

ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ КАМΠΑНИЇ ФОРМУВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ МЕТОДОМ ЕКСТРУЗІЇ ЧЕРЕЗ МУНДШТУК

А. Я. КАРВАЦЬКИЙ^{1*}, Т. В. ЛАЗАРЄВ², М. В. КОРЖИК³

¹ Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування, НТУУ «КПІ», Київ, УКРАЇНА

² НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», НТУУ «КПІ», Київ, Україна

³ Кафедра автоматизації хімічних виробництв, НТУУ «КПІ», Київ, УКРАЇНА

*email: admin@rst.kpi.ua

АНОТАЦІЯ Представлено фізичну, математичну та числову моделі процесу формування великогабаритних вуглецевих виробів методом екструзії через мундштук. Модель використовує наближення Bingham-Papanastasiou для опису руху вуглецевого композиту. На основі експериментальних досліджень промислового пресового обладнання визначені необхідні початкові та граничні умови процесу. Окрім того, проведена апробація та верифікація моделі, що підтвердили її адекватність та достовірність. Із використанням розробленого способу числового дослідження процесу формування вуглецевих виробів, проаналізовано вплив на якісні показники пресування таких параметрів як: швидкість пресування, потужності нагрівників пресового інструменту, температура маси, що завантажується.

Ключові слова: числове моделювання, вуглецеві вироби, екструзія, в'язко-пластичний матеріал, рідина Bingham, вуглецева маса, коксопековий композит.

NUMERICAL INVESTIGATION OF LARGE SIZE CARBON PRODUCTS FORMATION PROCESS USING THE EXTRUSION METHOD

A. KARVATSKIY^{1*}, T. LAZARIEV², M. KORZHYK³

¹ Department of chemical, polymer and silicate engineering, NTUU "KPI", Kiev, Ukraine

² Research center "Resource-saving technologies", NTUU "KPI", Kiev, Ukraine

³ Department of computer-integrated technologies, chemical and refining industries, NTUU "KPI", Kiev, Ukraine

ABSTRACT Carbon materials can be different depending on their physical properties and spheres of usage. Electrode and carbon products are used in aggregates of ferrous and non-ferrous metallurgy and chemical industry. High requirements are set for their mechanical and thermal hardness, electrical conductivity and chemical inertness. Pressing through the forming matrix (extrusion die) or extrusion is one of the main methods of formation of large size carbon products. Physical, mathematical and numerical models of process of carbon products formation using the extrusion method are performed. The model uses Bingham-Papanastasiou in order to describe the motion of carbon composite. The average process instructions were defined on the basis of experimental researches on pressing equipment. These instructions include pressure, pressing velocity, heaters operation mode, the character of temperature changes in controlled nodes of equipment. Moreover, approbation and verification have been made, what proves accuracy and adequateness. Using the developed method of numerical investigation of carbon products formation, the influence on process quality was analysed based on such criteria: pressing velocity, heaters power, loading mass temperature. The results of numerical investigation determine the capacity of significant influence on pressing process factors due to the change of investigated parameters.

Keywords: numerical simulation, carbonaceous materials, extrusion, viscoplastic material, Bingham fluid, carbon mass, coke/pitch composition.

Вступ

Моделювання складних технологічних процесів вимагає розробки відповідних математичних та числових моделей, а також проведення їх апробації та верифікації. Зазначений підхід дозволяє вирішувати широкий спектр наукових та технологічних задач із відносно невисокими витратами часових та матеріальних ресурсів. Числове моделювання успішно застосовується в багатьох галузях промисловості, зокрема і на виробництві вуглецевих виробів.

Найбільш поширена технологія виготовлення вуглецевої та графітової продукції починається з підготовки наповнювача, а саме з термічного оброблення коксу чи антрациту в обертових печах і електрокальцинаторах. Наступним етапом є змішування зі зв'язувальним, в ролі якого виступають пеки різних марок. Далі, отримана вуглецева маса формується у заготовки методом екструзії через мундштук на спеціалізованому пресовому обладнанні. При необхідності можуть застосовуватися інші способи формування: пресування у форму, віброформування, ізостатичне пресування. Для одержання монолітного виробу заготовки

випалюються при температурі 900–950 °С завдяки теплоті згорання газу у випалювальних печах. Кінцевим етапом технологічного циклу є графітування у електричних печах Ачесона чи Кастнера, під час якого вироби розігріваються до 2600 °С [1–3].

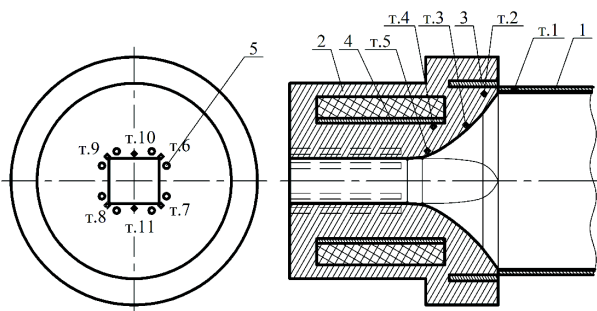
Ціль роботи

Загальнонауковою проблемою є вдосконалення процесів та обладнання на всіх етапах виробництва вуглецевої продукції, що дозволить підвищити енергоефективність та зменшити техногенний вплив на довкілля. Невирішеною частиною даної проблеми є дослідження процесу формування вуглецевих заготовок та визначення способів розробки нових та вдосконалення вже існуючих регламентів пресування.

Метою цієї статті є створення математичної та числової моделі пресування вуглецевих заготовок, її апробація та верифікація, а також проведення числових досліджень із варіюванням різних технологічних параметрів для визначення їх впливу на показники процесу.

Виклад основного матеріалу

Промисловий пресовий інструмент для формування великогабаритних вуглецевих заготовок прямокутного перерізу, схематично представлено на рис. 1. Основними конструктивними елементами пресу є масний циліндр; плунжер; мундштук, в якому відбувається процес формування заготовок.



1 – масний циліндр з нагрівником; 2 – мундштук;
3, 4 – основні нагрівники; 5 – додаткові нагрівники;
т. 1–11 – точки вимірювання температури

Рис. 1 – Промисловий пресовий інструмент для формування великогабаритних вуглецевих заготовок

Масний циліндр призначений для заповнення масою та являє собою теплоізольовану циліндричну камеру з електричним нагрівником, розташованим по всій його поверхні. Мундштук, або формуюча матриця реалізує дві зони деформування: західну та калібрувальну. В західній частині відбувається значне деформування маси та перехід від круглого до профілю, що відповідає геометрії заготовки, а в калібрувальній частині формується кінцева геометрія виробу. Для створення необхідного рівня температури

поверхні мундштука та маси використовуються два основних нагрівники (в західній та калібрувальній частинах) та декілька додаткових (на виході із мундштука). Режим пресування та температурний режим процесу контролюється сучасною електронно-вимірювальною апаратурою, а регулювання здійснюється автоматично та оператором [4, 5].

Кампанії пресування своєю метою ставить виготовлення певної кількості якісних заготовок, тому після її початку процес змішування та формування пресмаси повторюється через проміжки часу необхідні для заповнення та прогрів масного циліндру й мундштука. Тому формування виробів складається з таких основних операцій на кожному етапі кампанії: підпресовка – операція ущільнення маси; пресування; відрізання заготовки певної довжини; охолодження водою та огляд заготовки; заповнення масного циліндра новою порцією маси; розігрів маси до визначеної температури.

Фізична модель процесу формування вуглецевих заготовок способом екструзії може бути представлена наступним чином.

Циклічний характер процесу пресування дає змогу розглядати лише один його етап, який складається з періоду пресування на якому відбувається формування виробів та періоду простою, коли завантажуються нова порція вуглецевої маси і розігрівається пресовий інструмент.

Період формування в продовж підпресовки можна вважати статичним по відношенню до механічної дії, оскільки рух маси не відбувається, а здійснюється лише її ущільнення. З боку зміни теплового стану він є нестационарним, оскільки має місце теплообмін між пресовим інструментом, вуглецевою масою та середовищем. На момент початку формування виробів процес стає динамічним, відбувається екструзія (рух) маси через мундштук та її в'язко-пластична деформування разом зі зміною розподілу температур в об'ємі. Вуглецева композиція вважається неньютонівською нестилівою рідиною, а саме рідиною типу Bingham. Екструзія маси відбувається завдяки переміщенню плунжера в масному циліндрі пресового інструменту. Дискретне відрізання окремих сформованих заготовок та час, що витрачається на технологічні операції можливо представити у вигляді неперервного процесу екструзії з ефективною швидкістю, яка враховуватиме як зупинки, так і загальну витрату маси на етапі.

Під час періоду простою між пресуванням окремих партій заготовок відбувається заповнення масного циліндра новою порцією пресмаси та її часткове ущільнення. Зазначені операції проходять при закритому масивною плитою вихідному отворі мундштука. Період розглядається, як статичний по відношенню до руху маси, а також враховуються втрати теплоти через контакт з плитою.

Нагрівання маси та частин пресового обладнання здійснюється за рахунок основних та додаткових електричних нагрівників, що розташовані

в різних частинах обладнання. Регулювання інтенсивності нагріву та рівня температури відбувається зміною електричних параметрів нагрівників за показаннями датчиків температури, що встановлені в тілі пресового інструменту. Охолодження заготовки після екструзії здійснюється зрощенням її водою.

Розглянуті етапи екструзії заготовок відбуваються згідно регламенту пресування, що визначає швидкість та тиск пресування, а також характер зміни та рівень температури в різних частинах мундштука.

Математична модель процесу формування вуглецевої маси через мундштук може бути представлена нестационарною нелінійною системою рівнянь, що включає рівняння нерозривності, руху та енергії [6] для ламінарного потоку нестисливої ідеальної рідини Bingham (1) для пресмаси та рівняння енергії з внутрішнім джерелом теплоти для елементів пресового інструменту (2). В системі рівнянь задаються теплові параметри та характер їх зміни, швидкість пресування, а також зміна електричних параметрів нагрівників.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}; \\ \rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}h) \right] = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + \bar{\boldsymbol{\tau}} : \nabla \mathbf{v}, \\ \rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + q_v, \end{array} \right. \quad (1)$$

де \mathbf{v} – вектор швидкості, м/с; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; ρ – густина, кг/м³; t – час, с; p – тиск, Па; $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ – тензор зсувних напружень, відповідно до моделі Bingham, Па; $h = \int_0^T c_p(T) dT$ – масова ентальпія, Дж/кг; T – абсолютна температура, К; c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); λ_{eff} – ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $\bar{\boldsymbol{\tau}} : \nabla \mathbf{v}$ – член, що відповідає дисипації механічної енергії, Вт/м³; (\cdot) – оператор подвійного скалярного добутку; q_v – об'ємна густина джерел теплоти, що пов'язана із джоулевою теплоотою, Вт/м³.

Ідеальна рідина Bingham є ньютонівською в'язко-пластичною рідиною [4, 5], під час течії якої в'язкість залежить від градієнта швидкості. В'язко-пластична рідина вирізняється тим, що вона до досягнення деякого критичного внутрішнього напруження (статичне напруження зсуву) τ_{shear} веде себе як тверде тіло і тільки при перевищенні внутрішнього напруження вище за критичну величину починає рухатися як звичайна рідина. Причиною такого явища є те, що в'язко-пластична рідина має просторову жорстку внутрішню структуру,

що чинить опір будь-яким внутрішнім напруженням меншим за критичну величину.

Тензор зсувних напружень за моделлю Bingham записується у вигляді [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\boldsymbol{\tau}} = \left(\mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\boldsymbol{\gamma}}|} \right) \dot{\boldsymbol{\gamma}}, \quad |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{shear}; \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} = 0, \quad |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{shear}, \end{array} \right. \quad (3)$$

де μ_{eff} – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; τ_{shear} – статичне напруження зсуву матеріалу, Па;

$|\dot{\boldsymbol{\gamma}}| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\boldsymbol{\gamma}}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\dot{\boldsymbol{\gamma}} : \dot{\boldsymbol{\gamma}})}$ – другий інваріант від $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$,

с⁻¹; $\dot{\boldsymbol{\gamma}} = \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla$ – швидкість деформації, с⁻¹;

$|\boldsymbol{\tau}| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\boldsymbol{\tau}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\boldsymbol{\tau} : \boldsymbol{\tau})}$ – другий інваріант від $\boldsymbol{\tau}$, Па.

Регуляризацію моделі Bingham за допомогою введення експоненціального множника, запропоновано в роботах Papanastasiou [7]:

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \left(\mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\boldsymbol{\gamma}}|} [1 - \exp(-m|\dot{\boldsymbol{\gamma}}|)] \right) \dot{\boldsymbol{\gamma}}, \quad (4)$$

де m – експоненціальний множник, с.

Для в'язко-пластичної вуглецевої маси використано значення експоненціального множника $m = 100$.

За початкові умови системи рівнянь (1), (2) прийнято розподіл полів компонент вектора швидкості, тиску й температури:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}(x, y, z); \\ p_0 = p(x, y, z); \\ T_0 = T(x, y, z), \end{array} \right. \quad (5)$$

де (x, y, z) – декартові координати, м.

Для врахування різних періодів процесу пресування застосовуються динамічні граничні умови (6)–(8). Дані граничні умови відображають зміни вхідних параметрів системи під час підпресування матеріалу, пресуванні окремих заготовок і простою для технологічних операцій, а також зміна режиму роботи нагрівальних елементів пресового інструменту.

Для маси, що рухається у внутрішньому просторі мундштука, задаються: у вхідному перерізі – нормальна швидкість і температура (6); у вихідному перерізі – нульовий градієнт тиску і температури (7); на поверхні контакту маса-елементи пресового інструменту – умови проковзування і умови абсолютного теплового контакту (8):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{inlet}(t); \\ T = T_{inlet}(t), \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \nabla p = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0, \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\begin{cases} \bar{\tau}_{wall} = 0; \\ \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

де \mathbf{n} – зовнішня нормаль до вхідного чи вихідного перерізу; $\bar{\tau}_{wall}$ – тензор зсувних напружень на границі контакту маса–тверде тіло, Па; $\{T\} = T^+ - T^-$; $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}^+ + \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}^-$.

Для елементів пресового інструмента задаються: умови теплообміну з оточуючим середовищем, умови абсолютного теплового контакту та внутрішнє джерело теплоти

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot (-\lambda(T)\nabla T) = \alpha_{eff}(T - T_\infty); \\ \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0; \\ q_v = q(t), \end{cases} \quad (9)$$

де T_∞ – температура оточуючого середовища, К; α_{eff} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); q_v – внутрішнє джерело теплоти, що вноситься електричними нагрівниками, Вт/м³.

Для числової реалізації представленої математичної моделі (1)–(9) застосовано метод скінчених об'ємів. Дискредитована симетрична модель пресового інструменту представлена на рис. 2, яка складається з 385788 різнотипних елементів. Розв'язання рівняння системи (1) для вуглецевої маси виконується за допомогою алгоритму неявного зв'язку між тиском та швидкістю – SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) [6]. Числова модель реалізована на основі вільного відкритого програмний коду OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) [8].

Числові дослідження процесу формування вуглецевої продукції проведені з використанням експериментальних даних, що отримані на промисловому пресі для виготовлення великогабаритних прямокутних заготовок [9]. Маса для формування заготовок має наступний склад: зв'язувальне (кам'яновугільний пек) – 27,6±2 %; наповнювач: графітована вуглецева сировина фракції 0–10 мм – 70 %; графітована вуглецева сировина фракції 0–0,05 мм – 30 %.

Кампанія проведена за таких параметрів:

- тиск підпресовки 20,4–20,8 МПа, тиск пресування заготовок – 2,1–2,6 МПа;
- швидкість пресування заготовок 0,7–1,0 м/хв;
- потужність нагрівника масного циліндра 22 кВт;
- потужність нагрівника західної частини мундштука 32–34 кВт;
- потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука 44–47 кВт;
- потужність додаткових нагрівників 1,8 кВт, система автоматики підтримує сталий рівень

температури в діапазоні 115–120 °С за показами точок 6–9.

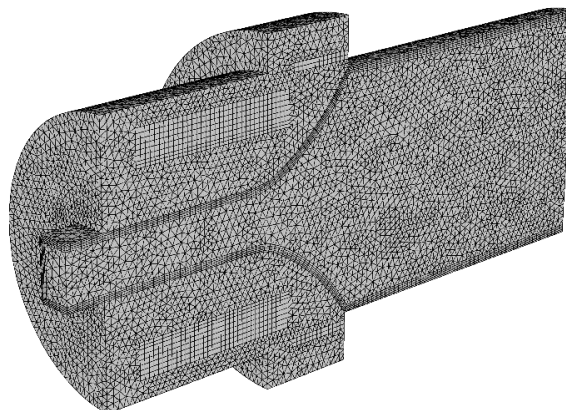


Рис. 2 – Дискредитована модель пресового інструменту для формування великогабаритних вуглецевих заготовок

Режим роботи пресового обладнання та нагрівників у безрозмірній за часом формі представлено на рис. 3, 4. Сірим кольором виділено час пресування заготовок.

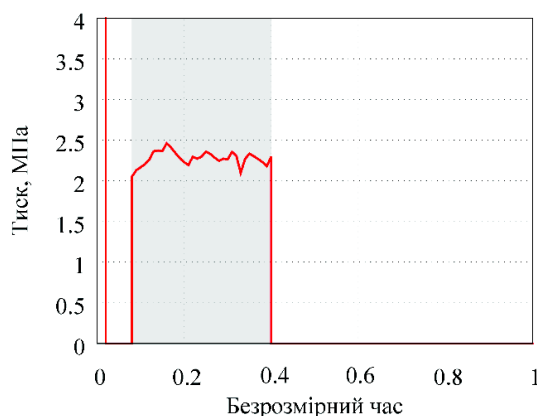


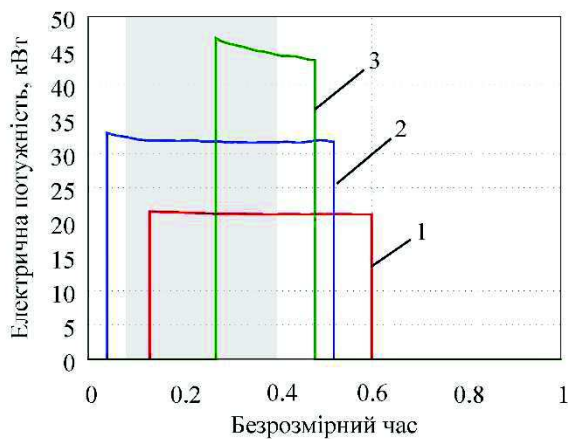
Рис. 3 – Регламент етапу пресування в безрозмірній формі за часом, тиск пресування

Наведений регламент використано як граничні умови для числового моделювання.

Співставлення результатів розрахунків та експериментальних даних по точках вимірювання температури наведено на рис. 5.

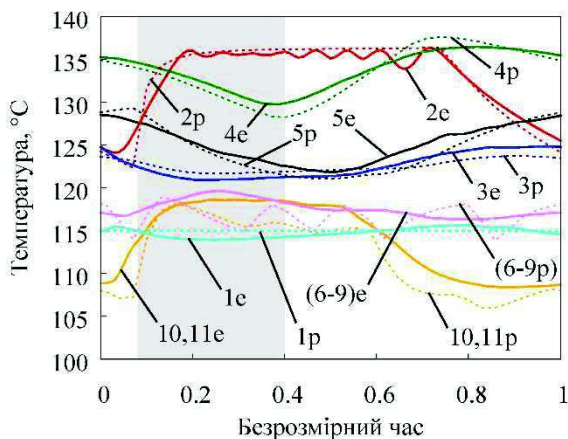
Результати порівняння показують збіжність, а різниця не перевищує 4–6 %.

За інформацією, по проведеній за представленим регламентом кампанії пресування великогабаритних заготовок прямокутного перерізу, не виявлено бракованої продукції, що свідчить про його ефективність. Тому на підставі експериментальних та розрахункових даних можливо зробити висновок про фактори проведення безбракових кампаній формування.



1 – потужність нагрівника масного циліндра;
2 – потужність нагрівника західної частини мундштука;
3 – потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука

Рис. 4 – Регламент етапу пресування в безрозмірній формі за часом, електрична потужність



Т. 1–11 – точки вимірювання температури; е – осереднене експериментально визначене значення температури; р – температура, що отримана в результаті моделювання

Рис. 5 – Співставлення результатів розрахунків та експериментальних даних по точках вимірювання температури для кампанії пресування

Для існуючого в умовах реального виробництва рівня швидкості руху матеріалу через мундштук, коксопекова маса поводить як структурована в'язко-пластична рідина, що характеризується наявністю уздовж стінок внутрішньої поверхні мундштука суцільного тонкого ламінарного шару рідини і псевдо твердого тіла в основному потоці. В такому випадку визначальну роль в нерозривності середовища відіграє наявність вище зазначеного тонкого ламінарного шару, який забезпечує умови проковзування основного потоку по внутрішній поверхні мундштука. З фізичної точки зору роль мастила на поверхні контакту виконує кам'яновугільний пек, який під дією тиску та

нагрівання вище температури розм'якшення дифундує на периферію потоку матеріалу [10].

Температурний діапазон, що забезпечує необхідні умови проковзування для вуглецевого композиту становить 110–150 °С. З іншого боку, необхідною умовою структурного режиму течії є наявність твердого та пластичного ядра потоку, що є можливим за температур вуглецевої маси нижче 110 °С [11].

Дані експериментальних досліджень та результати числового моделювання дають змогу визначити характеристики температурного поля вихідної частини мундштука, необхідного для одержання бездефектних виробів.

Характеристична величина A є співвідношенням площі поверхні маси, яка має температури нижче ніж 110 °С до загальної площі перерізу вихідної частини мундштука

$$A = \frac{S_{110^{\circ}C}}{S}, \quad (10)$$

де $S_{110^{\circ}C}$ – площа поверхні перерізу мундштука, що має температуру нижче ніж 110 °С; S – загальна площа перерізу мундштука.

Зазначена величина розраховується для початкової (A_1) та кінцевої (A_2) ділянок калібрувальної частини мундштука і повинна знаходитись у діапазоні 0,2–0,55 під час процесу формування. Саме такі умови характеризують достатній поверхневий шар матеріалу з температурою 110–150 °С та наявне ядро потоку з температурою нижче 110 °С.

Методи числового аналізу дають змогу виконати оцінку впливу на тепловий стан та показники процесу формування вуглецевих заготовок таких основних параметрів:

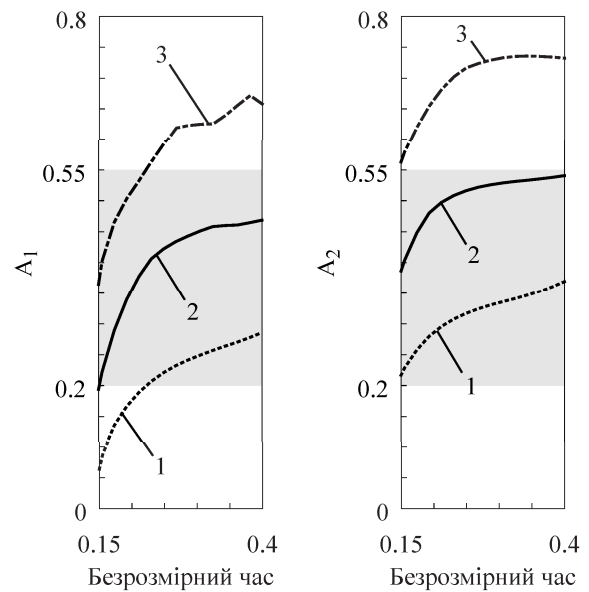
- швидкість пресування (v);
- потужність нагрівника масного циліндра ($Q_{\text{масн.цил.}}$);
- потужність нагрівника західної частини мундштука ($Q_{\text{зах.}}$);
- потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука ($Q_{\text{калібр.}}$);
- температура маси, що завантажується ($T_{\text{мас.}}$);

Проведена серія числових розрахунків із варіюванням окремих параметрів при незмінному значенні всіх інших величин та режиму роботи пресового інструменту. Значення параметрів, що використані для числових досліджень приведено в табл. 1. Їх вплив на перебіг процесу формування заготовок оцінено за зміною величин A_1 та A_2 (рис. 6–10) в порівнянні із базовою (експериментальною) (крива 2) кампанією на періоді пресування.

Найбільш суттєво на температурне поле вуглецевої маси, що пресується, впливає зміна швидкості пресування, потужності нагрівника масного циліндра та температури маси, що завантажується. Дещо менший вплив має нагрівник

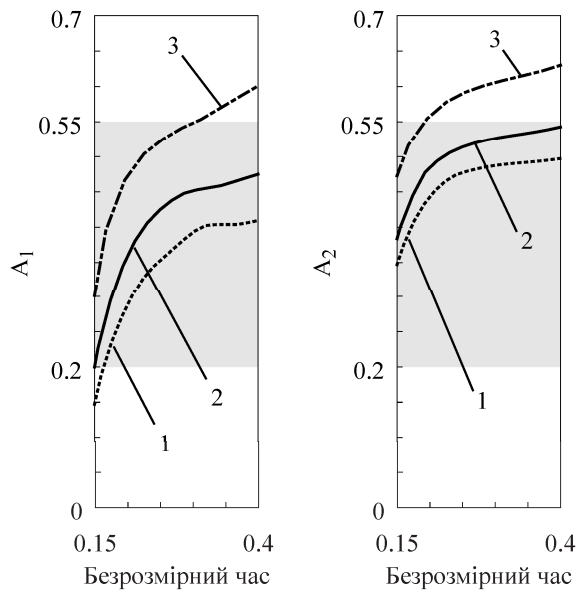
Таблиця 1 – Параметри числових досліджень процесу формування вуглецевих виробів

Параметр	Значення параметрів для базового варіанту	Варіаційне значення параметрів	
Швидкість пресування заготовок, м/хв	0,68	0,34	0,95
Потужність нагрівника масного циліндра, кВт	22	20	24
Потужність нагрівника західної частини мундштука, кВт	33	30,6	35,4
Потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука, кВт	46	40,6	51,4
Температура маси, що завантажується, °С	97	90	



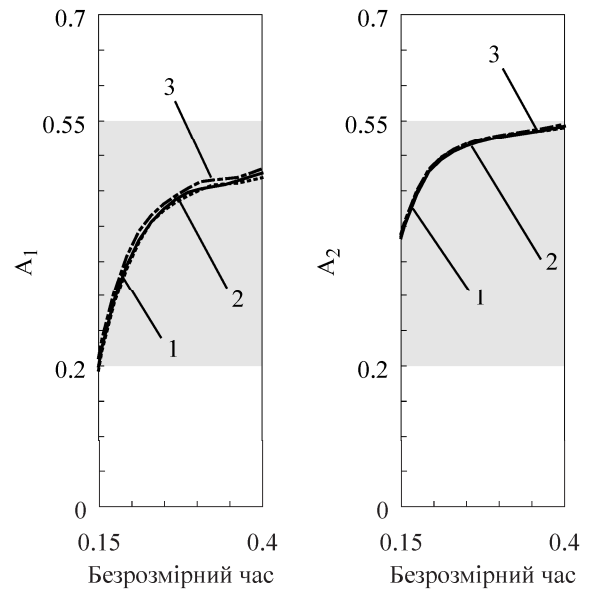
$a - A_1; b - A_2; 1 - Q_{\text{масн. цил.}} = 20 \text{ кВт};$
 $2 - Q_{\text{масн. цил.}} = 22 \text{ кВт}; 3 - Q_{\text{масн. цил.}} = 24 \text{ кВт}$

Рис. 7 – Вплив на A_1 та A_2 зміни потужності нагрівника масного циліндра



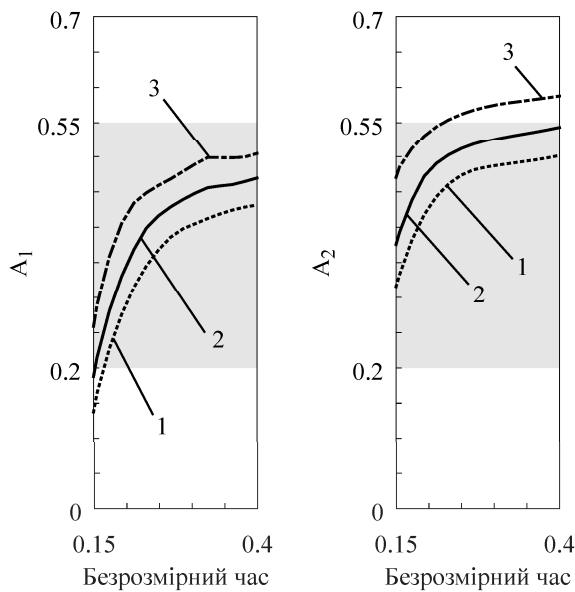
$a - A_1; b - A_2; 1 - v = 0,34 \text{ м/хв}; 2 - v = 0,68 \text{ м/хв};$
 $3 - v = 0,95 \text{ м/хв}$

Рис. 6 – Вплив на A_1 та A_2 зміни швидкості пресування заготовок



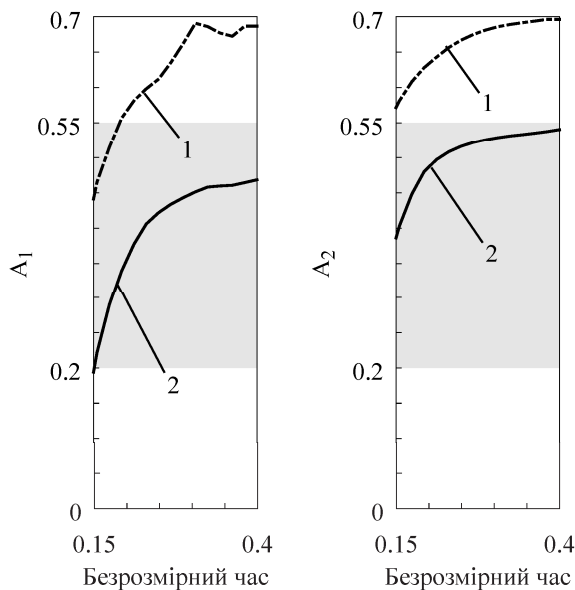
$a - A_1; b - A_2; 1 - Q_{\text{зах.}} = 30,6 \text{ кВт}; 2 - Q_{\text{зах.}} = 33 \text{ кВт};$
 $3 - Q_{\text{зах.}} = 35,4 \text{ кВт}$

Рис. 8 – Вплив на A_1 та A_2 зміни потужності нагрівника західної частини мундштука



$a - A_1$; $b - A_2$; 1 – $Q_{\text{калібр.}} = 40,6 \text{ кВт}$;
2 – $Q_{\text{калібр.}} = 46 \text{ кВт}$; 3 – $Q_{\text{калібр.}} = 51,4 \text{ кВт}$

Рис. 9 – Вплив на A_1 та A_2 зміни потужності нагрівника калібрувальної частини мундштука



$a - A_1$; $b - A_2$; 1 – $T_{\text{мас.}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T_{\text{мас.}} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 10 – Вплив на A_1 та A_2 зміни температури маси, що завантажується

калібрувальної частини мундштука, а нагрівник західної частини мундштука практично не змінює температурне поле на виході із пресового інструменту.

Висновки

Представлені результати числового експерименту вказують на можливість значно впливати на показники процесу пресування, зміною майже всіх розглянутих параметрів. Проте наведені варіаційні значення параметрів призводять до зміни показників процесу, що виходять за допустимий діапазон, характерний для безбракової кампанії пресування. Результати підтверджують раціональність регламенту формування розглядуваних вуглецевих виробів, який застосовується на виробництві.

Отримані дані дозволяють прогнозувати та змінювати процес формування великогабаритних вуглецевих заготовок, при зміні характеристик пресмаси чи інших технічних умов.

Список літератури

- 1 Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology / ed. ed by Arza Seidel. – Wiley. – 2004. – Vol. 4. – 872 p.
- 2 Jäger, H. Carbon, 4. Industrial Carbons. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry / H. Jäger, W. Frohs, M. Banek, et. all. – Wiley. – 2010. – 40 p. – doi: 10.1002/14356007.n05_n03.
- 3 Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production / ed. by A. Tomsett, J. Johnson. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. – 2013. – Vol. 4. – 1210 p. – doi: 10.1002/9781118647745.
- 4 Фялков, А. С. Процессы и аппараты производства порошковых углеродистых материалов / А. С. Фялков. – М.: Аспект Пресс. – 2008. – 687 с.
- 5 Лазарев, Т. В. Математическая модель процесса экструзии вязко-пластичной углеродной массы / Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 31-37. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.
- 6 Карвацкий, А. Я. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів / А. Я. Карвацкий, Є. М. Панов, С. В. Кутузов та ін. – К.: НТУУ «КПІ». – 2012. – 352 с.
- 7 Mitsoulis E. Flows of Viscoplastic Materials: Models and Computations / E. Mitsoulis // Rheology Reviews. – 2007. – 2007. – P. 135-178.
- 8 OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.openfoam.org/> – 01.08.2016 р.
- 9 Карвацкий, А. Я. Экспериментальное исследование теплового состояния промышленного прессы для формирования углеродной продукции / А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев, А. Ю. Педченко // Вісник Хмельницького національного університету, Серія: Технічні науки. – Хмельницький. – 2016. – № 3 (237). – С. 188-194.
- 10 Händle, F. Extrusion in ceramics / ed. by F. Händle. – Springer. – 2007. – 470 p. – doi: 10.1007/978-3-540-27102-4.
- 11 Карвацкий, А. Я. Реологічні властивості вуглецевих композицій в діапазоні температури 120-170 $^\circ\text{C}$ / А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев, Д. Г. Швачко, О. С. Тищенко // Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 74-79. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.18.11.

Bibliography (transliterated)

- 1 Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Wiley, 2004, 4, 872 p.
- 2 **Jäger, H., Frohs, W., Banek, M., et. all.** Carbon, 4. Industrial Carbons. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley, 2010, 40 p., doi: 10.1002/14356007.n05_n03
- 3 Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production. John Wiley & Sons, Inc., 2013, 4, 1210 p., doi: 10.1002/9781118647745.
- 4 **Fialkov, A. S.** Processy i apparaty proizvodstva poroshkovykh uglegrafitovykh materialov. Moscow: Aspekt Press, 2008, 687 p.
- 5 **Lazariev, T., Karvatskii, A., Leleka, S., Pedchenko, A.** The mathematical model of extrusion of viscoplastic carbon composition. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2016, **12**, 31-37. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.
- 6 **Karvatskii, A. Ja., Panov, Je. M., Kutuzov, S. V. et. all.** Teoretychni ta eksperymental'ni doslidzhennja teploelektrychnogo ta mehanichnogo stanu vysokotemperaturnykh agregativ, Kyiv: NTUU «KPI», 2012, 352 p.
- 7 **Mitsoulis, E.** Flows of Viscoplastic Materials: Models and Computations. *Rheology Reviews 2007*, 2007, 135-178.
- 8 OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. <http://www.openfoam.org/>
- 9 **Karvatskii, A., Lazariev, T., Pedchenko, A.** Experimental investigation of the thermal state of industrial press for carbon products forming. *Herald of khmelnytskyi national university: Technical sciences*, 2016, **3**, 188-194.
- 10 **Händle, F.** Extrusion in ceramics. Springer, 2007, 470 p., doi: 0.1007/978-3-540-27102-4.
- 11 **Karvatskii, A., Lazariev, T., Shvachko, D., Tyschenko, O.** Rheological properties of carbon composition within temperature rang 120–170 °C. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. 2016, **46**, 74-79, doi: 10.20998/2413-4295.2016.18.11.

Відомості про авторів (About authors)

Карвацький Антон Янович – доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор, кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: anton@rst.kpi.ua.

Anton Karvatskii – Doctor of Science (D. Sc.), Professor, Senior Researcher, Professor, Department of chemical, polymer and silicate engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: anton@rst.kpi.ua.

Лазарев Тарас Валерійович – кандидат технічних наук, науковий співробітник, НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: t_lazarev@rst.kpi.ua.

Taras Lazariev – Candidate of Sciences (Ph. D.), Researcher, Research center "Resource-saving technologies", National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: t_lazarev@rst.kpi.ua.

Коржик Михайло Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент, Кафедра автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: korzhyk@rst.kiev.ua.

Mykhailo Korzhyk – Candidate of Sciences (Ph. D.), associate professor, Department of computer-integrated technologies, chemical and refining industries, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: korzhyk@rst.kiev.ua.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Карвацький, А. Я. Числові дослідження кампанії формування великогабаритних вуглецевих виробів методом екструзії через мундштук / **А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарев, М. В. Коржик** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 99-106. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.15.

Please cite this article as:

Karvatskii, A., Lazariev, T., Korzhyk, M. Numerical investigation of large size carbon products formation process using the extrusion method. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **25** (1197), 99-106, doi:10.20998/2413-4295.2016.25.15.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Карвацкий, А. Я. Численные исследования кампании формирования крупногабаритных углеродных изделий методом экструзии через мундштук / **А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев, М. В. Коржик** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 25 (1197). – С. 99-106. – doi:10.20998/2413-4295.2016.25.15.

АННОТАЦІЯ Представлено фізическую, математическую и численную модели процесса формирования крупногабаритных углеродных изделий методом экструзии через мундштук. Модель использует приближения Bingham-Papanastasiou для описания движения углеродного композита. На основе экспериментальных исследований промышленного прессового оборудования определены необходимые начальные и граничные условия процесса. Кроме того, проведена апробация и верификация модели, что подтвердило её адекватность и достоверность. С использованием разработанного способа численного исследования процесса формирования углеродных изделий, проанализировано влияние на качественные показатели прессования таких параметров как: скорость прессования, мощности нагревателей прессового инструмента, температура загружаемой массы.

Ключевые слова: численное моделирование, углеродные изделия, экструзия, вязко-пластичный материал, жидкость Bingham, углеродная масса, коксопексовая смесь.

Поступила (received) 24.06.2016