

DOI 10.15589/jnn20170315  
 УДК 658.567.1  
 М26

## STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF COMPRESSION OF A BATCH OF WHOLE WASTE TIRES IN A PYROLYSIS REACTOR

### ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК УЩІЛЬНЕННЯ МАСИ ЦІЛИХ ЗНОШЕНИХ АВТОШИН У ПІРОЛІЗНОМУ РЕАКТОРІ

**Liudmyla M. Markina**  
 liudmila.markina@nuos.edu.ua  
 ORCID: 0000-0003-3632-1685

**Л. М. Маркіна,**  
 канд. техн. наук, доц.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

**Abstract.** The publication studies the characteristics of compression of a batch of whole waste tires. The process of their dynamic compression in a pyrolysis is modeled. Dependencies of variation of the load on the tire column are analyzed at various heating temperatures and statistical load during pyrolysis. Rheological properties of the tires are considered in three relatively isolated zones of the reactor with different physical conditions. A physical model of pyrolysis reactor has been developed, which is intended for the study of rheology of whole waste tires during their heating and compression. In prospect, this model will improve the technology of thermal recycling of waste tires and increase the reactor fill factor up to 98%. The mathematical model of dynamic compression of whole waste tires in the pyrolysis reactor can be used for practical purposes during pyrolysis plant design.

**Keywords:** waste tires; pyrolysis reactor; dynamic compression; reactor fill factor.

**Анотація.** Проведено моделювання процесу динамічного ущільнення цілих зношених автошин у піролізному реакторі, проаналізовано залежності зміни навантаження на стовп сировини за різних температур нагріву й статичного стискання масиву цілих зношених автошин у процесі піролізу.

**Ключові слова:** зношені автомобільні шини; піролізний реактор; динамічне ущільнення; коефіцієнт заповнення реактора.

**Аннотация.** Проведено моделирование процесса динамического уплотнения целых отработанных автошин в пиролизном реакторе, проанализированы зависимости изменения нагрузки на столб автошин при различных температурах нагрева и статистической нагрузке в процессе пиролиза.

**Ключевые слова:** отработанные автомобильные шины; пиролизный реактор; динамическое уплотнение; коэффициент заполнения реактора.

## REFERENCES

- [1] Zolotenko B. N., Skibka N. Ye., Synyuk O. N. *Konechno-raznostnyy metod issledovaniya protsessa zapolneniya pryamougolnoy press-formy, putem vizualizatsii potoka rasplava* [A finite-difference method for studying the process of filling a rectangular mold by visualizing the flow of a melt *Visnyk Kyivskoho derzhavnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu — Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*, 2000, no. 2, pp. 48–43.
- [2] Syniuk O. M. *Modeliuvannia plynu ridyny z viazkistiu, shcho zalezhyt vid temperatury* [Modeling of a flow of a liquid with the viscosity depending on temperature]. Khmelnytskyi, TUP Publ., 2002, no. 1, part 1, 216 p.
- [3] Basov N. I., Kazankov Yu. V. *Litevoe formovanie polimerov* [Injection formation of polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 248 p.
- [4] Walter A. I., Larin A. V., Makarov M. A. *Strukturnoe modelirovanie proizvodstvennogo protsessa litya v peschanye formy* [Structural modeling of the production process of casting into sand molds]. *Izvestiya TulGU, seriya Metallurgiya, Ekologiya, Fizika — Proceedings of the TSU, Series of Metallurgy, Ecology, Physics*, 2002, issue 2, pp. 216–219.
- [5] Walter A. I., Larin A. V., Makarov M. A. *Eksperimentalnye issledovaniya svoystv peschano-glinistykh smesey* [Experimental studies of the properties of sand-clay mixtures]. *Nauchnye osnovy resheniya problem selkhoz. mashinostroeniya* [Scientific foundations for solving the problems of agricultural machine building]. Tula, TULGU Publ., 2003, pp. 149–155.

- [6] Mamayev Sh., Karimbayev T. D. *Vliyanie kharaktera dinamicheskogo nagruzheniya na formirovanie plasticheskoy zony i volny razgruzki v sterzhne konechnoy dliny* [Influence of the nature of dynamic loading on the formation of the plastic zone and the unloading wave in a rod of finite length]. *Vestnik KGTU — Bulletin of the KSTU*, 2012, no. 4, pp. 7–14.
- [7] Markina L. M., Ryzhkov S. S., Rudiuk M. V., Kryva M. S. *Universalna avtomatyzovana ustanovka bezperervnoho pirolizu tsilykh znoshenykh avtomobilnykh shyn* [Universal automated installation of continuous pyrolysis of whole worn car tires]. Patent UA no. 98287, CF23G5 / 027, S08J11/04

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Наявні технології піролізу не передбачають термічна утилізація цілих автошин у безперервному режимі з максимальним коефіцієнтом заповнення реактора, оскільки об'ємна геометрична структура автошин не дозволяє наповнювати реактор без повітряно-газових пустот, що різко знижує коефіцієнт заповнення реактора, а це, в свою чергу, зменшує продуктивність й енергетичний потенціал піролізних установок за умови збільшення енергетичних затрат. Ця проблема викликала необхідність створення більш досконалої технології й обладнання піролізу, яке б забезпечувало ущільнення автошин у реакторі за подальшої їхньої термічної деструкції. Виникла потреба в дослідженні процесів деформації каркасу автошин і реології їх гуми під час проходження процесу піролізу, що, в свою чергу, включає розробку й апробацію фізико-математичної моделі піролізного реактора, заповненого автошинами. Складність явищ, які супроводжують процес ущільнення в момент піролізу, стало причиною того, що до сьогодні не створено 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.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У роботі [1] розглядалося однорідне температурне поле в процесі проходження сировини в ізотермічних умовах, але для дослідження режимів ущільнення автошин у піролізному реакторі необхідно враховувати вплив температури стінок обладнання на проходження сировини.

Оскільки під дією температури матеріал автошини змінює фізичний стан від твердого до в'язкопластичного, то для вирішення проблеми плинності рідини, в'язкість якої залежить від температури, необхідним є фізико-математичний опис цього процесу [2]. Таким чином, моделюючи реальний процес ущільнення автошин у піролізному реакторі, слід вирішити задачу плинності в неізотермічних умовах [3].

Для аналізу фізичного стану термопластичної гуми з бортовими кільцями під дією температури як аналог, прийнято результати досліджень моделі плинності в'язкого середовища, що залежить від температури [4], і динамічного ущільнення сировини з розсіпчас-

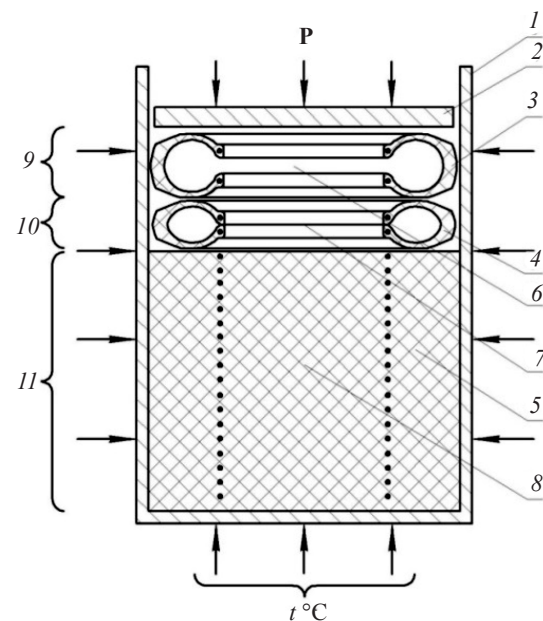
тою структурою [5], які найбільше придатні до аналізу процесу зміни фізичного стану термопластичної гуми за її ущільнення під час нагріву.

**МЕТОЮ СТАТТІ** є розробка фізичної моделі процесу деформування цілих зношених автошин за їх утилізації шляхом піролізу. Для вирішення проблеми забезпечення максимального заповнення піролізного реактора цілими відпрацьованими автошинами за подальшої їхньої термічної деструкції необхідно виконати низку завдань:

- побудову фізичної моделі реології гуми в піролізному реакторі;
- розробку математичної моделі динамічного ущільнення цілих автошин;
- проведення експериментальних досліджень цих моделей.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для опису процесів поширення тепла в середині протяжного реактора із зовнішнім нагрівом за умови заповнення його автошинами з наступним їх стисканням розглянемо реологічні характеристики цілих автошин (рис. 1) у трьох зонах реактора з різним фізичним станом термопластичної гуми автошини.



**Рис. 1.** Фізична модель піролізного реактора для дослідження реологічних властивостей цілих зношених автошин у процесі нагріву й стискання й вплив фізичного стану автошин на їх щільність за симетричного розташування

У фізичній моделі розглядається реактор піролізу 1 з зовнішнім обігрівом  $t^{\circ}\text{C}$  його днища і бокової поверхні й плитою 2, яка створює навантаження  $P$  на автошини в середині реактора. Вихідна автошина 3 з об'ємом повітря чи газу  $\delta$ , що попередньо підігріта до температури  $100\text{--}120^{\circ}\text{C}$  і стиснута навантаженням  $P$ , частково деформується 4 з частковим об'ємом повітря чи газу 7. Під дією температури  $250\text{--}350^{\circ}\text{C}$  утворюється ущільнена маса термопластичної гуми автошин 5 разом з бортовими кільцями й металокордом. У подальшому за температури  $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$  об'єм термопластичної гуми 8 витісняє об'єм повітря чи газу й заповнює вільну порожнину в середині бортових кілець. Аналізуючи фізичну модель, треба умовно розділити об'єм реактора на три зони: перша зона реактора 9 з вихідною автошиною, яка прогріта до температури  $100\text{--}120^{\circ}\text{C}$  й стиснута навантаженням  $P$ ; друга зона реактора 10 з деформованою автошиною за температури  $250\text{--}350^{\circ}\text{C}$ ; третя зона реактора 11 з ущільненою масою термопластичної гуми автошин з бортовими кільцями й металокордом за температури  $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 2 представлено отримані експериментальні характеристики динаміки фізичного стану автошин у кожній зоні реактора.

Умовно розділені зони відповідають температурним інтервалам: I зона —  $100\text{--}120^{\circ}\text{C}$ , II —  $200\text{--}350^{\circ}\text{C}$ , III —  $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$ . У першій зоні реактора розташовується вихідна автошина, яка попередньо нагріта утилізаційним теплом димових газів до температури  $100\text{--}120^{\circ}\text{C}$ , при цьому з об'єму автошини димовими газами видаляється повітря, яке може спричинити

загоряння або навіть вибух за безперервної подачі автошин у гарячий реактор, у якому містяться пари горючих вуглеводнів. Під дією температури  $t$  і навантаження  $P$  у першій зоні автошини стискаються за висотою на  $50\text{--}55\%$ , при цьому фізичні характеристики гуми змінюються незначно, а деформація автошини відбувається тільки за рахунок навантаження.

У другій зоні реактора розташовуються наступні шари автошин, які завдяки теплопередачі в реакторі нагріваються до температури  $200\text{--}350^{\circ}\text{C}$ , при цьому під впливом температури й сили навантаження  $P$  вони стискаються за висотою на  $70\text{--}75\%$ . У цій зоні гума є еластичною, що забезпечує збільшену деформацію автошини за рахунок навантаження  $P$ .

У третій зоні реактора шари автошин завдяки збільшеній теплопередачі в реакторі нагріваються до температури  $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$ . Їх гума під дією температури стає термопластичною, перетікає й заповнює всі порожнини як в реакторі, так і в середині бортових кілець [6]. Під впливом сили навантаження  $P$  автошини стискаються за висотою до  $90\text{--}93\%$ , при цьому висота матеріальної частини автошини зменшується до  $7\text{--}10\%$  щодо вихідної. У процесі утворення парогазової суміші (ПГС) легких вуглеводнів, формуються газові порожнини у всьому об'ємі гуми, заповнені легкими вуглеводами, загальний об'єм яких на вході в третю зону складає  $7\text{--}10\%$ . У кінці третьої зони гума повністю розкладається, формуючи твердий залишок — вуглець, при цьому під дією зовнішнього навантаження легкі вуглеводні витісняються з об'єму вуглецю.

Ефективна теплопровідність шару автошин у першій і другій зонах може бути прирівняна до теплопро-

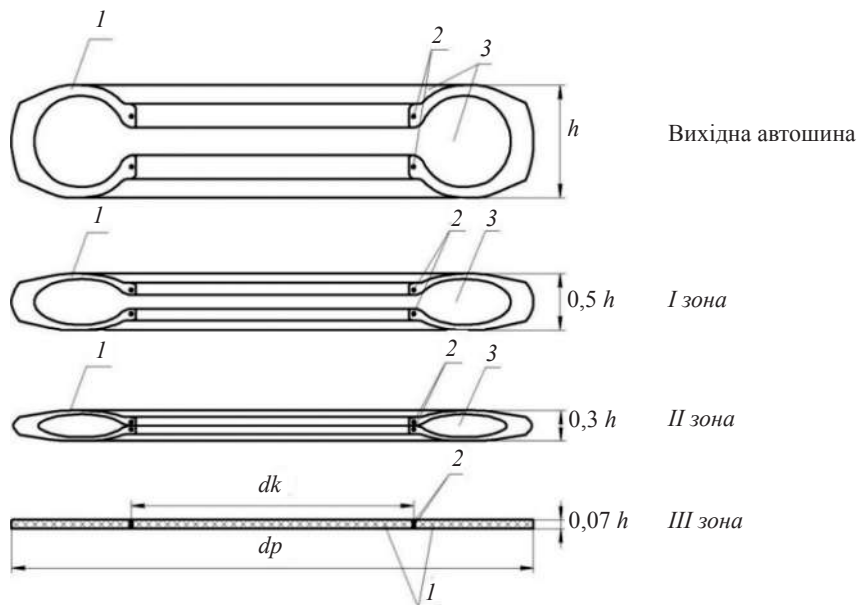


Рис. 2. Зміна форми й співвідношення компонентів автошин:

1 — гума автошини; 2 — бортові кільця; 3 — об'єм повітря й газів,  $dk$  — діаметр кільця,  $dp$  — діаметр реактора

відності комбінованого елемента першого типу з усередненими параметрами трьох компонентів — гума, димові гази, бортові металеві кільця. Перша й друга зони є перехідними, тому при розрахунках температурних полів за переносу тепла, розглядається тільки третя зона. У третій зоні вивчається теплопровідність комбінованого елемента другого типу з усередненими параметрами двох компонентів — термопластичної гуми і бортових металевих кілець. Оскільки в більшості сучасних автошин металокорд відсутній, а його функції виконують еластичні полімерні нитки, то в подальших розрахунках теплопровідності металокорд не враховується.

Оскільки перша й друга зони фізичного стану автошин у піролізному реакторі (рис. 1, 2) є перехідними, то для розробки математичної моделі вони беруться до уваги як граничні умови для третьої зони ущільнення. Для аналізу фізичного стану термопластичної гуми з бортовими кільцями в реакторі піролізу використано результати дослідження процесу динамічного ущільнення сумішей [4, 5]. Термопластична гума з розташованими в ній бортовими кільцями на початковому етапі третьої зони може бути подана як модель пружно-в'язкого тіла, деформація якого описується рівнянням:

$$P = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + n_{\Gamma} \frac{dx(t)}{dt} + n_c x(t), \quad (1)$$

де  $P$  — зовнішнє навантаження ( $P$ ) 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;  $n_{\Gamma} = f(P)$  і  $n_c = f(P)$  — коефіцієнти демпфірування (співвідношення коефіцієнта опору до подвоєної маси або подвоєного моменту інерції) й пружності відповідно у функції щільності термопластичної гуми;  $\rho$  — щільність термопластичної гуми.

Деформація стовпа термопластичної гуми в реакторі здійснюється за рахунок осевого стискання при цьому починається пластична течія гуми й заповнення нею всіх порожнин. Однак у робочому об'ємі гуми відбуваються процеси з виділенням парогазової суміші летких вуглеводнів, утворюються парогазові порожнини, які характеризують параметр пружності, властивий середовищу, яке стискається, цей процес виражається формулою:

$$\sigma = k [0,4 - \exp(-2p_0)] E(\rho), \quad (2)$$

де  $\sigma$  — пружність,  $E(\rho)$  — модуль пружності у функції щільності термопластичної гуми й бортових кілець за різних температур;  $p_0$  — тиск на термопластичну гуму в реакторі при зовнішньому навантаженні ( $P$ );  $k$  — поправочний коефіцієнт (визначається експериментально).

Під час аналізу прийнятої моделі припускається, що пружність, яка виникає в конструкції автошини в першій зоні ущільнення, характеризується динамікою зміни геометричної форми автошини при зовнішньому навантаженні до температури 100–120 °С, напруженість збільшується (рис. 3) і дорівнює сумі напружень, які зазнає пружна конструкція всієї маси автошин у реакторі. У другій зоні автошини за температури 200–350 °С втрачають пружність геометричної форми, а сама пружність визначається сумою напружень, які виникають в об'ємі гуми з наявністю порожнин, заповнених димовими газами, які залишилися в порожнині автошини за її нагріву гарячими димовими газами перед подачею її в піролізний реактор, при цьому напруження зменшується. Пружність у третій зоні має в основному сталий розвиток за температури більше 400–600 °С, коли гума в конструкції автошини вже втратила пружні властивості геометричної форми автошини й порожнини заповнені димовими газами. Гума автошини перейшла у в'язко-пластичний

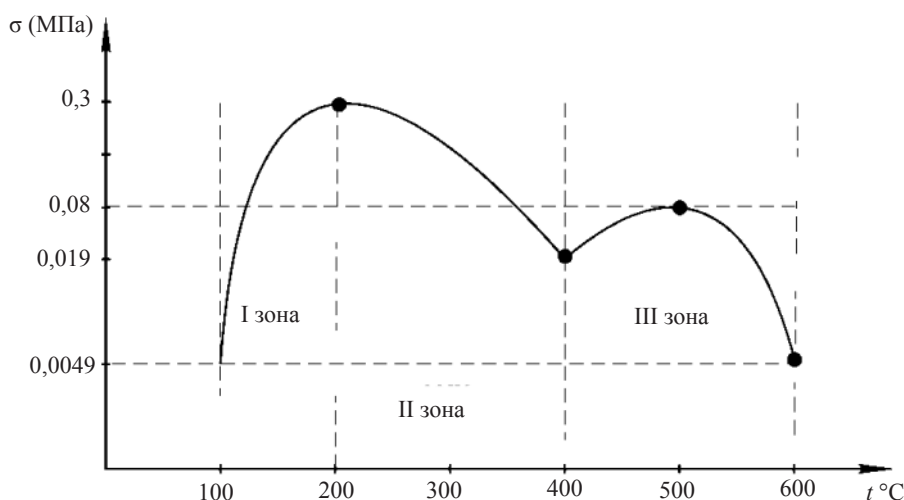


Рис. 3. Характеристика зміни пружності в масиві автошин у різних зонах піролізного реактора



стан [6], в об'ємі якої за піролізу проходить інтенсивне термічне розкладання з виділенням ПГС, яка утворює локальні газові порожнини в її об'ємі. На цьому етапі пружність визначається як сума напружень, утворених силою стискування за ущільнення суміші термопластичної гуми, в об'ємі якої виникли пружні порожнини з ПГС. Слід відзначити, 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 знижується кількість газових порожнин в об'ємі гуми.

Кожна із зон (рис. 2, 3) умовно характеризується достатньо великим діапазоном температур, величина якого визначається труднощами в оцінці чіткої границі зміни фізичного стану маси автошин у піролізному реакторі за фіксованої температури.

Величина розбіжності поправочного коефіцієнта (формула 2) залежить від діапазону температур у відповідних зонах реактора й встановлено експериментально в умовах тиску від 0,05 до 3,5 кг/см<sup>2</sup> (табл. 1).

Для розрахунків величина коефіцієнта  $k$  у середньому приймається 1,8–2,4. Таким чином, сила, яка діє на елементарний об'єм  $V$  гуми з газовою порожниною, дорівнює інтегралу тензора напруженості на границі цього об'єму по його поверхні  $S$  (за відсутності об'ємних сил):

$$F_i = \phi_S d\sigma_{ij} S_j,$$

де компоненти тензора напруженості  $\sigma_{ij}$  рівні відношенню компоненти сили  $\Delta F_p$ , яка діє на елементарну площадку  $\Delta S$  до її площі  $\sigma_{ij} = \Delta F_i / \Delta S_j$ . Проведення моделювання процесу динамічного ущільнення потребує спільного розгляду математичних моделей рухомого поршня, який утворює ефект стискування й процесу ущільнення суміші термопластичної гуми й бортових кілець. Схема процесу динамічного стискування автошин у піролізному реакторі під час взаємодії навантаження ( $P$ ) й високої температури (400–600 °C) подана на рис. 4.

Ураховуючи динаміку рухомого поршня, модель стискування сировини записується системою диференціальних рівнянь [4, 5]:

$$\begin{aligned} (p_1 F_1 - p_2 F_2) + (m_1 + m_2)g = \\ = m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + n_r \frac{dx_1}{dt} n_c (x_1 - S_T), \end{aligned} \quad (3)$$

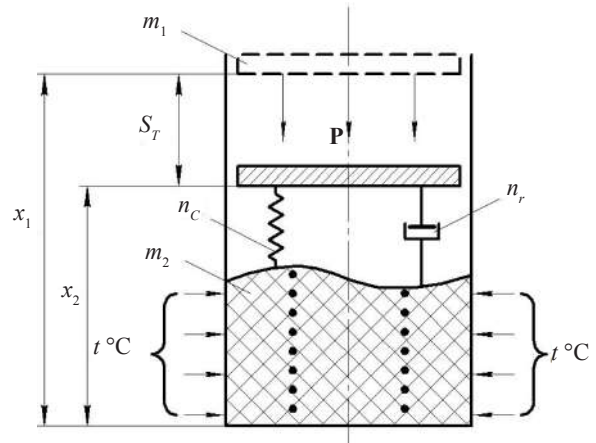


Рис. 4. Схема процесу динамічного стискування автошин у піролізному реакторі за симетричної схеми розташування автошин відносно корпусу реактора

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{K}{S_T - x_1} \left( p_2 \frac{dx_1}{dt} - \frac{G_2 R T_2}{F_2} \right), \quad (4)$$

де  $p_1$  і  $p_2$  — абсолютний тиск у третій активній зоні реактора й зворотний за рахунок пружності термопластичної гуми в пасивній камері, утвореної в процесі відходу поршня в момент завантаження нової автошини в реактор;  $F_1$  і  $F_2$  — площа відповідно робочої зони поршня й 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 у третій зоні реактора;  $x_1$  — координата верхнього положення поршня;  $x_2$  — координата положення верхнього шару ущільнених автошин;  $S_T$  — робочий шлях поршня за стискування автошин;  $k$  — показник адиабати — це відношення теплоємності за сталого тиску ( $C_p$ ) до теплоємності за сталого об'єму ( $C_v$ ),  $G_2$  — інтенсивність видалення парогазової суміші;  $R$  — газова постійна гарячих летких вуглеводнів у складі парогазової суміші, розміщеної в об'ємі термопластичної гуми;  $T_2$  — температура летких вуглеводнів у складі парогазової суміші.

Для спрощення розрахунків приймаються припущення:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} \rightarrow n_r \rightarrow n_c. \quad (5)$$

Таблиця 1. Поправочний коефіцієнт розбіжності пружності деформації стовпа цілих шин у реакторі

Зони в реакторі	Межа температур у відповідній зоні, $t$ °C	Тиск, $P_0$ кг/см <sup>2</sup>	Поправочний коефіцієнт, $k$
I зона	100	3,5	1,82
	120	0,05	2,21
II зона	200	3,5	1,93
	350	0,05	2,32
III зона	400	3,5	1,80
	600	0,05	2,40

Для використання математичної моделі стискання термопластичної гуми автошин разом з бортовими кільцями необхідно знайти коефіцієнти, які характеризують її реологічні (текучі) властивості у вигляді  $n_T = f(P)$  і  $n_C = f(P)$ . Величини цих коефіцієнтів, які зумовлюють в'язкість і пружність суміші термопластичної гуми, насиченої пухирями ПГС, визначаються на основі експериментальних даних:

$$n_C(p) = 0,42S_p \cdot \rho \cdot V(\rho); \quad (6)$$

$$n_T(p) = 1,4 \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} E(\rho)(1 - \mu^2), \quad (7)$$

де  $c = f(P)$  — швидкість поширення ультразвукової хвилі в об'ємі ( $V$ ) термопластичної гуми у 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 у функції щільності термопластичної гуми й бортових кілець.

Дослідження математичної моделі процесу динамічного ущільнення термопластичної гуми разом з бортовими кільцями проведено з використанням методів статистичної обробки даних. Адекватність запропонованої математичної моделі перевірено методом порівняння розрахункових й експериментальних даних. Розбіжність результатів вкладається в межі похибки (до 10%) з прийнятим ступенем вірогідності. Результати розрахункових й експериментальних досліджень зображено на графіках (рис. 5, 6).

Презентовані залежності отримано за різних початкових температур автошин, які завантажуються в реактор, попередній прогрів автошин до температури 125 °С забезпечується шляхом утилізації тепла вихідних димових газів, після обігріву ними реактора піролізу, що виключає втрати тепла в гарячому реакторі.

Із кривих на рис. 4, 5 можна стверджувати, що попередній нагрів автошин до температури 125 °С дозволяє різко зменшити ефект стискання за відпо-

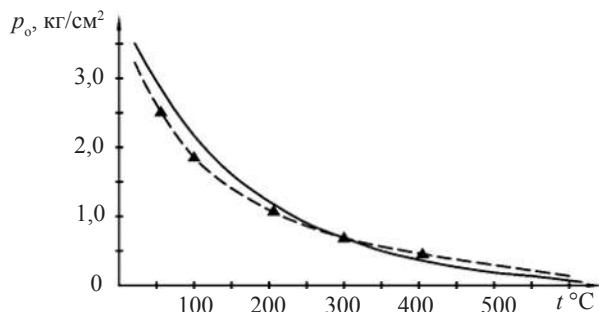


Рис. 5. Графік залежності зміни навантаження  $p_0$  на стовп автошин у піролізному реакторі за різних температур нагріву (початкова температура автошини 25 °С дорівнює температурі навколишнього середовища):

— — розрахункова крива, —▲— експериментальна крива

відного зниження величини навантаження. У допустимих границях стискання, величину навантаження вважаємо постійною, наприклад, для даного випадку величину  $p_0$  можна прийняти в границях 0,18–0,2 кг/см<sup>2</sup>, при цьому час піролізу автошин скорочується на 25–35%.

Для підтвердження теоретичних розрахунків проведено експеримент зміни щільності маси автошин у вертикальному піролізному реакторі, за безперервного його завантаження цілими автошинами й постійного стискання [7]. Розглянемо три етапи, які характеризують різний стан автошин, їх щільність за висотою реактора (рис. 7), що призводить до зміни теплопровідності в середині реактора залежно від його висоти в процесі піролізу.

Діаграма характеризує зміну структури автошин, які подаються в реактор за безперервної роботи в стаціонарному тепловому режимі. За об'єму вихідної автошини  $R = 13$ , або  $R = 14$  і розподілу характерного співвідношення вихідних компонентів маємо такі показники: гума — 17%; метал бортових кілець — 3%; повітря — 80%, загальна вага автошин — 6–8 кг.

*I* зона характеризується впливом температури 10–120 °С й стисканням із 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 з рис. 6, перерозподіл об'ємів металу і гуми незначно змінюється, їх відносний об'єм збільшується, а повітря зменшується.

*II* зона визначається впливом температури до 200–350 °С за постійного зусилля стискання всього набору автошин у 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 перерозподіл компонентів в одиниці об'єму: 35–40% (П); 10,5–13% (М); 35–47% (Г).

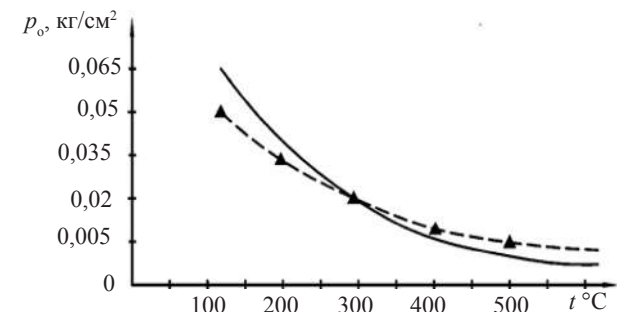


Рис. 6. Графік залежності зміни навантаження  $p_0$  на стовп автошин у піролізному реакторі за різних температур нагріву (початкова температура автошини, перед її завантаженням у реактор — 125 °С):

— — розрахункова крива, —▲— експериментальна крива

III зона характеризується впливом температури до 400–600 °С, гума є термопластичною, а за стискання із зусиллям 0,2 кг/см<sup>2</sup> перетікає, займаючи вільний об'єм у реакторі й усередині бортових кілець, при цьому повністю видаляється вихідний об'єм повітря чи димовому газу. За постійного зусилля стискання всього набору автошин у реакторі вони проштовхуються на 60% довжини реактора протягом  $\tau = 3,8$  години. Висота профілю автошини, наприклад R14, зменшується з 163 мм до 16–25 мм, а її компоненти в одиниці об'єму перерозподіляються таким 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 підвищується, починаючи з температури 300 °С (рис. 8). Виходячи з того, що процент металу з високою теплопровідністю щодо гуми збільшується, то за несиметричної системи розміщення автошин у реакторі це суттєво впливає на загальну теплопровідність у середині реактора. У третій зоні вона різко зростає за рахунок безпосереднього теплового контакту бортових кілець, які розташовані несиметрично на всій площі перетину реактора. У кінці третьої зони процес піролізу входить у стаціонарний режим, якщо прийняти твердий залишок за 100%, то при цьому вуглець (пірокарбон) буде складати — 75%, а металеві бортові кільця — 25%, залишок вуглеводнів у пірокарбоні не перевищує 2–3%, тому він не враховується під час моделювання процесу.

**ВИСНОВКИ.** 1. Розроблено фізичну модель піролізного реактора для дослідження реологічних властивостей цілих зношених автошин у процесі нагріву й стискання, що в перспективі дозволить удосконалити технологію термічної утилізації цілих автошин і збільшити заповнення реактора безперервної дії до 98%, при цьому з'являється нагода суттєво підвищити продуктивність установки безперервної дії за утилізації цілих автошин порівняно з установками циклічної дії з реакторами у вигляді реторт, у які завантажуються шматки автошин. 2. Створено математичну модель процесу динамічного стискання автошин у піролізному реакторі, що дає можливість використовувати її в практичних цілях для проектування піролізних установок. 3. Результати розрахунків й експериментальні дослідження підтвердили можливість зменшення величини стискання за попереднього нагріву автошин до температури 125 °С за утилізації тепла димових газів з температурою до 250–300 °С, які виходять після обігріву піролізного реактора. 4. Експериментально доведено, що величину стискання можна вважати постійною, наприклад, для даного випадку величину  $p_0$  приймаємо в межах 0,18–0,2 кг/см<sup>2</sup>, при цьому час піролізу автошин

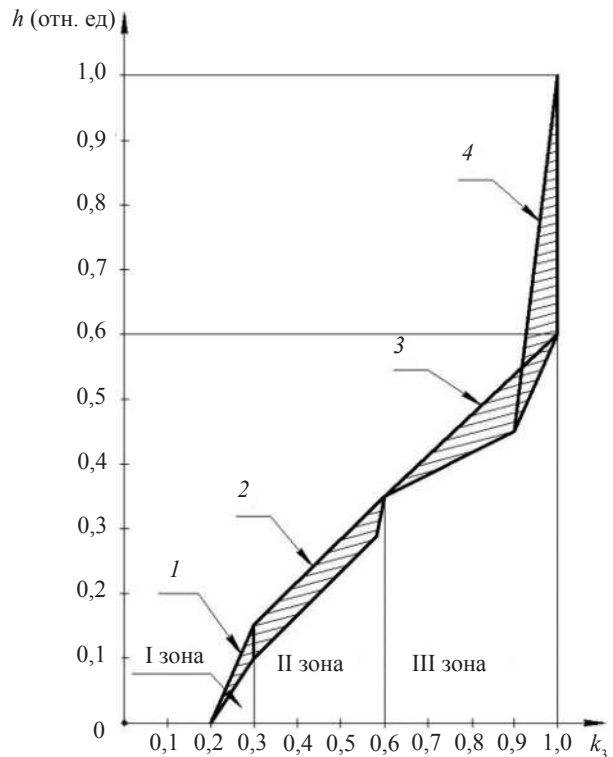


Рис. 7. Діаграма зміни коефіцієнта заповнення реактора цілими автошинами за висотою реактора в процесі їх піролізу з одночасним стисканням:

1 — ділянка зони впливу температури 100–120 °С 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 °С; 3 — ділянка зони впливу навантаження на шини з температурою 400–600 °С; 4 — ділянка зони впливу пористості гуми шляхом утворення порожнин, заповнених ПГС гуми

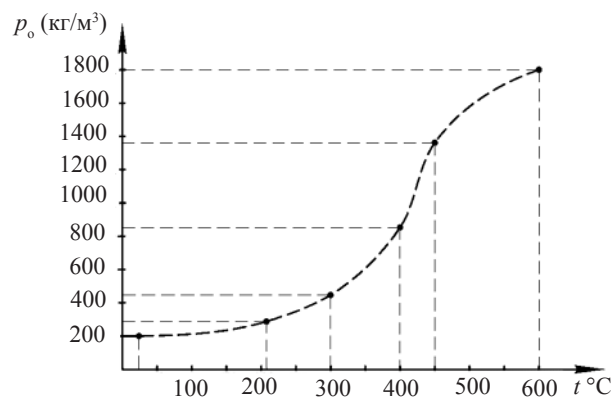


Рис. 8. Крива зміни щільності маси цілих автошин у циліндричному піролізному реакторі під впливом температури й постійного зовнішнього навантаження 0,2 кг/см<sup>2</sup>

зменшується на 25–50% порівняно з відомими технологіями піролізу автошин у ретортних реакторах, що працюють у циклічному режимі. 5. Проведені дослідження показали можливі напрямки підвищення продуктивності піролізних установок безперервної дії за термічної утилізації цілих автошин, що суттєво зменшить експлуатаційні витрати.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Золотенко Б. Н.** Конечно-разностный метод исследования процесса заполнения прямоугольной пресс-формы, путем визуализации потока расплава [Текст] / Б. Н. Золотенко, Н. Е. Скибка, О. Н. Сынюк // Вісник Київського державного університету технологій та дизайну. — 2000. — № 2. — С. 48–43.
- [2] **Сынюк О. М.** Моделивання плин у рідині з в'язкістю, що залежить від температури [Текст] / О. М. Сынюк. — Хмельницький : ТУП, 2002. — № 1. — Часть 1. — 216 с.
- [3] **Басов Н. И.** Литьевоє формование полимеров [Текст] / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков. — М. : Химия, 1984. — 248 с.
- [4] **Вальтер А. И.** Структурное моделирование производственного процесса литья в песчаные формы [Текст] / А. И. Вальтер, А. В. Ларин, М. А. Макаров // Известия ТулГУ, серия Металлургия, Экология, Физика. — Вып. 2. — 2002. — С. 216–219.
- [5] **Вальтер А. И.** Экспериментальные исследования свойств песчано-глинистых смесей [Текст] / А. И. Вальтер, А. В. Ларин, М. А. Макаров // Научные основы решения проблем сельхоз. машиностроения. — Тула : ТулГУ, 2003. — С. 149–155.
- [6] **Мамаев Ш.** Влияние характера динамического нагружения на формирование пластической зоны и волны разгрузки в стержне конечной длины [Текст] / Ш. Мамаев, Т. Д. Каримбаев // Вестник КГТУ. — 2012. — № 4. — С. 7–14.
- [7] Патент України на корисну модель № 98287, кл. F23G5/027, C08J11/04/. Універсальна автоматизована установка безперервного піролізу цілих зношених автомобільних шин // Опубл. Бюл № 8, 27.04 2015/ Авт. Л. М. Маркіна, С. С. Рижков, М. В. Рудюк, М. С. Крива.

---

© Л. М. Маркіна

Надійшла до редколегії 26.05.17  
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. С. С. Рижков