

УДК 658.567.1

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ АВТОМАТИЧНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ВІДХОДІВ У РЕАКТОР

Маркіна Л.М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, 54025, м. Миколаїв

markserg@ukr.net

ORCID: 0000-0003-3632-1685

У статті запропоновано технологію створення ущільненої технологічної пробки в процесі безперервної подачі відходів для забезпечення герметичності реактора під час утилізації подрібнених термопластичних полімерів за технологією багатоконтурного циркуляційного піролізу. Метою цього процесу є забезпечення герметичності реактора й виключення виходу газів у навколишнє середовище. Запропоновано математичну модель, яка описує процес динамічного стискання з формуванням ущільненої технологічної пробки в конусній насадці в процесі забезпечення необхідної герметичності піролізного реактора. Адекватність розробленої математичної моделі перевірялась методом порівняння розрахункових та експериментальних даних. Розбіжність результатів укладається в рамки похибки з прийнятним ступенем вірогідності. Результатами роботи є отримані графіки зміни напружень у шарах середовища, яке стискається, й величини його переміщення, залежно від тривалості процесу динамічного стискання, що забезпечують надійне завантаження реактора з використанням плунжерної системи. *Ключові слова:* фізична модель, система завантаження, піролізний реактор, плунжерна система, розплавлені полімери, пірокарбон, динамічне ущільнення.

Математическое моделирование процессов автоматической загрузки отходов в реактор. Маркина Л.М. В статье предложена технология создания уплотненной технологической пробки в процессе непрерывной подачи отходов для обеспечения герметичности реактора при утилизации измельченных термопластичных полимеров по технологии многоконтурного циркуляционного пиролиза. Целью данного процесса является обеспечение герметичности реактора и исключения выхода газов в окружающую среду. Предложена математическая модель, описывающая процесс динамического сжатия с формированием уплотненной технологической пробки в конусной насадке при обеспечении необходимой герметичности пиролизного реактора. Адекватность разработанной математической модели проверялась путем сравнения расчетных и экспериментальных данных. Расхождение результатов укладывается в рамки погрешности, с приемлемой степени достоверности. Результатами работы являются полученные графики изменения напряжений в слоях среды, сжимается и величина его перемещения, в зависимости от продолжительности процесса динамического сжатия, обеспечивающие надежную загрузку реактора с использованием плунжерной системы. *Ключевые слова:* физическая модель, система загрузки, пиролизный реактор, плунжерная система, расплавленные полимеры, пирокарбон, динамическое сжатие.

Mathematical modeling of processes of automatic downloading of waste in reactor. Markina L. In the article the technology of creating a sealed technological plug in the process of continuous supply of waste is proposed to ensure the reactor tightness when recycling crushed thermoplastic polymers using the technology of multi-circular pyrolysis. The purpose of this process is to ensure the reactor's tightness and to eliminate the release of gases into the environment. A mathematical model describing the process of dynamic compression with the formation of a sealed technological plug in a conical nozzle with the provision of the necessary sealing of the pyrolysis reactor is proposed. The adequacy of the developed mathematical model was verified by comparing the calculated and experimental data. The difference in the results is within the scope of error, with an acceptable degree of probability. The results of the work are obtained graphs of changes in the stresses in the layers of the medium, which is compressed and the value of its displacement, depending on the duration of the dynamic compression process, which ensure a reliable loading of the reactor using the plunger system. *Key words:* a physical model, a system of download, plunger system, molten polymers, pirokarbon, dynamic compression.

Постановка проблеми. Проектування піролізних установок, які б дали змогу забезпечувати оптимальні режими піролізу відходів при максимальній продуктивності, потребують розробки фізико-математичних моделей процесів автоматичного завантаження відходів. Складність явищ, які відбуваються в процесі ущільнення сировини в системі подачі її в піролізний реактор, стала причиною того, що до теперішнього часу не розроблено фізичну модель системи завантаження сировини в реактор при зміні її стану по довжині піролізного реактора.

Актуальність дослідження. Тому необхідно розробляти й досліджувати математичні моделі, які можна використовувати при розрахунках параметрів завантаження сировини в реактор з використанням плунжерних систем для оптимального проектування конструкцій піролізних технологій і вдосконалення процесу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Особливість безперервного завантаження реактора сировиною

та розвантаження пірокарбону з реактора полягає в необхідності забезпечення герметичності реактора для запобігання виходу через отвори високо токсичних компонентів парогазової суміші (ПГС). Для забезпечення герметичності реактора в процесі безперервної подачі сировини, наприклад, подрібнених термопластичних полімерів, у тому числі й автошин і розвантаження пірокарбону, який утворюється на виході з реактора при піролізу органічних відходів, запропоновано в процесі просування даних матеріалів створювати з них ущільнену технологічну пробку, яка б герметично закривала реактор і виключала вихід газів у навколишнє середовище [1]. Переробка полімерних матеріалів під тиском полягає в розм'якшенні сировини під дією зовнішнього нагріву реактора до в'язкотекучого стану [2]. Розплавлені полімери при охолодженні твердіють, що стає проблемою при наступних запусках піролізного реактора. Усе це висуває жорсткі вимоги не тільки до технологічної пробки, а й до конструкції пристрою, який сприяє утворенню цієї пробки. Тому перед тим, як розробляти математичну модель, необхідно вирішити інженерне завдання щодо створення працездатної конструкції плунжерної системи, яка б забезпечувала, по-перше, просування сировини при її оптимальному ущільненні, по-друге, створення перепону не тільки для газу, а й для гарячого розплаву, по-третє, можливість повторного запуску реактора, коли розплав полімеру в ньому став холодним і твердим [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При проведенні огляду публікацій і літературних джерел у цьому напрямі, як вітчизняних учених, так і закордонних науковців, подібних результатів не виявлено. Нижче наведений аналіз статей, що стосується утилізації полімерних відходів і методів їх здійснення.

У роботі [4] розглянута проблема поводження з твердими побутовими відходами в штаті Хартум (Судан). Авторами запропоновано вирішення питання утилізації з використанням SMUDA PROCESS – безперервного процесу піролізу пластмасових відходів. Проведені дослідження показали переваги проведення процесу в присутності каталізатору, оскільки збільшується об'єм отриманого палива.

Стаття [5] присвячена аналізу ефективної утилізації пластмаси за допомогою термолізу та концептуального процесу каталітичної деградації. Каталітичний піроліз дає змогу пластмасовим відходам бути перетвореним у рідину, газ і твердий залишок з майже 100% ефективністю. На підставі примітивного попереднього аналізу масла придатні для використання в якості мазуту для різних енергій і цілей.

У дослідженні [6] показано вплив наявності каталізаторів при піролізній переробці відходів пластмас у паливо. Продемонстровано, що каталізатор CaCO_3 має найбільший вихід з умістом рідкої домішки

90%, а каталізатор MgCO_3 має найбільший вихід – 5,2% кінцевих продуктів твердого залишку та газу. Отримані рідкі продукти можуть використовуватися в промислових котлах, пальниках, генераторів енергії, автомобілях і як реактивне паливо.

У роботі [7] представлені результати експериментального дослідження теплоізоляційної установки для згорання відходів пластику. Дослідження проводилося в промисловому масштабі на заводі, що виробляє пластикову стрічку. Унаслідок характеру відходів, особливу увагу було приділено аналізу викидів оксид вуглецю та летючим органічним сполукам.

У праці [8] розкрито переваги використання піролізних технологій як найбільш ефективних порівняно з іншими методами утилізації, оскільки він може повторно використовувати енергію та сировину відходів, тим самим зменшуючи екологічні наслідки, зумовлені неадекватною утилізацією пластикових відходів. Для інтенсифікації процесу запропоновано використання каталізаторів, таких як цеоліти, що впливають на отримані кінцеві продукти.

Авторами в джерелі [9] проведено експериментальні дослідження та здійснена реалізація простого процесу піролізу для перетворення твердих полімерних відходів у піролізне масло. З використанням методики оптимізації визначено вибір температури (350–400)°C, тиску й типу відходів, щоб максимально збільшити пропускну спроможність потрібної продукції.

Наукова стаття [10] присвячена визначенню впливу мікрохвильового опромінення як однієї з найбільш ефективної технології для нагрівання піролізного реактору для утилізації суміші різних видів пластмас. Оптимальні умови піролізу призвели до виробництва продукту, які були проаналізовані за допомогою різних методик. Доведено, що отриманий конденсат можна застосувати в якості транспортного палива.

Дослідження [11] розглядає низькотемпературний піроліз побутових пластикових відходів для отримання альтернативного палива. Отримані зразки показали варіації їх складів і властивостей палива залежно від температури піролізу. Збільшення температури підвищує вихід рідкого продукту, але виробляє важче масло з довгими вуглеводневими ланцюгами ($> \text{C}_{20}$). З іншого боку, отримані рідкі продукти при більш низькій температурі (350°C) мають чудові властивості палива, такі як висока теплотворна здатність і низька в'язкість, температура застигання та температура спалаху.

Метою роботи є розробка й дослідження універсальної математичної моделі, яка характеризує процес формування ущільненої технологічної пробки в піролізному реакторі та яка б могла використовуватися при розрахунках технологічних параметрів динамічного завантаження плунжерною системою сировини в реактор для проектування обладнання піролізних установок, у тому числі й піролізного реактора безперервної дії.

Виклад основного матеріалу. На першому етапі розгляду фізичної моделі було вирішено завдання максимального ущільнення сировини за допомогою конусної насадки, в яку сировина подавалася з боку більшої основи зрізаного конусу насадки. Але, як показали експерименти, досягнути необхідного ущільнення сировини, яке б забезпечувало необхідну герметизацію реактора, при заданій площі

більшої основи зрізаного конусу й заданому тиску, який утворює гідроциліндр, неможливо, піролізний газ проривався в навколишнє середовище через загрузочний отвір, крім того, ця конструкція не забезпечувала просування сировини після охолодження, коли полімер становиться твердим монолітом. Ураховуючи всі виявлені недоліки фізичної моделі створеної на першому етапі [3], була розроблена нова фізична модель плунжерної системи подачі сировини (рис. 1).

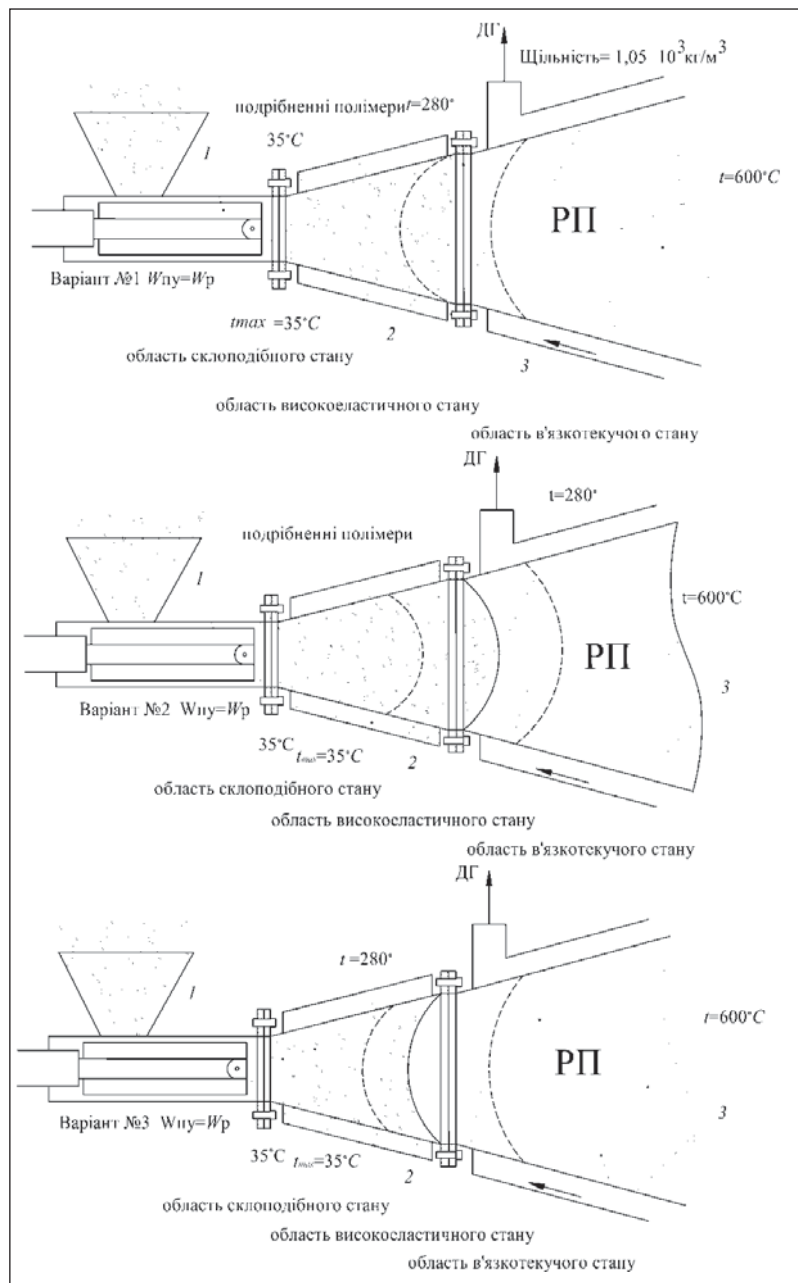


Рис. 1. Три варіанти фізичної моделі системи завантаження сировини в реактор при зміні її стану по довжині піролізного реактора, при різних співвідношеннях продуктивності плунжерної системи $W_{пн}$ і піролізного реактора W_p : 1 – плунжерна система подачі подрібнених полімерів; 2 – конусна насадка з водяним охолодженням; 3 – конусний реактор з розплавленими полімерами, який обігрівается димовими газами; 4 – $W_{пн}$ – продуктивність плунжерної системи по сировині; 5 – W_p – продуктивність реактора, яка характеризує об'єм ПГС, що утворюється в реакторі при термічному розкладанні рідких полімерів

З урахуванням того, що система подачі сировини в реактор більш складна і проблематична порівняно із системою розвантаження з реактора твердого залишку, в подальшому будемо розглядати особливості фізико-математичної моделі тільки системи завантаження, яка без проблем може бути застосована й для системи розвантаження.

При розробці фізико-математичної моделі системи завантаження прийняті такі граничні умови: фракційний склад сировини – подрібнені полімери розміром 5x2x10мм, гума 5x10x5мм, при співвідношенні їх 5:1; середня теплопровідність сировини, яка подається в реактор, прийнята 0,082Вт/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 0,35Вт/мК; температура сировини на вході конусної насадки – 35°C; температура розплавленого полімеру в реакторі і твердого залишку, який видаляється із реактора, – (400 – 600°C; температура на границі кристалізації полімеру – 280°C; передбачається, що подрібнені полімери й автошини можуть бути представлені як модель пружно-в'язкого тіла.

Розглянемо можливі варіанти зміни фізичної моделі системи завантаження сировини в реактор в ланцюгу: плунжерна подача сировини, конусна насадка й реактор (рис. 1).

У першому варіанті взаємне розташування різних фаз сировини, яка створює пробку в конусній насадці, при умові, що продуктивність плунжерної системи $W_{пн}$ дорівнює продуктивності піролізного реактора W_p . У другому – стан полімерної пробки в конусній насадці при умові, що продуктивність плунжерної системи $W_{пн}$ перевищує продуктивність піролізного реактора W_p . У третьому – стан

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{k}{S_a - x_1} \left(p_2 \frac{dx_1}{dt} - \frac{QRt}{F_2} \right), \quad (3)$$

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 й 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 адиабати, Q – інтенсивність виходу повітря або піролізного газу з 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, що стискається в активній камері.

Наявність повітря або піролізного газу в об'ємі сировини, яка стискається в активній камері, підпорядковується адиабатичному процесу, що математично описується ступеневою функцією $pV^\gamma = \text{const}$, де γ є показником адиабати (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) (рис. 2) допускаємо, що теплофізичні характеристики розплаву і твердого полімеру однакові. Позначимо скриту теплоту плавлення через λ , 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) указує, що відповідна величина належить до твердої фази, а індекс (m) – до рідкої фази. Друга гранична умова стосується поглинання скритої теплоти на поверхні розділу (А). Припустимо, що в ділянці $x > x_{(t)}$ знаходиться рідина при температурі $T_{m(x,t)}$, а в ділянці $x = x_{(t)}$ 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 ділянка $x > 0$ зайнята твердими подрібненими полімерами з постійною температурою T_{s0} , то при $t > 0$ площина (А), $x = 0$ підтримується при постійній температурі $T_2 > T_n$, у цьому випадку положення площини (А) визначається виразом: $X = 2\theta(\alpha_m t)^{1/2}$, де: θ – корінь рівняння:

$$\frac{\exp(-\theta^2)}{\Phi(\theta)} = \frac{k_s \alpha_m^{1/2} T_1 \exp(-\frac{\theta^2 \alpha_m}{\alpha_s})}{k_s \alpha_m^2 (T_2 - T_1) \cdot \Phi^*(\theta \sqrt{\alpha_m / \alpha_s})} + \frac{\theta \lambda \pi^{1/2}}{C_m (T_2 - T_1)}, \quad (5)$$

$$T_2' = T_2 - T_{s0}; \quad T_1 = T_n - T_{s0}$$

При цьому розподіл температур у рідкій і твердій фазах описується виразами, відповідно:

$$T_s = T_{s0} - \frac{T_1}{\Phi^*(\theta \sqrt{\alpha_m / \alpha_s})} \cdot \Phi^*\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right). \quad (6)$$

На рис. 3 представлений розрахунковий розподіл градієнтів температури в об'ємі конусної насадки з твердою фазою подрібненої сировини (полімерів і гуми), яка характеризується температурою T_s , та рідкій фазі розплаву полімерів з температурою T_m з боку піролізного реактора з чіткою границею між ними. Максимальна температура T_m близько 636°C знаходиться в площині більшої основи зрізаного конусу насадки.

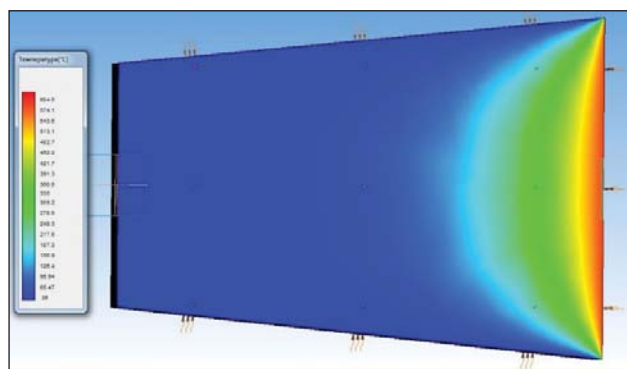


Рис. 3. Розподіл градієнтів температури в конусній насадці заповненою твердою фазою подрібненої сировини (полімерів і гуми з максимальною температурою біля 636°C у площині більшої основи зрізаного конусу насадки)

Із рис. 3 видно, що полімери, які знаходяться в конусній насадці, що охолоджується водою, з боку більшої основи нагріваються від гарячого піролізного реактора й, відповідно, розплавляються. У цьому 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 ділянка $x < 0$ являє собою рідину, а ділянка $x > 0$ – тверді подрібнені полімери, в цьому випадку поверхня розділу збігається з початком координат.

Значення розплаву, який тільки що затвердів, відрізняється від значень термічних коефіцієнтів твердої фази подрібнених полімерів у ділянці $x < 0$, присвоїмо термічним коефіцієнтам цієї ділянки індекс (s_0 і m_0). Позначимо температуру першопочаткового розплаву – T_2 . Координата поверхні (А) розділу фаз визначається співвідношенням: $X = 2\theta(\alpha_s t)$, де θ – корінь рівняння;

$$\frac{k_{s0} \alpha_{s0}^{1/2} e^{-\theta}}{k_s \alpha_{s0}^{1/2} + k_{s0} \alpha_s^{1/2} \Phi(\theta)} - \frac{k_{s0} \alpha_s^{1/2} (T - T_n) \exp(-\frac{\alpha_s \theta^2}{\alpha_m})}{k_s \alpha_m^{1/2} T_n \Phi^*(\theta \sqrt{\alpha_s / \alpha_m})} = \frac{\theta \lambda \pi^{1/2}}{C_s T_n}. \quad (7)$$

Після визначення θ , яке може бути виконано будь-яким числовим методом (наприклад, методом ітерації), можна визначити температурні поля в усіх трьох ділянках (початкова тверда фаза подрібнених полімерів, розплав і розплав, який затвердіє при охолодженні):

$$T = \frac{k_s \alpha_{s0}^{1/2} T_n}{k_s \alpha_{s0}^{1/2} + k_{s0} \alpha_s^{1/2} \Phi(\theta)} \left(1 + \Phi \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}} \right] \right). \quad (8)$$

На рис. 4 представлений розрахунковий розподіл градієнтів температури при охолодженні піролізного реактора й конусної насадки з твердою фазою подрібненої сировини (полімерів і гуми), яка характеризується температурою T_{s_0} , і твердої рідики фази розплаву полімерів з температурою T_{m_0} з боку піролізного реактора з чіткою границею між ними. Максимальна температура T_{m_0} близько 400°C знаходиться в площині більшої основи зрізаного конусу насадки.

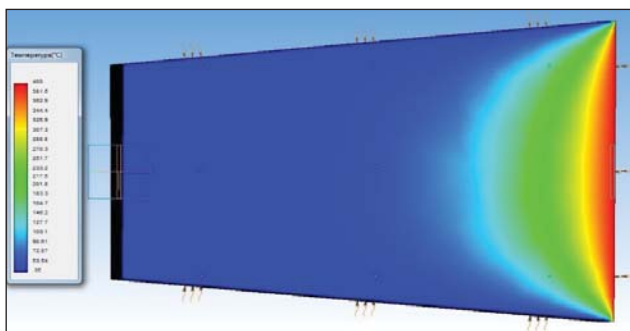


Рис. 4. Розподіл градієнтів температури при охолодженні піролізного реактора й конусної насадки з твердою фазою подрібненої сировини (полімерів та гуми) з максимальною температурою T_{m_0} близько 400°C у площині більшої основи зрізаного конусу насадки

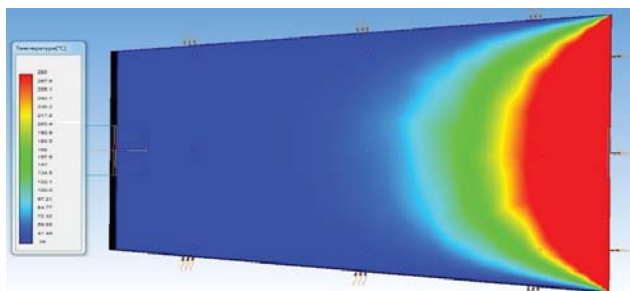


Рис. 5. Розподіл градієнтів температури при наступному охолодженні піролізного реактора й конусної насадки з максимальною температурою T_m близько 280°C у площині більшої основи зрізаного конусу насадки

На рис. 4, 5 представлений розрахунковий розподіл градієнтів температури при наступному охолодженні піролізного реактора й конусної насадки з максимальною температурою T_m близько 400 і 280°C у площині більшої основи зрізаного конусу насадки. Як видно з рис. 4, 5 полімери, які знаходяться біля стінок насадки, практично не розплавившись, 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.

При дослідженні процесів ущільнення подрібнених полімерів у конусній насадці припускаємо, що процес нагріву сировини має адіабатичний характер, при якому відсутній теплообмін з навколишнім середовищем, у зв'язку з цим на представленій схемі (рис. 2) границя (А) представлена як пряма лінія. Для спрощення розрахунків візьмемо такі припущення [12]:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_2}{dt} \rightarrow n_T \rightarrow n_C. \quad (9)$$

У поданій системі рівнянь (3) перше описує рух поршня плунжерної системи і процес ущільнення середовища в активній і пасивній камерах, а друге є моделлю видалення з активної камери залишків повітря при стисканні подрібнених полімерів при завантаженні або видалення піролізного газу при стисканні пірокарбону в системі розвантаження твердого залишку. З урахуванням загального характеру розвитку напружень і деформацій у сировині подрібнених полімерів і гуми як інерційного пружно в'язко пластичного середовища при динамічному стисканні й основні залежності цих величин для класичних реологічних тіл, деформаційна модель сировини представлена на рис. 6.

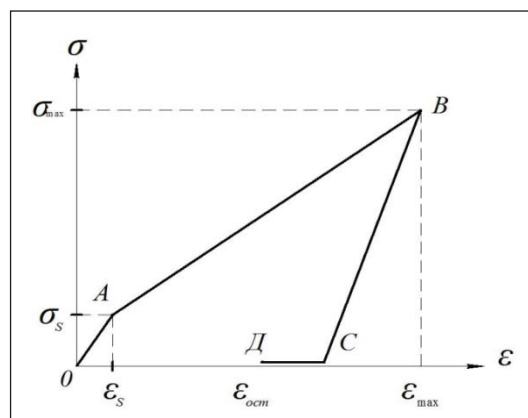


Рис. 6. Розрахункова схема пружно в'язко пластичного деформування: OA – ділянка зворотних пружних деформацій; AB – ділянка пружно пластичного деформування; BC і CD – ділянки відновлення пружної частини деформації після зворотного руху поршня плунжерної системи для повторної подачі сировини

Ця модель може бути представлена такою системою рівнянь, яка враховує нелінійність при ущільненні й залежність динамічної межі пружності від швидкості деформації [15; 16]:

$$\begin{aligned} \sigma &= E_0 \cdot \varepsilon_x + \mu \frac{d\varepsilon}{d\tau}, \text{ при } \varepsilon \leq \varepsilon_x \text{ (навантаження й розвантаження);} \\ \sigma &= E_0 \cdot \varepsilon_x + E_1 (\varepsilon - \varepsilon_x) p, \text{ при } \varepsilon > \varepsilon_x; \frac{d\varepsilon}{d\tau} > 0; \\ \sigma &= \sigma_{max} + E_2 (\varepsilon_{max} - \varepsilon), \text{ при } \varepsilon_{max} > \varepsilon; \frac{d\varepsilon}{d\tau} < 0; \end{aligned}$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_c + \varphi \left(d\varepsilon / d\tau \right), \text{ при } \frac{d\varepsilon}{d\tau} = 0, \quad (10)$$

де $E_0 = \tan \theta_0$ – модуль пружності; $E_1 = \tan \theta_1$ – модуль пружності; $E_2 = \tan \theta_2$ – модуль пружного розвантаження (відповідно схеми рис.7); ∞ – коефіцієнт в'язкості; τ – час; p – показник ступеню зміщення сировини за межею пружності; $\sigma_{max}, \varepsilon_{max}$ – максимальне напруження й деформація досягнуті при стисканні; $\varepsilon_x = \sigma_x / E_0$ – межа пружної деформації; σ_x динамічна межа пружності; $\varepsilon_c = D / E_0$ – константа, яка відповідає статичній межі пружності деформації сировини; P – зовнішнє навантаження; φ – функція, яка виражає залежність динамічної межі пружності від швидкості деформації сировини при навантаженні.

Розрахунок динамічної границі пружності ε_x проводимо відповідно до розрахункової схеми (рис. 6). Переміщення подрібнених елементів сировини, показане на схемі, можна описати диференційними рівняннями:

$$\frac{d^2x_1}{d\tau^2} + \frac{\mu_1}{m_{pp}} \left(\frac{dx_1}{d\tau} - \frac{dx_2}{d\tau} \right) + \frac{k_1}{m_{pp}} (x_1 - x_2) = 0,$$

$$\frac{d^2x_2}{d\tau^2} - \frac{\mu_1}{m_2} \left(\frac{dx_1}{d\tau} - \frac{dx_2}{d\tau} \right) - \frac{k_1}{m_2} (x_1 - x_2) + \frac{k_1}{m_2} x_2 + \frac{\mu_1}{m_2} \frac{dx_2}{d\tau} = 0, \quad (11)$$

де x_1 і x_2 – координати горизонтальних переміщень $m_{pp} = m_1 + m_2$; k_1 – жорсткість пружного елемента системи.

З урахуванням пропозиції про відсутність в'язких зв'язків у шарі сировини, який лежить безпосередньо на передній стінці поршня плунжерної системи, і проведення необхідних перетворень, із цієї системи рівнянь одержимо диференційне рівняння четвертого порядку [16]:

$$\frac{d^4\varepsilon}{d\tau^4} + \frac{\mu_1(m_{pp} + m_2)}{m_{pp}m_2} \frac{d^3\varepsilon}{d\tau^3} + \frac{k_1(m_{pp} + m_2) + k_1m_{pp}}{m_{pp}m_2} \frac{d^2\varepsilon}{d\tau^2} + \frac{\mu_1k_1}{m_{pp}m_2} \frac{d\varepsilon}{d\tau} + \frac{k_1k_1}{m_{pp}m_2} \varepsilon = 0. \quad (12)$$

Загальне рішення цього рівняння представлено у вигляді:

$$\varepsilon(\tau) = e^{-n_1\tau} (c_1^* \cos \omega_1\tau + c_1^* \sin \omega_1\tau) + e^{-n_2\tau} (c_2^* \cos \omega_2\tau + c_2^* \sin \omega_2\tau). \quad (13)$$

Величини n_1 і n_2 є коефіцієнтами згасання; ω_1 і ω_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 (13) і рішенням одержаної системи з допомогою визначників. Для рішення цього рівняння (13) 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 (13) підставляємо їх у рівняння (4.10) і одержимо рівняння з одним невідомим τ_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 τ_c , знаходимо величину ε_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 й пружні властивості середовища. Їх визначаємо на основі експериментальних даних як для подрібнених полімерів при завантаженні, так і для пірокарбону при розвантаженні реактора. Експериментальні дані характеристики в'язкості сировини, яка подається в реактор, в процесі її термічної утилізації методом піролізу при різних температурах представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

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 за формулою: $n_T(\rho) = 2\sqrt{\frac{F_1}{\rho}} E(\rho) (1 - \alpha^2)$, де $c = f(\rho)$ – швидкість поширення ультразвукової хвилі в середовищі, яке характеризується функцією щільності; F_1 – робоча активна площа поршня; ρ – щільність середовища; α – 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 2.

Таблиця 2

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 і гуми з температурою не більше ніж 120°C, при більших температурах вони переходять в аморфний вид, що може бути застосовано й 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 представлена на рис. 7.

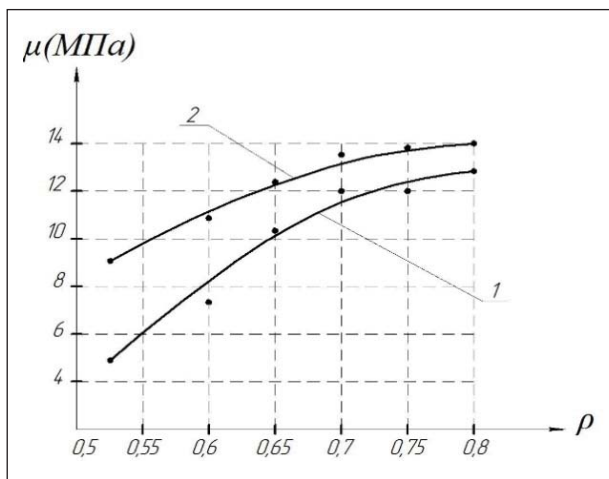


Рис. 7. Залежність модуля пружності термопластичних подрібнених полімерів (крива 1) і гуми (крива 2) від їх щільності при температурі 35°C у системі завантаження піролізного реактора

Пружні властивості коефіцієнтів $n_c = f(\rho)$ для термопластичних подрібнених полімерів і гуми визначаються за формулою: $n_c(\rho) = 0,6 F_1 \cdot \rho \cdot v(\rho)$. Для гарячого пірокарбону, якому властиві якості аморфного тіла, пружні властивості відсутні, при цьому $n_c(\rho) = 0$.

Дослідження математичної моделі процесу динамічного стиснення сировини в системі завантаження проведено з використанням методів статистичної обробки даних. Адекватність розробленої математичної моделі перевірялась методом порівняння розрахункових та експериментальних даних. Розбіжність результатів укладається в рамки похибки з прийнятним ступенем вірогідності. Результати розрахункових та експериментальних досліджень представлені на рисунках 8–10. Ці графіки показують зміну напружень у шарах сировини й пірокарбону, розташованих біля передньої стінки поршня плунжерної системи, залежно від тривалості процесу динамічного стиснення й розрахункової величини переміщення поршня при заданій величині ущільнення.

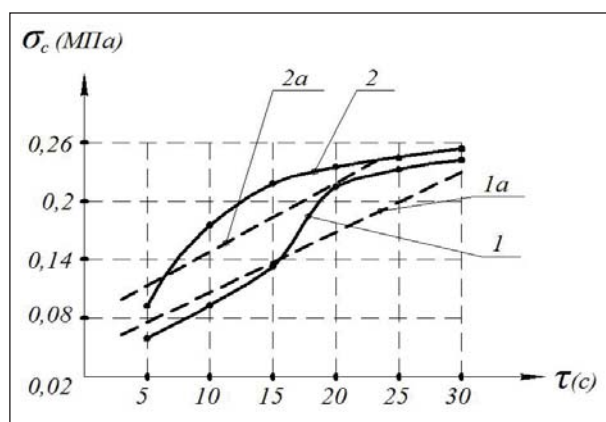


Рис. 8. Залежність $\sigma_c = f(\tau)$ для вхідної подрібненої сировини (крива 1, 1а) і вихідного гарячого пірокарбону (крива 2, 2а) при зусиллі $P = 1,0$ Мпа (1,2 експериментальні дані, 1а і 2а – розрахункові)

Результати розрахунків напружень, які виникають у шарах сировини в процесі її ущільнення, представлені на рис. 9.

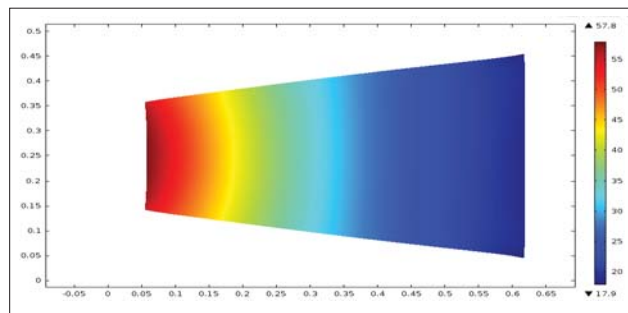


Рис. 9. Результати розрахунків напружень, які виникають у шарах сировини біля поршня в процесі її ущільнення при $P = 1,0$ Мпа

При цьому розрахункова величина максимального переміщення поршня в процесі ущільнення подрібненої сировини становить 57,8 мм (рис. 10).

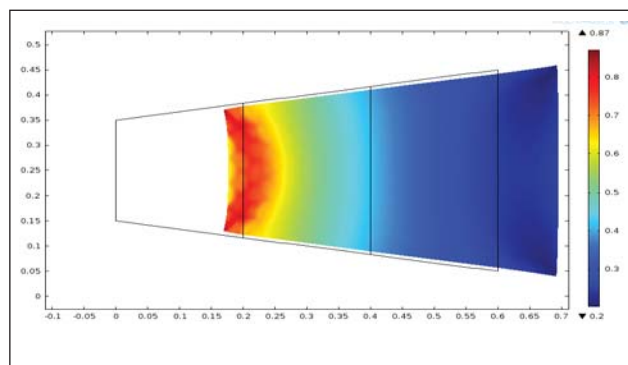


Рис. 10. Результати розрахунків величини переміщення поршня в процесі ущільнення подрібнених полімерів і подачі їх у реактор при $P = 1,0$ Мпа

Із рис. 8, 9, 10 видно, що максимальне ущільнення подрібнених полімерів спостерігається з боку меншої основи зрізаного конуса, де розташований поршень плунжерної системи подачі полімерів у реактор. Порівнюючи результати розподілу градієнтів температури в конусній насадці (рис. 3, 4, 5) і напружень (рис. 9), можна стверджувати, що надійність герметизації реактора при безперервній подачі полімерів в основному залежить від інтенсивності охолодження конусної насадки й мало залежить від ущільнення подрібнених полімерів усередині насадки.

За аналогією системи подачі подрібнених полімерів у піролізний реактор, розглянемо параметри напружень і переміщення пірокарбону в аналогічній плунжерній системі безперервного видалення твердого залишку з піролізного реактора.

Результати розрахунків напружень, які виникають у шарах пірокарбону в процесі його ущільнення із зусиллям $P = 1,0$ Мпа, представлені на рис. 11.

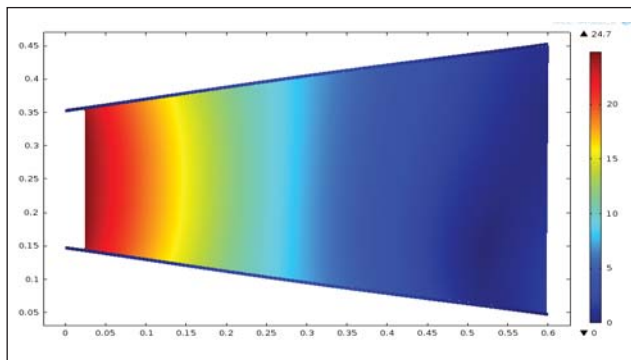


Рис. 11. Результати розрахунків напружень, які виникають у шарах пірокарбону біля поршня в процесі його ущільнення при 1,0 МПа

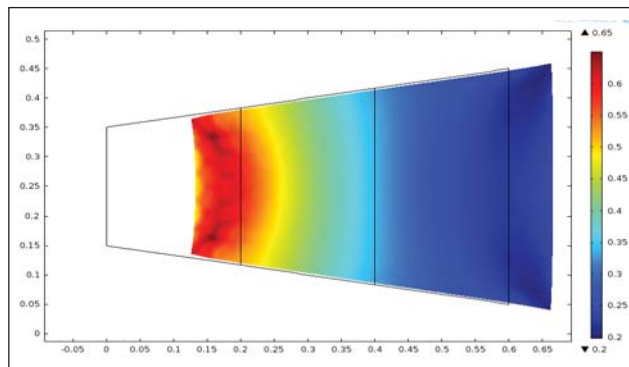


Рис. 14. Розрахункове напруження в об'ємі вхідної сировини при подачі її в реактор при величині стискання 4,0 МПа

При цьому розрахункова величина максимального переміщення поршня в процесі ущільнення пірокарбону становить 24,7 мм (рис. 12).

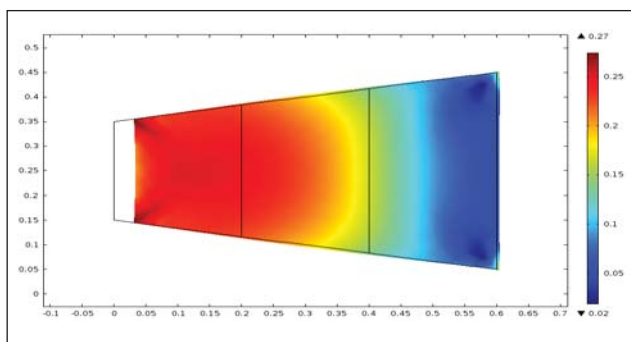


Рис. 12. Результати розрахунків величини переміщення поршня в процесі ущільнення пірокарбону при видаленні його з реактора при $P = 1,0$ МПа

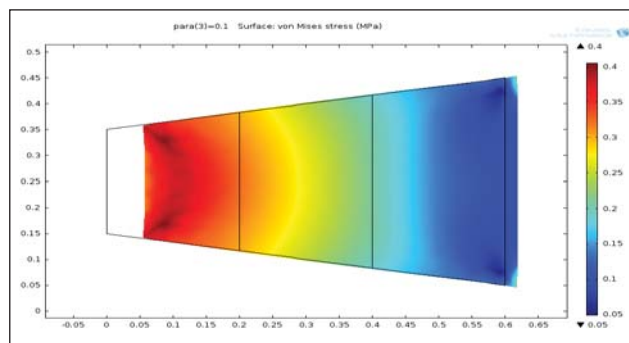


Рис. 15. Розрахункове напруження в об'ємі пірокарбону при видаленні його з реактора при величині стискання 4,0 МПа

Ураховуючи, що фізичні характеристики гарячого пірокарбону з температурою 400–600°C на виході з реактора близькі до в'язко текучого середовища, то навіть при мінімальному його ущільненні герметичність піролізного реактора гарантована.

Для порівняння приводимо графіки напружень при стисканні сировини й пірокарбону з максимальним зусиллям 4,0 МПа (рис. 13, 14, 15).

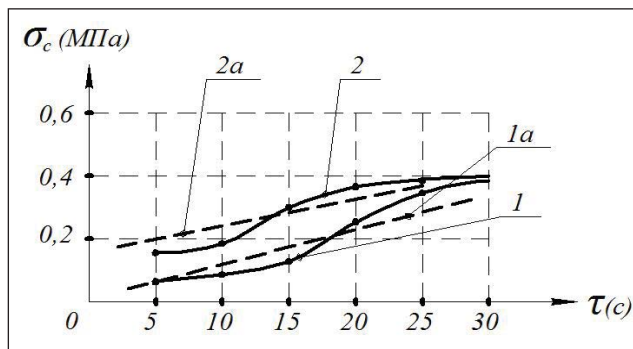


Рис. 13. Залежність $\sigma_c = f(t)$ для вхідної сировини (крива 1, 1a) і вихідного гарячого пірокарбону (крива 2, 2a) при $P = 4,0$ МПа (1, 2 – експериментальні дані, 1a і 2a – розрахункові)

Порівнюючи результати розрахунків, що представлені на рис. 13, 14, 15, з результатами розрахунків, що представлені на рис. 8, 9, 10, можна стверджувати, що збільшувати зусилля стискання як подрібнених полімерів при безперервній подачі їх у реактор, так і пірокарбону при його видаленні з реактора до 4,0 МПа недоцільно, оскільки це призведе до неоправданого ускладнення обладнання й підвищення матеріальних витрат.

Головні висновки. На основі викладеного вище можемо резюмувати таке:

1. Розроблено математичну модель, яка характеризує процес формування ущільненої технологічної пробки в конусній насадці при забезпеченні необхідної герметичності піролізного реактора.

2. Представлені розрахункові напруження в шарах середовища, яке стискається, і величина його переміщення, залежно від тривалості процесу динамічного стискання, доводять, що зусилля стискання в 1 МПа достатнє для забезпечення надійного безперервного завантаження реактора з використанням запропонованої конструкції плунжерної системи.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропоновану математичну модель можна використовувати для проектування й оптимізації технічних параметрів плунжерних систем подачі подрібненої сировини в піролізний реактор і видалення з нього твердого залишку, а також для оцінювання ефективності конструкції плунжерної системи та її вдосконалення.

Література

1. Патент України на винахід № 107386, кл. F23G5/24, F23G5/027, C08J11/04, B09B3/00 / Установка безперервної термічної утилізації цілих зношених автомобільних шин / авт. Л.М. Маркіна, С.С. Рижков, М.В. Рудюк. Бюлетень. 2014. № 24.
2. Основные методы расчета современного оборудования для подачи и охлаждения полимерного материала / В.К. Битюков, В.Н. Колодежнов, Л.М. Сырицын. Москва: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. 39 с.
3. Отработка пиролизной технологии утилизации органических отходов для морехозяйственного комплекса – системы подачи отходов в пиролизный реактор / С.С. Рижков, Л.Н. Маркина, Н.В. Рудюк, Ю.В. Заболотная. Судостроение и морская инфраструктура. 2014. № 2 (2). С. 131–143.
4. Conversion of plastic waste to liquid fuel / Mohamed M. Garib Alla, Ahmed I. Ahmed, Babiker K. Abdalla. International Journal of Technical Research and Applications. 2014. Volume 2. Issue 3. P. 29–31. URL: www.ijtra.com.
5. Effective disposal of plastic waste / Deepak B, Salman Nizarudin, Gokul J, Rohit Anoop Choodan, Anwin Mathai. International Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology (IJARTET). 2016. Vol. 3. Special Issue 5. P. 10–15. URL: www.ijartet.com.
6. Synthesis of Hydrocarbon Fuel by Thermal Catalytic Cracking of Polypropylene / Jean Baptiste Habyarimana, Mohammed Njiemon, Raiyan Abdulnasir, Musa Neksumi, Muhammad Yahaya, O'Donnell Sylvester, Ifeoma Joseph, Linus Okoro, Bolade Agboola, Obioma Uche, Wan Jin Jahng. International Journal of Scientific & Engineering Research. 2017. DOI: 10.14299/ijser.2017.01.014.
7. Janusz Wojciech Bujak. Thermal utilization (treatment) of plastic waste / Janusz Wojciech Bujak. Energy. 2015. P. 1468–1477. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.106>.
8. Débora Almeida Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste 5 [Text] / Débora Almeida and Maria de Fátima Marques. Instituto de Macromoléculas Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil. Polímeros, 2016. DOI: 10.1590/0104-1428.2100.
9. Pyrolysis of plastic waste into fuel and other products / B. Chiwara, E. Makhura, G. Danha, S. Bhero, E. Muzenda, P. Agachi. Proceedings Sardinia, Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium, 2–6 October 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/321213689>.
10. Aishwarya K.N. and Nangarthody Sindhu. Microwave Assisted Pyrolysis of Plastic Waste. Procedia Technology. 2016. Vol. 25. P. 990–997. Doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.197.
11. Pallab Das, Pankaj Tiwari. Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis. Resources, Conservation & Recycling. 2018. Vol. 128. P. 69–77. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.025>.
12. Структурное моделирование производственного процесса литья в песчаные формы / А.И. Вальтер, А.В. Ларин, М.А. Макаров. Известия ТулГУ. Серия «Металлургия. Экология. Физика». Тула, 2002. Вып. 2. С. 216–219.
13. Кирпичев М.В., Михеев М.А. Моделирование тепловых устройств. Москва: Изд-во АН СССР, 1936. 255 с.
14. Тябин Н.В. Теплообмен. Советские исследования. Москва: Наука, 1975. С. 195–198.
15. Карпов Ю.И. Напряженно-деформированное состояние формовочных смесей при динамическом нагружении. Литейное производство. 2001. № 10. С. 11–13.
16. Карпов Ю.И., Карпова Е.Ю. Расчет динамического предела упругости формовочных смесей. Известия Волг. ГТУ. Серия «Металлургия». 2008. Выпуск № 2. Том 10. С. 86–88.