ввести всебічну фінансову підтримку проекту «Екопірогенезіс», пільговий режим оподаткування, розробити і удосконалити нормативи і стандарти якості даного виду палива на державному рівні. Наголошено на необхідності в проведенні подальших досліджень, пов'язаних з перевагами переходу на альтернативне паливо.

9. За результатами дослідження визначено об'єкти моніторингу для реалізації проекту «Екопірогенезіс». Запропоновано організаційну схему проекту і схема організації контролю якості проектом.

10. Проаналізовано ризикові події, ідентифіковано ризики та проведена їх

таксономія, на основі якої сформовано їх до 24 груп. Досліджено практику експлуатації підприємств з утилізації ТПВ та встановлено яким чином групи ризиків можуть ускладнювати процес управління цими проектами в цілому. На основі методу експертних оцінок, проведено якісний аналіз груп ризиків, встановлено ранги ризиків, їх вплив на час, вартість та якість реалізації проекту.

Результати, викладені у розділі 6, опубліковані у роботах [90, 121, 125, 135, 143, 200, 203, 209, 218, 232, 233, 235, 236, 238, 253 – 255, 264 – 266].



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій наведено розв'язання актуальної наукової проблеми розвитку наукових основ екологічно прийнятної піролізної технології утилізації твердих органічних відходів мінімізації шкідливого впливу на довкілля, що враховує особливості термічної деструкції відходів з одержанням товарної продукції. При цьому було одержано результати, які наведено нижче:

1. За результатами аналізу сучасного стану нормативних та статистичних матеріалів з питань поводження з твердими органічними відходами встановлені небезпечні обсяги їх утворення, шкідливі наслідки для всіх компонентів довкілля й здоров'я населення від функціонування об'єктів накопичення та утилізації відходів (у тому числі процесів та умов здійснення їх термічної утилізації).

2. Визначено поняття «екологічно прийняттого піролізного процесу» - як процес утилізації твердих органічних відходів методом циркуляційного піролізу, під час проведення якого та при використанні його кінцевого продукту, небезпечні речовини не потрапляють в атмосферне повітря, ґрунти та водні об'єкти та не накопичуються в них у концентраціях, що призводять до деградації довкілля та погіршення здоров'я людей.

3. При проведенні аналізу термодинамічної ймовірності проходження реакцій деструкції отримано значення вільної енергії Гіббса, розроблено кінетичну модель термічного розкладання багатокomпонентної суміші органічних відходів з урахуванням етапів деструкційних перетворень у реакторі. Складено систему диференціальних рівнянь швидкості перетворення для різних компонентів органічної сировини, яка дає можливість визначати розрахункові кінетичні та активаційні параметри моделі деструкції, які дозволяють вирішувати задачі прогнозування та оптимізації температурних умов проведення процесу, а також керування якістю кінцевих продуктів. Теоретична модель підтверджена експериментально за допомогою диференціального термогравіметричного аналізу, що визначає основні закономірності зміни маси компонентів відходів від часу їх

деструкції, похибка отриманих експериментальних та розрахункових даних не перевищує 7-8 %.

4. Змодельовано технологічні процеси циркуляції проміжних продуктів піролізу твердих органічних відходів з визначенням температурних параметрів здійснення процесу деструкції на контурах охолодження для попередження забруднення навколишнього середовища шляхом перерозподілу гетероатомних компонентів в окремих контурах за їх масовими частками. Встановлено, що у кінцевих продуктах екологічно прийняттого піролізного процесу вміст гетероатомних компонентів складає 0,279-0,29 % (мас.) у піролізному газі та 0,24-0,26 % (мас.) у рідкій фракції, що на 20 % знижено від продуктів процесу стандартного піролізу, та припустимо для використання в якості товарного енергетичного продукту.

5. Проведені теоретичні дослідження загальної теплопровідності всередині маси відходів при додатковій дії стискання довели, що максимально наближеним до реалістичних умов є варіант з несиметричним розташуванням цілих автошин в піролізному реакторі при якому забезпечується збільшення значень теплопровідності з 1,8 Вт/(м·К) до 12,7 Вт/(м·К). При моделюванні визначено раціональне розташування автошин відносно піролізного реактора - діаметр реактора має бути більший за діаметр автошин мінімум в 1,5 рази. Це дозволить досягти коефіцієнту заповнення реактору до 98 %, тим самим оптимізувати конструктивні характеристики піролізного обладнання.

6. Шляхом контролю встановлених технологічних параметрів процесу визначено вміст компонентів кінцевих продуктів утилізації порівняно з рідкими продуктами стандартного процесу піролізу: знижено кількість парафінових вуглеводнів до 2%, підвищено вміст нафтових – до 39% та ароматичних вуглеводнів до 25%, що покращує енергетичну складову кінцевої рідкої фракції як товарної продукції. При порівнянні рідкого продукту зі стандартними вуглеводневими паливами, спостерігаються підвищені показники температури спалаху, температури застигання та вмісту механічних домішок. Це негативно впливає на використання в двигунах та енергетичних установках. При відповідних

режимах можна одержувати більш важку рідку фракцію з температурою спалаху до 57°C, що спрощує умови її зберігання і використання у якості котельного палива відповідно до умов пожежної безпеки.

7. Для дослідження ефективності герметизації реактора, який працює в безперервному режимі, було промодельовано, розраховано, розроблено і виготовлено ряд конструкцій вихідних насадок, які забезпечують утворення на виході плунжерної системи технологічної відновлювальної пробки із відходів, які подаються. За допомогою стиснення технологічної пробки забезпечуватиметься необхідна герметичність реактора та екологічна безпека навколишнього робочого середовища. Виявлено принципову залежність протидії технологічної пробки внутрішньому тиску в реакторі і зусиль проштовхування пробки від конфігурації та розташування зрізаного конусу вихідного наконечника. Встановлено, що напруження, які виникають в шляхах сировини в процесі її ущільнення мають зусилля  $P = 1,0$  МПа, температура розплаву складає 520-530 °С при температурі насадки 280°C, внутрішній тиск поршня 1,25 кг/см<sup>2</sup>, що достатньо для унеможливлення потрапляння шкідливих речовин в робочу зону установки.

8. Окреслено фактори екологічної небезпеки при роботі установок з утилізації відходів за піролізним процесом, визначено основні ймовірні аварійні ситуації. Досліджено характер їх впливу та методи зменшення загрози навколишньому середовищу. Розроблено автоматизовану систему управління екологічними ризиками при здійсненні процесу утилізації відходів піролізним процесом, яка включає багатокритеріальну оцінку факторів небезпеки (з врахуванням промислової, пожежної та екологічної небезпеки) для формування оптимальних технічних рішень і заходів попереджуючих виникнення аварійних ситуацій та оптимізації методів управління ризиками.

9. Розроблено методики визначення токсичних сполук металів в кінцевих рідкому та твердому продуктах. Отримані результати показали наявність сполук в пробах рідкого залишку продуктів піролізу суміші полімерів. Вміст Cu, Zn, Ni не відповідає нормативам для дизельного палива, проте задовольняє вимогам для палива нафтового (мазут), тому потрібно проводити жорсткий та постійний

контроль концентрацій цих сполук металів. У результаті аналізу твердої фракції підтвердилася наявність Fe, Cu, Ni, Mg. Установлені концентрації не перевищують значення ГДК та відповідають нормам СанПін 4630 – 88.

10. Для підтвердження екологічної чистоти використання отриманих рідких та газоподібних продуктів в якості альтернативного палива у теплових, енергетичних установках виконаний теоретичний розрахунок викиду  $\text{NO}_2$  при їх спалюванні у водогрійному котлі КВГ(М) – 4,65. Проведені теоретичні розрахунки викидів при спалюванні та отримані експериментальні дані не перевищують норми ГДК (ГДК для природного газу та мазуту –  $300 \text{ мг/м}^3$ ; концентрація  $\text{NO}_2$  у пірогазі та рідкій фракції – 150 і  $200 \text{ мг/м}^3$  відповідно).

11. Розроблено, запатентовано та впроваджено в Чеській республіці піролізне устаткування для промислової утилізації ТОВ. Установа БЦП – 5 (з продуктивністю по сировині 5000 кг на добу) призначена для термічної утилізації твердих органічних відходів автомобільної промисловості з отриманням корисних рідких та газоподібних продуктів, які використовуються як альтернативні види палива. Проведені натурні дослідження підтвердили встановлені параметри роботи устаткування: час виходу обладнання на сталий робочий режим 90-95 хв., кількість отриманих продуктів в перерахунку на 1 кг сировини – рідкого продукту 62%, газового продукту 22% та пірокарбону 16%, температурні показники циркуляційної системи – 1 контур –  $345 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 контур –  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 1 контур –  $135 \text{ }^\circ\text{C}$ .

12. Розроблено та запатентовано новий спосіб двостадійного процесу, який отримав назву технологія «екопірогенезису» (ЕПГ). Він об'єднав два процеси в одну технологічну лінію, в якій відходи першого класу (в основі яких полімерні речовини, гума) направляються по лінії екологічно прийняттого піролізного процесу, а відходи другого класу (в основі яких харчові відходи) направляються на спеціальну лінію газифікації, при цьому, вихідні компоненти однієї лінії використовуються як сировина в іншій. Таке поєднання процесів дозволить проводити процес утилізації всіх твердих органічних відходів населеного пункту, сортуючи їх тільки за показником вологості. Це дозволить збільшувати об'єми перероблених відходів та отриманих продуктів для власних потреб або вироблення

електроенергії в дизельних або газотурбінних електростанціях, використовувати потоки для збільшення енергетичних показників обладнання. Розроблено рекомендації для впровадження екопірогенезису в складі котельних мікрорайону з використанням отриманого альтернативного палива при термічній деструкції твердих побутових органічних відходів, автошин, деревини з лісопаркової зони, опалого листя та подібних.

13. За результатами узагальнення власних досліджень розроблено конструкторську документацію на лабораторні та промисловий зразки піролізного обладнання, зареєстровано технічні умови (ТУ), створено регламенти роботи устаткування та технічні рекомендації для промислового здійснення утилізації ТОВ методом екологічно прийняттого піролізного процесу з мінімізацією негативного впливу на навколишнє середовище. Наведено напрямки використання екологічно прийняттого піролізного процесу на практиці у вигляді розробленого й виготовленого устаткування та вдосконалених окремих елементів, такі як спосіб утилізації органічних відходів – екопірогенезис, установка для циркуляційного піролізу інфікованих медичних відходів, спосіб теплопостачання житлового мікрорайону з використанням власних альтернативних видів палива, установка безперервної термічної утилізації цілих зношених автомобільних шин.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамова М. В., Османов И. Х. Формирование рациональной системы управления твердыми бытовыми отходами. *Вестник экономической науки Украины*. 2011. № 2. С. 6-10.
2. Альтшулер В. С., Клириков Г. В., Медведев В. А. Термодинамика процессов получения газов заданного состава из горючих ископаемых. Москва, 1969. 103 с.
3. Аметов И. Э., Оболонский В. В., Абхаирова С. В. Теоретические основы механотермической переработки резины. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки*. № 35. 2012. С. 23-28.
4. Афанасьев Д. Электронный справочник. Состав отходов. URL : <http://eco-profy.info> (дата звернення 02.11.2012).
5. Афаров В. В. Принципы создания безотходных химических производств. М. : Химия, 1982. 286 с.
6. Багатуров С. А. Основы теории и расчета перегонки ректификации. Москва, 1974. 440 с.
7. Баженов Д. А., Тарновская Л. И., Маслов С. Г. Физико-химические основы моделирования реакций термолиза торфа. 1. Гуминовые и фульвокислоты. *Химия растительного сырья*. Томск, 1999. №4. С. 39-46.
8. Бакаев В. В., Соловьев В. А., Черный С. П. Система управления установкой пиролиза древесины с элементами искусственного интеллекта. *Информатика и системы управления*. №1 (3), 2002. С. 80-86.
9. Балан Р. К., Татыбеков А. А., Энгельшт В. С. Термодинамический анализ газификации и сжигания твердых бытовых отходов в атмосфере кислорода. *Известия НАН КР*. Бишкек, 2007. №4. С. 68-75.
10. Басов Н. И., Казанков Ю. В. Литьевое формование полимеров. М : Химия, 1984. 248 с.
11. Бедюх А. Р. Комплексная утилизация отработанных автомобильных шин с использованием методов магнитного удара и низкотемпературной деструкции.

URL : <http://waste.ua/cooperation/2007/theses/bedyuh.html> (дата звернення: 08.01.2017).

12. Бельков В. П., Шестопапов В. В., Кафаров В. В. Математические модели химико-технологических процессов. Москва, 1981. (ч. 2). 40 с.
13. Бернадинер М. И. Огневая переработка и обезвреживания промышленных отходов. М. : Химия, 1990. 423 с.
14. Беспмятников Г. П., Богушевская К. К., Зелинская Л. А. Термические методы обезвреживания промышленных отходов. Л. : Химия, 1969. 108 с.
15. Білопільська О.О. Еколого-економічні основи управління системою поводження з твердими побутовими відходами : дис. канд. економ. наук: 08.00.06/СДУ. Суми, 2014. 246 с.
16. Битюков В. К., Колодежнов В. Н., Сырицын Л. М. Основные методы расчета современного оборудования для подачи и охлаждения полимерного материала. М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. 239 с.
17. Боднар Л. А., Юзюк А. А. Использование органических отходов с целью выработки энергоносителей. *Современные технологии, материалы и конструкции в строительстве: науч.-технический сборник*. 2011. С. 158-163.
18. Бойко, Т. В., Бендюг В. Т., Комариста Б. М. Оцінка ризику промислового підприємства на стадії проектування в рамках стратегії сталого розвитку. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2012, № 2/14 (56). С. 13-17.
19. Бок Р. Методы разложения в аналитической химии М. : Химия, 1984. 432 с.
20. Буртная И. А. Имплементация нанотехнологий в утилизации шин (ч. 1). *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 8. С. 14-16.
21. Буртная И. А., Гачечиладзе О. О. Имплементация нанотехнологий в утилизации шин. (ч. 2). *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 12. С. 50-52.
22. Вальтер А. И., Ларин А. В., Макаров М. А. Структурное моделирование производственного процесса литья в песчаные формы. *Известия ТулГУ, серия*

*Металлургия, Экология, Физика*. Тула. 2002 Вып. 2. С. 216-219.

23. Вальтер А. И., Ларин А. В., Макаров М. А. Экспериментальные исследования свойств песчано-глинистых смесей. Научные основы решения проблем сельхоз. Машиностроения. Тула : ТулГУ, 2003. С. 149-155.

24. Вамболь С. А., Шахов Ю. В., Вамболь В. В., Петухов И. И. Математическое описание процессов разделения газовых смесей, образующихся при термической утилизации отходов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. № 1/2 (79). С. 32-42.

25. Ван Кревелен Д. В. *Свойства и химическое строение полимеров*. (пер. с англ). Голландия, 1972. Под ред. А. Я. Малкина. М. : Химия, 1976. 416с.

26. Василевич С. В., Дмитриев В. Н., Кожурин, Малько М. В. Исследование термохимической конверсии биомассы для получения различных видов топлив. *International conference Energy of Moldova - 2012. Regional aspects of development*. 2012. С. 324-330.

27. Ватолин Н. А., Моисеев Г. К., Трусов Б. Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. Москва, 1994. 352 с.

28. Вейлас С. Химическая кинетика. Расчеты промышленных реакторов. М. : ХИМИЯ, 1964. 432 с.

29. Веселов И. В., Перлина Ж. В., Марьев В. А., Шувалов Ю. А. Переработка использованных шин: международный опыт. *Твердые бытовые отходы*. 2012. № 12. С. 58-63.

30. Вольфсон С. И., Фафурина Е. А., Фафурин А. В. Методы утилизации шин и резинотехнических изделий. *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. № 1. С. 74-79.

31. Гелетуха Г. Г., Жовмір М. М., Олійник Є. М., Радченко С. В. Біомаса як паливна сировина. *Нетрадиційна енергетика*, 2011. т. 33, № 5. С. 79-87.

32. Герасимов Г. Я., Росляков П. В. Моделирование кинетики образования полициклических ароматических углеводородов в пылеугольном факеле. *Вестник Моск. Университета. Сер. 2*. 1999. Т. 40. № 1. С 56-59.



33. Герцюк М. М., Ковальчук Т. В., Капрал К. О., Лисиченко Г. В. Використання двомірної газової хроматографії з мас-спектрометричним детектуванням для визначення складу продуктів піролізу з відпрацьованих автомобільних шин. *Наука та інновації*. 2014. Т. 10. № 2. С. 75-78.
34. Гогунський В. Д., Чергнега Ю.С. Управління ризиками в проектах з охорони праці як метод усунення шкідливих і небезпечних умов праці. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2013. № 1/10 (61). С. 83-85.
35. Горобець О.В., Щербина І.Б. Екологічні, економічні та соціальні аспекти термічних методів утилізації відходів. URL : [http://ir.znau.edu.ua/bitstream/123456789/8160/5/NME\\_2016\\_179-183.pdf](http://ir.znau.edu.ua/bitstream/123456789/8160/5/NME_2016_179-183.pdf) (дата звернення: 22.08.2015).
36. ГН 2.1.6.014-94. Предельно допустимая концентрация ПДК полихлорированных диоксинов и полихлорированных дибензофуранов в атмосферном воздухе населенных мест [Чинний від 1994-07-22]. Госкомсанэпиднадзор России, 1994. (Інформація та документація).
37. Горбулін В. П., Качинський А. Б. Системно-концептуальні засади стратегії національної безпеки України. К. : Євроатлантикінформ. 2007. 592 с.
38. Горда В. И., Кульченко В. В. Энерготехнологические преимущества высокотемпературного пиролиза бытовых отходов. Труды II научно-техн. конф. *Нові технології та обладнання по переробці промислових та побутових відходів і їх медико-екологічне забезпечення*. К. : Знання. 2003. С. 55-58.
39. Гориславец С. П., Тменов Д. Н., Майоров В. И. Пиролиз углеводородного сырья. К. : Наук. Думка. 1977. 309 с.
40. ГОСТ 24974-81. Резина. Идентификация полимера методом пиролитической газовой хроматографии. [Чинний від 05.02.1982] Москва, 1982. 28 с. (Інформація та документація).
41. Гранкін О. О., Житницький А. О. Активізація утилізаційних виробництв автомобільних гумових шин в Україні. *Економічний нобелівський вісник*. 2014. № 1 (7). С. 128-132.
42. Гриценко А. В., Внукова Н. В., Позднякова Е. И. Оценка возможности

использования продуктов утилизации шин в качестве альтернативного топлива. *Автомобильный транспорт*. 2015. Вып. 36. С. 42-47.

43. Граммелис П. Отчет о применении RDF/SRF и технических характеристиках. LIFE09 ENV/GR/000307. 2011. URL : [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=ENERGY\\_WASTE\\_D1\\_2\\_Report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=ENERGY_WASTE_D1_2_Report.pdf) (дата звернення: 11.06.2013).

44. Гужев В.В. Особенности оценки и управления в инновационных проектах. *Экономика. Статистика. Информатика*. 2014. №. 5. С. 17-21.

45. Гутник С. П., Сосонко В. Е., Гутман В. Д. Расчёты по технологии органического синтеза. М. : Химия, 1988. 272 с.

46. Данченко О. Б. Класифікація відхилень в проектах: ризику, проблеми, зміни. *Вісник ЛДУ БЖД*. 2014. №9. С. 72-79.

47. Державний класифікатор відходів України ДК 005-96 (із змінами і доповненнями, внесеними наказом Державного комітету України по стандартизації, метрології та сертифікації від 30.03.2000 р. № 252, наказом Державного комітету України з питань технічного регулювання та споживчої політики від 22.01.2008 р. № 18) URL : <http://plast.vn.ua/DK005-96.html> (дата звернення: 22.02.2019).

48. Директива 2008/98/ЕС Европейского парламента и Совета от 19 ноября 2008 года об отходах и отмене некоторых директив. Официальный журнал Европейского Союза. 22.11.2008. Л 312. С. 3-30. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj> (дата звернення: 12.01.2016).

49. Директива Совета 1999/31/ЕС от 26 апреля 1999 года о захоронении отходов. Официальный журнал Европейского Союза. 16.07.1999. Л 182. С.1-19. URL : <http://data.europa.eu/eli/dir/1999/31/oj> (дата звернення: 12.01.2016).

50. Дрозд І. П., Скляренко В. І. Огляд методів утилізування твердих побутових відходів. URL : <http://waste.com.ua/cooperation/2008/theses/drozd.html> (дата звернення 03.03.2010).

51. Душкін С. С., Дегтяр М. В. Технологія утилізації твердих побутових відходів. Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. Х. : ХНАМГ, 2011. 86 с.

52. Дырда В. И., Гребенюк С. Н., Лисица Н. И., Решевская Е. С., Тархова В.

М., Новикова А. В., Заболотная Е. Ю. Расчёт напряженно-деформированного состояния виброизоляторов сложной формы. *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр.* 2012. № 106. С. 105-110.

53. Дырда В. И., Толстенко А. В., Калганков Е. В. Определение долговечности упругонаследственных сред с использованием обобщенных критериев разрушения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2013. № 4/7 (64). С. 4-7.

54. Енергоспоживання на основі відновлюваних джерел за 2007 - 2018 роки. [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/sg/ekolog/ukr/esp\\_vg\\_u.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2016/sg/ekolog/ukr/esp_vg_u.htm) (дата звернення: 25.06.2018).

55. Еланский Г. Н., Медведев М. Н. Диоксины – экологическая опасность. *Сталь.* 2000. №2. С. 82-86.

56. Ексергія - шлях енергозбереження. URL : [http://gazeta.dt.ua/ECONOMICS/eksergiya\\_\\_shlyah\\_energozberezhennya.html](http://gazeta.dt.ua/ECONOMICS/eksergiya__shlyah_energozberezhennya.html) (дата звернення: 15.06.2018).

57. Екологічні аспекти термічного знешкодження непридатних отрутохімікатів : монографія / Петрук В. Г та інш. ; за ред. В. Г. Петрука. Вінниця, Універсум-Вінниця, 2006. 254 с.

58. Енаев А. А., Манфановский С. Б. Стенд для статических и динамических испытаний пневматических шин. *Машиностроение.* 2002. С. 249-253.

59. Железная Т. А., Гелетуха Г. Г. Современные технологии получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом. *Промышленная теплотехника.* 2005. № 5. С. 79-90.

60. «Про відходи» : Закон України від 05 березня 1998 р. № 187/98. *Відомості Верховної Ради України.* 1998.

61. «Основні засади (Стратегія) державної екологічної політики на період до 2020 року» : Закон України від 21. грудня 2010 р. *Відомості Верховної Ради України.* № 2818-VI.

62. «Про альтернативні види палива» Закон України [від 21 травня 2009](#) р. *Відомості Верховної Ради України.* 2009. № 12.

63. «О внесении изменений и дополнений в некоторые законодательные акты Украины относительно содействия производству и использованию биологических видов топлива» : Закон Украины [від 21 травн. 2009 р.](#) *Відомості Верховної Ради України*. 2009. № 40.

64. Зайцева Т. А. Полигон депонирования твердых бытовых отходов (тбо) как антропогенная экологическая система. *Научные исследования и инновации*. 2010. № 4. С. 35-43

65. Запорожець О. О., Вовк Ю. С., Нікітченко. Improving of ecological characteristics of technology on pyrolysis of scrap tires. *Вісн. Нац. авіац. ун-ту. Впр. хімії і хім. технології*. 2002. № 5. С. 61-63.

66. Запорожець О. І., Вовк О. О., Нікітченко Ю. С. Аналіз структурно-групового і хімічного складу пірокондесату та його продуктів. *Вісн. Нац. авіац. ун-ту. Охрана окружающей среды*. 2010. № 42. С. 191-195.

67. Запорожець О. І., Нікітченко Ю. С. Фізико-хімічні властивості пірокондесату, отриманого шляхом переробки відпрацьованих автомобільних шин. *Науково-виробничий журнал «Нафтова і газова промисловість»*. 2011. № 1. С. 47-51.

68. Запорожець О. І., Нікітченко Ю. С. Оцінка екологічних ризиків при складуванні зношених автомобільних шин на звалищах. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 2/11. С. 19-24.

69. Золотенко Б. Н. Скибка Н. Е., Сынюк О. Н. Конечно-разностный метод исследования процесса заполнения прямоугольной пресс-формы, путем визуализации потока расплава. *Вісник Київського державного університету технологій та дизайну*. 2000. № 2. С. 48-43.

70. Иванова Т. П., Повякель Л. И. Вопросы гигиены и токсикологи при использовании вторичных полимерных ресурсов. *Збірник матеріалів наук-практ. конференції. Відходи та відхідні гази промислових підприємств – значний потенціал енергоресурсів у народному господарстві*. К. : Знання, 2001. С. 73-75.

71. Иванов К. С., Сурикова Т. Б. Утилизация изношенных автомобильных шин. МГТУ : МАМИ, 2009. С. 19-24.

72. Іванюта С. П., Качинський А. Б. Екологічна та природньо-техногенна безпека України. Регіональний вимір загроз і ризиків : монографія. К. : НІСД, 2012. 308 с.
73. Івашків Т. С. Біопаливо : Міфи та реальність. *Університетські наукові записки*. 2010. №1. С. 166-177.
74. Ионова Е. И., Ляпков А. А., Бондалетов В. Г., Васильева Е. В., Гайдукова О. С., Извекова Н. В., Зайцева А. П., Шипилова Н. С. Моделирование процесса олигомеризации фракции С9 пиролиза бензина. *Известия Томского политехнического университета*. 2010. Т. 316. № 3. С. 90-96.
75. Іскович-Лотоцький Р. Д., Веселовська Н. Р., Іванчук Я. В., Веселовський Я. П. Розрахунок температурних полів в робочих зонах піролізної установки. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2013. № 42. С. 113-119.
76. Исламов М.Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей. Л. : Химия, 1986. 280 с.
77. Казаков В. Г., Луканин П. В., Смирнова О. С. Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнологических установок : учеб. пособ. 2013. 93 с.
78. Калашников О. В. Моделирование фазового поведения углеводородов : выбор уравнения состояния. *Экотехнологиии ресурсосбережение*. 2003. № 1. С. 22-30.
79. Калетнік Г. М. Альтернативні джерела енергії. URL : <http://lib.vsau.vin.ua/old/text/our/pokazhchyky/altpalyvo.pdf> (дата звернення: 23.04.2018).
80. Калинин В. И. Термическая утилизация твердых бытовых отходов (Концепция НИИ Стромкомполит). Красноярск, 2006. С. 2-10.
81. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва, 1961. 832 с.
82. Кафаров В. В. Принципы создания безотходных химических производств. М. : Химия, 1982. 288 с.
83. Качинський А. Б. Безпека, загрози і ризик : наукові концепції та математичні методи. К. : ІПНБ, НАСБУ, 2004. 472 с.

84. Кашковский В. И., Чубов Л. Н. Термолитическая деструкция автошин в среде жидких углеводородов. Харьков, 2010. С. 63-64.
85. Кашковский В. И. Жидкое топливо термолитического распада отработанных автошин как добавка к нефтепродуктам. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2011. № 1. С. 41-46.
86. Ким К. К., Карпова И. М. Новый метод утилизации автомобильных шин с металлокордом. *Безопасность жизнедеятельности*. 2007. № 7. С. 24-27.
87. Киселева И. А., Симонович Н. Е., Егорова Г. Н., Шаповалов Ю. А. Методы оценки и управления предпринимательскими рисками. *Вестник ВГУИТ*. 2017. Т. 79. № 2. С. 314-319.
88. Киселева Д. В., Садыкова Н. О. Кинетический анализ термогравиметрических данных ископаемых костных остатков. *Ежегодник – 2009*. 2010. №157. С. 336-339.
89. Клімішина М. Т. Стан та перспективи розвитку технологій переробки шин та їх вплив на довкілля. *Technology audit and production reserves*. 2016. № 6/2(32). С. 57-63.
90. Козлов О. В., Маркіна Л. М., Рудюк М. В. Автоматизація процесів керування технологічними комплексами утилізації цілих зношених автошин. *Наукові праці. Науково-методичний журнал : Комп'ютерні технології*. 2015. № 254 (Том 266), С. 131-137.
91. Коллеров Л. К. Газомоторные установки. Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. Москва 1951. 240 с.
92. Колотырин К. П. Управление развитием эколого-экономических систем в сфере обращения с отходами потребления: автореф. дис. на соискание уч. степени д.э.н. Саратов. гос. аграр. ун-т им. Н. И. Вавилова. Саратов, 2010. 40 с.
93. Кондратенко Ю. П., Козлов О. В., Коробко О. В. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для контролю параметрів технологічного комплексу екопірогенезісу. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. К. : Техніка, 2014. № 13 (89). С. 52-61.
94. Кондратенко Ю. П., Маркіна Л. М., Козлов О. В. Математичне

моделювання температурних режимів реактора багатоконтурної піролізної установки для задач автоматичного керування. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2012. № 2 (443), С. 84-90.

95. Коробочкин В. В., Кравцов А. В., Попок Е. В. Повышение эффективности установок синтеза метанола с использованием метода математического моделирования. *Фундаментальные исследования*. 2012. № 9. С. 151-156.

96. Корнеев И. С. Переработка отходов полимеров и резинотехнических изделий в компоненты моторных топлив: автореферат дис. на соискание уч. степени к-та хим. наук. Москва, 2011. С. 18.

97. Косивцов Ю. Ю., Сульман Э. М. Технология пиролиза органических материалов: монографія. 1-е изд. Тверь, 2010. 124 с.

98. Контарева Т. А., Юловская В. Д., Оболонкова Е. С., Насруллаев И. Н., Серенко О. А. Влияние температуры на механические свойства резинопластов на основе полиэтилена. *Вестник МИТХТ*. 2011. Т. 6. № 1. С. 33-36.

99. Контроль якості паливно-мастильних матеріалів: навч. посіб. / Бойченко С. В., Л. М. Черняк, В. Ф. Новікова та ін. Київ, 2012. 308 с.

100. Краснянский М. Е. Утилизация и рекуперация отходов : Учебное пособие, издание 2-е, исправленное и дополненное. Х.: Бурун Книга, 2007. 288 с.

101. Кращі європейські практики управління відходами / Войціховська А., О. Кравченко, О. Мелень-Забрамна, М. Панькевич. за заг. ред. О. Кравченко. Львів : Вид-во «Компанія Манускрипт», 2019. 64 с.

102. Кремнева Е. В. Исследование процесса пиролиза биомассы в плотном слое с учетом вторичных реакций разложения смолы. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика*. № 3, 2011. С. 142-154.

103. Крещенецький В. Л., Капітула В. Я. Шляхи розв'язання проблеми переробки відпрацьованих шин. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2013. № 5 (194). С. 85-88.

104. Кузьмин Р. С. Компонентный состав отходов : монография: в 2 ч. Ч. 1. Казань : Дом печати, 2007. 156 с.

105. Курис Ю. В., Ткаченко С. И. Анализ эффективности мирового энергетического и экологического использования биомассы. *Профессиональный журнал «Промышленная электроэнергетика»*. Киев, 2008. №5. С. 35-41.

106. Кутняшенко О. І. Обґрунтування параметрів промислової переробки заскладованих несорттованих побутових відходів : дис. на здобуття вч. ступеня канд. техн. наук : 21.06.01. Покровськ, 2017. 182 с.

107. Кушнір С, Кость М., Пальчикова О. Причини відмінності хімічного складу природного газу в родовищах зовнішньої зони передкарпатського прогину. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2013. № 1–2 (162–163). с. 88-100.

108. Ланкина С. А. Флегонтов В. И. Классификация и проблемы оценки рисков промышленного предприятия *Интернет журнал «Науковедение»*. 2015. Том 7, №3. С. 1-16.

109. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. М. : Логос, 2002. 392с.

110. Литвинцев И. Ю. Пиролиз - ключевой процесс нефтехимии. *Соросовский образовательный журнал*. 1999. № 12. С. 21-28.

111. Лихманенко В. А., Цветкова И. В., Юшко В. Л., Русалин С. М. Термохимические процессы переработки отработанных шин и отходов резинотехнических изделий. *Вопросы химии и химической технологии*. 2009, №1. С. 129-132.

112. Лосев И. П., Тростянская Е. Б. Химия синтетических полимеров. Москва, 1971. 616 с.

113. Лунева О. В., Горда В. И., Матлак Е. С. Основы практической теории предотвращения образования токсичных продуктов при термической утилизации твердых бытовых отходов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Хімія і хімічна технологія*. Випуск 95. Донецьк, ТОВ «Лебідь», 2005. С. 117-123.

114. Магарил Р. З., Трушкова Л. В., Пауков А. Н. Возможность получения товарных нефтепродуктов из промышленных и бытовых отходов. *Известия вузов : нефть и газ*. 2003. № 6. С. 92-98.



115. Мадорский С., Рафикова С. Р. Термическое разложение органических полимеров. М. : Мир, 1967. 326 с.
116. Майстренко В. Н., Хамитов Р. З., Будников Г. К. Эколого-аналитический мониторинг супертоксикантов. М. : Химия, 1996. 319 с.
117. Макитра Р. Г., Мидяна Г. Г, Брык Д. В., Семенюк М. В. Процессы переработки углей в смеси с резиносодержащими отходами в жидкое топливо. *Химия твердого топлива*. 2013. № 3. С. 43-46.
118. Малышевский А. Ф. Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов жилого фонда в городах России. URL : [http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad\\_po\\_tbo.pdf](http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad_po_tbo.pdf) (дата звернення: 05.05.12).
119. Маркіна Л. М. Створення екологічно безпечного технологічного процесу та устаткування для переробки побутових органічних відходів методом багатоконтурного циркуляційного піролізу : дис. на здобуття вч. ступеня кандидата технічних наук : 21.06.01. Миколаїв, 2007. 209 с.
120. Маркіна Л. М. Математичне моделювання процесів автоматичного завантаження відходів у реактор. *Екологічні науки*. 2018. №1 (20), Том 2, С.74-83.
121. Маркіна Л. М. Впровадження екологічно безпечної технології Екопірогенезіса при утилізації органічних побутових відходів з одержанням альтернативного палива. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: Матеріали 2-ої міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв : видавництво НУК. 2011. С. 457-460.
122. Маркіна Л. М. Дослідження процесу ущільнення цілих зношених шин при піролізі. Матеріали XI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні». Миколаїв : НУК, 2016. С. 25-26.
123. Маркіна Л. М. Дослідження характеристик ущільнення маси цілих зношених автошин в піролізному реакторі. *Збірник наукових+ праць НУК*. Миколаїв, 2017. № 3. С. 121-128.
124. Маркіна Л.М. Дослідження екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів. *Інновації в*

*суднобудуванні та океанотехніці* : Матеріали XX міжнародної науково-технічної конференції. У 2-х томах. Т.1. Миколаїв : НУК, 2019. С. 615-617.

125. Маркіна Л. М. Розробка екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів. *Проблеми екології та енергозбереження* : Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв : Видавець Торубара, 2019. С. 27-31.

126. Маркіна Л. М. Розробка новітньої технології енергозбереження та екологічної безпеки при утилізації органічних відходів методом екопірогенезису. *Збірник наукових праць НУК*. 2011. № 4 (439), С. 156-163.

127. Маркіна Л. М. Розвиток наукових основ екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів. *Проблеми екологічної безпеки* : Матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції. Кременчук, 2019. С. 171-175.

128. Маркіна Л. М. Модельні дослідження переробки органічних відходів методом багатоконтурного піролізу з отриманням альтернативного палива. *Зб. наук. праць НУК*. Миколаїв. 2008. № 4. С. 101-109.

129. Маркіна Л. М., Крива М. С. Дослідження стійкості експериментальної установки ЕУ БЦП-14 при надзвичайних ситуаціях. *Стратегія реформування організації цивільного захисту. Том 1. Цивільний захист України: сучасний стан, здобутки, проблеми, перспективи розвитку: матер.наук.-практ. конф.* Київ, ІДУЦЗ. 2018. С. 170-171.

130. Маркіна Л. М., Крива М. С. Забезпечення екологічної безпеки під час термічної утилізації гумотехнічних відходів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : технічні науки*. 2019. Том 30 (69). № 1. Частина 2. С. 41-50.

131. Маркіна Л. М., Крива М. С. Забезпечення екологічно обґрунтованого регулювання утворенням небезпечних речовин під час термічної утилізації гумотехнічних відходів. *Екологічні науки*. 2019. №1 (24), Том 2, С. 136-143.

132. Маркіна Л. М., Крива М. С. Визначення особливостей розподілення з'єднань у фракціях при утилізації автошин. *Екологічна безпека як основа сталого*

розвитку суспільства. *Європейський досвід і перспективи* : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Львів : ЛДУБЖД. С. 58-59.

133. Маркіна Л. М., Крива М. С. Дослідження технологічних параметрів піролізу зношених автомобільних шин при їх статичному навантаженні. *Наука та інновації*. 2018. 14 (6), с. 38-54. <https://doi.org/10.15407/scin14.06.038>.

134. Маркіна Л. М., Крива М. С., Глиняна В. В. Визначення ексергетичної ефективності процесу утилізації гумовмісних відходів за технологією багатоконтурного циркуляційного піролізу. Матеріали 7-ої міжнародної науково-технічної конференції «*Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*». Миколаїв : видавництво НУК. 2016. С. 271-272.

135. Маркіна Л. М., Потай І. Ю. Проблеми управління проектом «Екопирогенезис» в рамках екологізації бізнеса. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2014. № 6 (456), С. 120-127.

136. Маркіна Л. М., Тимченко І. В. Розробка автоматизованої системи управління екологічними ризиками при утилізації відходів за технологією «Екопирогенезис». *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 2/4(22), С.50-56.

137. Маркіна Л. М., Філатова М. І. Підвищення енергетичних властивостей газоподібного продукту при двостадійному процесі. Збірник матеріалів 6-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2011. С.109-112.

138. Маркіна Л. М., Філатова М. І. Моделювання параметрів багатоконтурного циркуляційного піролізу для розробки експериментальної установки. Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 113-114.

139. Маркіна Л. М., Філатова М. І. Вдосконалення технології утилізації твердих побутових відходів з отриманням альтернативних палив. Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції «*Природоохоронні аспекти використання відновлювальних джерел енергії в Україні*». Миколаїв : вид-во ЧДУ,

2012. С. 90-91.

140. Маркіна Л. Н., Філатова М. І. Аналіз можливості застосування термічних методів деструкції органічної сировини для утилізації побутових відходів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2010. № 6 (435), С. 152-159.

141. Маркіна Л. М., Мирошниченко М. В. Альтернативні рідкі палива з відходів: переваги та недоліки. *Енерготехнологии и ресурсосбережение*. 2013. № 4, С. 23-30.

142. Маркіна Л. М., Мірошниченко М. В. Розрахунок викидів NOx при спалюванні альтернативних видів палива отриманих методів двостадійного процесу утилізації органічної сировини. *Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні. Миколаїв* : видавництво НУК. 2012. С. 96-98.

143. Маркіна Л. М., Рудюк М. В. Основні положення підвищення продуктивності реактора піролізу цілих зношених автошин. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*». Миколаїв : НУК, 2015. С. 18-19.

144. Маркіна Л. М., Тоболякова М. І. Аналіз можливості застосування сучасного розрахункового пакету програм FLUENT (ANSYS, Inc.) для моделювання процесу багатоконтурного циркуляційного піролізу. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*». Миколаїв : НУК, 2015. С. 111-113.

145. Маркіна Л. М., Глиняна В. В. Ексергетичний аналіз деструктивної переробки органічних відходів методом багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Збірка тез доповідей 19 Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Екологія. Людина. Суспільство»*. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. С. 108.

146. Маркіна Л. М., Сегіна Є. Є., Маркін О. С. Оцінка стійкості обладнання екологічно прийнятної технології екопірогенезіс при надзвичайних ситуаціях. *Безпека життя діяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука,*

*практика* : Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції. Херсон, 2019. С. 50-54.

147. Маркіна Л. М., Рижков С. С. Моделювання й розрахунків елементів технології багатоконтурного циркуляційного піролізу високомолекулярних органічних відходів. *Екотехнології і ресурсозбереження*. 2006. № 4. С. 71-76.

148. Матрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей. М. : Металлургия, 1972. 368 с.

149. Матвеев Ю. Б., Гелетуха Г. Г. Перспективи енергетичної утилізації твердих побутових відходів в Україні. Аналітична записка БАУ № 22. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/position-paper-uabio-22-ua.pdf> (дата звернення 28.10.2019).

150. Миронский В. Е., Булавин А. В. Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сборник докладов Международной конференции аспирантов и студентов. 15-17 апреля 2011г. Т.1. - Донецк: ДонНТУ, ДонНУ, 2011. - 47 с.

151. Мирный А. Н., Беньямовский Д. Н. Санитарная очистка и уборка населенных мест. М. : Стройиздат, 1985. 521 с.

152. Мирный А. Н. Санитарная очистка и уборка населенных мест. М. : Стройиздат, 1990. 467 с.

153. Міністерство розвитку громад та територій України. Офіційний веб-сайт Міністерства. Стан сфериповодження з побутовими відходами в Україні за 2018 рік. URL : <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretory/stan-sferipovodzhennya-z-pobutovimi-vidhodami-v-ukrayini-za-2018-rik/> (дата звернення: 14.03.2019)

154. Мирошниченко М. В., Маркіна Л. М. Дослідження показників рідких продуктів технології БЦП. Збірка тез доповідей 16 Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених «*Екологія. Людина. Суспільство*». Київ : НТУУ «КПІ», 2013. С. 118-119.

155. Мирошниченко М. В., Маркіна Л. М., Рижков С. С. Аналіз показників рідкої фракції технології БЦП. *Проблеми екології та енергозбереження в*

суднобудуванні : Матеріали 8 міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: видавництво НУК. 2013. С. 76-78.

156. Моисеев Г. К., Вяткин Г. П. Термодинамическое моделирование в неорганических системах. *Научное издание*. Челябинск, 1999. 256 с.

157. Мухина Т. Н., Барабанов Н. Л., Бабаш С. Е. и др. Пиролиз углеводородного сырья. М. : Химия, 1987. 240 с.

158. Нагиев М. Ф. Учение о рециркуляционных процессах в химической технологии (методы химико-технологического исследования комплексных многостадийных реакций и вопросы оптимизации химических комбинатов). Баку : Азерб. гос. изд-во, 1965. 474 с.

159. Нагиев М. Ф. Теория рециркуляции и повышение оптимальности химических процессов (Новые технологические принципы, моделирование и оптимизация химических процессов, осуществляемых в системах с обратной связью). М. : Наука, 1970. 392 с.

160. Нагиев М. Ф. Химическая рециркуляция. М. : Наука, 1978. 88 с.

161. Некос В. Е., Берещук Н. Я., Дмитриев И. Б. Проблемы отходов в системе улучшения экологии городской среды. *Захист довкілля від антропогенного навантаження*. 1999. Вип. 1 (3). С. 154-160.

162. Нікітченко Ю. С. Еколого-економічний аналіз технологій переробки зношених автомобільних шин. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка*. 2012. № 142. С. 58-62.

163. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов. *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. 2008. № 1, 3, 4, 5. С. 1-39.

164. Новичков Ю. А., Петренко Т. В., Братчун В. И. Исследование процесса бескислородного пиролиза изношенных автомобильных шин. URL : <http://cyberleninka.ru/article/issledovanie-protsesssa-beskislородnogo-piroliza-iznoshennyh-avtomobilnyh-shin/pdf> (дата звернення: 4.09.2016).

165. Новичков Ю. А. Повышение экологической безопасности рециклинга автотракторных шин : диссерт. на соискание уч. степени к.т.н. 05.23.19 –

экологическая безопасность строительства и городского хозяйства. Макеевка, 2018. 172 с.

166. Основи хімічної термодинаміки кінетика, біохімічних реакцій URL : <http://intranet.tdmu.edu.ua> (дата звернення: 12.06.2016).

167. Павлова С.С. А., Журавлева И. В., Толчинский Ю. И. Термический анализ органических и высокомолекулярных соединений. Москва, 1983. 120 с.

168. Папін А. В., Ігнатов А. Ю., Макаревич Е. А., Неведров О. В. Получение композиционного топлива на основе технического углерода пиролиза автошин. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2015. № 3(109). С. 107-113.

169. Парфенюк А. С., Антонюк С. И., Топоров А. А. Диоксины : проблема техногенной безопасности технологий термической переработки углеродистых отходов. *Экотехнологии и энергосбережение*. 2002. №6. С. 40-44.

170. Парфенюк А. С. Крупномасштабная комплексная переработка твердых углеродистых промышленных и бытовых отходов. *Кокс и химия*. 2001. № 5. С. 41-44.

171. Петрук В. Г., Прокопенко В. О., Турчик П. М. Оцінка впливу на навколишнє середовище шинної промисловості. *Екологічна оцінка методів утилізації відходів шинної промисловості: збірник матеріалів II Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю*. Львів, 2010. С. 1-4.

172. Петрук В. Г., Васильківський І. В. Петрук Р. В., Крусір Г. В., Клименко М. О., Сакалова Г. В. Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 4. Технології поводження з відходами харчових виробництв. Підручник. Херсон: Олді-плюс, 2019. 520 с.

173. Планковский С. И., Гарин В. О., Цегельник Е. В. Сучасні методи утилізації полімерних композиційних матеріалів. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2011. № 51. С.186-193.

174. Площай Ф. В. Параметричний аналіз ризиків в проектах утилізації шахтного метану. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2012, №1/11 (55). С. 53-55.

175. Пляцук Л. Д., Гурець Л. Л., Будьонний О.П. Утилізація гумових відходів. *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. Випуск 5/2007 (46). (ч. 1). С. 152 -154.

176. Повякель Л. И., Иванова Т. П., Кривенчук В. Е., Козлова Е. В. Роль санитарно-гигиенических исследований при обращении с полимерными отходами. *Збірник матеріалів II науково-практичної конференції "Енергозбереження при термічній переробці відходів - значний потенціал енергоресурсів"*. К.: Знання, 2002. С. 59-62.

177. Позднякова О. І., Сталилко М. В. Исследование физико-химических параметров продуктов утилизации автопокрышек методом пиролиза и их влияние на отрасли применения. *Экология и промышленность*. 2006. №1. С. 57-60.

178. Позднякова О. І., Пономаренко А. В. Авторециклінг – шлях до ресурсозбереження та сталого розвитку України. <http://nauka.zinet.info/20/ponomarenko.php>

179. Позднякова О. І, Шапар О. В., Ширяєва І. І. Дослідження галузей застосування рідинних продуктів піролізу автопокришок як альтернативного палива. *Екологія. Людина. Суспільство*. Київ, 2011.

180. Попович Н. В. Екологічно безпечний збір, транспортування та знешкодження твердих побутових відходів : дис. на здобуття вч. ступеня кандидата технічних наук : 21.06.01. Львів, 2019. 209 с.

181. Попович В. В. Поводження із твердими побутовими відходами (вітчизняний та зарубіжний контекст). *Науково-технічний збірник*. № 105. С. 476-781.

182. Попович О. Р., Ятчишин Ю. Й., Мальований М. С., Яворівська І. М., Вронська Н. Ю. Проблема утилізації небезпечних медичних відходів (на прикладі України та Польщі). *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. 2008. № 622. С. 60-64.

183. Попович В. В. Еколого-техногенна небезпека сміттєзвалищ та наукові основи фіто меліоративних заходів їх виведення з експлуатації : дис. на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук : спец. 21.06.01 - екологічна безпека.



Львів, 2017. 527 с.

184. Последние данные Евростата: муниципальные отходы 2018 года. 29 января 2020 г. URL : <https://www.cewep.eu/> (дата звернення: 20.01.2019).

185. Постанова Кабінету Міністрів України Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року від 08.11.2017 р. № 820-р. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80> (дата звернення: 22.05.2018).

186. Постанова Кабінету Міністрів України «Про систему збирання, сортування, транспортування, переробки та утилізації використаної тари (упаковки) і твердих побутових відходів» від 16.03.1999 р. № 408 (скасовано) URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/408-99-%D0%BF> (дата звернення : 01.02.2015).

187. Потап І. Ю. Стратегия и тактика экологизации инвестиционной деятельности в контексте проектного подхода. *Управление проектами: состояние и перспективы* : матер. VI Междунар. науч.-практ. конференции. Николаев : НУК, 2010. С. 258-262.

188. Превратите отходы в доходы. URL : <http://altop.com.ua/> (дата звернення : 08.04.2015).

189. Проблеми енергетики і зміна структури народного господарського використання вуглеводневої сировини. URL : <http://energoworld.com/articles/36-articles/762-news> (дата звернення 19.07.2017).

190. Пупышев А. А. Термодинамическое моделирование термохимических процессов в спектральных источниках. Учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург, 2007. 85 с.

191. Разработка и моделирование установки для термической обработки горючих сланцев URL : [http://discollection.ru/article/27072009\\_kosova\\_ol\\_ga\\_jur\\_evna\\_93707/2](http://discollection.ru/article/27072009_kosova_ol_ga_jur_evna_93707/2) (дата звернення 12.10.2015).

192. Расчет константы равновесия по термодинамическим данным. Метод Темкина-Шварцмана. URL : [https://studopedia.ru/4\\_3418\\_raschet-konstanti-ravnovesiya-po-termodinamicheskim-dannim-metod-temkinashvartsmana.html](https://studopedia.ru/4_3418_raschet-konstanti-ravnovesiya-po-termodinamicheskim-dannim-metod-temkinashvartsmana.html) (дата

звернення:18.11.2016).

193. Розен Константин. Утилизация покрышек методом пиролиза. URL : [www.brasco-oil.ru](http://www.brasco-oil.ru) (дата звернення:11.07.2016).

194. Рижков С. С., Маркіна Л. Н., Рудюк М.В. Інноваційні технології утилізації органічних відходів з отриманням альтернативного палива на основі багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Збірник наукови праць Національного університету кораблебудування*. 2010. № 2 (431), С. 133-142.

195. Рыжков С. С., Маркіна Л. Н. Аналіз процесу регулювання потоків в циркуляційній системі багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Електронне видання : Вісник НУК*. 2010. № 1, С. 144-151.

196. Рижков С. С, Маркіна Л. М., Рудюк М. В., Ощип О. В. Анализ процессов деструкции диоксинов и тяжелых углеводородов при многоконтурном циркуляционном пиролизе твердых бытовых отходов. *Научно-технический журнал : Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2011. № 6, С. 43-48.

197. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Лісова А. В. Тверді побутові відходи як сировина для двостадійного процесу термічної деструкції. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2011. № 3 (438), С. 140-148.

198. Рижков, С. С., Маркіна Л. М., Рудюк М. В., Філатова М. І. Дослідження раціональних технологічних параметрів роботи установки ЕУ БЦП-14. *Вісник НУК*. Миколаїв : НУК. 2012. № 2, С. 574 - 583.

199. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Мирошніченко М. В. Екологічна безпека продуктів екопірогенезису та використання їх як альтернативного палива. *Екологічна безпека*. 2012. № 2(14), С. 98-103.

200. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Рудюк М. В. Аналіз теплового потенціалу технологій піролізу твердих побутових відходів і шляхи його реалізації. *Збірник наукових праць НУК*. 2012. № 1 (442), С. 124-127.

201. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Крива М. С Дослідження кінетики термічної деструкції органічних відходів. *Екологічна безпека*. 2013. № 2(16), С. 82-88.

202. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Рудюк М. В., Філатова М. І. Контроль та

дослідження можливих модифікацій рідких вуглеводнів піролізного палива. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2014. № 5 (455), С. 117-125.

203. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Сербін С. І., Радченко М. І. Кондиціонування повітря на вході турбогенератора використанням скидної теплоти піролізної технології утилізації твердих побутових відходів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2012. № 3-4 (444), С. 128-132.

204. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Крива М. С. Аналіз особливостей фізико-хімічних процесів багатоконтурного циркуляційного піролізу органічних відходів. *Збірник наукових праць НУК*. 2012. № 5-6 (445), С. 125-131.

205. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Рудюк Н. В., Заболотная Ю. В. Отработка пиролизной технологии утилизации органических отходов для морехозяйственного комплекса – система подачи отходов в пиролизный реактор. *Судостроение и морская инфраструктура*. 2014. № 2, С. 131-143.

206. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Крива М. С., Глиняна В. В. Аналіз основних термодинамічних показників багатоконтурного циркуляційного піролізу органічних відходів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2015. № 4 (460), С. 104-112.

207. Рижков С. С., Трохименко Г. Г., Маркіна Л. М., Циганюк Н. В. Визначення концентрації важких металів у рідкій фракції продуктів багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2015. №1 (457), С. 92-98.

208. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Крива М. С. Аналіз особливостей фізико-хімічних процесів багатоконтурного циркуляційного піролізу органічних відходів. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв, 2012. № 5-6. С. 117-123.

209. Рижков С. С., Рижков С. С., Маркіна Л. М., Розробка екологічно безпечної технології екопірогенезису для утилізації органічних відходів та низькосортного вугілля з отриманням альтернативних видів пального. *Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 10-13.

210. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Крива М. С. Визначення хімічних реакцій первинного піролізу в реакторі БЦП при утилізації органічних відходів. Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічної конференції. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 119-120.

211. Рижков, С. С., Маркіна Л. М., Крива М. С. Встановлення первинної кінетичної моделі термічної деструкції органічних відходів. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні* : Матеріали 8 міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: видавництво НУК. 2013. С. 82-85.

212. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Філатова М. І. Дослідження складу рідкого продукту багатоконтурного циркуляційного піролізу. Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*». Миколаїв : НУК, 2014. С. 70-72.

213. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Рудюк М. В. Інноваційні технології утилізації органічних відходів з отриманням альтернативного палива на основі багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв, 2010. № 2. С. 133-142.

214. Рижков С. С., Маркіна Л. М., Мирошніченко М. В. Екологічна безпека продуктів екопірогенезису та використання їх як альтернативного палива. *Екологічна безпека*. 2012. № 2(14). С. 98-103.

215. Рижков, С. С., Маркіна Л. М., Рудюк М. В. Інноваційні технології утилізації органічних відходів з отриманням альтернативного палива на основі багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв : НУК. 2010. № 2 (431). С. 133-142.

216. Рыжков С. С., Маркина Л. Н., Бабий В. П., Рудюк Н. В. Особенности процесса многоконтурного пиролиза высокомолекулярных органических отходов. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2001. № 5. С. 56-61.

217. Саати Т. Принятие решений - метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1993. 278 с.

218. Савіна О. Ю., Маркіна Л. М. Ідентифікація та аналіз ризиків портфеля наукомістних проектів підприємства з утилізації відходів за технологією

«екопірогенезіс». *Управління проектами та розвиток виробництва*. 2018. №1 (66), С. 31-46.

219. Савина О. Ю. Особенности наукоемких предприятий и специфика управления их проектами. *Збірник наукових праць. «Вісник ЧДТУ. Серія: Технічні науки»*. 2017. № 1. С. 39-43.

220. Савіна О. Ю. Особливості портфелів проектів наукомістких підприємств та специфіка управління ними. *Управління розвитком складних систем*. 2017. № 30. С. 62-74.

221. Сбор, удаления и обезвреживание бытовых отходов / Под ред. Гуляева Н. Ф. М. :Стройиздат, 1971. 298с.

222. Самсонов А. И. Эксергетический анализ работы тепловых машин. Противоречия и неточности в учебниках по технической термодинамике. *Кораблестроение, океанотехника, вопросы экономики*. Владивосток, 2002. № 25. С. 21-22.

223. Семко І. Б. Огляд ризиків проектів електроенергетики. *Управління розвитком складних систем*. 2015. № 22 (1). С. 69-74.

224. Систер В. Г., Деминский М. А., Животов В. К., Иванникова Е. М., Ямчук А. И., Бабарицкий А. И., Дёмкин С. А., Коробцев С. В., Потапкин Б. В., Чебаньков Ф. Н. Газификация твердых углеродов в расплаве металла. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2008. № 10. С. 32-36.

225. Синюк О. М. Моделювання плинину рідини з в'язкістю що залежить від температури. Хмельницький: ТУП, 2002. №1 Часть 1 (38). 216 с.

226. Скрипник А. В., Міхно І. С. Оптимізація утилізації відходів в Україні. *Вісник Східноєвропейського університету економіки і менеджменту*. 2014, № 2. С. 14-26.

227. Скоромный А. Л. Снижение энергозатрат на утилизацию изношенных автомобильных шин методом термохимической деструкции. *Экология и промышленность*. 2008. № 4. С. 68-71.

228. Сметанин В. И. Защита окружающей среды от отходов производства и потребления. М. : КолосС, 2003. 230 с.

229. Соколов Е. Я., Бродянский В. М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. 1981. 235 с.

230. Соколов А. Р., Беляев П. С., Маликов О. Г. Исследование процесса девулканизации резиновой крошки изношенных автомобильных шин. URL : <http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/st/2004/sokolov.pdf> (дата звернення: 05.10.2016).

231. Спосіб утилізації органічних відходів : патент на корисну модель 52840 Україна. Маркіна Л. М., Рудюк М. В., Бабій В. П., кл. F23G 5/027 №52840 ; заявл. 03.10.02; опубл. 15.01.2003, Бюл. № 1.

232. Спосіб утилізації органічних відходів – екопірогенезіс : патент на корисну модель 66822 Україна. Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК (2012.01) : F23G 5/027 (2006.01), C10G 1/00. № u 201105242 ; заявл. 26.04.2011 ; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2.

233. Спосіб теплопостачання житлового мікрорайону з використанням власних альтернативних видів палива : патент на винахід 102773 Україна. Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК (2013.01) : F24D 3/00, F23G 5/027 (2006.01), C10G 1/00, C10B 53/07 (2006.01), C08J 11/00. № а 201204564 ; заявл. 11.04.2012 ; опубл. 12.08.2013, Бюл. № 15.

234. Спосіб вимірювання рівня завантаженості відходів у реакторах багатоконтурних піролізних установок : патент на корисну модель 92217 Україна. Кондратенко Ю. П., Козлов О. В., Маркіна Л. М., Рудюк М. В., Коробко О.В. МПК : G21C 17/035 (2006.01), G01F 23/22 (2006.01). № u 201400945 ; заявл. 03.08.2014 ; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15.

235. Спосіб термічної утилізації органічних відходів з сезонним алгоритмом використання одержаних альтернативних видів палива при теплопостачанні мікрорайону : патент на винахід 110670 Україна. Маркіна Л.М., Рижков С.С., Рудюк М.В. МПК (2016.01) : F23G 5/027 (2006.01), C10G 1/00, B09B 3/00, C10B 53/00. № а 201407317 ; заявл. 01.07.2014 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

236. Спосіб безперервної деполімерізації суміші полімерних відходів з отриманням рідких, газоподібних і твердих продуктів: пат. на корисну модель 124714 Україна. Рудюк М. В., Маркіна Л. М., Новоселова М.М. МПК (2018.01) :

F23G5/027 (2006.1) C10G1/00. № u 2017 09242 ; заявл. 19.09.2017 ; опубл. 25.04.18, Бюл. № 8.

237. Спосіб утилізації органічних відходів: пат. на корисну модель 52840 Україна. Маркіна Л. М., Рудюк М. В., Бабій В.П. МПК : F23G5/027 C10G1/00. № u 2001 031804 ; заявл. 19.03.2001 ; опубл. 15.01.03, Бюл. № 1.

238. Спосіб багатоконтурної циркуляційної газифікації органічних відходів : патент на винахід 102321 Україна. Маркіна Л.М., Рижков С.С., Рудюк М.В. МПК : (2013.01) : C10J 3/20 (2006.01), F23B 99/00, F23G 5/027 (2006.01). № а 201201324 ; заявл. 08.02.2012 ; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12.

239. Стольберг Ф. В. Экология города. К. : Либра, 2000. 464 с.

240. Сталинский, Д. В., Скромный А. Л., Синозацкий А. М. Моделирование температурного состояния реактора термохимической деструкции изношенных автомобильных шин. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2011. №1, С. 58-66.

241. Суслов М. Б. Оборудование по утилизации и переработке шин, других РТИ. URL : <http://suslov.m.ucoz.ru/> (дата звернення: 3.05.2019).

242. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. Москва, 1968. 536 с.

243. Тверді побутові відходи в Україні : потенціал розвитку. Сценарії розвитку галузі поводження з твердими побутовими відходами. Підсумковий звіт. URL : <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/504c5765-89d4-4be1-916e-ea27aa94feaf/> (дата звернення: 20.01.2019).

244. Тимонин А. С. Инженерно-экологический справочник. Калуга, 2003. Т. 3. 1024 с.

245. Тимошевский Б. Г., Ткач М. Р. Моторные топлива из полимерного сырья: производство и применение. Киев, 2011. 290 с.

246. Торховский В. Н., Николаев А. И., Бухаркин А. К. Пиролиз углеводородного сырья : метод. указания. Москва, 2004. 68 с.

247. Трофімов І. Л., Яковлева А. В., Іванченко О. В., Верягіна Л. С. Аналіз потенціалу твердих побутових відходів як сировини для виробництва альтернативних палив в Україні. *Енергетика: економіка, технології, екологія* :

*науковий журнал*. 2016. № 2 (44). С. 105-111.

248. Трофімов І. Л. Оцінка впливу відходів побутового походження на екологічний стан України. *Восточно-Европейский журнал передових технологій*. 2014. Т. 2. № 10(68). С. 25-39.

249. Трохименко Г. Г., Цимбал Д. О., Циганюк Н. В. Створення експериментального стенда для дослідження рідкого та твердого залишку продуктів багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв, 2012. № 2. С. 121-124.

250. Трохименко Г. Г., Маркіна Л. М., Циганюк Н. В., Цимбал Д. О. Виявлення важких металів у твердому залишку продуктів БЦП методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії. *Електронне видання : Вісник Національного університету кораблебудування*. Миколаїв : НУК. 2012. №2, С. 410-413.

251. Тризонний газогенератор вологих органічних відходів: пат. на винахід 109610 Україна. Маркіна Л.М., Рижков С.С., Рудюк М.В., Борцов О.С. МПК (2015.01) : С10J 3/20 (2006.01), F23B 99/00, F23G 5/24 (2006.01), F23G 5/027 (2006.01). № а 201407309 ; заявл. 01.07.14 ; опубл. 10.09.15, Бюл. № 17.

252. Тугов И. И., Кострыкина Г. И. Физика и химия полимеров. Москва, 1989. 432 с.

253. Універсальна автоматизована установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин : патент 98287 України на корисну модель № 98287 UA. Л. М. Маркіна, С. С. Рижков, М. В. Рудюк, М. С. Крива.; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

254. Універсальна установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин : патент на винахід 112907 Україна. Маркіна Л.М., Рижков С.С., Рудюк М.В. МПК : F23G 5/027 (2006.01), C08J 11/04 (2006.01), F23G 5/24 (2006.01), C10B 53/07 (2006.01), C10G 1/10 (2006.01). № а 201501280 ; заявл. 16.02.2015 ; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 21.

255. Універсальна автоматизована установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин : патент України на винахід № 110678 UA. Л. М. Маркіна, С. С. Рижков, М. В. Рудюк, М. С. Крива .; опубл. 25.01. 2016, Бюл. № 2.



256. Усов А.В., Дубров А.Н., Дмитришин Д.В. Моделирование систем с распределенными параметрами. Одеса : Астропринт, 2002. 664 с.

257. Установа для безперервного піролізу твердих органічних відходів : патент на винахід 96079 Україна. Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК : F23G 5/027 (2006.01). № а 201005978; заявл. 18.05.2010; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

258. Установа для циркуляційного піролізу інфікованих медичних відходів : патент на винахід 96080 Україна. Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК : F23G 5/027 (2006.01). № а 201005980 ; заявл. 18.05.2010 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

259. Установа піролізу органічних відходів з безперервним вивантаженням пірокарбону : патент на винахід 96086 Україна. Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК : F23G 5/027 (2006.01). № а 201008360 ; заявл. 05.07.2010 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

260. Установа безперервної термічної утилізації термопластичних відходів : патент на винахід 102308 Україна. Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В. МПК : (2013.01) : B09B 3/00, C10G 1/00, C10B 53/07 (2006.01), C08J 11/12 (2006.01). № а 201114361 ; заявл. 05.12.2011 ; опубл. 25.06.2013. Бюл. № 12.

261. Установа безперервного піролізу полімерних відходів з платформою : патент на винахід 103723 Україна. Маркіна Л.М., Рижков С.С., Рудюк М.В., Московко О.О. МПК : F23G 5/027 (2006.01), C10J 3/20 (2006.01). № а 201210912 ; заявл. 18.09.2012 ; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.

262. Установа для безперервного піролізу подрібнених полімерних відходів з системою їх подачі в реактор : пат. на винахід 110424 Україна. Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В., Заболотна Ю.В. МПК F23G 5/027 (2006.01). № а 201406653 ; заявл. 13.06.2014 ; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.

263. Установа для безперервного піролізу подрібнених термопластичних полімерних відходів з системою контролю рівня розплаву в реакторі : патент на винахід 110669 Україна. Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М.В. МПК (2016.01) F23G 5/027 (2006.01) G01F 23/22 (2006.01) G05D 9/00. № а 201407317 ; заявл.

25.01.2016 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

264. Універсальна автоматизована установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин : патент на винахід 110678 Україна. Маркіна Л. М., Рижков С. С., Рудюк М. В., Крива М. С. МПК F23G5/24 (2006.01), F23G 5/027 (2006.01), C08J 11/04 (2006.01), C10G 1/10 (2006.01), C10B 53/07 (2006.01). № а 201410925 ; заявл. 06.10.2014 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

265. Установка безперервної деполімерізації суміші полімерних відходів з отриманням рідких, газоподібних і твердих продуктів : патент на корисну модель 125168 Україна. Рудюк М. В., Маркіна Л. М., Новоселова М. М. МПК (2018/01) : F23G5/027 (2006.1) B09B3/00 C10G1/00. № и 2018 00164 ; заявл. 19.09.2017 ; опубл. 25.04.18, Бюл. № 8.

266. Установка безперервної глибокої термічної утилізації термопластичних відходів з одержанням рідкого палива легких фракцій : пат. на корисну модель 120657 Україна. Рудюк М. В., Маркіна Л. М., Новоселова М. М. МПК (2017/01) : F23G5/027 (2006.1) B09B3/00 C10G1/00. № и 2017 05520 ; заявл. 06.06.2017 ; опубл. 10.11.17, Бюл. № 21.

267. Установка для безперервної термічної утилізації органічних відходів з одержанням рідкого палива : патент на корисну модель 50431 Україна. Маркіна Л.М., Рижков С.С., Рудюк М.В. МПК (2006) : F23G 5/027 (2006.01), C10G 1/00. № и 200912544 ; заявл. 03.12.2009 ; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11.

268. Устинов В. А., Козлита А. Н., Люлькин М. С. Выбор температурного режима в аппарате пиролиза на основании химии процесса. *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2011. № 3. URL : <http://www.ogbus.ru> (дата звернення: 3.04.2017).

269. Файнзильберг Л. С. Байесова схема принятия коллективных решений в условиях противоречий. *Проблемы управления и информатики*. 2002, № 3. С. 112-122.

270. Федоев С. Д. Теория технологических процессов. Основы теории термической деструкции углеродистых материалов: курс лекцій. Москва, 1982. С. 48.

271. Федоров Л. А. Диоксины как экологическая опасность : ретроспектива и перспективы. М. : Наука. 1993. 266 с.
272. Федоткин І.М., Бурляй І.Ю., Рюмшин М.О. Математичне моделювання технологічних процесів: теорія реакторів, рециркуляції й промезового шару. К. : Техніка, 2003. 424 с.
273. Федюкнн Д. Л., Махлис Ф. А. Технические и технологические свойства резин. Москва, 1985. 240 с.
274. Фесіна Ю. Г. Оптимізація логістичного ланцюга поводження з твердими побутовими відходами. *Науковий журнал «Логістика: теорія та практика» Луцького національного технічного університету*. 2011. №1. С. 110-126.
275. Фомин В. М., Апельинский Д. В. Анализ технологий переработки альтернативных источников энергии в моторное топливо. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2014. № 1(19), т. 1. С. 66-73.
276. Хазипов В. А., Погребняк В. Г., Хазипова В. В. Диоксины и их образование в процессе коксования. *Экотехнологии и энергосбережение*. 2000. №6. С. 50-55.
277. Характеристика ТБО как органического топлива. URL : <http://www.kasin.org/pdf/chapter3.pdf> (дата звернення: 03.10.2018).
278. Чернова Л. С. Механізми діагностики ризиків у програмах інноваційного розвитку наукомістких виробництв (на прикладі створення газотурбінних установок) : дис. канд. техн. наук : 05.13.22 / Чернова Любава Сергіївна; Національний університет Кораблебудування ім. адм. Макарова. М., 2017. 209 с.
279. Черножуков Н. И., Обрядчиков С. Н. Химия нефти и нефтяных газов. Москва, 1946. 254 с.
280. Шаго Є. П. Аналіз існуючих технологій термічного знешкодження відходів. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, 2012. № 2 (73). С. 179-183.
281. Шабурова Н. А. Материаловедение Часть II Неметаллические материалы. Челябинск, 2011. 82 с.
282. Шленский О. Ф., Лясникова Н. Н., Соколов-Бородкин Е. С. Параметры и режимы горения конденсированных систем. Москва, 2009. 135 с.

283. Шмандий В. М., Вамболь В. В. Системный подход к решению задачи управления экологической безопасностью при утилизации отходов жизнедеятельности. *Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: сб. тр. науч. экологич. конф.* Краснодар, 2015. С. 680-685.
284. Шмандий В. М. Управление техногенной безопасностью урбосистемы на стадии образования и поступления отходов в окружающую среду : монография. 2001. Т. 2. 132 с.
285. Шуддякова К. А. Воздействие автомобильных шин на окружающую среду и здоровье человека. *Молодой учёный*. 2016. № 20 (124). С 472-477.
286. Эксергетический анализ термодинамических циклов. URL : <http://sergeyk.kiev.ua/tech/exergy/analysis/> (дата звернення: 17.12.2017).
287. Енергоспоживання на основі відновлюваних джерел за 2007-2018 роки URL : [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/sg/ekolog/ukr/esp\\_vg\\_u](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/sg/ekolog/ukr/esp_vg_u) (дата звернення: 22.02.2019).
288. Юфит С. С. Альтернативные технологии переработки бытовых отходов. *Научно-практический журнал «Твердые бытовые отходы»*. 2009. № 1. С. 36-41.
289. Ямпольский Ю. П. Элементарные реакции и механизм пиролиза углеводов. Москва, 1990. 216 с.
290. Яцун А. В., Коновалов Н. П., Ефименко И. С. Жидкие продукты пиролиза отработанных автомобильных шин под воздействием СВЧ. *Химия твердого топлива*. 2013. № 4. С. 60-62.
291. Aishwarya K N. Microwave Assisted Pyrolysis of Plastic Waste. *Procedia Technology*. 2016. Vol. 25. P. 990-997.
292. Alex Lu Chia Yang, Farid Nasir Ani Controlled microwave-induced pyrolysis of waste rubber tires. *International Journal of Technology*. 2016. № 2. P. 314-322.
293. Alan C. Lloyd Technology Evaluation and Economic Analysis of Waste Tire Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction. *University of California Riverside, Integrated Waste Management Board*, 2006.
294. Al Seyab, R. K. A case study of predictive control for the ALSTOM gasifier

problem. *IEE Proceedings – Control and Applications*, vol. 153(3), 2006. P. 293-301.

295. Anke Brems, Jan Baeyens, Carlo Vandecasteele, & Raf Dewil (2011). Polymeric Cracking of Waste Polyethylene Terephthalate to Chemicals and Energy. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Volume 61. DOI:10.3155/1047-3289.61.7.721

296. Baran P., Krzak M., Zarębska K., Szczurowski J., Żmuda W.A. Adsorption of sulfur (IV) oxide on activated carbon from pyrolysis of waste tires. *Przemysł Chemiczny*. June 2016. DOI: 10.15199/62.2016.6.16.

297. Barton P. I., Allagor R. J., Feehery W. F., Galan S. Dynamic optimization in a discontinuous world. *Ind. Chem. Res.* 1998, 37. P. 966-981.

298. Bekhiti M., Trouzine H., Asroun A. Properties of Waste Tire Rubber Powder. *Engineering, Technology and Applied Science Research*. Vol. 4, №. 4, 2014. P. 669-672.

299. Bekhiti M. Properties of Waste Tire Rubber Powder. *Engineering, Technology and Applied Science Research*. 2014. Vol. 4, Issue 4. P. 669-672.

300. Bokhoree C., Beeharry Y., Makoondlall-Chadee T., Doobah T., Soomary N. Assessment of Environmental and Health Risks Associated with the Management of Medical Waste in Mauritius. *APCBEE Procedia* Vol. 9, 2014, P. 36-41.

301. Composites Recycling : Market Opportunity Analysis, April 2010. 4 p. [https : adherent-tech.com](https://adherent-tech.com) (дата звернення: 4.08.2015).

302. Chiwara B. Pyrolysis of plastic waste into fuel and other products. *Proceedings Sardinia, Sixteenth International. Waste Management and Landfill Symposium*, 2-6 October 2017, Italy. Available online at [https : //www.researchgate.net/publication/321213689](https://www.researchgate.net/publication/321213689) (дата звернення: 3.08.2018).

303. Deepak B. Effective disposal of plastic waste. *International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology (IJARTET)*. 2016. Vol. 3, Special Issue 5. P. 10-15.

304. Débora Almeida Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste 5. Instituto de Macromoléculas Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil. *Polímeros*. 2016 // DOI: 10.1590/0104-1428.2100.

305. Development and model operation of installation for a heat treatment of

combustible slates [Electronic resource]. Available at: URL: [http://discollection.ru/article/27072009\\_kosova\\_ol\\_ga\\_jur\\_evna\\_93707/](http://discollection.ru/article/27072009_kosova_ol_ga_jur_evna_93707/) (дата звернення 15.07.2012).

306. Dixon R., Pike A., Donne M. The ALSTOM benchmark challenge on gasifier control. *Proc. Inst. Mech. Eng. I, J. Syst. Control Eng.*, 2000, 214. P. 389-394.

307. Duncan M. Price, Douglas J. Hourston, and Fabrice Dumont. Thermogravimetry of Polymers. *Encyclopedia of Analytical Chemistry* R.A. Meyers (Ed.) *John Wiley & Sons Ltd, Chichester*. 2000. P. 8094-8105.

308. Farid Nasir Ani. Microwave Induced Fast Pyrolysis of Scrap Rubber Tires. *The 4th International Meeting of Advances in Thermofluids (IMAT 2011) AIP Conf. Proc.* 1440. 2012. P 834-841. Doi: 10.1063/1.4704294.

309. Felix A. Aisien, Robert O. Ebewe, Fredrick K. Hymore. Mathematical model of sorption kinetics of crude oil by rubber particles from scrap tyres. *Leonardo Journal of Sciences*. 2011. Issue 18. URL : <http://ljs.academicdirect.org/> (дата звернення: 12.09.2014).

310. Hamza Y. Ismail, Ali Abbas, Fouad Azizi, Joseph Zeaiter. Pyrolysis of waste tires: A modeling and parameter estimation study using Aspen Plus. *Waste Management*. 2016.

311. Hasib Z. M., Hossain J., Biswas S., Islam A. Bio-Diesel from Mustard Oil: A Renewable Alternative Fuel for Small Diesel Engines. *Modern Mechanical Engineering*, 2011. №1. P. 77-83. doi:10.4236/mme.2011.12010. URL : <http://www.SciRP.org/journal/mme> (дата звернення: 13.04.2012).

312. Heil J.P. Study and analysis of carbon fiber recycling. *Graduate Faculty of North Carolina State University*, 2011. 154 p.

313. Hujuri U., Ghoshal A. K., Gumma S. Modeling Pyrolysis Kinetics of Plastic Mixtures. *Polymer Degradation and Stability*. Vol. 93, No. 10, 2008. P. 1832-1837.

314. Hind Isam, Mohamed Magzoub Garieb Alla. Conversion of Used tires to Useful Products. *International Journal of trend in Research and Development*. 2016. Vol. 3 (4). URL : [www.ijtrd.com](http://www.ijtrd.com) (дата звернення: 12.11.2018).

315. Islam, M. N. Improvement of Waste Tire Pyrolysis Oil and Performance Test

with Diesel in CI Engine. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Renewable Energy*. 2016. 8 p. Article ID 5137247, URL : <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5137247> (дата звернення: 12.11.2018).

316. Janusz Wojciech Bujak. Thermal utilization (treatment) of plastic waste. *Energy*. 2015. P. 1468-1477.

317. Jean Baptiste Habyarimana. Synthesis of Hydrocarbon Fuel by Thermal Catalytic Cracking of Polypropylene. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2017. // DOI: 10.14299/ijser.2017.01.014.

318. Julius I. Osayi. Biocrude Production through Pyrolysis of Used Tyres. *Hindawi Publishing Corporation, Journal of Catalysts*. Vol. 2014, P. 1-9 p.

319. Kalitko V. A. New Functions and Factors for Safety and Quality of Tyre Pyrolysis with Cogenerated-Superheated Steam: *Engineering Theory, Innovative Design and Testing Data on Pilot Mobile Plant 6 t/day*. 2018. URL : <https://www.researchgate.net/publication/327944258> (дата звернення: 3.09.2018).

320. Kalitko V. A. Steam thermolysis of tire shreds: modernization in afterburning of accompanying gas with waste steam. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2010. Vol. 83. No. 1. P. 179-187.

321. Kalitko V. A. Waste Tire Pyrolysis Recycling with Steaming: Heat-Mass Balances & Engineering. Solutions for By-Products Quality. *Material Recycling - Trends and Perspectives*. 2012. URL : <http://www.intechopen.com/books/material-recyclingtrends-and-perspectives/waste-tire-pyrolysis-recycling-with-steam-heat-mass-balances-and-engineeringsolutions-for-by-product> (дата звернення: 4.09.2015).

322. Katarzyna Slopiecka, Pietro Bartocci, Francesco Fantozzi. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis. *Applied Energy*. 2012. P. 491-497.

323. Kim, K. K. Novij metod utilizatsii avtomobilnyh shin s metolokordom [A new method for recycling automobile tires with metal cord]. *Life safety*. 2007. Vol. 7. P. 24-27.

324. Кос А. Studying the Utilization of Plastic Waste by Chemical Recycling Method. *Open Journal of Applied Sciences*. Vol. 3, No. 1, 2013. P. 413-420.

325. Kondratenko Y. P., Kozlov O. V. Computerized Monitoring and Control

System for Ecopyrogenesis Technological Complex. Tribuna Plural: La revistacientifica. Barcelona: Reial Academia de Doctors, 2014. № 1. P. 223-255.

326. Kuan Ding, Zhaoping Zhong, Bo Zhang, Zuwei Song, Xiaoxiao Qian. Pyrolysis characteristics of waste tire in an analytical pyrolyzer coupled with gas chromatography, mass spectrometry. *Energy Fuels*. 2015. P. 3181-3187.

327. Matzakos A. N. Computerized thermogravimetric reactor with video microscopy imaging system for coal pyrolysis and combustion studies. *Review of Scientific Instruments*, Volume 64, Issue 6, 1993. P. 1541-1548.

328. Mohamed M. Garib Alla, Ahmed I. Ahmed, Babiker K. Abdalla. Conversion of plastic waste to liquid fuel. *International Journal of Technical Research and Applications*. 2014. Vol. 2, Issue 3. P. 29-31.

329. Markina L., Tymchenko I. Comprehensive evaluation of environmental hazard factors at disposal of waste using the «ecopyrogenesis» technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 2/6 (74), P. 38-44.

330. Markina L., Kryva M. Modeling of destruction processes during recycling of rubber-technical waste using the technology of multi-contour circulation pyrolysis. *Збірка матеріалів XII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні»*. Миколаїв : НУК, 2017. С.42-43.

331. Najla Grioui, Kamel Halouani. Review on biomass – tires co-pyrolysis: Exploration of energy-recovery methods of byproducts. *Refrigeration Energy and Environment*, Hammamet, 2016. URL : <https://www.researchgate.net/publication/306103247> (дата звернення: 20.10.2018).

332. Nema, S. K. Plasma pyrolysis of medical waste. *Current science, Bengaluru*. 2005. Vol. 83, № 3. P. 271-278.

333. Nema S. K., Ganeshprasad K. S. Plasma pyrolysis of medical waste. *Current science, Bengaluru*, 2005. Vol. 83, № 3. С. 271-278.

334. Nikitchenko J. S., Vovk O. O. Environmental Safety Technology of Scrap Tires Treatment. *Proceedings of The National Aviation University*. 2009. № 4, P. 94-99.

335. Pallab Das. Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis. *Resources, Conservation & Recycling*. 2018. Vol. 128. P. 69-77.



336. Park JK, Hoerning L, Watry S, Burgett T and Matthias S. Effects of Electronic. *Waste on Developing Countries Advances in Recycling & Waste Management*. 2017, 2:2 DOI: 10.4172/2475-7675.1000128.

337. Paweł Baran, Mateusz Krzak, Katarzyna Zarębska, Jakub Szczurowski, Wiesław A. Żmuda. Adsorption of sulfur (IV) oxide on activated carbon from pyrolysis of waste tires. *Przemysl Chemiczny*. 2016. DOI 10.15199/62.2016.6.16.

338. Rofiqul Islam. Innovation in Pyrolysis Technology for Management of Scrap Tire: a Solution of Energy and Environment. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2010. Vol. 1. № 1. P 89-96 p.

339. Ryzhkov S., Rudyuk N., Markina L. Research of thermal conductivity of the condensed mass of the whole waste tires and determination of their optimum arrangement in the pyrolysis reactor. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 4/5 (82) 2016. P. 12-18.

340. Ryzhkov S., Timchenko I.V. Expert system of estimation for the environmental risk levels of hazardous facilities of a shipbuilding plant. *Вісник НУК*. 2012, № 2 (14). P.

341. Ryzhkov S., Markina L., Kryva M. Modeling of Destruction Processes During Recycling of Rubber-Technical Waste Using the Technology of Multi-Contour Circulation Pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 3/10 (87), P. 28-35.

342. Scheirs J. and Kaminsky W. *Feeds tock Recycling and Pyrolysis of Waste plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels*. *John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex*, 2006. P.

343. Sana Kordoghli, Maria Paraschiv, Radu Kuncser, Mohand Tazerout, Malina Prisecaru, Fethi Zagrouba, Ionut Georgescu. *Managing the environmental hazards of waste tires*. *Journal of Engineering Studies and Research*. 2014. Vol. 20. № 4. P. 1-11.

344. Sarker M., Mamunor Rashid M., Sadikur Rahman M., Molla M. Alternative Diesel Grade Fuel Transformed from Polypropylene (PP) Municipal Waste Plastic Using Thermal Cracking with Fractional Column Distillation. *Energy and Power Engineering*. 2012. № 4. P. 65-172.

345. Shahzad Ahmad, Muhammad Imran Ahmad, Khawar Naeem, Muhammad Humayun, Sebt-E-Zaeem, Farrukh Faheem. Oxidative desulfurization of tire pyrolysis. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*. 2016. № 22 (3). P. 249-254.
346. Singh B., Sharma N. Mechanistic Implications of Plastic Degradation. *Polymer Degradation and Stability*. Vol. 93, № 3, 2008. P. 561-584.
347. Skoromnii, A. L. Snizenie energozatrat nautilizatsiyu iz noshennyh avtomobilnyh shin metodom termohimicheskoy destruktzii. Reduced energy consumption for recycling of used tires by thermochemical destruction. *Ecology and industry*. 2008. Vol. 4. P. 68-71.
348. Thanyaporn Tanchareernrat, Garry L. Rempel, Pattarapan Prasassarakich. Cleaner alternative liquid fuels derived from the hydrodesulfurization of waste tire pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.02.003.
349. Themelis N., Barriga M., Estevez P., Velasco M. Руководство по применению отходов к энергетическим технологиям в Латинской Америке и Карибском бассейне. Руководство по WTE, ЕЕС / IDB, июль 2013. Earth Engineering Center, Колумбийский университет. 228 стр. URL : [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/pressreleases/Guidebook\\_WTE\\_v5\\_July25\\_2013.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/pressreleases/Guidebook_WTE_v5_July25_2013.pdf) (дата звернення: 08.02.2015).
350. Top Y. Waste generation and utilisation in micro-sized furniture-manufacturing enterprises in Turkey. *Waste Management* 2015. 35. P 3-11.
351. Vovk, O. O. Environmental Safety Technology of Scrap Tires Treatment. *Proceedings of The National Aviation University*. 2009. Vol. 41, Issue 4. P. 94-99. doi: 10.18372/2306-1472.41.1805.
352. Wongkhorsub C., Chindaprasert N. A Comparison of the Use of Pyrolysis Oils in Diesel Engine. *Energy and Power Engineering*. 2013. №5. P. 350-355. doi:10.4236/epe.2013.54B068.
353. Xinghua Zhang, Tiejun Wang, Longlong Ma, Jie Chang. Vacuum pyrolysis of waste tires with basic additives. *Waste Management*. 2008. P. 2301-2310 DOI : 10.1016/j.wasman.2007.10.009.

354. Yukiko Hashimoto Wastemanagement in urbanindia and roleofsocia lenterprises. *Eurasian Journal of Business and Management*, 4(1), 2016, P. 42-50 DOI: 10.15604/ejbm.2016.04.01.005

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації

*Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science*

1. **Markina L.**, Tymchenko I. Comprehensive evaluation of environmental hazard factors at disposal of waste using the "ecopyrogenesis" technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 2/6 (74), P. 38 – 44. (Scopus, Index Copernicus) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39941>. Автору належить
2. Ryzhkov S., Rudiuk N., **Markina L.** Research of Thermal conductivity of the Condensed Mass of the Whole Waste Tires and Determination of Their Optimum Arrangement in the Pyrolysis Reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 4/5 (82), P. 12-19. (Scopus, Index Copernicus). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.73557>
3. Ryzhkov S., **Markina L.**, Kryva M. Modeling of Destruction Processes During Recycling of Rubber-Technical Waste Using the Technology of Multi-Contour Circulation Pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 3/10 (87), P. 28-35. (Scopus, Index Copernicus). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101725>
4. **Markina L.M.**, Kryva M.S. study of technological parameters of pyrolysis of waste tires under static load. *Science and Innovation*. 2018, 14(6): 35 – 49. (Web of Science, Index Copernicus International). <https://doi.org/10.15407/scin14.06.038>

*Статті у фахових наукових виданнях із переліку МОН України*

5. Рижков С.С., **Маркина Л.Н.**, Рудюк М.В. Інноваційні технології утилізації органічних відходів з отриманням альтернативного палива на основі багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2010. № 2 (431), С. 133 - 142.

6. Рыжков С.С., **Маркіна Л.Н.** Аналіз процесу регулювання потоків в циркуляційній системі багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Електронне видання : Вісник НУК.* 2010. № 1, С. 144 – 151.
7. **Маркіна Л.Н.**, Філатова М.І. Аналіз можливості застосування термічних методів деструкції органічної сировини для утилізації побутових відходів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування.* 2010. № 6 (435), С. 152 – 159.
8. **Маркіна Л.М.** Розробка новітньої технології енергозбереження та екологічної безпеки при утилізації органічних відходів методом екопірогенезису. *Збірник наукових праць НУК.* 2011. № 4 (439), С. 156 – 163.
9. Рыжков С.С., **Маркіна Л.М.**, Рудюк М.В., Ощип О.В. Анализ процессов деструкции диоксинов и тяжелых углеводородов при многоконтурном циркуляционном пиролизе твердых бытовых отходов. *Научно-технический журнал : Энерготехнологии и ресурсосбережение.* 2011. № 6, С. 43-48.
10. Рыжков С.С., **Маркіна Л.М.**, Лісова А.В. Тверді побутові відходи як сировина для двостадійного процесу термічної деструкції. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування.* 2011. № 3 (438), С. 140 – 148.
11. Рыжков, С.С., **Маркіна Л.М.**, Рудюк М.В., Філатова М.І. Дослідження раціональних технологічних параметрів роботи установки ЕУ БЦП-14. *Вісник НУК.* Миколаїв : НУК. 2012. № 2, С. 574 – 583.
12. Трохименко Г.Г., **Маркіна Л.М.**, Циганюк Н.В., Цимбал Д.О. Виявлення важких металів у твердому залишку продуктів БЦП методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії. *Електронне видання : Вісник Національного університету кораблебудування.* Миколаїв : НУК. 2012. №2, С. 410 – 413.
13. Рыжков С.С., **Маркіна Л.М.**, Мирошніченко М.В. Екологічна безпека продуктів екопірогенезису та використання їх як альтернативного палива. *Екологічна безпека.* 2012. № 2(14), С. 98 – 103.
14. Рыжков С.С., **Маркіна Л.М.**, Рудюк М.В. Аналіз теплового потенціалу технологій піролізу твердих побутових відходів і шляхи його реалізації. *Збірник наукових праць НУК.* 2012. № 1 (442), С. 124 – 127.
15. Кондратенко Ю.П., **Маркіна Л.М.**, Козлов О.В. Математичне моделювання

температурних режимів реактора багатоконтурної піролізної установки для задач автоматичного керування. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2012. № 2 (443), С. 84 –90.

16. Рижков С.С., **Маркіна Л.М.**, Сербін С.І., Радченко М.І. Кондиціонування повітря на вході турбогенератора використанням скидної теплоти піролізної технології утилізації твердих побутових відходів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2012. № 3-4 (444), С. 128 – 132.

17. Рижков С.С., **Маркіна Л.М.**, Крива М.С. Аналіз особливостей фізико-хімічних процесів багатоконтурного циркуляційного піролізу органічних відходів. *Збірник наукових праць НУК*. 2012. № 5-6 (445), С. 125 – 131.

18. **Маркіна Л.М.**, Мирошниченко М.В. Альтернативні рідкі палива з відходів: переваги та недоліки. *Енерготехнологии и ресурсосбережение*. 2013. № 4, С. 23-30.

19. Рижков С.С., **Маркіна Л.М.**, Крива М.С. Дослідження кінетики термічної деструкції органічних відходів. *Екологічна безпека*. 2013. № 2(16), С. 82 - 88. (Index Copernicus).

20. Рижков С.С., **Маркіна Л.М.**, Рудюк М.В., Філатова М.І. Контроль та дослідження можливих модифікацій рідких вуглеводнів піролізного палива. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2014. № 5 (455), С. 117 – 125. (Crossref, eLIBRARY, WorldCat, Base-Search, Scholar.google).

21. Козлов О.В., **Маркіна Л. М.**, Рудюк М. В. Автоматизація процесів керування технологічними комплексами утилізації цілих зношених автошин. *Наукові праці. Науково-методичний журнал : Комп'ютерні технології*. 2015. № 254 (Том 266), С. 131-137. (Scholar.google)

22. **Маркіна Л.М.**, Тимченко І.В. Розробка автоматизованої системи управління екологічними ризиками при утилізації відходів за технологією «Екопірогенезіс». *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 2/4(22), С.50 – 56. (Index Copernicus)

23. **Маркіна Л.М.** Математичне моделювання процесів автоматичного завантаження відходів у реактор. *Екологічні науки*. 2018. №1 (20), Том 2, С.74 – 83. (Index Copernicus)

24. Савіна О.Ю., **Маркіна Л.М.** Ідентифікація та аналіз ризиків портфеля наукомістних проектів підприємства з утилізації відходів за технологією «екопирогенезис». *Управління проектами та розвиток виробництва*. 2018. №1 (66), С. 31 – 46. (Scholar.google)
25. **Маркіна Л.М.**, Крива М.С. Забезпечення екологічної безпеки під час термічної утилізації гумотехнічних відходів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : технічні науки*. 2019. Том 30 (69). № 1. Частина 2. С. 41-50. (Index Copernicus).
26. **Маркіна Л.М.**, Крива М.С. Забезпечення екологічно обґрунтованого регулювання утворенням небезпечних речовин під час термічної утилізації гумотехнічних відходів. *Екологічні науки*. 2019. №1 (24), Том 2, С. 136 – 143. (Index Copernicus).
27. Рижков С.С., **Маркіна Л.М.**, Рудюк Н.В., Заболотная Ю.В. Отработка пиролизной технологи утилизации органических отходов для морехозяйственного комплекса – система подачи отходов в пиролизный реактор. *Судостроение и морская инфраструктура*. 2014. № 2, С. 131 - 143. (eLIBRARY, Україніка наукова).
28. **Маркіна Л.М.**, Потай І.Ю. Проблеми управління проектом «Екопирогенезис» в рамках екологізації бізнеса. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2014. № 6 (456), С. 120 – 127. (Crossref, eLIBRARY, WorldCat, Base-Search, Scholar.google)
29. Рижков С.С., **Маркіна Л.М.**, Крива М.С., Глиняна В.В. Аналіз основних термодинамічних показників багатоконтурного циркуляційного піролізу органічних відходів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2015. № 4 (460), С. 104 – 112. (Crossref, eLIBRARY, WorldCat, Base-Search, Scholar.google)
30. Рижков С.С., Трохименко Г.Г., **Маркіна Л.М.**, Циганюк Н.В. Визначення концентрації важких металів у рідкій фракції продуктів багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2015. №1 (457), С. 92 – 98. (Crossref, eLIBRARY, WorldCat, Base-Search, Scholar.google)

31. **Маркіна Л.М.** Дослідження характеристик ущільнення маси цілих зношених автошин в піролізному реакторі. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2017. № 3 (470), С. 121 – 128. (Crossref, eLIBRARY, WorldCat, Base-Search, Scholar.google).

32. Рижков С.С., **Маркіна Л.М.**, Рудюк М.В., Філатова М.І., Литвинов І.В. Експериментальна установка для дослідження процесу багатоконтурного циркуляційного піролізу. *Електронне видання : Вісник Національного університету кораблебудування за 2012 рік*. Миколаїв : НУК. 2012. С. 381 - 386.

*Патенти на винахід та корисну модель України*

33. Установка для безперервного піролізу твердих органічних відходів : патент на винахід 96079 Україна. **Маркіна Л.М.**, Рижков С.С., Рудюк М.В. МПК : F23G 5/027 (2006.01). № а 201005978 ; заявл. 18.05.2010 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

34. Установка для циркуляційного піролізу інфікованих медичних відходів : патент на винахід 96080 Україна. **Маркіна Л.М.**, Рижков С.С., Рудюк М.В. МПК : F23G 5/027 (2006.01). № а 201005980 ; заявл. 18.05.2010 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

35. Установка піролізу органічних відходів з безперервним вивантаженням пірокарбону : патент на винахід 96086 Україна. **Маркіна Л.М.**, Рижков С.С., Рудюк М.В. МПК : F23G 5/027 (2006.01). № а 201008360 ; заявл. 05.07.2010 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

36. Спосіб утилізації органічних відходів – екопірогенезіс : патент на корисну модель 66822 Україна. **Маркіна Л.М.**, Рижков С.С., Рудюк М.В. МПК (2012.01) : F23G 5/027 (2006.01), C10G 1/00. № и 201105242 ; заявл. 26.04.2011 ; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2.

37. Установка безперервної термічної утилізації термопластичних відходів : патент на винахід 102308 Україна. **Маркіна Л.М.**, Рижков С.С., Рудюк М.В. МПК : (2013.01) : B09B 3/00, C10G 1/00, C10B 53/07 (2006.01), C08J 11/12 (2006.01). № а 201114361 ; заявл. 05.12.2011 ; опубл. 25.06.2013. Бюл. № 12.

38. Спосіб теплопостачання житлового мікрорайону з використанням власних альтернативних видів палива : патент на винахід 102773 Україна. **Маркіна Л.М.**, Рижков С.С., Рудюк М.В. МПК (2013.01) : F24D 3/00, F23G 5/027 (2006.01), C10G



1/00, C10B 53/07 (2006.01), C08J 11/00. № а 201204564 ; заявл. 11.04.2012 ; опубл. 12.08.2013, Бюл. № 15.

39. Спосіб вимірювання рівня завантаженості відходів у реакторах багатоконтурних піролізних установок : патент на корисну модель 92217 Україна. Кондратенко Ю.П., Козлов О.В., **Маркіна Л.М.**, Рудюк М.В., Коробко О.В. МПК : G21C 17/035 (2006.01), G01F 23/22 (2006.01). № и 201400945 ; заявл. 03.08.2014 ; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15.

40. Установа для безперервного піролізу подрібнених полімерних відходів з системою їх подачі в реактор : пат. на винахід 110424 Україна. **Маркіна Л.М.**, Ришков С.С., Рудюк М.В., Заболотна Ю.В. МПК F23G 5/027 (2006.01). № а 201406653 ; заявл. 13.06.2014 ; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.

41. Установа для безперервного піролізу подрібнених термопластичних полімерних відходів з системою контролю рівня розплаву в реакторі : патент на винахід 110669 Україна. **Маркіна Л.М.**, Ришков С.С., Рудюк М.В. МПК (2016.01) F23G 5/027 (2006.01) G01F 23/22 (2006.01) G05D 9/00. № а 201407317 ; заявл. 25.01.2016 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

42. Універсальна автоматизована установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин : патент на винахід 110678 Україна. **Маркіна Л.М.**, Ришков С.С., Рудюк М.В., Крива М.С. МПК F23G5/24 (2006.01), F23G 5/027 (2006.01), C08J 11/04 (2006.01), C10G 1/10 (2006.01), C10B 53/07 (2006.01). № а 201410925 ; заявл. 06.10.2014 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

43. Спосіб термічної утилізації органічних відходів з сезонним алгоритмом використання одержаних альтернативних видів палива при теплопостачанні мікрорайону : патент на винахід 110670 Україна. **Маркіна Л.М.**, Ришков С.С., Рудюк М.В. МПК (2016.01) : F23G 5/027 (2006.01), C10G 1/00, B09B 3/00, C10B 53/00. № а 201407317 ; заявл. 01.07.2014 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

44. Установа безперервної глибокої термічної утилізації термопластичних відходів з одержанням рідкого палива легких фракцій : пат. на корисну модель 120657 Україна. Рудюк М.В., **Маркіна Л.М.**, Новоселова М.М. МПК (2017/01) : F23G5/027 (2006.1) B09B3/00 C10G1/00. № и 2017 05520 ; заявл. 06.06.2017 ; опубл. 10.11.17, Бюл. № 21.

45. Спосіб безперервної деполімерізації суміші полімерних відходів з отриманням рідких, газоподібних і твердих продуктів: пат. на корисну модель 124714 Україна. Рудюк М.В., **Маркіна Л.М.**, Новоселова М.М. МПК (2018.01) : F23G5/027 (2006.1) C10G1/00. № у 2017 09242 ; заявл. 19.09.2017 ; опубл. 25.04.18, Бюл. № 8.

46. Установка безперервної деполімерізації суміші полімерних відходів з отриманням рідких, газоподібних і твердих продуктів : патент на корисну модель 125168 Україна. Рудюк М.В., **Маркіна Л.М.**, Новоселова М.М. МПК (2018/01) : F23G5/027 (2006.1) B09B3/00 C10G1/00. № у 2018 00164 ; заявл. 19.09.2017 ; опубл. 25.04.18, Бюл. № 8.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

47. **Маркіна Л.М.**, Філатова М.І. Підвищення енергетичних властивостей газоподібного продукту при двостадійному процесі. Збірник матеріалів 6-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2011. С.109-112.

48. **Маркіна Л.М.** Впровадження екологічно безпечної технології Екопірогенезіса при утилізації органічних побутових відходів з одержанням альтернативного палива. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: Матеріали 2-ої міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв : видавництво НУК. 2011. С. 457-460.

49. Рижков С.С., Рижков С.С., **Маркіна Л.М.**, Розробка екологічно безпечної технології екопірогенезісу для утилізації органічних відходів та низькосортного вугілля з отриманням альтернативних видів пального. Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 10-13.

50. **Маркіна Л.М.**, Мірошніченко М.В. Розрахунок викидів NOx при спалюванні альтернативних видів палива отриманих методів двостадійного процесу утилізації органічної сировини. Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 96-98.

51. **Маркіна Л.М.**, Філатова М.І. Моделювання параметрів багатоконтурного циркуляційного піролізу для розробки експериментальної установки. Збірник

- матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 113-114.
52. Рижков С.С., **Маркіна Л.М.**, Крива М.С. Визначення хімічних реакцій первинного піролізу в реакторі БЦП при утилізації органічних відходів. Збірник матеріалів 7-ї міжнародної науково-технічна конференція. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*. Миколаїв : видавництво НУК. 2012. С. 119-120.
53. **Маркіна Л.М.**, Філатова М.І. Вдосконалення технології утилізації твердих побутових відходів з отриманням альтернативних палив. Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції *«Природоохоронні аспекти використання відновлювальних джерел енергії в Україні»*. Миколаїв : вид-во ЧДУ, 2012. С. 90-91.
54. Мирошніченко М.В., **Маркіна Л.М.**, Рижков С.С. Аналіз показників рідкої фракції технології БЦП. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні* : Матеріали 8 міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: видавництво НУК. 2013.С.76-78.
55. Рижков, С.С., **Маркіна Л.М.**, Крива М.С. Встановлення первинної кінетичної моделі термічної деструкції органічних відходів. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні* : Матеріали 8 міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: видавництво НУК. 2013.С.82-85.
56. Мирошніченко М.В., **Маркіна Л.М.**, Дослідження показників рідких продуктів технології БЦП. Збірка тез доповідей 16 Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених *«Екологія. Людина. Суспільство»*. Київ : НТУУ «КП», 2013. С. 118-119.
57. Рижков С.С., **Маркіна Л.М.**, Філатова М.І. Дослідження складу рідкого продукту багатоконтурного циркуляційного піролізу. Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції *«Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні»*. Миколаїв : НУК, 2014. С. 70-72.
58. **Маркіна Л.М.**, Рудюк М.В. Основні положення підвищення продуктивності реактора піролізу цілих зношених автошин. Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції *«Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні»*.

Миколаїв : НУК, 2015. С. 18-19.

59. **Маркіна Л.М.,** Тоболякова М.І. Аналіз можливості застосування сучасного розрахункового пакету програм FLUENT (ANSYS, Inc.) для моделювання процесу багатоконтурного циркуляційного піролізу. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*». Миколаїв : НУК, 2015. С. 111-113.

60. **Маркіна Л.М.,** Глиняна В.В. Ексергетичний аналіз деструктивної переробки органічних відходів методом багатоконтурного циркуляційного піролізу. Збірка тез доповідей 19 Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених «*Екологія. Людина. Суспільство*». Київ : НТУУ «КПІ», 2016. С. 108.

61. **Маркіна Л.М.** Дослідження процесу ущільнення цілих зношених шин при піролізі. Матеріали XI Міжнародній науково-технічній конференції «*Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*». Миколаїв : НУК, 2016. С. 25-26.

62. **Маркіна Л.М.,** Крива М.С., Глиняна В.В. Визначення ексергетичної ефективності процесу утилізації гумовмісних відходів за технологією багатоконтурного циркуляційного піролізу. Матеріали 7-ої міжнародної науково-технічної конференції «*Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*». Миколаїв : видавництво НУК. 2016. С. 271-272.

63. **Markina L.,** Kryva M. Modeling of destruction processes during recycling of rubber-technical waste using the technology of multi-contour circulation pyrolysis. Збірка матеріалів XII Міжнародної науково-технічної конференції «*Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*». Миколаїв : НУК, 2017. С.42-43.

64. **Маркіна Л.М.,** Крива М. С. Визначення особливостей розподілення з'єднань у фракціях при утилізації автошин. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи* : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Львів : ЛДУБЖД. С. 58 – 59.

65. **Маркіна Л.М.** Дослідження екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : Матеріали XX міжнародної науково-технічної конференції. У 2-х томах. Т.1. Миколаїв : НУК, 2019. С. 615-617.

66. **Маркіна Л.М.,** Сегіна Є.Є., Маркін О.С. Оцінка стійкості обладнання екологічно прийнятної технології екопірогенезіс при надзвичайних ситуаціях. *Безпека життя діяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика* : Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції. Херсон, 2019. С. 50-54.
67. **Маркіна Л.М.** Розвиток наукових основ екологічно прийнятного піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів. *Проблеми екологічної безпеки* : Матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції. Кременчук, 2019. С. 171-175.
68. **Маркіна Л.М.** Розробка екологічно прийнятного піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових відходів. *Проблеми екології та енергозбереження* : Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв : Видавець Торубара, 2019. С. 27-31.

Особисто автором у роботах, опублікованих за співавторства було: - встановлено об'єм утворення, накопичення та характеристики сумішей твердих органічних відходів, аналіз технологій їх переробки та утилізації відходів, умов здійснення процесів та екологічної безпеки – 4, 7, 9, 10, 52; змодельовано процес рециркуляції в системі «газ - рідина» термічної деструкції твердих органічних відходів та обґрунтовано основні параметри інтенсифікації проведення екологічно прийнятного піролізного процесу, встановлено параметри для розробки математичної моделі температурного режиму піролізного реактора та визначення експлуатаційних характеристик обладнання – 3, 6, 8, 15, 16, 17, 19, 21, 25, 29, 32, 51, 55, 59, 63; встановлено фізико-хімічні характеристики отриманих продуктів, досліджено модифікації рідких вуглеводнів, які отримані в різних температурних та часових режимах – 11, 14, 18, 20, 30, 47, 53, 54, 56, 57; досліджено характеристики ущільнення маси цілих зношених автошин, теплопровідності ущільненої маси та визначено оптимальне їх розташування в піролізному реакторі – 2, 4, 31, 40, 41, 58, 61; проведено комплексну оцінку факторів екологічної небезпеки процесу утилізації відходів методом екологічно прийнятного піролізного процесу, встановлено параметри екологічної безпеки піролізного процесу та отриманих продуктів – 1, 12,

13, 22, 26, 50, 60, 62, 64-68; створено ефективні схемні рішення піролізних установок та елементів конструкцій – 23, 27, 33-37, 39, 42, 44-46; визначено економічні аспекти застосування піролізного процесу для різних видів сировини та потужностей; обґрунтовано економічну доцільність впровадження, використання піролізного процесу та обладнання – 24, 28, 38, 43, 48, 49.

## ДОДАТОК Б

## Патенти на винахід та корисну модель



Рисунок Б.1 - Установа для безперервного піролізу твердих органічних відходів :  
патент на винахід 96079 Україна



Рисунок Б.2 - Установа для циркуляційного піролізу інфікованих медичних відходів  
: патент на винахід 96080 Україна





Рисунок Б.3 - Установа піролізу органічних відходів з безперервним вивантаженням пірокарбону : патент на винахід 96086 Україна



Рисунок Б.4 - Спосіб утилізації органічних відходів – екопірогенезіс : патент на корисну модель 66822 Україна



Рисунок Б.5 - Установа безперервної термічної утилізації термопластичних відходів: патент на винахід 102308 Україна



Рисунок Б.6 - Спосіб теплопостачання житлового мікрорайону з використанням власних альтернативних видів палива : патент на винахід 102773 Україна



Рисунок Б.7 - Спосіб вимірювання рівня завантаженості відходів у реакторах багатоконтурних піролізних установок : патент на корисну модель 92217 Україна



Рисунок Б.8 - Установа для безперервного піролізу подрібнених полімерних відходів з системою їх подачі в реактор : пат. на винахід 110424 Україна



Рисунок Б.9 - Установа для безперервного піролізу подрібнених термопластичних полімерних відходів з системою контролю рівня розплаву в реакторі : патент на винахід 110669 Україна



Рисунок Б.10 - Універсальна автоматизована установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин : патент на винахід 110678 Україна





Рисунок Б.11 - Спосіб термічної утилізації органічних відходів з сезонним алгоритмом використання одержаних альтернативних видів палива при теплопостачанні мікрорайону : патент на винахід 110670 Україна



Рисунок Б.12 - Установа безперервної глибокої термічної утилізації термопластичних відходів з одержанням рідкого палива легких фракцій : патент на корисну модель 120657 Україна



Рисунок Б.13 - Спосіб безперервної деполімеризації суміші полімерних відходів з отриманням рідких, газоподібних і твердих продуктів: пат. на корисну модель 124714 Україна



Рисунок Б.14 - Установа безперервної деполімеризації суміші полімерних відходів з отриманням рідких, газоподібних і твердих продуктів : патент на корисну модель 125168 Україна

## ДОДАТОК В

Фізико-хімічні процеси первинного піролізу сухих органічних відходів на експериментальній установці УПУ-МІО-10

Вихідні речовини	Температурний інтервал	Хімічний механізм розкладання	Утворені продукти
<i>Нагрівання маси сухих органічних продуктів</i>			
Суміш органічних відходів	110-120°C	Виділення вологи та залишку повітря, дегідрування	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub>
	200°C	Виділення летких речовин, первинна деструкція	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, Cl, F, SO <sub>2</sub> та ін.
<i>Поступове плавлення та первинна деструкція в реакторі БЦП. Утворення первинної ПГС</i>			
І група Полімерні відходи	Початок 125-270°C Завершення 300-250°C	Зміна агрегатного стану з твердого в рідкоподібний	Розплав термопластичних полімерів
	200-400°C	Деструкція, дисоціація, деполімеризація	Низькомолекулярний продукт, мономер
ІІ група Відходи деревини	150-200°C	Сублімація – перехід із твердого агрегатного стану в газоподібний	CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
	270-450°C	Деполімеризація, поліконденсація, глибока деструкція, карбонізація	Ароматичні сполуки (феноли), ациклічні сполуки, вихід оцтової кислоти, вихід вугілля, вихід летких речовин

Лігнін	200°C	Деполімеризація, дисоціації хімічних зв'язків, повна перебудова первинної структури лігніну	Низькомолекулярні, леткі сполуки, низькокалорійний газ
Целюлоза	300°C	Деполімеризація,, глибока деструкція	Більш прості і стійкі речовини, мономери
<i>Утворення розплаву органічних відходів з установленням парорідинної рівноваги</i>			
Нижчі олефіни – етилен і пропілен та ін.	200-400°C	Дегідрування, відщеплення водню, подальше розкладання і поліконденсація. Установлення рівноваги ПГС із розплавом у реакторі (за умови рівних тиску й температури ПГС та розплаву)	Циклічні ненасичені (циклополієни) та ароматичні вуглеводнів
<i>Початок утворення твердого залишку - пірокарбону</i>			
Складні багатоядерні ароматичні вуглеводні та алкени	450-500°C	Конденсація, дегідроконденсація, поліконденсація, дегідрополіконденсація. Розкладання вихідних вуглеводнів на вуглець і водень	Утворення пірокарбону, видалення залишку легких речовин

## ДОДАТОК Г

Загальний вигляд, комплектація та документація на обладнання Науково-дослідного «Центру піролізних технологій» (Лабораторії піролізних технологій (з 2009р. до 2019р.)) при Науково-дослідному інституті проблем екології та енергозбереження Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова

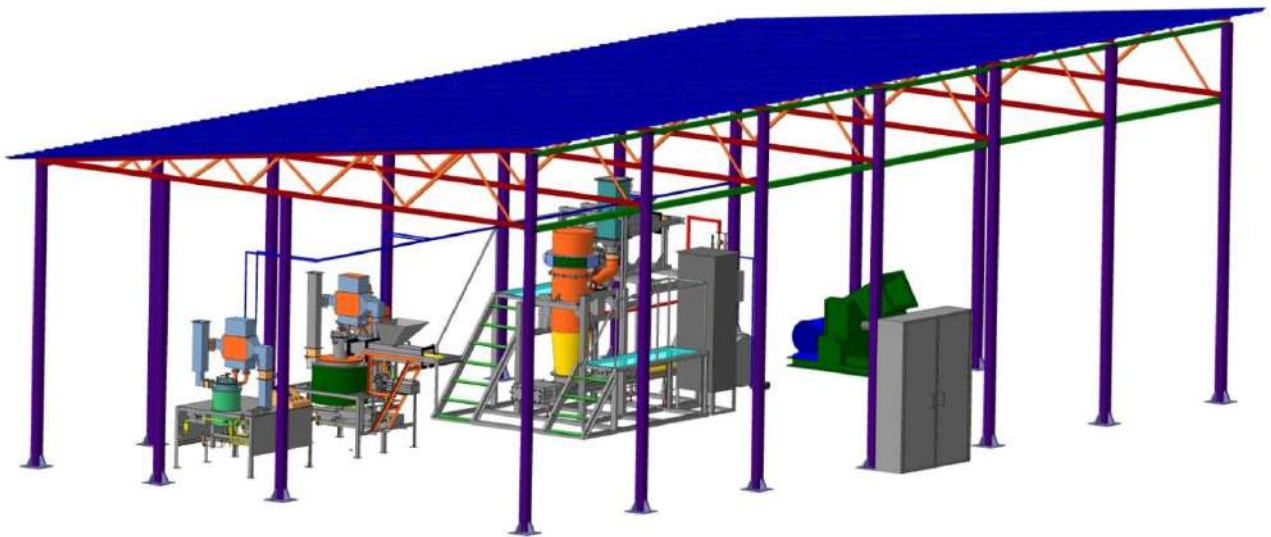


Рисунок Г.1 – 3Д зображення розташування обладнання



Рисунок Г.2 – Загальний вигляд лабораторного експериментального обладнання Науково-дослідного «Центру піролізних технологій»

## ДОДАТОК Г.1



«Затверджую»

Ректор НУК

Рижков С.С.

\_\_\_\_\_ 2014р.

**Перелік науково - дослідних стендів «Лабораторії  
піролізних технологій» (ЛПТ)**

1. Стенд №1 – Установа експериментальна «ЕУ БЦП – 14».
2. Стенд №2 – Установа «Екопір 18Д».
3. Стенд №3 – Установа «Екопір Газогенератор».
4. Стенд №4 – Установа «Екопір БЦП».
5. Стенд №5 – Комплекс інтегрований для подрібнення ТПВ

Науковий керівник ЛПТ

к.т.н. \_\_\_\_\_ Маркіна Л.М.

« 28 » \_\_\_\_\_ 05 2014



## ДОДАТОК Г.2



д.т.н. Рижков С.С.  
2010 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на проектування та виготовлення лабораторної установки типу ЕУ БЦП-14, що призначена для проведення науково-дослідних робіт з утилізації твердих побутових відходів методом багатоконтурного циркуляційного піролізу для отримання альтернативних видів палива.

Розробили:

к.т.н., доцент НУК  
Маркіна Л.М.  
«  » 2010 р.

с.п.с. НУК  
Рудюк М.В.  
«  » 2010 р.

м. Миколаїв  
2010 р.

 **НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ИМ. АДМ. МАКАРОВА** 

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Ректор \_\_\_\_\_ Рижков С.С.  
«  » 2011 р.

**Стенд №1**

**Експериментальна установка ЕУ БЦП – 14  
по термічній утилізації органічних відходів з одержанням  
альтернативних видів палива.**

Паспорт та інструкція по експлуатації

<p>Погоджено:</p> <p>Начальник НУК к.т.н. _____ Рижков С.С. «<u>  </u>» 2011 р.</p>	<p>Розробили:</p> <p>К.т.н. доцент НУК Маркіна Л.М. С.п.с. НУК Рудюк М.В.</p>
---	---

м. Миколаїв  
2011 р.

 **НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ИМ. АДМ. МАКАРОВА** 

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Ректор \_\_\_\_\_ Рижков С.С.  
«  » 2013 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на проектування та виготовлення установки «Екопір 18Д» для утилізації полімерних відходів з отриманням альтернативного рідкого палива.

Погоджено:

Начальник НУК  
к.т.н. \_\_\_\_\_ Рижков  
С.С.  
«  » 2013 р.

Розробили:

К.т.н. доцент НУК  
Маркіна Л.М.  
С.п.с. НУК  
Рудюк М.В.

м. Миколаїв  
2013 р.

 **НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ИМ. АДМ. МАКАРОВА** 

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Ректор \_\_\_\_\_ Рижков С.С.  
«  » 2014 р.

**Стенд №2**

**Установка «Екопір 18Д»  
по термічній утилізації органічних відходів з одержанням  
альтернативних видів палива.**

Паспорт та інструкція по експлуатації

Погоджено:

Начальник НУК  
к.т.н. \_\_\_\_\_ Рижков  
С.С.  
«  » 2014 р.

Розробили:

К.т.н. доцент НУК  
Маркіна Л.М.  
С.п.с. НУК  
Рудюк М.В.

м. Миколаїв  
2014 р.

## Продовження Додатку Г.2

 **НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ИМ. АДМ. МАКАРОВА** 

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Ректор Рижков С.С.  
«    »      2013 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на проектування та виготовлення установки «Екопір БЦП»  
для утилізації полімерних відходів з отриманням  
альтернативного рідиного палива.

Погоджено: **Начальник НУК** **Розробили:**  
к.т.н. Рижков С.С. К.т.н. доцент НУК  
«    »      2013р. Маркіна Л.М.  
С.п.с. НУК  
Рудюк М.В.

м. Миколаїв  
2013 р.

 **НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ИМ. АДМ. МАКАРОВА** 

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Ректор Рижков С.С.  
«    »      2014 р.

**Стенд №4**

**Установка Екопір БЦП**  
по термічній утилізації органічних відходів з одержанням  
альтернативних видів палива.

Паспорт та інструкція по експлуатації

Погоджено: **Начальник НУК** **Розробили:**  
к.т.н. Рижков С.С. К.т.н. доцент НУК  
«    »      2014р. Маркіна Л.М.  
С.п.с. НУК  
Рудюк М.В.

м. Миколаїв  
2014 р.

 **НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ИМ. АДМ. МАКАРОВА** 

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Ректор Рижков С.С.  
«    »      2013 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на проектування та виготовлення установки «Екопір Газогенератор»  
для газифікації вологих ТПВ «хвоєтів» з отриманням  
генераторного газу.

Погоджено: **Начальник НУК** **Розробили:**  
к.т.н. Рижков С.С. К.т.н. доцент НУК  
«    »      2013р. Маркіна Л.М.  
С.п.с. НУК  
Рудюк М.В.

м. Миколаїв  
2013 р.

 **НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ИМ. АДМ. МАКАРОВА** 

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Ректор Рижков С.С.  
«    »      2014 р.

**Стенд №3**

**Установка «Екопір Газогенератор»**  
по термічній утилізації вологих органічних відходів з  
одержанням генераторного газу.

Паспорт та інструкція по експлуатації

Погоджено: **Начальник НУК** **Розробили:**  
к.т.н. Рижков С.С. К.т.н. доцент НУК  
«    »      2014р. Маркіна Л.М.  
С.п.с. НУК  
Рудюк М.В.

м. Миколаїв 2014р.

## ДОДАТОК Г.3

ДКПІ 28.99.39--55.00

УКНД 71.120.10

Згідно з



**ПОГОДЖЕНО**  
 Директор  
 ТОВ «Респект Бізнес»  
 О.В. Моспаненко  
 « 25 » 12 2016

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Директор  
 ТОВ «ТЕХНО АЛЬЯНС СЕРВІС»  
 С.І. Маркін  
 « 27 » 12 2016

**УСТАНОВКИ ПРОЛІЗІ****ТЕХНІЧНІ УМОВИ****ТУ У 28.9-36487146-001:2016**

(Уведено вперше)

Дата надання чинності 28.12.2015

Без обмеження строку чинності

**РОЗРОБЛЕНО**

Керівник проекту


ТОВ «ТЕХНО АЛЬЯНС СЕРВІС»


 Л.М. Маркіна

« 14 » 11 2016

Головний конструктор

ТОВ «ТЕХНО АЛЬЯНС СЕРВІС»


 М.В. Рудюк

« 14 » 11 2016

## ДОДАТОК Д

Скорочені розроблені методики проведення експериментальних досліджень

### **Установка ЕУ БЦП – 14:**

Підготовка до пуску: Підготовлений матеріал для дослідження (суміші різних органічних відходів) завантажуються в корзину, яка надалі встановлюється в реактор. Після завантаження реактора він герметизується кришкою, що ущільнюється гвинтовим пресом. Включити рубильник на головному розподільному щиті і подати електричне живлення на пульт управління і устаткування установки. Пуск «на холодну» здійснюється без подачі холодної води у вихідний конденсатор, це пов'язано з високою тепловою інерційністю стенду. Після того, як III-й контур прогріється до температури 100 °С, необхідно встановити витрату води, що охолоджує, на вихідний конденсатор регулюючи його краном, орієнтуючись на свідчення витратоміру. Перед запуском головного пальника проводиться включення витяжного вентилятора, який забезпечує необхідну тягу в газоході. Дросельною заслінкою регулюється розрідження на початку газоходу, яке повинно складати 40 – 50 Па. Заслінку регулюють, ґрунтуючись на свідчення манометра. Дане розрідження забезпечує нормальні умови, для стабільного горіння головного пальника і пальники допвлу. Дросельною заслінкою необхідно встановити задану витрату повітря, що охолоджує, на II-у ступінь БЦС орієнтуючись за свідченнями манометра. Необхідно підключити до паливної системи один з двох балонів з газом.

Пуск ЕУ БЦП – 14 і проведення експерименту: Голчаним краном подають газ на головний пальник, витрата якого заміряється газовим лічильником. Початком процесу термічного розкладання можна вважати зростання тиску в системі, який показує манометр. Надлишковий тиск для процесу піролізу складає 0,15 МПа. Для запобігання збільшення тиску в ній встановлений скидний клапан. При спрацьовуванні скидного клапана надлишковий піролізний газ скидається в ресивер. Коли ресивер заповнений, це визначається по тиску, що показує манометр, можливий випуск горючого газу на пальник допалу. Після зниження тиску до атмосферного, кран слід закрити. Для наглядного відображення процесу деструкції отриманий піролізний газ, краном подається на контрольний пальник для

спалювання, таким чином можна зафіксувати закінчення процесу піролізу, після того, як полум'я згасне на пальнику Піролізний газ можна направити на пальник допалу. Таким чином, реалізується самопідтримка процесу термічної деструкції в реакторі. Облік витрати піролізного газу здійснюється газовим лічильником. На експериментальній установці використовується вимір температур за допомогою 8-ми термопар, типа ХКТ. Для того, щоб реєструвати значення температур що змінюються в часі установка забезпечена блоком реєстрації даних на ПК. За допомогою аналогово-цифрового перетворювача УКТ38-Щ4 (40), декодера сигналів АЦП АС-2 (41), які через порт RS-232 підключені до персонального комп'ютера здійснюється запис значень температур у вигляді тимчасових графіків.

Завершення експерименту (зупинка ЕУ БЦП – 14): Після згасання полум'я на пальнику перекрити кран подачі газу на головний пальник і крани подачі піролізного газу на пальник допалу. Витяжний вентилятор не вимикати, дочекатися зниження температури установки до безпечної відмітки в 30 – 40 °С. Якщо за показниками манометра тиск перевищує атмосферний, то його необхідно нормалізувати, допалюючи піролізний газ на пальнику. Після того, як тиск і температура в системі нормалізувалися, можна розгерметизувати кришку реактора. При розгерметизації реактора може виділитися невелика кількість газоподібних продуктів піролізу, тому витяжний вентилятор слід відключити через 15 хвилин після розгерметизації реактора.

#### **Установка Екопір 18Д:**

Відвести поршень плунжеру в крайнє праве положення. Завантажити порцію відходів в бункер плунжерної системи. Ввімкнути маслостанцію та за допомогою плунжерної системи подати відходи в реактор. Кількість циклів плунжерної системи залежить від виду відходів і показань трьох термопар (К3, К4, К5), розміщених в реакторі. Вихід установки на робочий режим: відкрити кран подачі піролізного газу на додатковий пальник, відрегулювати максимальну інтенсивність горіння пропан-бутану на головному пальнику, вести постійний контроль за додатковим пальником, поява на ньому спалахів піролізного газу свідчить про вихід установки на робочий режим.

При збільшенні інтенсивності горіння на додатковому пальнику необхідно зменшити подачу пропан-бутану на головному пальнику. Таким чином, реалізується самопідтримка процесу термічної деструкції в реакторі. Витрати піролізного газу фіксуються газовим лічильником і записуються в таблицю. Коли температура в точці K9 досягне 80°C, 100°C, 130°C, 160°C, 190°C, 220°C, 260°C, 300°C, 320°C, здійснити відбір рідкого палива на кожній з указаних температур. Регулювати температуру в точці K9 необхідно за допомогою дросельної засувки, встановленої на трьох контурній циркуляційній системі. Зміни температур на контрольних точках записуються в таблицю кожні 5-10 хвилин з початку проведення випробування. Здійснюється відбір проб вихідних продуктів. Постійно здійснюється контроль зміни ваги реактора при деструкції органічної сировини. Забезпечити відбір рідкої фракції вихідних продуктів об'ємом 100-150 мл, використовуючи шаровий кран та мірну ємність. Забезпечується відбір піролізного газу об'ємом 2×1 л за допомогою спеціального пробовідбірника. Проби піролізного газу відбираються з трубопроводу подачі піролізного газу на додатковий пальник. Забезпечується відбір твердого залишку масою 200 г з реактору після його охолодження (після того, як реактор досягне температури навколишнього середовища, можна розгерметизувати кришку реактора для відбору проб твердого залишку).

## ДОДАТОК Е

## Технічні характеристики розроблених піролізних установок

## Технічні характеристики «ЕУ БЦП – 14»

- Продуктивність по сировині, кг/сутки \_\_\_\_\_ 50;
- Вологість вхідної сировини % \_\_\_\_\_ до 35;
- Кількість вихідних продуктів (залежить від вхідної сировини) %:
  - рідкого палива \_\_\_\_\_ 8 - 15;
  - піролізного газу \_\_\_\_\_ 15 - 35;
  - пірокарбону \_\_\_\_\_ 5 - 46;
  - конденсату \_\_\_\_\_ 12- 35;
- Робоча температура реактора, °С \_\_\_\_\_ до 600;
- Надлишковий тиск в реакторі (min), кг/см<sup>2</sup> \_\_\_\_\_ 0,1;
- Надлишковий тиск в реакторі (max), кг/см<sup>2</sup> \_\_\_\_\_ 0,5;
- Випробувальний тиск герметичного устаткування, кг/см<sup>2</sup> \_\_\_\_\_ 1,25;
- Режим роботи ЕУ БЦП-14 \_\_\_\_\_ циклічний;
- Теплова потужність газового пальника, кВт \_\_\_\_\_ 42 – 68;
- Кількість контурів, шт. \_\_\_\_\_ 3;
- Температурні режими контурів:
  - 1-го контуру \_\_\_\_\_ за рахунок конденсату 2-го і 3-го контурів;
    - температура контуру, °С \_\_\_\_\_ 330 ± 20;
  - 2-го контуру \_\_\_\_\_ повітря;
    - температура контуру, °С \_\_\_\_\_ 230 ± 20;
  - 3-го контуру \_\_\_\_\_ водяне;
    - температура контуру, °С \_\_\_\_\_ 120 ± 20;
    - максимальна температура води на виході, °С \_\_\_\_\_ 80;
- вихідного конденсатора \_\_\_\_\_ водяне;
- Температура охолоджувальної води на вході, °С не більш \_\_\_\_\_ 35;
- Температура охолоджувальної води на виході, °С не більш \_\_\_\_\_ 50;

- Контроль забезпечує пульт управління, встановлений безпосередньо на експериментальній установці;

- Габаритні розміри, мм:

- довжина \_\_\_\_\_ 1250;

- ширина \_\_\_\_\_ 1300;

- висота \_\_\_\_\_ 2300;

- Маса, кг \_\_\_\_\_ 390.

#### Технічні характеристики «Екопір 18Д»

- Продуктивність установки по сировині (ТПВ), кг/добу \_\_\_ 200,0 - 500,0;

- Вологість вхідних ТПВ, % \_\_\_\_\_ 8-12;

- Робоча температура реактора, °С \_\_\_\_\_ 600,0 – 950,0;

- Робочий тиск у реакторі, кг/см<sup>2</sup> не менше \_\_\_\_\_ 0,1;

- Максимальний тиск у реакторі, кг/см<sup>2</sup> не більше \_\_\_\_\_ 0,5;

- Испитовий тиск герметичного устаткування, кг/см<sup>2</sup> \_\_\_\_\_ 1,25;

- Режим роботи установки \_\_\_\_\_ безперервний;

- Теплова потужність пальника зрідженого газу, кВт \_\_\_\_\_ 10,0 - 25,0;

- Кількість контурів БЦП, шт. \_\_\_\_\_ 3;

- Габаритні розміри установки в міліметрах:

- довжина \_\_\_\_\_ 1500;

- ширина \_\_\_\_\_ 1500;

- висота \_\_\_\_\_ 2300;

- Маса, кг \_\_\_\_\_ 350.

#### Технічні характеристики «Екопір БЦП»

- Продуктивність установки по сировині (ТПВ), кг/добу \_\_\_ 500,0 - 2000,0;

- Вологість вхідних ТПВ, % \_\_\_\_\_ 8-12;

- Робоча температура реактора, °С \_\_\_\_\_ 600,0 – 950,0;

- Режим роботи установки \_\_\_\_\_ безперервний;

- Теплова потужність пальника зрідженого газу, кВт \_\_\_\_\_ 10,0 - 25,0;



- Кількість контурів БЦП, шт. \_\_\_\_\_ 3;
- Габаритні розміри установки в міліметрах:
  - довжина \_\_\_\_\_ 3000;
  - ширина \_\_\_\_\_ 1400;
  - висота \_\_\_\_\_ 2300;
- Маса, кг \_\_\_\_\_ 450.

#### Технічні характеристики БЦП – 5

- Продуктивність установки по об'єму відходів, кг/добу \_\_\_\_\_ до 5000;
- Вологість вхідних відходів % \_\_\_\_\_ до 12;
- Робоча температура котла, °С \_\_\_\_\_ 600;
- Робочий тиск в котлі, кг/см<sup>2</sup> \_\_\_\_\_ 0,01;
- Надлишковий тиск в котлі (max), кг/см<sup>2</sup> \_\_\_\_\_ 0,2;
- Випробувальний тиск герметичного устаткування, кг/см<sup>2</sup> \_\_\_\_\_ 1,25;
- Тиск спрацьовування запобіжних клапанів, кг/см<sup>2</sup> \_\_\_\_\_ 1,25;
- Установочна електрична потужність, кВт \_\_\_\_\_ до 20,0;
- Режим роботи БЦП-5 \_\_\_\_\_ безперервний;
- Теплова потужність пальника на альтернативному паливі, кВт 95 – 150;
- Кількість пальників, шт. \_\_\_\_\_ 2;
- Кількість контурів циркуляційної системи, шт. \_\_\_\_\_ 3;
- Система управління і контролю забезпечується з пульта управління, з допомогою комп'ютера, паралельно пульт управління в ручному режимі;
- Габаритні розміри, мм:
  - довжина \_\_\_\_\_ 6 000;
  - ширина \_\_\_\_\_ 2 300;
  - висота \_\_\_\_\_ 5 100;
- Маса, не більше, кг \_\_\_\_\_ 5600.

## ДОДАТОК Ж

Алгоритм керуючої програми технологічного процесу утилізації цілих зношених автошин циркуляційним піролізним процесом

Крок 1. Встановлення поршня автоматичного гідроприводу (АГП) у крайнє праве положення.

Крок 2. Перевірка положення поршня АГП. Якщо поршень АГП знаходиться у крайньому правому положенні, то здійснюється перехід на крок 3. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 1.

Крок 3. Встановлення рухомого вантажу у крайнє верхнє положення.

Крок 4. Перевірка положення рухомого вантажу. Якщо рухомий вантаж знаходиться у крайньому верхньому положенні, то здійснюється перехід на крок 5. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 3.

Крок 5. Відкриття першої електрокерованої заслонки (ЕК31).

Крок 6. Перевірка стану ЕК31. Якщо ЕК31 знаходиться у відкритому стані, то здійснюється перехід на крок 7. У протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 5.

Крок 7. Відкриття ЕК32.

Крок 8. Перевірка стану ЕК32. Якщо ЕК32 знаходиться у відкритому стані, то здійснюється перехід на крок 9. У протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 7.

Крок 9. Вмикання форсунок для розпилу відпрацьованого машинного масла.

Крок 10. Перевірка роботи форсунок для розпилу відпрацьованого машинного масла. Якщо форсунки працюють, то здійснюється перехід на крок 11. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 9.

Крок 11. Вмикання пластинчатого транспортеру (ПТ) та встановлення необхідного значення швидкості його руху.

Крок 12. Перевірка стану ПТ. Якщо швидкість ПТ більше нуля, то здійснюється перехід на крок 13. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 11.

Крок 13. Перевірка значення рівня завантаження реактора. Якщо значення

рівня завантаження реактора відповідає заданому, то здійснюється перехід на крок 14. В протилежному випадку здійснюється повторне виконання кроку 13.

Крок 14. Вимкнення ПТ.

Крок 15. Перевірка стану ПТ. Якщо швидкість ПТ дорівнює нулю, то здійснюється перехід на крок 16. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 14.

Крок 16. Вимкнення форсунок для розпилу відпрацьованого машинного масла.

Крок 17. Перевірка стану форсунок для розпилу відпрацьованого машинного масла. Якщо форсунки вимкнені, то здійснюється перехід на крок 18. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 16.

Крок 18. Встановлення рухомого вантажу у максимально можливе нижнє положення.

Крок 19. Перевірка положення рухомого вантажу. Якщо рухомий вантаж знаходиться у максимально можливому нижньому положенні, то здійснюється перехід на крок 20. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 18.

Крок 20. Закриття ЕК32.

Крок 21. Перевірка стану ЕК32. Якщо ЕК32 знаходиться у закритому стані, то здійснюється перехід на крок 22. У протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 20.

Крок 22. Закриття ЕК31.

Крок 23. Перевірка стану ЕК31. Якщо ЕК31 знаходиться у закритому стані, то здійснюється перехід на крок 24. У протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 22.

Крок 24. Вмикання автоматичного пальника (АП) та встановлення необхідного значення температури нагріву реактора.

Крок 25. Перевірка стану АП. Якщо АП працює, то здійснюється перехід на крок 26. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 24.

Крок 26. Вмикання системи охолодження першого контуру БЦС та встановлення необхідного значення його температури.

Крок 27. Перевірка стану системи охолодження першого контуру БЦС. Якщо дана система працює, то здійснюється перехід на крок 28. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 26.

Крок 28. Вмикання системи охолодження другого контуру БЦС та встановлення необхідного значення його температури.

Крок 29. Перевірка стану системи охолодження другого контуру БЦС. Якщо дана система працює, то здійснюється перехід на крок 30. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 28.

Крок 30. Вмикання системи охолодження третього контуру БЦС та встановлення необхідного значення його температури.

Крок 31. Перевірка стану системи охолодження третього контуру БЦС. Якщо дана система працює, то здійснюється перехід на крок 32. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 30.

Крок 32. Вмикання системи охолодження вихідного конденсатору (ВК) та встановлення необхідного значення його температури.

Крок 33. Перевірка стану системи охолодження ВК. Якщо дана система працює, то здійснюється перехід на крок 33. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 32.

Крок 34. Перевірка значення вертикального положення рухомого вантажу. Якщо рухомий вантаж опускається до певного мінімального значення його вертикального положення, то здійснюється перехід на крок 35. В протилежному випадку здійснюється повторне виконання кроку 34.

Крок 35. Вмикання системи охолодження вузла вивантаження реактору (ВВР) та встановлення необхідного значення температури на його виході.

Крок 36. Перевірка стану системи охолодження ВВР. Якщо дана система працює, то здійснюється перехід на крок 37. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 35.

Крок 37. Встановлення поршня АГП у крайнє ліве положення.

Крок 38. Перевірка положення поршня АГП. Якщо поршень АГП знаходиться у крайньому лівому положенні, то здійснюється перехід на крок 39. В

протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 37.

Крок 39. Встановлення поршня АГП у крайнє праве положення.

Крок 40. Перевірка положення поршня АГП. Якщо поршень АГП знаходиться у крайньому правому положенні, то здійснюється перехід на крок 41. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 39.

Крок 41. Встановлення рухомого вантажу у крайнє верхнє положення.

Крок 42. Перевірка положення рухомого вантажу. Якщо рухомий вантаж знаходиться у крайньому верхньому положенні, то здійснюється перехід на крок 43. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 41.

Крок 43. Встановлення рухомого вантажу у максимально можливе нижнє положення.

Крок 44. Перевірка положення рухомого вантажу. Якщо рухомий вантаж знаходиться у максимально можливому нижньому положенні, то здійснюється перехід на крок 45. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 43.

Крок 45. Відкриття ЕК32.

Крок 46. Перевірка стану ЕК32. Якщо ЕК32 знаходиться у відкритому стані, то здійснюється перехід на крок 47. У протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 45.

Крок 47. Закриття ЕК32.

Крок 48. Перевірка стану ЕК32. Якщо ЕК32 знаходиться у закритому стані, то здійснюється перехід на крок 49. У протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 47.

Крок 49. Вмикання вентилятору витяжного зонту.

Крок 50. Перевірка стану вентилятору витяжного зонту. Якщо даний вентилятор працює, то здійснюється перехід на крок 51. У протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 49.

Крок 51. Відкриття ЕК31.

Крок 52. Перевірка стану ЕК31. Якщо ЕК31 знаходиться у відкритому стані, то здійснюється перехід на крок 53. У протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 51.

Крок 53. Закриття ЕКЗ1.

Крок 54. Перевірка стану ЕКЗ1. Якщо ЕКЗ1 знаходиться у закритому стані, то здійснюється перехід на крок 55. У протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 53.

Крок 55. Вмикання форсунок для розпилу відпрацьованого машинного масла.

Крок 56. Перевірка роботи форсунок для розпилу відпрацьованого машинного масла. Якщо форсунки працюють, то здійснюється перехід на крок 57. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 55.

Крок 57. Вмикання ПТ та встановлення необхідного значення швидкості його руху.

Крок 58. Перевірка стану ПТ. Якщо швидкість ПТ більше нуля, то здійснюється перехід на крок 59. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 57.

Крок 59. Перевірка завантаження першої секції вузла завантаження реактору (ВЗР). Якщо перша секція ВЗР повністю завантажена автошинами, то здійснюється перехід на крок 60. В протилежному випадку здійснюється повторне виконання кроку 59.

Крок 60. Вимкнення ПТ.

Крок 61. Перевірка стану ПТ. Якщо швидкість ПТ дорівнює нулю, то здійснюється перехід на крок 62. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 60.

Крок 62. Вимкнення форсунок для розпилу відпрацьованого машинного масла.

Крок 63. Перевірка стану форсунок для розпилу відпрацьованого машинного масла. Якщо форсунки вимкнені, то здійснюється перехід на крок 64. В протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 62.

Крок 64. Вимкнення вентилятору витяжного зонту.

Крок 65. Перевірка стану вентилятору витяжного зонту. Якщо даний вентилятор вимкнений, то здійснюється перехід на крок 34. У протилежному випадку здійснюється повернення до кроку 64.

## ДОДАТОК К

## ДОКУМЕНТАЦІЯ ДО ПРОМИСЛОВОЇ ПІРОЛІЗНОЇ УСТАНОВКИ БЦП-5



Рисунок К.1 - Паспорт та інструкція з експлуатації установки БЦП-5

## ДОДАТОК К.2 Алгоритм роботи промислової установки БЦП-5

1. Подача живлення на розподільний щит (головний рубильник).
2. Подача живлення на електрообладнання установки (натисненням кнопки «вкл» в частині панелі «Живлення» розподільного щита). При наявності живлення загоряється зелена лампа у відповідному місці на панелі «Живлення» розподільного щита.
3. Вибір режиму роботи (ручний або автоматичний) натисненням кнопки «вкл» в частині панелі «Ручний режим» (для вибору ручного режиму) або в частині панелі «Автоматичний режим» для чотирьох агрегатів: «Маслостанція», «Вентилятор БЦС», «Шнек», «Паливний насос». Вибраний режим відзначається засвіченням жовтої лампи навпроти відповідного агрегату на панелі «Ручний

режим» або «Автоматичний режим» розподільного щита одразу після натиснення відповідної кнопки «вкл».

4. Запуск насосу маслостанції з плунжерною системою.

а. Перший запуск маслостанції проводиться тільки в ручному режимі і здійснюється натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Маслостанція» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита при первинному виборі ручного режиму за п. 3. Значення рівня завантаженої сировини відслідковується радарним датчиком рівня та відзначається у відповідному полі інтерфейсу оператора. При досягненні необхідного значення рівня завантаженої сировини оператор зупиняє маслостанцію натисканням відповідної кнопки зупинки на перетині горизонтального рядка «Маслостанція» та вертикальної колонки «стоп» для ручного режиму на панелі розподільного щита.

б. Подальші запуски плунжерної системи в ручному режимі проводяться тільки при мінімальному значенні рівня сировини в котлі та, одночасно, при температурі не менше 300 °С в середній частині котла на термодатчику ТД2. Увага! Категорично забороняється запуск маслостанції при температурі менше 300 °С в середній частині котла на термодатчику ТД2.

с. Автоматичний запуск маслостанції (при первинному виборі автоматичного режиму роботи маслостанції за п. 3) здійснюється при нижньому значенні рівня в котлі (нижній рівень) та, одночасно, при температурі не менше 300 °С в середній частині котла на термодатчику ТД2, а автоматичне вимкнення маслостанції – при верхньому значенні рівня в котлі (верхній рівень), яке відслідковується безконтактним індуктивним датчиком рівня розплаву (ПІП-8-3).

При наявності живлення на маслостанції загорається зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Маслостанція» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита. Переміщення плунжера маслостанції вперед та назад відзначається по черговим засвічуванням ламп «В» («вперед», при русі вперед) і «Н» («назад», при русі назад) в незалежності від вибраного режиму. Досягнення плунжером крайніх положень відслідковується безконтактними індуктивними



датчиками SN04-N.

5. Включення електродвигуна водяного насоса охолодження тільки в ручному режимі (натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Водяний насос» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита при первинному виборі ручного режиму за п. 3). При наявності живлення на водяному насосі охолодження загорасться зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Водяний насос» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита.

6. Включення електродвигуна вентилятора видалення димових газів тільки в ручному режимі (натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Димосос» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита при первинному виборі ручного режиму за п. 3). При наявності живлення на електродвигуні вентилятора видалення димових газів загорасться зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Димосос» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита.

7. Включення електродвигуна дизельного пальника 1 тільки в ручному режимі (натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Топка 1» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита при первинному виборі ручного режиму за п. 3). При наявності живлення на електродвигуні дизельного пальника 1 загорасться зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Топка 1» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита.

8. Включення електродвигуна вентилятора дизельного пальника 1 тільки в ручному режимі (натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Вентилятор топки 1» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита при первинному виборі ручного режиму за п. 3). При наявності живлення на електродвигуні вентилятора дизельного пальника 1 загорасться зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Вентилятор топки 1» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита.

9. Включення електродвигуна дизельного пальника 2 тільки в ручному режимі (натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Топка 2» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита при первинному виборі ручного режиму за п. 3). При наявності живлення на електродвигуні дизельного пальника 2 загорається зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Топка 2» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита.

10. Включення електродвигуна вентилятора дизельного пальника 2 тільки в ручному режимі (натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Вентилятор топки 2» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита при первинному виборі ручного режиму за п. 3). При наявності живлення на електродвигуні вентилятора дизельного пальника 2 загорається зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Вентилятор топки 2» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита.

11. Включення електродвигуна вентилятора манжети на радарному датчику рівня рідини в котлі тільки в ручному режимі (натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Вентилятор ДР» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита при первинному виборі ручного режиму за п. 3). При наявності живлення на електродвигуні вентилятора манжети на радарному датчику рівня рідини в котлі загорається зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Вентилятор ДР» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита.

12. Включення електродвигуна вентилятора БЦС.

а. Ручний запуск вентилятора БЦС проводиться натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Вентилятор БЦС» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита (при попередньому виборі ручного режиму роботи за п. 3).

б. Запуск вентилятора БЦС в автоматичному режимі відбувається при досягненні на датчику температури ТД5 наступних температур: 90 °С, 100 °С, 110

°C, 120 °C, 130 °C, 140 °C, 150 °C – задається з людино-машинного інтерфейсу оператора (при первинному виборі автоматичного режиму роботи за п. 3) з метою підтримки заданого значення температури. Підтримання заданої температури (90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C або 150 °C) здійснюється вмиканням/вимиканням вентилятора в релейному режимі з гістерезисом в 10 °C.

При наявності живлення на електродвигуні вентилятора БЦС загорається зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Вентилятор БЦС» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита.

13. Включення мотор-редуктора шнека.

а. В ручному режимі натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Шнек» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита (при первинному виборі ручного режиму роботи за п. 3). Увага! Категорично забороняється запуск мотор-редуктора шнека при температурі менше 300 °C в середній частині котла на термодатчику ТД2.

б. Автоматичний запуск мотор-редуктора шнека (при первинному виборі автоматичного режиму роботи мотор-редуктора шнека за п. 3) здійснюється приблизно через 10 годин роботи установки з моменту запуску та, обов'язково, при температурі не менше 300 °C в середній частині котла на термодатчику ТД2.

При наявності живлення на електродвигуні шнека загорається зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Шнек» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита.

14. Включення електродвигуна насосу рідкого палива.

а. Ручний запуск електродвигуна насосу рідкого палива проводиться натисканням відповідної кнопки запуску на перетині горизонтального рядка «Паливний насос» та вертикальної колонки «пуск» для ручного режиму на панелі розподільного щита (при попередньому виборі ручного режиму роботи за п. 3). Увага! Категорично забороняється запуск електродвигуна насосу рідкого палива при рівні палива, меншому за нижній рівень.

б. Автоматичний запуск електродвигуна насосу рідкого палива (при первинному виборі автоматичного режиму роботи мотор-редуктора шнека за п. 3)

здійснюється при спрацьовуванні верхнього поплавкового датчика рівня в ємності з рідким паливом (верхній рівень). Автоматичне вимкнення електродвигуна насосу рідкого палива здійснюється при досягненні нижнього рівня палива в ємності з паливом, який відслідковується нижнім поплавковим датчиком рівня.

При наявності живлення на електродвигуні насосу рідкого палива загорається зелена лампа на перетині горизонтального рядка «Паливний насос» та вертикальної колонки «Робота» на панелі розподільного щита.

15. Про перевищення допустимого тиску в ємності з рідким паливом сигналізує червона лампа з підписом «Тиск» на панелі розподільного щита, при цьому лунає звуковий сигнал. Увага! При перевищенні допустимого тиску в ємності з рідким паливом необхідно негайно натиснути кнопку «викл» в частині панелі «Живлення» розподільного щита. При знеструмленні установки гасне зелена лампа у відповідному місці на панелі «Живлення» розподільного щита.

## ДОДАТОК Л

Хімічний склад різних видів гумових відходів та гумових виробів, що втратили споживчі властивості

Вид гумотехнічних виробів	Хімічний склад		Морфологічний склад	
	Компонент	Вміст, %	Компонент	Вміст, %
Стандартна гума	Каучук СКН-26 (бутадієнітрильний)	48,11	Натуральний каучук	15-18
	Каучук СКІ-3 (ізопреновий)	47,16	Синтетичний каучук	25-28
	Нафтові залишки	0,381	Метал	9-12
	Сірка технічна	0,152	Текстиль	5-6
	Тіурам	0,762	Технічний вуглець	20-23
	Білило цинкове	3,049	Інші компоненти	10-13
	Стеарин	0,381		
Покришки відпрацьовані	Каучук СКІ-3 (ізопреновий)	42,81	Каучук	86,5
	Каучук СКД (бутадієновий)	43,95	Металокорд	8,33
	Сірка технічна	0,16	Біла сажа	0,27
	Вуглець	8,89		
	Інші компоненти	4,80	Інші компоненти	4,90
Пневматичні шини відпрацьовані	Каучук СКС-30 (бутадієнстирольний)	86,86	Гума	96
	Вуглець	0,30		
	Марганець	9,20		
	Діоксид кремнію	0,05	Сталь	4
	Залізо	3,40		
	Сірка технічна	0,18		
Покришки з тканинним кордом відпрацьовані	Бутилкаучук БК	84,4	Гума	95
	Залізо	3,2		
	Діоксид кремнію	0,5	Сталь	4
	Марганець	0,6		
	Вуглець	10,8	Капрон	1
	Сірка технічна	0,17		
Покришки з металевим кордом відпрацьовані	Каучук СТС (Хлорпреновий)	43,8	Гума	76
	Бутилкаучук БК	44,1	Сталь	17
	Залізо	3,1		
	Сірка технічна	0,149	Текстиль	7
	Вуглець	8,51		

## ДОДАТОК М

Зовнішній вигляд та основні технічні характеристики термопар типу ТХК

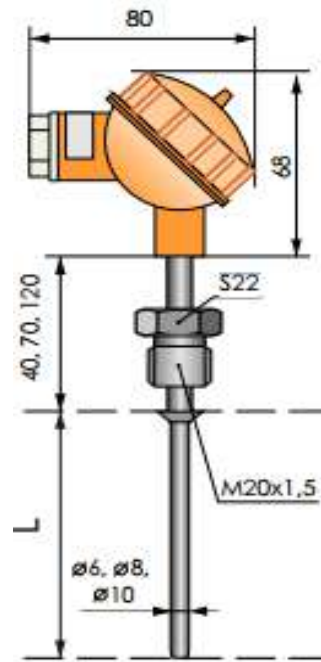


Рисунок М.1- Зовнішній вигляд термопар типу ТХК

Таблиця М.1 – Технічні характеристики термопар типу ТХК

Найменування	Значення
Робочий діапазон вимірюваних температур, °С	-40...600
Номінальна статична характеристика	L
Клас допуску	2
Тип спаю	И
Показник теплової інерції, с	18...25
Опір ізоляції при 25 °С і відносній вологості до 80%, МОм, не менше	100
Матеріал захисної арматури	Сталь 12X18H10T
Стійкість до механічних впливів	Група N 2
Ступінь захисту монтажної частини	IP68
Ступінь захисту зовнішньої частини	IP54
Робочий тиск монтажної частини, МПа	1,6

## Зовнішній вигляд та основні технічні характеристики термопар типу ТХА

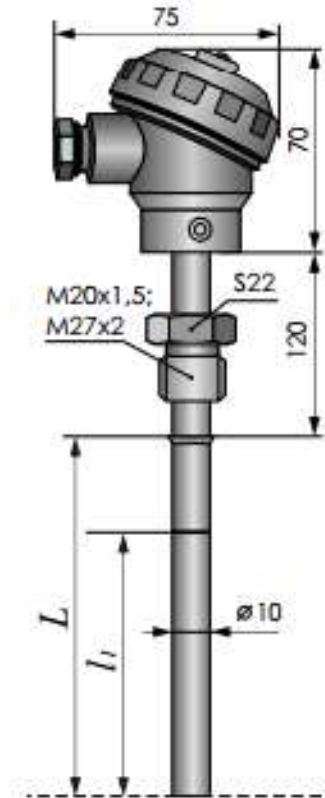


Рисунок М.2- Зовнішній вигляд термопар типу ТХА

Таблиця М.2 - Технічні характеристики термопар типу ТХА

Найменування	Значення
Робочий діапазон вимірюваних температур, °С	-40...1050
Номінальна статична характеристика	К
Клас допуску	2
Тип спаю	И
Показник теплової інерції, с	45
Опір ізоляції при 25 °Сі відносній вологості до 80%, МОм, не менше	100
Матеріал захисної арматури	Сталь 310S
Стійкість до механічних впливів	Група N 2
Ступінь захисту монтажної частини	IP68
Ступінь захисту зовнішньої частини	IP54
Робочий тиск монтажної частини, МПа	0,63

## ДОДАТОК Н

Вимоги щодо характеристик палив котельних  
(мазутів та пічного побутового палива)

Назва показника	Одиниця виміру	Значення норм	
		пічне побутове	мазут паливний
Масова частка сірки, не більше	%		
низькосірчистого		0,5	0,5
малосірчистого		-	1,0
сірчистого		1,1	2,0
високосірчистого			3,5
Температура спалаху у відкритому тиглі, не нижче	°C	45	90
В'язкість:			
умовна за температури 80 °C		-	16,0
кінематична за температури 20 °C	мм <sup>2</sup> /с	8,0	-
Зольність, не більше	%		
малозольного		0,02	0,05
зольного		-	0,14
Густина за температури 20 °C, в межах	кг/м <sup>3</sup>	830-900	870-1100
*) Температура застигання	°C	мінус 15	25
Теплота згоряння (нижча) в перерахунку на сухе паливо	кДж/кг	40 100	40 530
Масова частка води, не більше	%	сліди	1,0
*) В період з 1 квітня до 1 жовтня дозволяється вводити в обіг паливо пічне побутове з температурою застигання не вище, ніж мінус 5 °C			



## ДОДАТОК П

Вплив наявності сірчистих, кисневмісних сполук на корозійну активність  
альтернативних моторних палив

Корозійна активність	Характеризується наявністю сірчистих і кисневих сполук, водорозчинних кислот і лугів		
Водорозчинні (мінеральні) кислоти і луги	Нейтральність – кількість їдкого калію (KOH) в мг	Інтенсивний знос деталей двигуна: знос вкладишів; колінчастого вала; втулок верхньої головки шатуна; деталей з свинцю та міді	Вміст не допускається
Органічні кислоти	Кислотність	Закупорка паливо-проводів системи живлення	менше 3 мг/100 см <sup>3</sup>
Активні сірчані з'єднання	Випробування на мідній пластинці	корозійна агресивність: елементарна сірка, сірководень, меркаптани	Вміст не допускається
	Вміст меркаптанової сірки	Сильний непремний запах Легко окисляються до дисульфідів При її більшому вмісті бензини слід піддавати демеркаптанізації	Вміст не повинен перевищувати 0,01%.
Неактивні сірчисті сполуки		Викликають корозію тільки при їх згоранні разом з бензином. Утворюють потужну кородіючу сірчану і сірчисту кислоти, які окислюють масло і викликають знос деталей.	Деяка кількість неактивній сірки в бензині допускається

## ДОДАТОК Р

## Методи визначення характеристик палива

Назва характеристики	Метод визначення	Значення показника для стандартних палив	Метод контролю
Цетанове число (для дизельного палива)	Рівняння з чотирма змінними	40 – 50 одиниць	ISO 4264
Детонаційна стійкість (бензинів) октанове число	Дослідницький метод Моторний метод	80 – 98 одиниць 76 - 88 одиниць	ГОСТ 8226 або ASTM D 2699; ГОСТ 511
Фракційний склад палив:	Визначення фракційного складу. Газорідинна хроматографія	75 – для бензинів; 120 – для бензинів; 280 – для ДП; 190 – для бензинів; 370 – для ДП; 215 – для бензинів	ГОСТ 2177-99 (ISO 3405-88)
Тиск насичених парів у бензині, кПа	Визначення тиску насичених парів	79,9	ГОСТ 1756-52
Кінематична в'язкість при температурі 20 °С, мм <sup>2</sup> /с, ДП	Метод капілярного витікання (віскозиметрія)	3,0 – 6,0	ГОСТ 33-2000
Температура застигання ДП, °С	Визначення температур застигання або текучості	-10 – (-25)	ГОСТ 20287-91
Температура спалаху в закритому тиглі ДП, °С	Визначення температури спалаху в закритому тиглі	35 - 62	ГОСТ 6356-75
Масова доля сірки, %	Визначення вмісту сірки спалюванням у лампі	0,05 – для бензинів 0,05 – 0,5 – для ДП	ГОСТ 19121-73
Масова доля меркаптанової сірки, (%) та вміст сірководню	Потенціометричне титрування	0,01 – для меркаптанової сірки. Сірководень - відсутній	ГОСТ 17323-71
Випробування на мідній пластині	Визначення корозійної дії на мідній пластині	Витримує	ГОСТ 6321-92 (ISO 2160-85)

Концентрація фактичних смол, мг на 100 см <sup>3</sup> палива	Визначення фактичних смол (по Бударову)	30 – 40 – для ДП 5 – для бензинів	ГОСТ 8489-85
Кислотність, мг КОН на 100 см <sup>3</sup> палива	Визначення кислотності та кислотного числа	5 – для ДП 3 – для бензинів	ГОСТ 5985-79
Зольність, % для ДП	Визначення шляхом випарювання у тиглі	0,01	ГОСТ 1461-75
Коксування 10% залишку, % для ДП	Визначення коксовності методом Конрадсона	0,30	ГОСТ 19932-99 (ISO 6615-93)
Коефіцієнт фільтрування для ДП	Визначення коефіцієнта фільтрування	3	ГОСТ 19006-73
Вміст механічних домішок	Визначення за допомогою фільтрування	Відсутні	ГОСТ 6370-83
Вміст води	Визначення вмісту води за допомогою нагрівача	Сліди	ГОСТ 2477-65
Густина за температури 20 °С	Визначення густини за допомогою аерометру	860 – 840 – для ДП 700 – 780 – для бензинів	ГОСТ 3900-85

## ДОДАТОК С

## Загальні властивості моторних палив

Фізико-хімічні властивості	Характеризують стан і склад палив
Елементний, фракційний і груповий вуглеводневий склади	Характеризує пускові властивості бензину
	Встановлює залежність між кількістю палива ( % за об'ємом) і температурою, при якій воно переганяється
	Висока температура кінця перегонки призводить до зносу циліндрів і поршневої групи внаслідок
Сортність бензину	Збільшення потужності двигуна за рахунок збільшення наддуву в порівнянні з потужністю, одержуваної на еталонному ізооктані
Щільність	Для автомобільних бензинів не нормуються
	Визначається нафто-денсиметром при 20 °С
	Підвищення щільності збільшується кількість одного і того ж обсягу бензину, що надходить через жиклери
В'язкість	Збільшення в'язкості зменшує пропускну здатність жиклерів
	При недостатній в'язкості палива підвищується зношення плунжерних пар насоса високого тиску і голок форсунок
	Паливо занадто в'язке буде погано прокачуватися по системі живлення, недостатньо тонко розпилюватися і неповністю згоряти.
Температура застигання	Маркування дизельних палив: літнє (t заст менш -10 °С), зимове (t заст менш -35 ... 45 °С) і арктичне (t заст менш -55 °С).
<i>Експлуатаційні властивості</i>	Забезпечують надійність і економічність експлуатації ДВЗ, машин і механізмів, характеризують корисний ефект від їх використання
Випаровуваність	Характеризує пускові якості палива
	Тиск насичених парів бензину встановлюється з урахуванням попередження утворення парових пробок в двигуні
Теплота згорання	Від теплоти згорання палива залежить потужність
Наявність води	В бензині недопустимо наявність води. Небезпечна при

	Т нижче 0 ° С. Сприяє осмоленню, викликає корозію паливних баків
Детонаційна стійкість	Характеризує здатність бензину згорати в ДВС з займанням від іскри без детонації
	Октанове число чисельно дорівнює 1 % (за об'ємом) вмісту ізооктану в суміші з гептаном
Займистість (для дизельного пального)	Здатність дизельного палива до самозаймання в середовищі розігрітого повітря від стиснення в циліндрі двигуна
	Характеризується цетановим числом (ЦЧ), рівний відсотковому змісту цетана в суміші з $\alpha$ -метилнафталіном
	В якості еталонних палив застосовують цетан (н-гексадекан $C_{16}H_{34}$ ), його займистість прийнята за 100 одиниць ЦЧ
<i>Технічні властивості</i>	Здатність протистояти хімічним змінам в процесах їх зберігання, транспортування і тривалої експлуатації
Фізична і хімічна стабільність	Оцінка хімічної стабільності нормується вмістом фактичних смол і індукційним періодом
	Характеризується вмістом за йодним та бромним числом
Токсичність	Найважливіша характеристика бензину
	Ні сам бензин, ні його пари і нагар не повинен містити токсичних компонентів
Пожеже- та вибухонебезпечність	Оцінюється по температурі спалаху в закритому тиглі. нормується не нижче 30-35 °С.
	застосування на кораблях, температура спалаху - не нижче 61 °С; в підводних човнах, не нижче 90 °С.
Корозійна активність	Оцінюється вмістом загальної сірки (> 0,2 і 0,4 ... 0,5% мас), меркаптанової сірки (>0,01% мас.); відсутністю сірководню, водорозчинних кислот і лугів; кислотністю (>5 мг/КОН/460 мл) і випробуванням на мідній пластинці
Екологічні властивості	У порівнянні з автобензином, дизельні палива характеризуються значно меншою пожежебезпекою.

## ДОДАТОК Т

## Основні характеристики рідких альтернативних палив та методи їх визначення

Назва характеристики	Метод визначення	Значення показника для рідких вуглеводневих палив	Вплив характеристики на властивість палива	Метод контролю
Цетанове число	Рівняння з чотирма змінними	40-50 одиниць	Вплив на пускові якості, час самозапалювання палива, більш повне згоряння палива, якість вихлопних	ISO 4264
Фракційний склад палив: - 50% переганяється при T, °C - 96% переганяється за температури, °C	Визначення фракційного складу. Газорідинна хроматографія	280 370	Впливає на умови пуску двигуна, час прогріву, зносостійкість двигуна, повноту згоряння палива та випаровуваність палива	ГОСТ 2177-99 (ISO 3405-88)
Кінематична в'язкість при температурі 20 °C, мм <sup>2</sup> /с	Метод капілярного витікання	3,0-6,0	Впливає на змащувальну властивість палива, збільшення в'язкості зменшує пропускну здатність жиклерів	ГОСТ 33-2000
Температура застигання, °C	Визначення температур застигання	-10 – (-25)	Впливає на рух палива по паливній системі, пускові характеристики двигуна, експлуатаційний строк паливних фільтрів	ГОСТ 20287-91
Температура спалаху в закритому	Визначення температури спалаху в	25-62	Впливає на пожежну безпеку палива. Чим вище температура	ГОСТ 6356-75

тиглі, °С	відкритому тиглі		спалаху тим менше небезпека виникнення пожежі у аварійних ситуаціях	
Масова доля сірки, %	Спалювання у лампі	0,05-0,5	Впливає на якість каталізаторів, що призначенні для повного згоряння палива, утворення шламу та смолянистих відкладень	ГОСТ 19121-73
Зольність, %	Визначення зольності шляхом випарювання у тиглі	0,01	Впливає на концентрацію твердих частин у вихідних газах, швидкість корозії деталей двигуна та абразивну зношеність деталей	ГОСТ 1461-75
Вміст механічних домішок	Визначення механічних домішок за допомогою фільтрування	Відсутні	Впливає на абразивне зношення паливної системи та експлуатаційний термін паливних фільтрів	ГОСТ 6370-83
Вміст води	Визначення вмісту води за допомогою нагрівача	Сліди	Впливає на подачу пального до карбюратора, температуру згоряння та корозійну активність палива	ГОСТ 2477-65
Густина за температури 20 °С (або 50°С)	За допомогою аерометру	860-840	Впливає на питомі ефективні витрати палива, рух палива у паливній системі	ГОСТ 3900-85

## ДОДАТОК Т.1

Склад палив отриманих шляхом піролізу різних видів полімерної сировини в порівнянні з літнім дизельним паливом [210]

Характеристика	Поліетилен	Поліпропілен	Полістирол	Нейлон	Дизельне паливо Л ДСТУ 3868-99
Температура спалаху, °С	33,6	27,8	26,1	34,8	40
Температура застигання, °С	-27	-39	-67	-28	-10
Вміст води, % мас.	0,18	0,13	0,67	0,25	Сліди
Зольність, % мас.	0,013	0,010	0,006	0,018	0,01
В'язкість при 50°С, сСт	2,2	1,9	1,4	1,8	-
Густина, г/см <sup>3</sup>	0,858	0,792	0,960	0,926	0,79-0,97
Цетанове число	-	56,8	12,6	-	45
Вміст сірки, % мас.	0,010	0,010	0,010	0,010	0,01
Теплотворна здатність, кДж/кг	52263	53371	50365	44403	42500



## ДОДАТОК У

## Поширеність різних термічних технологій в світі

Технологія	Сировина	Енергетичний продукт	Сумарна потужність, млн. т/рік.	Локація
Спалювання на рухомій решітці	Змішані ТОВ	Пар високого тиску	< 168	Азія, Європа, Америка
Обертові печі	Змішані ТОВ	Пар високого тиску	> 2	Японія, США, ЕС
SEMASS (Energy Answers Process)	Подрібнені ТОВ	Пар високого тиску	> 1	США
Спалювання RDF на решітці	Подрібнені та сортовані ТОВ	Пар високого тиску	> 5	США, ЕС
Циркулюючий киплячий шар	Подрібнені ТОВ, RDF	Пар високого тиску	> 11	Китай, Європа
Киплячий шар (Ebara process)	Подрібнені ТОВ, RDF	Пар високого тиску	> 0,8	Японія, Португалія
Киплячий шар (bubbling)	Подрібнені ТОВ, RDF	Пар високого тиску	> 0,2	США
Газифікація (JFE, Nippon Steel)	RDF	Пар високого тиску	> 0,9	Японія
Газифікація (Thermoselect)	Змішані ТОВ	Синтез-газ (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> )	> 0,8	Японія
Плазмова газифікація	Подрібнені та сортовані ТОВ	Синтез-газ (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> )	> 0,2	Канада, Японія, Франція
Механіко-біологічна обробка	Подрібнені і біологічно стабілізовані	RDF – цементні заводи і вугільні електростанції	> 5	ЄС
Всього			< 195	

## ДОДАТОК Ф

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження, листи підтримки та інші документи, що підтверджують практичну значимість роботи

Національний університет  
кораблебудування  
імені адм. Макарова  
організація

ЗАТВЕРДЖЕНО  
Наказ Держкомстату України  
10.08.2004 № 469

02066753  
Ідентифікаційний код ЄДРПОУ

Форма № ІВ-6. Акт про використання об'єкта права інтелектуальної власності

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_ р.

Назва і номер охоронного документа: Патент України на винахід «Установка для циркуляційного піролізу інфікованих медичних відходів» № 96080 кл. F23G 5\027 опубл. 26.09.2011. Бюл. №18.

Назва об'єкта права інтелектуальної власності: Винахід.

Використані всі ознаки формули винаходу.

Технічний або інший об'єкт, в якому використано винахід: Установка піролізна ЕУ БЦП-14.

Дата початку використання: 10 лютого 2011р.

Ректор НУК

Члени комісії

Головний бухгалтер

Зав. лаб. кафедри  
екологічної безпеки

Начальник  
патентного відділу

З актом ознайомлено  
(винахідники, автори):



підпис

підпис

підпис

підпис

підпис

підпис

підпис

Рижков С.С.

Яковлева І.Г.

Власенко О.В.

Левченко О.Г.

Рижков С.С.

Маркіна Л.М.

Рудюк М.В.

дата « 14 » квітня 20 11 р.



УТВЕРЖДАЮ  
 Ректор Национального университета  
 кораблестроения им. адм. Макарова  
 проф. Рыжков С.С.  
 «21» 06 2011г

А К Т

проведения испытаний определения токсичности отработавших газов дизельной электростанции, работающей на синтетическом топливе

Мы, нижеподписавшиеся представители:

Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова – старший научный сотрудник Рудюк Н.В., техник 1-ой категории Гончарова Н.А., настоящим актом удостоверяем, что 20 июня 2011 года на дизельной электростанции мощностью 50 кВт, были проведены испытания дизеля с определением токсичности выхлопных газов.

В качестве топлива использовалось синтетическое жидкое топливо, полученное при утилизации полимерных отходов методом многоконтурного циркуляционного пиролиза на установке ЭУ МЦП 14.

#### Методика проведения испытаний

К нормируемым токсичным компонентам дизелей в соответствии с действующей в Украине документацией, относятся оксид углерода (СО), суммарные углеводороды (С<sub>n</sub>Н<sub>m</sub>), оксиды азота (NO<sub>x</sub>). Кроме этих компонентов Правила ЕЭК ООН регламентируют выбросы твердых частиц (PM).

Нормы токсичных компонентов устанавливаются в удельных значениях массового выброса каждого вредного вещества за цикл испытаний, отнесенного к приведенной мощности в единицу времени. Токсичность отработавших газов дизеля замеряется при его работе. Измерение концентрации газообразных вредных веществ в отработавших газах, согласно нормативной документации, проводят с помощью быстродействующих газоанализаторов непрерывного действия. Масса твердых частиц определяется за цикл испытаний взвешиванием специальных фильтров.

Таблица

Нормы выбросов вредных веществ с отработавшими газами

Нормируемый компонент	Оценочный показатель уровня выбросов, г/кВт·ч
СО	4,0
С <sub>n</sub> Н <sub>m</sub>	1,8
NO <sub>x</sub>	7,2
PM	0,15

Н.Рудюк

Н.Гончарова

## ТОВ ЧОРНОМОРСЬКА ЛІЗИНГОВА КОМПАНІЯ

54025, Україна, Миколаїв, проспект Героїв Сталінграду, 9;  
МФ Приватбанку, м. Миколаїв, МФО 326610, ЄДРПОУ 31612965  
Рахунок 26007332376001

### ЛИСТ ПІДТРИМКИ

впровадження результатів прикладної науково-дослідної роботи

**Тема НДР:** «Розробка екологічно безпечної технології та створення експериментальної автоматизованої установки безперервного піролізу цілих зношених автошин з одержанням альтернативних палив».

**Керівник НДР** Рижков С.С., доктор. техн. наук, професор, ректор НУК, зав. кафедри екологічної безпеки та охорони праці НУК.

Проект спрямовано на розробку екологічно безпечної та енергозберігаючої універсальної інноваційної технології безперервної термічної утилізації цілих зношених автошин в реакторі піролізу, при статичному навантаженні та створення експериментального зразка, про що досягнуто домовленість з потенційним замовником. В даній універсальній технології забезпечується заповнення активного об'єму реактору автошинами до (97 – 99)%, в той час, як існуючі технології – максимум 60%, відповідно коефіцієнт теплопередачі всередині реактору збільшується в 70 разів і за рахунок цього збільшується продуктивність установки по сировині в 2-3 рази, при збільшеному виході рідкого палива до 18 %, забезпечуючи її екологічну безпеку, стабільну роботу і високу надійність, за рахунок повної автоматизації технологічних процесів. Впровадження даної інноваційної технології в комунальному господарстві дозволить вирішити екологічні проблеми в регіоні та в період енергетичної кризи - реформувати муніципальні системи тепlopостачання та замінити кошові традиційні види палива на одержані дешеві альтернативні палива.

Планується розробка рекомендацій з проектування серійних автоматизованих установок безперервної термічної утилізації цілих зношених автошин з використанням екологічно безпечної та енергозберігаючої універсальної технології з одержанням альтернативних видів палива.

ТОВ Чорноморська лізингова компанія спільно з Національним університетом кораблебудування імені адмірала Макарова підписала контракт з компанією NAZAR s.r.o., Nazaruk Viktor (Чехія) на розробку та впровадження установок типу: МЦП- 5 Ч (5 т/сутки); МЦП- 10 Ч (10 т/сутки); МЦП- 24 Ч (24 т/сутки), термін дії контракту: до 01.01.2016.

Виконавчий Директор  
ТОВ Чорноморська лізингова компанія



*[Handwritten signature]*  
М.П.

О.В. Коробко

Фізична особа-підприємець Басистий Павло Юрійович.  
Реєстраційний номер облікової картки платника податків №3251818255.  
Місце реєстрації – 54000, Миколаївська область,  
м. Миколаїв, вул. Миколаївська, б. 22, кв. 63.

#### ДОВІДКА

про доцільність впровадження результатів дисертаційної роботи  
**МАРКІНОЇ ЛЮДМИЛИ МИКОЛАЇВНИ**  
представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на тему  
«Розвиток наукових основ екологічно прийняттого піролізного процесу  
утилізації твердих органічних відходів»

Результати наукових досліджень Маркіної Л.М. впроваджено у виготовлених дослідних установках, які використовують принцип екологічно безпечного циркуляційного піролізу органічних відходів.

При здійсненні діяльності з реалізації гумо-технічної продукції та робіт з шиномонтажу утворюється велика кількість зношених автомобільних шин, які необхідно утилізувати в екологічно безпечному режимі.

В результаті виконання наукових досліджень з утилізації піролізним процесом автошин було отримано показники роботи піролізних установок, напрацьовано достатню кількість кінцевих рідких продуктів, які будуть використані як добавка до стандартного дизельного пального. Важливим фактом є забезпечення екологічної безпеки при проведенні піролізного процесу з не перевищення нормативних викидів забруднюючих речовин.

Тому є зацікавленість в розроблених установках для промислової утилізації зношених автомобільних шин з отриманням альтернативних палив з продуктивністю обладнання 500 кг на добу.

10.09.2014р.

ФОП Басистий Павло Юрійович



ТОВ «ГАРД ПРО»54030 м.Миколаїв , вул. Адмірала Макарова , буд.46/1 Телефон: (0512)47-71-81Ел. пошта: info@gardpro.com.ua

від 19.05.2016 року №15

## ДОВІДКА

про доцільність впровадження результатів дисертаційної роботи

Маркіної Людмили Миколаївни

представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на тему "РОЗВИТОК  
НАУКОВИХ ОСНОВ ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТНОГО ПІРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ  
УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ"

Результати наукових досліджень Маркіної Л.М впроваджені у дослідних установках, дозволяють утилізувати відходи, яку утворюються в процесі діяльності підприємства ТОВ «ГАРД ПРО».

ТОВ «ГАРД ПРО» багато років встановлює відео-охоронні системи. При виконанні робіт зазвичай використовуються кабельна продукція марок ПНСВ, ПСПВ, ШВВП, ПВС, УТР, ФТР, СТР, ВВГ, RG6. Після кожного процесу роботи, обов'язково залишається кабельна продукція, яка підлягає утилізації.

Так як у числі основних принципів діяльності підприємства є екологічна політика та охорона навколишнього середовища, то утилізація залишків кабельної продукції, які не підлягають використанню, дозволяє значно скоротити кількість утворених відходів та вирішити проблему забезпечення екологічної безпеки. Тому, ми зацікавлені в розробках піролізних установок з отриманням альтернативних палив НД «Центру піролізних технологій» НУК ім. Макарова. Рекомендуємо дані розробки для промислового впровадженні при утилізації відходів кабельної продукції.

Директор ТОВ «ГАРД ПРО»



К.Ю.Цибульська

Товариство з обмеженою  
відповідальністю  
«ТЕХНО АЛЬЯНС СЕРВІС»  
54002, Україна, м. Миколаїв,  
вул. Шнеерсона, 9



Limited Liability Company

"ТЕННО АЛЪЯНС СЕРВИС"  
54002, str. Schneerson, 9,  
Mykolaiv, Ukraine  
tel. +38 (050) 613-92-57, +38 (067) 959-83-58 E-mail: markserg@ukr.net

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи  
Маркіної Людмили Миколаївни  
на тему "РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ  
ЕКОЛОГІЧНО ПРИЙНЯТНОГО ПІРОЛІЗНОГО ПРОЦЕСУ  
УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ"  
представленої на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Результати наукових досліджень, моделювання, теоретичних розрахунків та практичних рекомендацій з конструювання піролізних установок, представлених Маркіною Л.М. були використані на етапі складання технічного завдання для виготовлення дослідного зразку піролізного устаткування продуктивністю 5 т/добу.

Результати математичного моделювання застосовано для інтенсифікації процесу термодеструкції органічних відходів, встановлення режимів експлуатації обладнання для утилізації відходів різного складу, що дозволило зменшити матеріальні та технічні витрати за рахунок мінімізації використання енергетичних ресурсів та часу, необхідних для здійснення технологічних процесів піролізу.

Маркіна Л.М. приймала участь в розробці конструкторської документації, технічних умов, паспорту та інструкції з експлуатації на піролізне обладнання, які впроваджено ТОВ «ТехноАльянсСервіс» для проектування установок термічної утилізації твердих органічних відходів та зношених автомобільних шин методом піролізу.

Комерційний директор  
«08» травня 2016 р.



Новоселова М.М.







УКРАЇНА

**МИКОЛАЇВСЬКИЙ МІСЬКИЙ ГОЛОВА**

 вул. Адміральська, 20, м. Миколаїв, 54001, тел/факс: (0512)37-10-99  
 тел. 37-45-23 e-mail: kancel@mkrada.gov.ua Код ЄДРПОУ 04056612

07.08.2018 № 1782/2018-22/02/14/18 від \_\_\_\_\_

Г

**ДОВІДКА**
**про використання результатів наукових досліджень  
 МАРКІНОЇ ЛЮДМИЛИ МИКОЛАЇВНИ**

В рамках організації та проведення міжнародного інвестиційного форуму по управлінню поводження з ТПВ WMFORUM2016, виконання Меморандуму про співпрацю у сфері управління відходами в Миколаєві від 03.10.2017р., результати наукових досліджень МАРКІНОЇ ЛЮДМИЛИ МИКОЛАЇВНИ були використані при розробці програми поводження з твердими побутовими відходами м. Миколаєва, розробці схеми санітарного очищення регіону, ефективної структури управління відходами в регіоні.

За рахунок впровадження комплексної програми утилізації з відходами за сучасними технологіями, наприклад, такими як екопірогенезис, плануються зменшення утворення та накопичення відходів і зниження рівня забруднення навколишнього середовища у м. Миколаєві.

Результати наукових досліджень, доробок та пропозиції Маркіної Л.М. використані при розробці комплексу заходів, спрямованих на збирання, зберігання, транспортування, переробку, утилізацію та захоронення відходів у м. Миколаєві, що дозволить підвищити екологічну безпеку регіону та ефективність управління системою поводження з відходами.

Міський голова

  
 О.Ф. Сенкевич

## АКТ

впровадження результатів науково-дослідної роботи  
за темою №2089 «Створення технології одержання альтернативних палив  
утилізацією органічних відходів та їх використання у польових умовах»

Проведені дослідження направленні на вирішення сучасних проблем утилізації накопичених органічних відходів в екологічно безпечному та енергозберігаючому режимі. Отримані фундаментальні теоретичні та практичні основи піролізного процесу, об'єднуючого багатоконтурний циркуляційний піроліз органічних відходів з технологією отриманням продуктів, які будуть використані як альтернативне паливо.

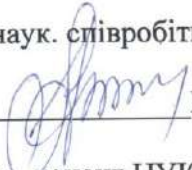
Створені фізико - математичні основи екологічно безпечної та енергозберігаючої інноваційної технології безперервного автоматизованого багатоконтурного циркуляційного піролізу.

Досліджені конструкційні та технологічні особливості впливу технологічних параметрів процесу піролізу на продуктивність процесу та характеристики вихідних продуктів.

Визначено найбільш оптимальні умови проведення процесу термічної обробки за часом і температурою. За участю Чеського науково-дослідного інституту неорганічної хімії на газовому хроматографі UniChrom-SIMDIS досліджено фізичні властивості отриманого рідкого продукту, одержані результати показали, що дане альтернативне паливо по всім характеристикам можливе для застосування у теплових і енергетичних установках.

На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень даної концепції було впроваджено технологію екологічно безпечної термічної утилізації високомолекулярних органічних відходів і за участю підприємства ТОВ «ERVO EnviTech s.r.o.» Чеської республіки було впроваджено в промислову експлуатацію установку з термічної утилізації термопластичних полімерів з отриманням альтернативних видів палив.

Ст. наук. співробітник

  
М.В. Рудюк

К.т.н., доцент НУК

  
Л.М.Маркіна

Директор ТОВ «ERVO EnviTech s.r.o.»

  
Мартинек Я.

Експерт з напрямку переробки відходів



## АКТ

ERVO EnviTech s.r.o.  
 Redniční 1/2, Pasáž U Lva,  
 434 01 Most  
 IČ: 04006585

впровадження піролізних установок з утилізації органічних відходів з одержанням альтернативних видів палива за дисертаційними дослідженнями Маркіної Л.М.

Комісія у складі представників Товариства з обмеженою відповідальністю «ERVO EnviTech s.r.o.» (Чеська Республіка): директора Мартинєка Яна та експерта з напрямку утилізації відходів Демчука Олександра, а також представників Національного університету кораблебудування (НУК) ім. адм. Макарова: заслуженого винахідника, старшого наукового співробітника Рудюка М.В., доцента, к.т.н. Маркіної Л.М. підтверджує, що новітня технологія термічної утилізації органічних відходів з одержанням альтернативних видів палива та пролізні установки, зокрема «Екопір БЦП», створені в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: тема №0109U007601 (2009-2010 рр.) «Розроблення новітньої технології переробки органічних відходів методом багатоконтурного піролізу з отриманням альтернативного палива», тема № 0111U002310 (2011-2013 рр.): «Наукові основи енергозберігаючого двостадійного процесу термічної утилізації органічної частини твердих побутових відходів», тема № 0111U009084 (2011-2012 рр.): «Розробка екологічно безпечної технології екопірогенезісу для утилізації органічних відходів та низькосортного вугілля з отриманням альтернативних видів пального», тема № 0112U000349 (2012-2014 рр.) «Системні дослідження та розробка моделей програмно-цільового розвитку системи тепlopостачання України на основі новітніх технологій та процесів енергоперетворення», тема № 0115U000303 (2014-2016рр.) «Розробка екологічно безпечної технології та створення експериментальної автоматизованої установки безперервного піролізу цілих зношених автошин з одержанням альтернативних палив» було розроблено та успішно застосовано піролізне обладнання та установку БЦП-5 по утилізації міських твердих побутових відходів, що дозволяє покращити екологічний стан населених пунктів і частково зберегти традиційні енергоресурси, які використовуються в системі тепlopостачання.

ТОВ «ERVO EnviTech s.r.o.» успішно впровадила технологію термічної утилізації органічної частини твердих побутових відходів з одержанням альтернативних видів палива в складі установки «БЦП-5».


Даний акт виданий для пред'явлення за місцем вимоги і не може бути підставою для отримання будь-яких коштів з фондів підприємства.


Від НУК ім. адм. Макарова:

Від ТОВ «ERVO EnviTech s.r.o.»:

Ст. наук. співробітник

Директор

 М.В. Рудюк

 Мартинек Я.

К.т.н., доцент НУК

Експерт з напрямку переробки відходів

 Л.М.Маркіна





МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА**  
 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв України 9, тел./факс (+380512) 42-48-11 E-mail: university@nuos.edu.ua



### АКТ

впровадження результатів докторської дисертаційної роботи  
 Маркіної Людмили Миколаївни  
 „Розвиток наукових основ екологічно прийняттого піролізного процесу утилізації  
 твердих органічних побутових та промислових відходів” у науковий процес  
 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Результати дисертаційної роботи к.т.н. доцента Маркіної Л.М. отримано та впроваджено у науковий процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова в рамках виконання науково-дослідних робіт у Науково-дослідному Інституті «Проблеми екології та енергозбереження» Національного університету кораблебудування ім. Макарова як відповідальний виконавець: «Розроблення новітньої технології переробки органічних відходів методом багатоконтурного піролізу з отриманням альтернативного палива» (державний реєстраційний номер 0109U007601) (2009-2010 р.) (керівник – д.т.н. професор [Рижков С.С.]); «Наукові основи енергозберігаючого двостадійного процесу термічної утилізації органічної частини твердих побутових відходів» (державний реєстраційний номер 0111U002310) (2011-2013 р.) (керівник – д.т.н. професор [Рижков С.С.]); «Розробка екологічно безпечної технології екопірогенезису для утилізації органічних відходів та низькосортного вугілля з отриманням альтернативних видів пального» (державний реєстраційний номер 0111U009084) (2011-2012 р.) (керівник – д.т.н. професор [Рижков С.С.]); «Створення теоретичних основ екологічно безпечної та енергозберігаючої новітньої інноваційної технології безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин під дією статичного навантаження» (державний реєстраційний номер 0115U000303) (2015-2016 р.) (керівник – д.т.н. професор [Рижков С.С.]), як виконавець в НДР «Системні дослідження та розробка моделей програмно-цільового розвитку системи теплопостачання України на основі новітніх технологій та процесів енергоперетворення» (державний реєстраційний номер 0112U000349) (2012-2014 р.) та як керівник НДР за господарчо-договірною тематикою НУК № 2094 «Розробка піролізної технології та обладнання переробки вугілля в рідке паливо» (03.03.2017 – 30.07.2017).

Проректор з наукової роботи  
 д.т.н. професор

В.О. начальника НДЧ НУК

В.С. Блинцов

О.І. Савенков





МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
 НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА  
 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв України 9, тел./факс (1380512) 42-48-11 E-mail: university@nuos.edu.ua



Грушляков Є. І.

10 вересня 2019 р.

### АКТ


впровадження результатів докторської дисертаційної роботи  
 Маркіної Л.М. «Розвиток наукових основ екологічно прийняттого  
 піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових  
 відходів» в навчальний процес

Наукові положення та результати досліджень к.т.н. доцента завідувачки кафедри «Техногенної та цивільної безпеки» Маркіної Людмили Миколаївни, що представлені в дисертаційній роботі та опубліковані в наукових працях використані та впроваджені в навчальний процес Національного університету кораблебудування при викладанні дисциплін «Безпека життєдіяльності» та «Цивільний захист» кафедри.

Проректор з науково-педагогічної  
 роботи НУК ім. Макарова  
 к.т.н., професор НУК

 С.О. Слободян

Декан факультету  
 Екологічної та техногенної безпеки,  
 к.т.н., професор НУК

 С.М. Літвак





МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
 НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА  
 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв України 9, тел./факс (+380512) 42-48-11 E-mail: [university@nuos.edu.ua](mailto:university@nuos.edu.ua)



Грущяков С. І.

16 вересня 2018 р.

### АКТ

впровадження результатів докторської дисертаційної роботи  
 Маркіної Л.М. „Розвиток наукових основ екологічно прийнятного  
 піролізного процесу утилізації твердих органічних побутових та промислових  
 відходів” в навчальний процес

Результати дисертаційної роботи завідувачки кафедри “Техногенної та цивільної безпеки” Маркіної Л.М. впроваджено в навчальний процес Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова при викладанні дисциплін «Утилізації та рекуперація відходів», «Технології переробки відходів» та «Екологічна безпека» кафедри екології та природоохоронних технологій на факультеті Екологічної та техногенної безпеки.

Результати роботи у вигляді проведених розрахунків, натурних експериментів зі студентами на основі піролізних технологій впроваджено при виконанні курсових, дипломних бакалаврських та магістерських проектів зі спеціальності 183 „Технології захисту навколишнього середовища” та 101 «Екологія».

Декан факультету  
 екологічної та техногенної безпеки,  
 к.т.н., професор НУК  
 Завідувач кафедрою екології  
 та природоохоронних технологій  
 д.т.н., к.біол.н, професор НУК

 С.М. Літвак

 Г. Г. Трохименко



# ЛАУРЕАТУ

Премії Верховної Ради України  
найталановитішим  
молодим ученим  
в галузі фундаментальних  
і прикладних досліджень та  
науково-технічних розробок

МАРКІНІЙ  
Людмилі Миколаївні

Голова Верховної Ради України



*Vol. Litvin* . В. ЛИТВИН

Постанова Верховної Ради України  
від 15 січня 2009 року  
№ 871-VI



