

Л.М. Маркіна, М.С. Крива

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
просп. Героїв України, 9, Миколаїв, 54000, Україна,
+380 93 608 7550, markserg@ukr.net, marharyta.kryva@nuos.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІРОЛІЗУ ЗНОШЕНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН ПРИ ЇХ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ



Вступ. Проблеми утилізації зношених автомобільних шин гостро постають на теренах нашої країни, оскільки обсяг останніх безперервно збільшується. Крім того, недосконалість наявних методів термічної утилізації зношених автошин спонукає до розробки новітньої технології піролізу в поєднанні зі статичним навантаженням.

Проблематика. Через відсутність даних щодо особливостей робочого процесу, що ускладнює проведення наладжувальних робіт та реалізацію утилізації гумових відходів термічним розкладанням під дією статичного навантаження в промислових умовах, важливим є визначення особливостей деструкції гумових відходів в реакторі устаткування під час статичного стискання.

Мета. Визначення фізичних характеристик теплотехнічного процесу деструкції зношених автошин в піролізному реакторі в поєднанні зі статичним навантаженням.

Матеріали й методи. Для оцінки ефективності запропонованого методу проведено серію експериментальних досліджень: традиційний піроліз подрібнених автошин в реакторі та піроліз автошин зі статичним навантаженням. За допомогою програми COMSOL Multiphysics досліджено теплофізичні характеристики вертикального піролізного реактора, заповненого автошинами, при взаємодії температури й статичного стискання.

Результати. Шляхом використання програмою методу кінцевих елементів та розв'язання диференціального рівняння теплопровідності, побудовано графіки, що демонструють теплопровідність і процес розподілу температурного поля всередині піролізного реактора за умов ущільнення перероблюваних продуктів. Розраховано термін перебування автошин в реакторі, що складає 7,8 год. Визначено оптимальний тиск на автошини, необхідний для досягнення максимального ущільнення.

Висновки. Обґрунтовано підвищення продуктивності установки утилізації гумотехнічних відходів шляхом впровадження в технологічну схему багатоконтурного циркуляційного піролізу статичного навантаження. Показано ефективність застосування статичного навантаження під час процесу, про що свідчить збільшення коефіцієнту теплопровідності масиву автошин в реакторі і, як наслідок, більш рівномірний розподіл температури в об'ємі ущільнених автошин.

Ключові слова: багатоконтурний циркуляційний піроліз, зношені автошини, статичне навантаження, ущільнення, теплопровідність, моделювання.

Інтенсивний розвиток транспортних зв'язків та підвищення економічного значення світових транспортних перевезень є свідченням того, що в найближчі декілька років проблема гумотехнічних відходів (ГТВ) буде особливо актуальною та вимагатиме ефективних рішень.

Для вирішення цієї проблеми та можливості утилізації зношених шин було проведено дослідження на установці багатоконтурного циркуляційного піролізу (БЦП), розробленій в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова.

Для інтенсифікації термічної деструкції, підвищення коефіцієнту корисної дії устаткування, проведення процесу в безперервному

режимі роботи, а також для можливості утилізації цілих шин запропоновано поєднання БЦП зі статичним навантаженням [1].

В основу інноваційної технології утилізації ГТВ термічним розкладанням під дією статичного навантаження 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 автошин [2].

Дослідження знаходиться на стадії теоретичного обґрунтування, отримання конструкторської документації, однак відсутні практичні знання робочого процесу устаткування, що ускладнює проведення налагоджувальних робіт та реалізацію процесу утилізації гумових відходів термічним розкладанням під дією статичного навантаження в промислових умовах.

Основні зусилля щодо підвищення ефективності піролізу спрямовані в напрямку оптимізації продуктивності установок, інтенсифікації утворення парогазової суміші та збільшення виходу цільових продуктів, які можуть знайти практичне застосування як альтернативне паливо.

Таким чином, актуальність роботи полягає в тому, щоб отримати експериментальні дані щодо можливості оптимізації тепло-фізичного режиму реактору при встановлених робочих параметрах процесу піролізу, зіставити та порівняти теплотехнічні та експлуатаційні показники процесу при традиційному піролізі гумових відходів за технологією БЦП та при утилізації їх за допомогою термічного розкладання під дією статичного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій про поєднання процесів термічної деструкції та статичного навантаження для утилізації гумотехнічних відходів не дає жодних результатів. Однак існують технології утилізації гумових відходів, що використовують поєднання традиційного піролізу з механічними

методами. Так, в роботі [3] запропоновано механотермічний спосіб утилізації гуми, наведено розрахунки величини потужності, необхідні для переробки відпрацьованих автомобільних шин та інших гумотехнічних виробів, доведено перевагу запропонованого авторами методу порівняно зі звичайними методами піролізу. Отримані значення показників потужності в 2–3 рази менше, ніж для традиційного піролізу гуми.

Для оцінки ефективності процесу утилізації гумової крихти в роботі [4] було проведено дослідження процесу девулканізації термічним і термомеханічним методами в середовищі мазути марки М-100. В результаті визначено, що термомеханічний процес девулканізації є найбільш перспективним і економічним, оскільки дозволяє зменшити час проведення процесу на 2–3 години і знизити енерговитрати.

Огляд робіт, що безпосередньо стосуються статичного навантаження та деформації гумових виробів у різних конфігураціях та областях їх застосування, показав, що було запропоновано спеціальний підхід до розрахунку пружно-деформованого стану гумових віброізоляторів з урахуванням контактної взаємодії з деталями конструкції [5, 6]. В роботі [7] розроблено стенд для статичних і динамічних випробувань пневматичних шин, який призначено для визначення коефіцієнта нормальної жорсткості та коефіцієнта непружного опору шини.

Дослідження впливу температури на деформаційно-міцнісні властивості високонаповнених композитів на основі поліетилену й частинок гуми наведено в роботі [8]. 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.

Також існують напрацювання щодо математичного моделювання процесу піролізу вуглеводневих відходів. В статті [9] розкрито практичне застосування програмного комплексу *Flow Vision* при розробці технологічного облад-

нання 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.

Існують дослідження поверхневого механізму синтезу метанолу на низькотемпературному Zn-Cu-Al-катализаторі [10], в яких проведено оцінку ефективності модернізації технологічної схеми установки з використанням розробленої математичної моделі для синтезу метанолу.

При утилізації цілих зношених шин сучасні технології використовують ретортні піролізні реактори, які здійснюють роботу в циклічному режимі. Такі методи призводять до енергетичних втрат при кожному процесі «нагрівання-охолодження» та до викидів шкідливих речовин в навколишнє природне середовище при розгерметизації устаткування [11, 12].

Аналіз піролізних технологій утилізації гумових відходів показує, що існуючі установки застосовують подрібнення сировини. Процес потребує додаткового обладнання та енергетичних витрат, що є недоцільним [13].

Відмінність вищезазначеної технології від інших полягає в наявності багатоконтурної циркуляційної системи, що повертає важкі сконденсовані продукти піролізу до реактора, за рахунок контурів охолодження [14]. В результаті такого процесу утилізації утворюється високоенергетичний піролізний газ та низькомолекулярне рідке паливо [14]. А в поєднанні зі статичним навантаженням технологія взагалі не має аналогів, що дає підстави для дослідження зазначеного методу, а також для наукових обґрунтувань доцільності та ефективності використання запропонованої технології.

Метою роботи було визначення фізичних характеристик процесу, що проходить в піролізному реакторі, заповненому автошинами із статичним навантаженням, із застосуванням сучасних досягнень фундаментальної науки й

комп'ютерних програмних засобів моделювання та розрахунку технологічного процесу.

Основними завданнями дослідження були оптимізація утилізації відходів за допомогою статичного навантаження для досягнення максимального виходу паро-газової суміші (ПГС), а також визначення оптимальної сукупності режимних параметрів піролізного реактора (ущільнення, теплопровідність і розподіл температурного поля всередині реактора). Одним із завдань також є розрахунок продуктивності реактора в процесі безперервного завантаження автошин і при їх стисканні в процесі піролізу та визначення величини оптимального тиску на автошини в реакторі.

Деструктивна термічна утилізація гумотехнічних відходів здійснюється при нагріванні їх в закритому реакторі БЦП і є складним фізико-хімічним процесом, що складається з одночасного нагрівання, хімічного розкладання маси відходів і вторинних реакцій взаємодії паро- та газоподібних продуктів деструкції.

Кількість та тип переважаючого каучуку, що входить до складу суміші гумових відходів визначає параметри проведення процесу утилізації та основні продукти деструкції. Тому для удосконалення та оптимізації технології БЦП проведено аналіз сировини зношених шин та гумових відходів, що дає підстави для визначення параметрів фізико-хімічних процесів термічної деструкції відходів в реакторі установки БЦП.

Хімічний та покомпонентний склад гумових сумішей та гумових виробів, що втратили споживчі властивості, представлено в **таблиці 1**.

Аналіз елементного складу гумотехнічних відходів показує, що до їх складу входять різноманітні компоненти, однак їх сумарний відсотковий вміст не перевищує 4–6 %. Це свідчить про те, що основними компонентами суміші відходів є натуральний каучук та різні типи синтетичних каучуків, їх основою є вуглець і водень, внаслідок чого гумові відходи володіють високою теплою згорання, що дозволяє проводити процес їх утилізації без використання додаткових енергоносіїв.

Таблиця 1

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
	Біло 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	4,90
	Інші компоненти	4,80		
Пневматичні шини відпрацьовані	Каучук СКС-30 (бутадієнстирольний)	86,86	Гума	96
	Вуглець	0,30	Сталь	4
	Марганець	9,20		
	Діоксид кремнію	0,05		
	Залізо	3,40		
	Сірка технічна	0,18		
Покришки з тканинним кордом відпрацьовані	Бутилкаучук БК	84,4	Гума	95
	Залізо	3,2	Сталь	4
	Діоксид кремнію	0,5	Капрон	1
	Марганець	0,6		
	Вуглець	10,8		
	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	Текстиль	7
	Сірка технічна	0,149		
	Вуглець	8,51		

Запатентована технологія утилізації ГТВ термічним розкладанням під дією статичного навантаження [15] базується на процесах механотермічної деструкції та залежить від тиску, сили навантаження на масив автошин в реакторі і температури. 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 змі-

нювати 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 ви-

сокомолекулярних сполук. В таблиці 2 наведено узагальнений процес термічної деструкції ГТВ.

В таблиці 3 наведено основні характеристики деструкції основних типів каучуків при їх утилізації та початкову температуру їх розкладання ($T_{роз}$, °С).

ПГС безперервно підіймається вгору та виходить з реактору в багатоконтурну циркуля-

ційну систему для подальшого розділення, таким чином зменшуючи масу та об'єм завантажених в реактор ГТВ, що постійно піддаються термічному розкладанню.

Матеріали шин сучасних автомобілів дуже різноманітні, але при їх виготовленні використовують натуральний або синтетичний каучук, які характеризуються низькою теплопровідністю. Процес їх піролізу характеризуєть-

Таблиця 2

Процес термічної деструкції гумотехнічних відходів

Етап деструкції та його температура, °С	Радикально-ланцюговий механізм	Хімічні реакції	Продукти реакції
Перший етап, 250–380	Утворення вільних радикалів, зростання реакційного ланцюга супроводжується розривом зв'язків і зниженням молекулярної маси	Деполімеризація з утворенням мономера та інших низькомолекулярних речовин	Випаровування різних компонентів гуми, таких як спеціальні добавки, масла й пластифікатори
Другий етап, 400–550	Обрив реакційного ланцюга відбувається шляхом рекомбінації або диспропорціонування вільних радикалів. Поява подвійних зв'язків на кінцях макромолекул, зміна фракційного складу і утворення розгалужених та просторових структур	Зміна ступеня ненасиченості, процеси циклізації та ізомеризації. Зшивання й деструкція макромолекул	Руйнування натурального, бутилового й бутилстирольного каучуків

Таблиця 3

Склад деструктованих каучуків різних типів

Вид каучуку	$T_{роз}$, °С	Вихід мономера	Основні речовини, що утворюються при піролізі каучуків	Вміст, % в розрахунку на каучук
Натуральний	198	Ізопрен Дипентен	Ізопрен 2-Метилпентен-2	24,0 1,45
Хлорпреновий (неопрен)	227	Хлоропрен	Бензол Толуол	2,70 1,62
Бутилкаучук	248	Бутилен Вінілциклогексан	М-Ксилол Тетрагідроетилтолуол	1,94 1,80
Бутадієнстирольний	254	Бутадієн Вінілциклогексан Стирол	Дипентен Гептени Гексени	29,0 3,80 4,16
Бутадієннітрильний	287	Бутадієн Вінілциклогексан Нітрилакрилова кислота	Гексадієни Пентени Бутени Бутадієни	1,25 2,41 1,60 3,91
Силоксановий	360	Кремнійорганічні з'єднання	Метилмеркаптан Сірководень	0,13 0,34

ся термодеструктивними показниками, які можуть суттєво відрізнятися один від одного, але всі вони однозначно реагують на максимальну температуру нагріву, при цьому глибина деструкції гуми в процесі піролізу буде характеризуватися тільки терміном впливу зазначеної температури на гуму. 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 в середині піролізного реактора.

В результаті дії вимушеного силового статичного навантаження на шини в реакторі загальна 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 % [15].

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.

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.

Завдання статичної оптимізації утилізації відходів на основі піролізу спрямовані на досягнення максимального виходу ПГС, пов'язані з визначенням оптимальної сукупності режимних параметрів піролізного реактора, а саме ущільнення, теплопровідності й процесу розподілу температурного поля всередині піролізного реактора.

Для вирішення завдань оптимізації на першому етапі необхідно знати аналітичні залежності між основними параметрами, які наведені у вигляді математичної моделі теплопровідності всередині реактора [16].

Загальну теплопровідність масиву автошин в зонах реактора можна виразити як:

де u – температура, c – питома об'ємна теплоємність, λ – коефіцієнт теплопровідності, q – щільність джерела тепла зовнішнього обігріву реактора, r, t – координати.

$$c(u, r, t) \frac{du}{dt} = \text{div} [\lambda(u, r, t) \text{gradu}] + q(u, r, t), \quad (1)$$

Рівняння теплопровідності для зон нагріву в сферичній системі координат наступне:

$$c'(T) \frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} \left(\lambda(T) r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{d}{d\theta} \left(\lambda(T) \frac{dT}{d\theta} \right). \quad (2)$$

Рівняння теплопровідності для ущільненого масиву компонентів автошин при деструкції можна представити в циліндричній системі координат:

$$c'(T) \frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(\lambda(T) r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{d}{dz} \left(\lambda(T) \frac{dT}{dz} \right), \quad (3)$$

де r, z – циліндричні координати; r, θ – сферичні координати; T – температура; τ – час, $c = \rho c$ – питома об'ємна теплоємність; ρ – щільність суміші компонентів автошини в третій зоні реактора; c – питома масова теплоємність.

Для спрощення розрахунків теплопровідності при допустимій похибці будь-яка багатоконпонентна система може бути послідовно зведена до двоконпонентної при відповідних граничних умовах. При виборі моделі приймаються наступні припущення і обмеження: матеріал гуми є термопластичним і має одно-



Рис. 1. Експериментальна установка БЦПШ–14

рідну структуру, металокордом нехтуємо, матеріал бортових кілець — однорідний метал, розташований в площині, перпендикулярній тепловому потоку.

Для характеристики процесу переносу тепла в багатокомпонентній моделі необхідно встановити залежність ефективного коефіцієнту узагальненої теплопровідності θ від структури комірки, коефіцієнтів узагальненої теплопровідності компонентів θ_i та їх концентрації m_i , тоді:

$$\theta = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, m_1, m_2, \dots, m_i). \quad (4)$$

Теоретичне дослідження процесу теплопереносу виконується на ідеалізованій моделі

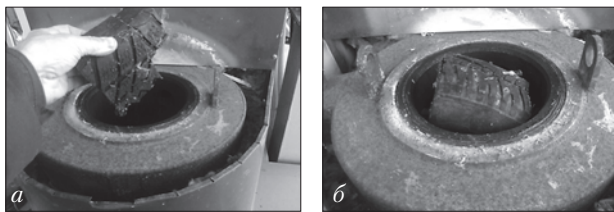


Рис. 2. Етапи підготовки подрібнених автошин до процесу утилізації традиційним піролізом: а — закладання шматків автошин в реактор; б — заповнення реактора подрібненими автошинами, де їх щільність не перевищує 60 %

структури, яка відображає основні геометричні характеристики реальної комірки автошини, враховуючи всі істотні фактори, що визначають процес теплопереносу. Таку модель можна вважати адекватною в реальній системі, що демонструє формула 5.

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{\nu - (\nu - 1)(1 - m_2^{\frac{2}{3}}) m_2}{\nu - m_2^{\frac{1}{3}}(\nu - 1)}. \quad (5)$$

Наведена формула теплопровідності анізотропної структури елементарної бінарної комірки з компонентами металевих бортових кілець і гуми дозволяє визначити теплопровідність масиву, структура якого найбільш реалістична в процесі піролізу цілих автошин, поєднаного з дією на них статичного навантаження.

Для прогнозування ефективності інноваційної технології, а також відпрацювання технологічних режимів, експериментальні дослідження проводили на стенді багатоконтурного циркуляційного піролізу БЦПШ–14 (рис. 1), що працює в циклічному режимі та може здійснювати утилізацію тільки подрібнених шин. 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'єма гуми до сумарного об'єму металу (металокорд та дріт бортових кілець) відповідно до цілої автошини. Отримані результати дозволяють використати їх для адаптації математичної моделі щодо роботи промислової установки безперервної дії утилізації цілих зношених шин.

Було проведено серію експериментальних досліджень в двох варіантах: варіант 1 — традиційний піроліз подрібнених автошин в реакторі (рис. 2), коли щільність масиву автошин в реакторі не перевищує 60 %, і варіант 2 — піроліз подрібнених автошин в реакторі зі статичним навантаженням (рис. 3).



Рис. 3. Етапи підготовки подрібнених автошин до процесу утилізації піролізом зі статичним навантаженням: *a* – вихідне положення набору масивних дисків перед розташуванням їх в реакторі; *б* – розташування першого диска в реакторі; *в* – розташування всього масиву дисків в реакторі; *г* – встановлення кришки на реактор та її герметизація за допомогою гвинта

Таблиця 4

Зміна температурного поля маси автошин в піролізному реакторі при різних статичних навантаженнях

№ експерименту	Маса шматків автошин, кг	Статичне навантаження, кг/см ²	Температура в центрі реактора, °С	Температура на відстані 1/4 діаметра реактора, °С	Температура на внутрішній поверхні корпусу реактора, °С	Температура 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

Порізані на частини розміром 100 × 100 мм автошини з металокордом завантажували в реактор об'ємом 14 дм³, а зверху на них встановлювали різну кількість дисків масою 0,5 кг кожен (табл. 4), які створювали статичне на-

вантаження на шматки автошин, розташованих в реакторі в процесі їх піролізу.

Для визначення температурного поля в реакторі було встановлено термометри, які були з'єднані з приладом ОВЕН УКТ38-Щ4.

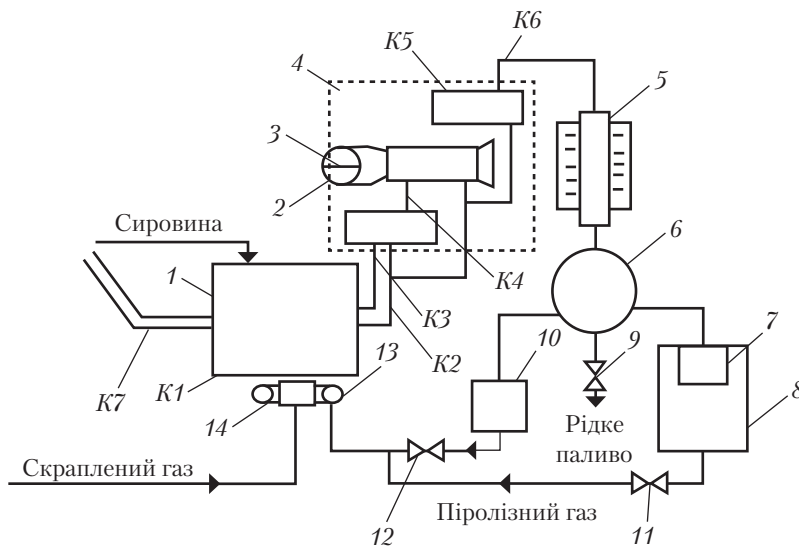


Рис. 4. Блок-схема експериментальної установки ЕУ БЦПШ – 14: 1 – реактор; 2 – система повітряного охолодження П контуру; 3 – повітряна засувка; 4 – блок контурної циркуляційної системи; 5 – вихідний конденсатор з водяним охолодженням; 6 – розподільна ємність; 7 – підривний запобіжник; 8 – компенсаційна ємність; 9 – кран зливання рідкого палива; 10 – лічильник піролізного газу; 11, 12 – крани подачі піролізного газу на палиник допаловання; 13 – палиник допаловання піролізного газу; 14 – палиник скрапленого газу; K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7 – термопари

ТП № 30108101104026097, що реєстрував зміну температури в масиві автошин в процесі піролізу. Реактор виготовлено із сталі марки 08X18H9T з такими геометричними параметрами: діаметр – 220 мм; товщина стінки корпусу – 5 мм. Схема розташування термопар та блок-схема експериментальної установки ЕУ БЦПШ – 14 наведено на рис. 4.

Теоретичні дослідження в програмі COMSOL теплофізичних характеристик вертикального піролізного реактора, заповненого цілими автошинами, при взаємодії температури і статичного їх стиснення

За допомогою програми *COMSOL* було проведено серію розрахунків для оцінювання точності складання математичної моделі та розробки рекомендацій зі збільшення продуктивності установки для утилізації ГТВ.

COMSOL Multiphysics – потужне інтерактивне середовище для моделювання та вирішення наукових і технічних проблем, заснованих на диференціальних рівняннях (*PDE*). Програмне забезпечення виконує кінцево-елементний аналіз разом з адаптивним будівництвом сітки, використовуючи ряд чисельних рішень.

Для розрахунків температурного поля у вертикальному піролізному реакторі, заповнено-

му автошинами з статичним навантаженням, використовувався метод кінцевих елементів. В результаті розв'язання диференціального рівняння теплопровідності, побудовано графіки, що демонструють ущільнення (рис. 5), теплопровідність (рис. 6) і процес розподілу температурного поля всередині піролізного реактора (рис. 7–8).

Максимальна щільність шматків автошин в нижній частині реактора у варіанті 1 складає 1080 кг/м^3 , тоді як у варіанті 2 – 1800 кг/м^3 (рис. 5). Відповідно змінюється й коефіцієнт теплопровідності масиву автошин в реакторі.

Порівнюючи графіки двох варіантів (рис. 6, а, б) 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 $50 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Відповідно, наведені характеристики впливають на інтенсивність нагрівання реактора, зменшуючи загальну тривалість процесу утилізації відходів.

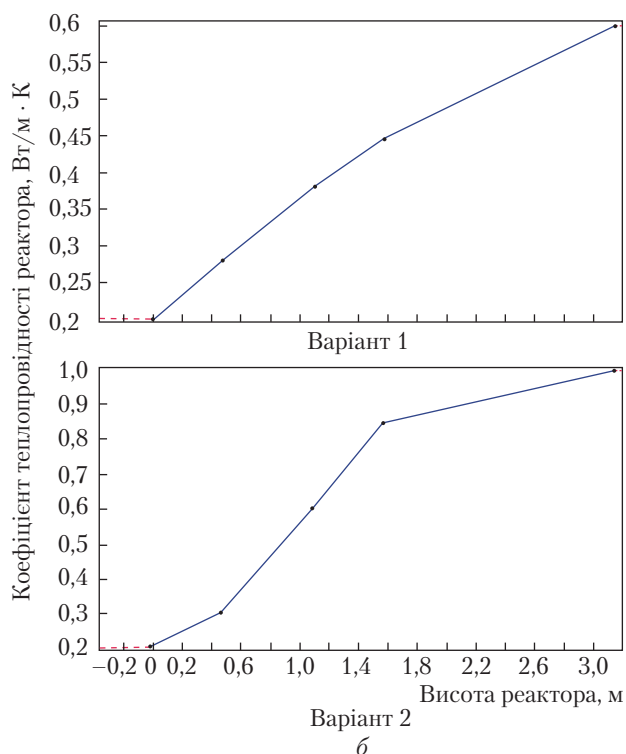
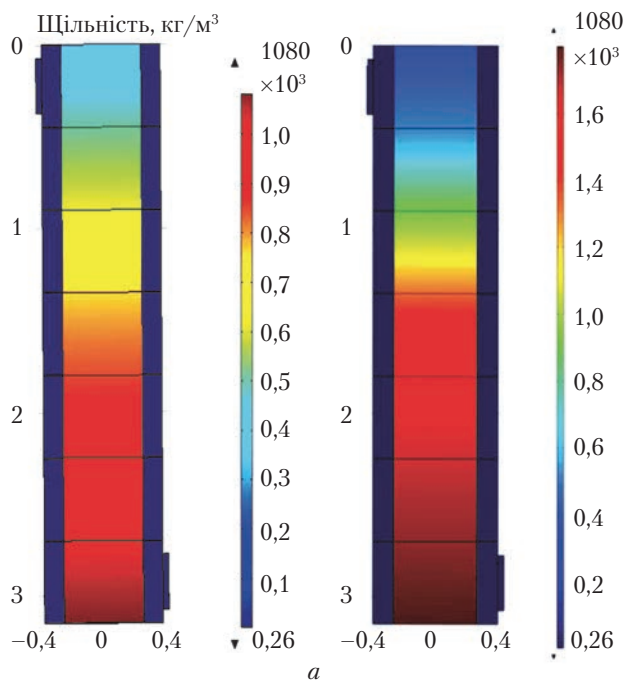


Рис. 5. Спектральний аналіз щільності (а) та криві зміни щільності автошин (б) залежно від висоти піролізного реактора ретортного типу без навантаження (варіант 1) та при статичному стисканні автошин в процесі піролізу (варіант 2)

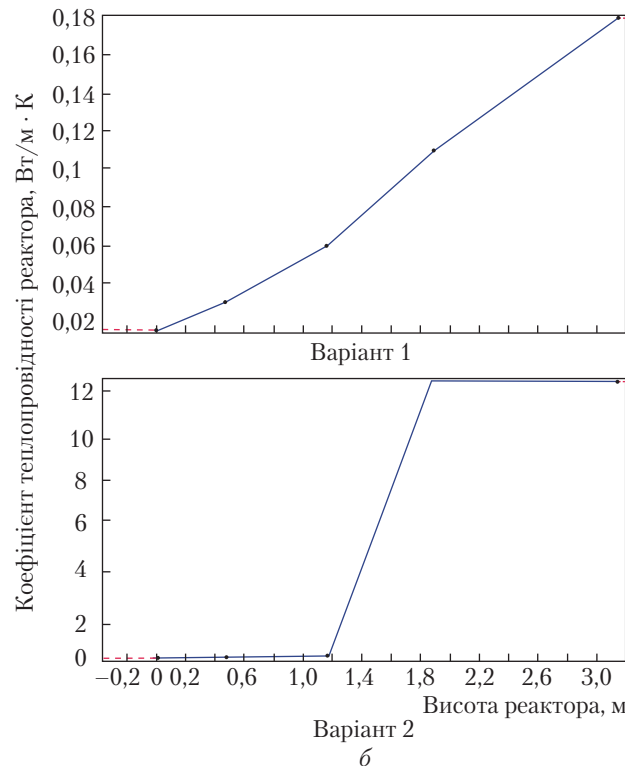
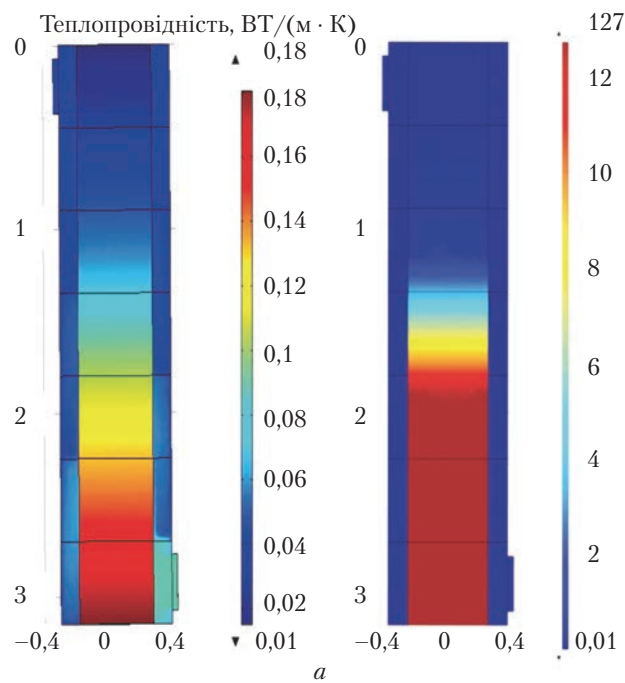


Рис. 6. Спектральний аналіз теплопровідності (а) та криві зміни коефіцієнту теплопровідності (б) залежно від висоти піролізного реактора ретортного типу без навантаження (варіант 1) та при статичному стисканні автошин в процесі піролізу (варіант 2)

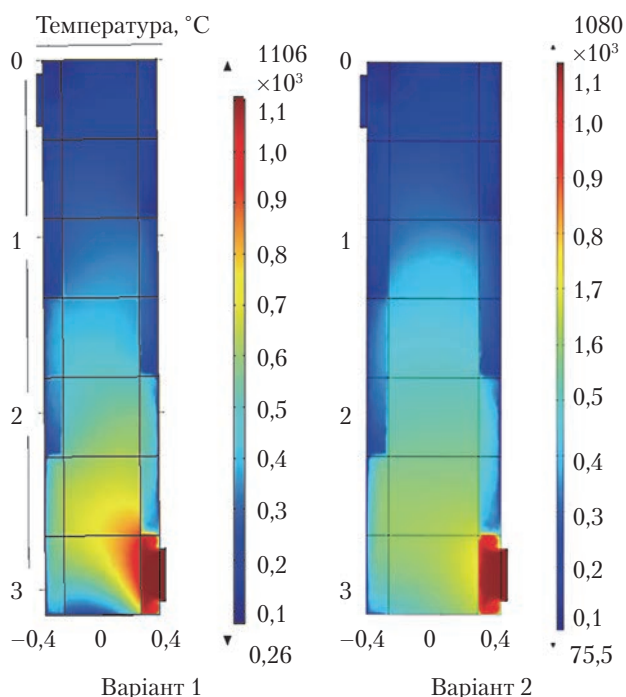


Рис. 7. Спектральний аналіз розподілу температури по масиву подрібнених автошин в піролізному реакторі ретортного типу без навантаження (варіант 1) та при статичному стисканні їх в процесі піролізу (варіант 2)

При порівнянні розподілу температур у варіантах 1 і 2 (рис. 7–8), 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 досліджу зменшується приблизно на 100 °С. Це пояснюється відсутністю різкого піку розподілу температур в центрі реактору (рис. 8, б).

Результати виконаного дослідження технологічних параметрів піролізу зношених автомобільних шин при їх статичному навантаженні узагальнено в таблиці 5. Умови теоретичного розрахунку: варіант 1 – розрахункова модель без статичного навантаження, варіант 2 – розрахункова модель при статичному навантаженні 0,35 кг/см². Практичні дослідження: варіант 1 – реактор заповнений частинами

автошин без статичного навантаження; варіант 2 – реактор заповнений шматками автошин при статичному їх стисканні силою 0,32 кг/см².

Таким чином, отримані в результаті досліджень показали ефективність застосування статичного навантаження під час утилізації гумових відходів, про що свідчить збільшення теплопровідності масиву автошин в реакторі як при теоретичних розрахунках, так і підтверджено в результаті практичних досліджень. Похибка різниці результатів теоретичної моделі та практичних досліджень не перевищує 13 %.

Розрахункова продуктивність реактора в процесі безперервного завантаження автошин і при їх стисканні в процесі піролізу

Для теоретичного дослідження точності розрахункової продуктивності проектованого реактора піролізу стиснених автошин задаємо контрольні параметри експериментального реактора:

- швидкість просування автошин в реакторі – 0,35–0,525 м/год;
- температура теплоносія обігріву реактора – 900–1100 °С;
- сила статичного навантаження на автошини – 0,02–0,08 кг/см²;

Таблиця 5

Порівняльна таблиця теоретичних розрахунків та результатів експерименту

Показники	Теоретичні розрахунки		Експериментальне 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

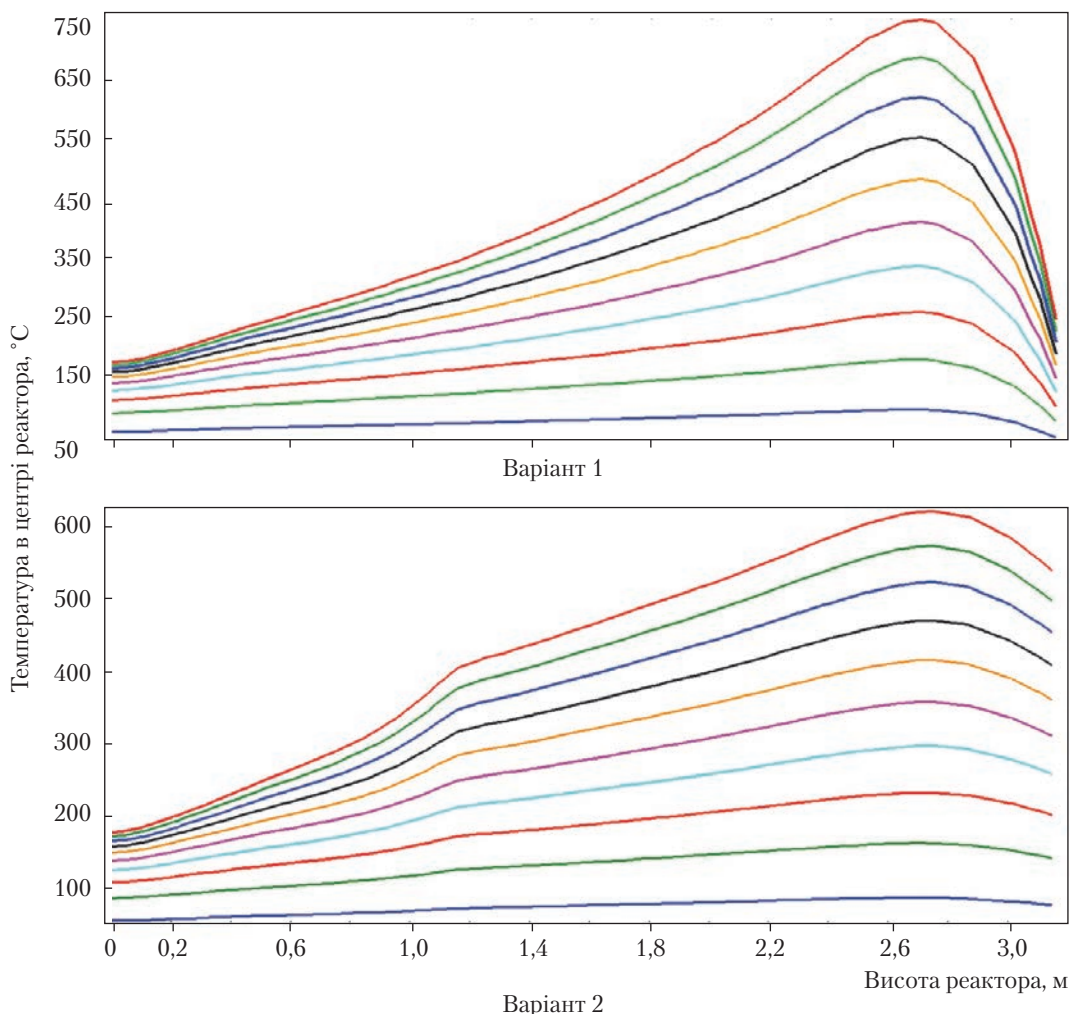


Рис. 8. Криві розподілу температури в центрі масиву подрібнених автошин в процесі їх нагрівання димовими газами різної температури в піролізному реакторі ретортного типу без навантаження (варіант 1) та при статичному стисканні (варіант 2)

- еквівалентний діаметр реактора – 0,6–1,2 м;
- частота подачі автошин в реактор – 10–15 шт./год;
- продуктивність переробки в реакторі – 35–50 кг/год.

На основі математичної моделі процесу піролізу автошин з ефектом стискання в процесі піролізу та аналізу експериментальних даних одержано кінетичне рівняння відносного середнього часу перебування автошини в реакторі, який достатній для видалення із автошин 80–95 % легких вуглеводнів. З урахуванням

цього перебування автошини в реакторі згідно числа Фур'є, одержуємо рівняння відносної продуктивності піролізного реактора:

$$G = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \cdot \left(\frac{Q - Q_0}{t_{\text{ст}} - Q} \right) \cdot d^2 \cdot a \cdot G_3 \approx 32 - 42,4 \text{ км/год},$$

де Re – критерій Рейнольдса ($\text{Re} = \frac{VD_1\rho_c}{\mu}$), V – швидкість руху автошин в реакторі 0,15–0,25 м/год, D_1 – внутрішній діаметр реактора – 0,6 м, μ – динамічна в'язкість маси термопластичної гуми 11,2 Н·с/м², ρ_c – щільність

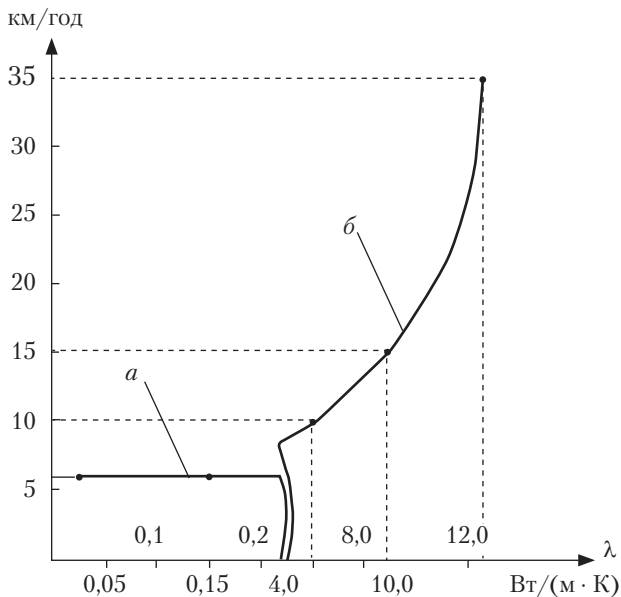


Рис. 9. Зміна продуктивності реактора піролізу безперервної дії при збільшенні теплопровідності маси автошин за рахунок зовнішнього навантаження на них в процесі піролізу в заданих температурних режимах: *a* — крива продуктивності реактора при відсутності зовнішнього навантаження; *б* — крива продуктивності реактора при дії статичного навантаження

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; λ — 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 м²; Q — температура пірокарбону на виході із реактора — 300 °С; Q_0 — температура автошини на вході в реактор — 120 °С; $t_{ст}$ — температура внутрішньої стінки реактора — 400 °С; d — діаметр бортових кілець — 0,38 м; a — коефіцієнт температуропровідності ущільненої маси автошин — $8 \cdot 10^6$ м²/с; G_3 — одночасна маса автошин, яка знаходиться в реакторі — 720 кг.

Межі змін безрозмірних коефіцієнтів в рівнянні: Re (для високов'язкого потоку) = $7,76 \cdot 10^{-5}$.

Аналізуючи одержане рівняння продуктивності за різними параметрами — температурою теплоносія, діаметрами реактора, швидкістю просування автошин по реактору, різним зусиллям навантаження, можна знайти експериментальне значення продуктивності реактора.

Виходячи із вище визначеної продуктивності реактора і одночасної маси автошин, яка знаходиться в реакторі, можна обчислити термін перебування автошин в реакторі:

$$\tau = \frac{G_3}{G_{пр}} = \frac{720}{92} = 7,8 \text{ год,}$$

що, згідно з експериментальними даними, забезпечує 98 % видалення летких вуглеводнів з об'єму автошин.

Для оцінки ефективності теплопередачі в реакторі БЦП під час статичного навантаження при утилізації зношених автошин побудовано графік залежності продуктивності зазначеного реактора від величини теплопровідності маси автошин в заданих температурних режимах (рис. 9).

Аналіз графічних зображень показує, що при малих величинах теплопровідності, в разі відсутності зовнішнього навантаження і малого ущільнення при $\lambda = 0,03-0,2$ Вт/(м·К), продуктивність реактора порівняно мала і практично не збільшується (рис. 9, крива *a*). Тоді як 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 реактора стрімко зростає (рис. 9, крива *б*).

Визначення величини оптимального тиску на автошини в реакторі

Для визначення величини оптимального тиску, тобто зовнішнього навантаження на масив автошин, які розташовані в циліндричному реакторі, проаналізовано фізичний стан автошини в кожній зоні реактора.

Із характеристики фізичного стану гуми видно, що основним параметром при розрахунку

сили навантаження (P) є коефіцієнт термопластичності гуми.

Для оцінювання стискаючого зусилля в першому наближенні розглянемо горизонтальне розташування автошин гладкими шарами. Сила стискання в напрямку вісі будь-якої пари контактуючих шарів автошин площею поперечного перерізу реактора і загальним коефіцієнтом термопластичного стану гуми становить:

$$P = p'_{\text{шт}} \pi r^2, \quad (6)$$

де πr^2 — площа поперечного перерізу автошини на ділянці 1, 2, а на ділянці 3 — площа поперечного перерізу реактора; $p'_{\text{шт}}$ — сила статичного тиску ($\text{кг}/\text{см}^2$) на масив автошин, який залежить від величини зовнішнього навантаження $p_{\text{шт}}$, у разі вертикального завантаження реактора враховується сила тяжіння G шарів автошин, розташованих зверху.

Оскільки масив автошин складається із ідеально гладких прошарків, то:

$$p'_{\text{шт}} = p_{\text{шт}} + \frac{G}{\pi r^2}; G = 9,81 \rho_n; \\ V = 10 \rho_n h_{\text{сл}} \pi r^2, \quad (7)$$

де ρ_n — насипна маса автошин для кожної ділянки реактора, $h_{\text{сл}}$ — половина висоти ділянки (сила стискання розраховується для середини ділянки).

Виходячи із практично отриманих даних властивостей термопластичної гуми при максимальній температурі 600°C і мінімальному терміні заповнення нею вільного об'єму в середині бортових кілець, розрахункове зовнішнє навантаження визначається в інтервалі $0,01$ – $0,07 \text{ кг}/\text{см}^2$ при динамічній в'язкості термопластичної гуми 112 сПуаз .

Таким чином, розроблено безвідходну технологію утилізації зношених автомобільних шин із застосуванням статичного навантаження з отриманням альтернативного палива. Отримання альтернативного палива зазначеним шляхом, визначення залежностей його якості та кількості від температурних параметрів здійснення процесу на кожному контурі

багатоконтурної циркуляційної системи, є матеріалом для подальших досліджень.

На основі отриманих результатів було проведено серію експериментальних випробувань в реакторі заповненому автошинами при традиційному піролізі (варіант 1) та із статичним навантаженням (варіант 2), а за допомогою комп'ютерної програми *COMSOL Multiphysics* визначено фізичні характеристики процесу — у варіанті 1 в нижній частині реактора визначено величину щільності, що складає $1080 \text{ кг}/\text{м}^3$, тоді як у варіанті 2 цей показник становить $1800 \text{ кг}/\text{м}^3$; максимальна теплопровідність в нижній частині реактора у варіанті 2 складає $12,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а у варіанті 1 майже в 100 разів менше — лише $0,18 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Таким чином, отримані результати досліджень показали ефективність застосування статичного навантаження під час утилізації гумових відходів, про що свідчить збільшення коефіцієнту теплопровідності масиву автошин в реакторі і, як наслідок, 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 другого варіанту менша приблизно на 100°C .

На основі математичної моделі процесу піролізу автошин з ефектом стискання в процесі їх утилізації та аналізу експериментальних даних розраховано продуктивність реактора при безперервному завантаженні автошин. Визначено час перебування автошин в реакторі, що складає $7,8$ годин та, згідно з експериментальними даними, забезпечує 98% видалення летких вуглеводнів з об'єму автошин.

В ході роботи було визначено величину оптимального тиску на автошини в реакторі при максимальній температурі 600°C . Розрахункове зовнішнє навантаження коливається в межах $0,01$ – $0,07 \text{ кг}/\text{см}^2$ при динамічній в'язкості термопластичної гуми 112 сПуаз .

Подальше удосконалення технології багатоконтурного циркуляційного піролізу автошин

з дією статичного навантаження можна віднести до пріоритетних і стратегічних напрямків розвитку вітчизняної науки, що дозволить Україні вирішити власні питання з утилізації зношених автошин з одержанням альтерна-

тивних видів палива. Це не лише суттєво покращить загальну екологічну ситуацію в країні, а й в перспективі дозволить вийти на всесвітній ринок з продажу як прогресивної технології, так і відповідного обладнання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент України на корисну модель кл. F23G5/027, C08J11/04. Маркіна Л.М., Рижков С.С., Рудюк М.В., Крива М.С. Універсальна автоматизована установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин.
2. Маркіна Л.М. Дослідження характеристик ущільнення маси цілих зношених автошин в піролізному реакторі. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2017. № 3. С. 121–128.
3. Аметов И.Э., Оболонский В.В., Абхайрова С.В. Теоретические основы механотермической переработки резины. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки*. 2012. Выпуск 35. С. 23–28.
4. 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: 20.03.2018).
5. 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. Вып. 106. С. 105–110.
6. 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.
7. Енаев А.А., Манфановский С.Б. Стенд для статических и динамических испытаний пневматических шин. *Машиностроение*. 2002. С. 249–253.
8. 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.
9. 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. Випуск 42. С. 113–119.
10. 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.
11. Суслов М. Б. Оборудование по утилизации и переработке шин, других РТИ. URL: <http://suslovm.ucoz.ru/> (дата звернення: 26.03.2018).
12. Превратите отходы в доходы. URL: <http://altor.com.ua/> (дата звернення: 02.03.2018).
13. Константин Розен. *Утилизация покрышек методом пиролиза*. URL: www.brasco-oil.ru (дата звернення: 15.03.2018).
14. Маркіна Л.М., Рижков С.С. Моделювання й розрахунок елементів технології багатоконтурного циркуляційного піролізу високомолекулярних органічних відходів. *Екотехнології і ресурсозбереження*. 2006. № 4. С. 71–76.
15. Патент України на винахід, кл. F23G5/24, F23G5/027, C08J11/04, C10G1/10, C10B53/07 № 110678. Маркіна Л.М., Рижков С.С., Рудюк М.В., Крива М.С. Універсальна автоматизована установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин; заявл. 06.10.2014; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.
16. 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*. 2016. No. 4/5 (82). P. 12–18.

Стаття надійшла до редакції 06.04.18

REFERENCES

1. Patent of Ukraine for the useful model C. F23G5/027, S08J11/04. L. M. Marquina, S. S. Rizhkov, M. V. Rudyuk, M. S. Kriva. The Flexible automated unit of the continuous pyrolysis of the whole auto tires [in Ukrainian].
2. Markina, L. M. (2017). Doslidzhennia kharakterystyk ushchilnennia masy tsilykh znoshenykh avtoshyn v piroliznomu reaktorі. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho univertsytetu korablebuduvannia*, 3, 121–128 [in Ukrainian].
3. Ametov, I. E., Obolonskiy, V. V., Abkhairova, S. V. (2012). Teoreticheskie osnovy mekhanotermicheskoy pererabotki reziny. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, issue 35, 23–28 [in Ukrainian].

4. Sokolov, A. R., Belyaev, P. S., Malikov, O. G. Issledovanie protsessa devulkanizatsii rezinovoy kroschki iznoshennykh avtomobilnykh shin. URL: <http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/st/2004/sokolov.pdf> (Last accessed: 20.03.2018).
5. Dyrda, V. I., Grebenyuk, S. N., Lisitsa, N. I., Reshevskaya, Ye. S., Tarkhova, V. M., Novikova, A. V., Zabolotnaya, Ye. Yu. (2012). Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vibrozolyatorov slozhnoy formy. *Geotekhnicheskaya mekhanika: Mezhved. sb. nauch. tr.*, issue 106, 105–110 [in Ukrainian].
6. Dyrda, V. I., Tolstenko, A. V., Kalgankov, Ye. V. (2013). Opredelenie dolgovechnosti uprugogo nasledstvennykh sred s ispolzovaniem obobshchennykh kriteriev razrusheniya. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 4/7(64), 4–7 [in Ukrainian].
7. Yenaev, A. A., Manfanovskiy, S. B. (2002). Stend dlya staticheskikh i dinamicheskikh ispytaniy pnevmaticheskikh shin. *Mashinostrenie*, 249–253 [in Ukrainian].
8. Kontareva, T. A., Yulovskaya, V. D., Obolonkova, Ye. S., Nasrullaev, I. N., Serenko, O. A. (2011). Vliyanie temperatury na mekhanicheskie svoystva rezinoplastov na osnove polietilena. *Vestnik MITKhT*, 6(1), 33–36 [in Ukrainian].
9. Iskovich-Lototskiy, R. D., Veselovska, N. R., Ivanchuk, Ya. V., Veselovskiy, Ya. P. (2013). Rozrakhunok temperatur-nikh poliv v robochikh zonakh piroliznoi ustanovki. *Mizhvuzivskiy zbirnik "Naukovi notatki"*, issue 42, 113–119 [in Ukrainian].
10. Korobochkin, V. V., Kravtsov, A. V., Popok, Ye. V. (2012). Povyshenie effektivnosti ustanovok sinteza metanola s ispolzovaniem metoda matematicheskogo modelirovaniya. *Fundamental research*, 9, 151–156 [in Ukrainian].
11. Suslov, M. B. Oborudovanie po utilizatsii i pererabotke shin, drugikh RTI. URL: <http://suslovm.ucoz.ru/> (Last accessed: 26.03.2018).
12. Prevratite otkhody v dokhody. URL: <http://altop.com.ua/> (Last accessed: 02.03.2018).
13. Konstantin Rozen. *Utilizatsiya pokryshek metodom piroliza*. URL: www.brasco-oil.ru (Last accessed: 15.03.2018).
14. Markina, L. M., Ryzhkov, S. S. (2006). Modeliuvannya y rozrakhunok elementiv tekhnolohii bahatokonturnoho tsyrkuliatsiinoho pirolizu vysokomolekuliarnykh orhanichnykh vidkhodiv. *Ekotekhnolohii i resursozberezhennia*, 4, 71–76 [in Ukrainian].
15. *Patent of Ukraine for the invention C. F23G5/24, F23G5/027, C08J11/04, C10G1/10, C10B53/07* No. 110678. Markina L. M., Ryzhkov S. S., Rudiuk M. V., Kryva M. S. (2016). Universal automated installation of continuous pyrolysis whole worn car tires [in Ukrainian].
16. Ryzhkov, S., Rudyuk, N., Markina, L. (2016). 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), 12–18 [in English].

Received 06.04.18

Markina, L.M., and Kryva, M.S.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Heroiv Ukrainy Ave., 9, Mykolaiv, 54000, Ukraine,
+380 93 608 7550, markserg@ukr.net, marharyta.kryva@nuos.edu.ua

STUDY OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PYROLYSIS OF WASTE TIRES UNDER STATIC LOAD

Introduction. Disposal of waste tires is a pressing problem in our country, since their amount has been constantly increasing. Inadequacy of the existing methods for thermal waste tire utilization has given rise to the necessity of developing an advance technology for their pyrolysis combined with static load.

Problem Statement. Since no data on specific features of work process are available, this complicates the adjustment works and implementation of waste tire utilization by thermal decomposition under static load in industrial conditions. The determination of specific features of waste tire destruction in the reactor under static load is a relevant problem to be solved.

Purpose. To determine the physical parameters of waste tire destruction in the pyrolysis reactor, under static load.

Materials and Methods. To assess the effectiveness of the proposed method a series of experiments have been carried out. It includes the conventional pyrolysis of grinded waste tires in the reactor and tire pyrolysis under static load. Using *COMSOL Multiphysics* program, the physical parameters of vertical pyrolysis reactor filled with tires under temperature effect and static compression have been studied.

Results. Diagrams that show thermal conductivity and distribution of temperature field inside the pyrolysis reactor in the case of compaction of processed products have been built using the method of end elements and solution of differential thermal conductivity equation. The time of tire stay in the reactor has been estimated as 7.8 hours. Optimal pressure on tire, which is required for maximum compaction has been determined.

Conclusions. Raising performance of the plant for waste tire utilization by introducing static load into the process technology for multi-loop circulation pyrolysis has been substantiated. The use of static load has been shown to be an effective method, as it leads to an increase in the thermal conductivity coefficient of waste tire mass in the reactor and, consequently, a more even temperature distribution in the compacted tire mass.

Keywords: multi-loop circulation pyrolysis, waste tires, static load, compaction, thermal conductivity, and modelling.

Л.Н. Маркіна, М.С. Кривая

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,
просп. Героев Украины, 9, Николаев, 54000, Украина,
+380 93 608 7550, markserg@ukr.net, marharyta.kryva@nuos.edu.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПИРОЛИЗА ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН ПРИ ИХ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Введение. Проблемы утилизации изношенных автомобильных шин остро стоят в нашей стране, поскольку их объем непрерывно увеличивается. Кроме того, несовершенство существующих методов термической утилизации изношенных автошин побуждает к разработке новой технологии пиролиза в сочетании со статической нагрузкой.

Проблематика. Из-за отсутствия практических знаний особенностей рабочего процесса затрудняется проведение наладочных работ и реализация утилизации резиновых отходов термическим разложением под действием статической нагрузки в промышленных условиях, важным является определение особенностей деструкции резиновых отходов в реакторе оборудования при статическом сжатии.

Цель. Определение физических характеристик теплотехнического процесса деструкции изношенных автошин в пиролизном реакторе в сочетании со статическим нагружением.

Материалы и методы. Для оценки эффективности предложенного метода проведена серия экспериментальных исследований: традиционный пиролиз измельченных автошин в реакторе и пиролиз автошин со статической нагрузкой. С помощью программы COMSOL Multiphysics исследовано тепло-физические характеристики вертикального пиролизного реактора, заполненного автошинами, при взаимодействии температуры и статического сжатия.

Результаты. Путем использования программой метода конечных элементов и решения дифференциального уравнения теплопроводности, построены графики, демонстрирующие теплопроводность и процесс распределения температурного поля внутри пиролизного реактора в условиях уплотнения перерабатываемых продуктов. Рассчитан срок пребывания автошин в реакторе, что составляет 7,8 ч. Определено оптимальное давление на автошины, необходимое для достижения максимального уплотнения.

Выводы. Обоснованно повышение производительности установки утилизации резинотехнических отходов путем внедрения в технологическую схему многоконтурного циркуляционного пиролиза статической нагрузки. Показана эффективность применения статической нагрузки во время процесса, о чем свидетельствует увеличение коэффициента теплопроводности массива автошин в реакторе и, как следствие, более равномерное распределение температуры в объеме уплотненных автошин.

Ключевые слова: многоконтурный циркуляционный пиролиз, изношенные автошины, статическая нагрузка, уплотнение, теплопроводность, моделирование.