

УДК 678.027.37

doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНОЙ УГЛЕРОДНОЙ МАССЫ

Т. В. ЛАЗАРЕВ^{1*}, А. Я. КАРВАЦКИЙ², С. В. ЛЕЛЕКА¹, А. Ю. ПЕДЧЕНКО²

¹ НИЦ «Ресурсосберегающие технологии», НТУУ «КПИ», Киев, УКРАИНА

² Кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, НТУУ «КПИ», Киев, УКРАИНА

*email: admin@rst.kpi.ua

АННОТАЦИЯ Рассмотрен процесс формования углеродных изделий из коксопекового композита. Разработано математическую и численную модели пресового инструмента для экструзии электродных заготовок с использованием приближения жидкости Bingham-Papanastasiou для описания поведения углеродной массы. Проведена верификация разработанной численной модели по данным экспериментальных исследований и определено, что разница между расчётными и экспериментально измеренными значениями температуры мундштука прессы не превышает 4–6 %.

Ключевые слова: углеродная масса, коксопековая смесь, электродные заготовки, экструзия, вязко-пластичный материал, жидкость Bingham, численное моделирование

THE MATHEMATICAL MODEL OF EXTRUSION OF VISCOPLASTIC CARBON COMPOSITION

T. LAZARIEV^{1*}, A. KARVATSKIY², S. LELEKA¹, A. PEDCHENKON²

¹ Research center "Resource-saving technologies", NTUU "KPI", Kiev, UKRAINE

² Department of chemical, polymer and silicate engineering, NTUU "KPI", Kiev, UKRAINE

ABSTRACT Manufacturing of large-size carbon products such as electrodes and carbon blocks requires multistage production cycle, special equipment and significant resources and energy consumption. The article is devoted to the technological stage of carbon products forming with the usage of extrusion method. On this stage carbon blanks are shaped and sized and also their physical properties start to be formed. It is necessary to use effective operating regimes in order to get a high quality and defectless products. The development of mathematical model of carbon materials extrusion process is an important task in numerical modeling since it enables us to estimate effective process parameters. Coke/pitch composition exhibits viscoplastic properties. It behaves as a rigid body at the low stress but flows as a viscous fluid at high stress. We propose mathematical model of carbon mass extrusion process with the usage of viscoplastic Bingham-Papanastasiou viscosity model. The model is based on transient nonlinear system of partial differential equation. It consists of continuity equation, motion equation and energy equation for laminar incompressible Bingham-Papanastasiou fluid flow and energy equation with additional heat source for solid parts of pressing equipment. The dynamically changeable initial and boundary conditions are used for the description of different stages of extrusion process. We performed verification and validation of the developed mathematical and numerical models of thermohydrodynamic state of extrusion equipment. Results of numerical analyses are presented in the article in the form of temperature plots and fields. The comparison of numerical and experiment data shows good agreement and the average difference is 4–6 %. This confirms model capability to solve engineering and manufacturing problems related to carbon mass extrusion process.

Keywords: carbon mass, coke/pitch composition, electrode blanks, extrusion, viscoplastic material, Bingham fluid, numerical simulation

Введение

Изготовление крупногабаритной углеродной продукции, в частности электродов или элементов конструкции печей цветной металлургии, требует многоэтапной цепочки производства, специфического оборудования и значительных ресурсных и энергетических затрат. Для получения высококачественного конечного продукта, исходное сырьё (кокс, антрациты, пеки различных марок) подвергаются измельчению, смешиванию, формованию и многостадийной высокотемпературной обработке. Данная технология позволяет получить монолитные углеродные изделия с анизотропией свойств в широком диапазоне габаритных размеров: площадь

поперечного сечения от $7,85 \cdot 10^{-5}$ до $0,38 \text{ м}^2$; длина от 1 до 3,58 м [1].

Во время формования, углеродной продукции передаётся необходимая геометрическая форма и размеры, а также закладываются её будущие физические свойства. Наиболее широко на электродных заводах распространён метод пресования выдавливанием или экструзией углеродной массы через формуемую матрицу (мундштук), что объясняется высокой производительностью и низкой стоимостью данного процесса. Смесь углеродосодержащего наполнителя и связующего (прессмасса) подаётся в массовый цилиндр гидравлического прессы, где предварительно уплотняется. Под воздействием усилия порядка 60 МН масса выдавливается через мундштук, таким

образом изделие придаётся необходимая форма. После этого, сформованная в заготовку масса, обрезается до необходимого размера и охлаждается для препятствия дальнейшей деформации [2].

Во время формования электродной заготовки методом экструзии ключевую роль в обеспечении бездефектной и высококачественной продукции играет технологический регламент процесса. К факторам, определяющим регламент прессования относятся: состав прессмассы и геометрические характеристики будущего изделия. К управляющим параметрам процесса следует отнести: изостатическую температуру, выдерживаемую в массном цилиндре; давление и скорость прессования; температурный режим нагревателей мундштука, которые обеспечивают необходимую температуру его поверхности; время работы и простоя, затраченное на каждом из этапов кампании прессования.

В промышленной практике, определение рациональных регламентов процесса формования углеродных заготовок связано со значительными затратами временных, материальных и энергетических ресурсов, из-за проведения опытных кампаний при переходе на новый состав прессмассы или новый вид продукции. Поэтому разработка и применение методов математического моделирования в условиях реального производства является безусловно актуальным, и позволит практически полностью исключить опытные кампании прессования, тем самым, обеспечивая ресурсо- и энергосбережение.

Цель работы

Электродная или коксопечковая масса представляет собой композитный материал, проявляющий свойства неньютоновской жидкости. Поэтому общенаучной проблемой является выбор адекватной модели динамической вязкости для моделирования течения массы при прессовании.

Нерешённой частью научной проблемы является создание адекватной математической и численной моделей экструзии, которая давала бы возможность в условиях производства отрабатывать регламенты прессования заготовок при изменении состава коксопечковой смеси и типоразмеров изделий.

Целью данной статьи является создание математической модели процесса экструзии углеродных заготовок для разработки рациональных регламентов прессового инструмента, которые обеспечивают условия выхода качественной продукции.

Изложение основного материала

Промышленное формование углеродных заготовок методом экструзии через мундштук пресса включает следующее технологические этапы:

- заполнение массного цилиндра пресса охлаждённой массой;
- подпрессовка массы;
- прессование и маркировка изделий;
- отрезка заготовки определённой длины;
- охлаждение водой и осмотр заготовки на приёмном столе пресса;
- транспортирование заготовки на рольганг для охлаждения;
- транспортирование заготовки на стеллаж для проведения производственного контроля.

Приготовленная в смесильных машинах масса, температура которой составляет 125–135 °С, транспортируется конвейерами в барабан-охладитель, где охлаждается до 90 °С. Далее масса подаётся в форкамеру пресса, откуда плунжером продвигается в массном цилиндре. В массном цилиндре масса подвергается подпрессовке – операции, при которой происходит уплотнение и удаление воздуха и паров пека.

После полного заполнения массного цилиндра производится прессование, которое заключается в выдавливании массы через отверстие мундштука с целью придания заготовке определённой геометрической формы, размеров и плотности. Во время данного технологического этапа температура в массном цилиндре и внутренней поверхности мундштука поддерживается в определённом диапазоне, что обеспечивает необходимую пластичность массы и условия свободного проскальзывания. Температурный режим выдерживается за счёт нескольких основных и дополнительных нагревателей, расположенных внутри прессового инструмента.

Получение заготовок заданной длины достигается отрезкой сформированной массы отрезными ножами. Далее заготовки охлаждаются на рольганге водой в течении 4 часов методом орошения или в ванне [2].

Физические свойства массы определяют характер её течения и условия теплового взаимодействия в рабочем пространстве прессового инструмента.

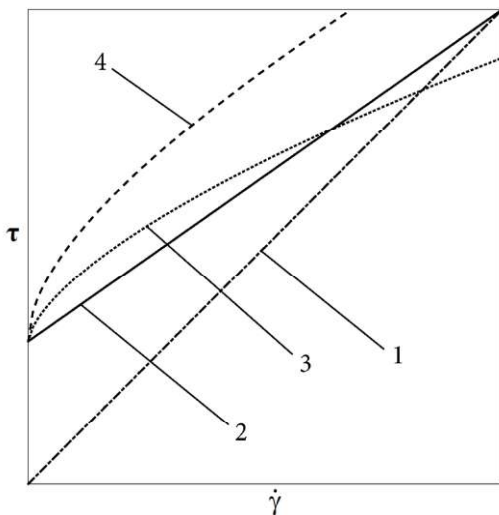
Коксопечковый композит проявляет двойные свойства в зависимости от значений внутренних напряжений. С одной стороны, ниже определённого уровня внешнего механического воздействия масса сохраняет свою целостность, проявляя пластичные свойства, схожие с твёрдым телом, а с другой – при достаточном усилии воздействия масса начинает течь как вязкая жидкость. Такие свойства позволяют отнести электродную массу к вязко-пластичным материалам [3, 4]. Для описания поведения данного класса веществ применимы модели Bingham (1), Herschel-Bulkley (2), Casson (3) [5–7]. Для простого двумерного сдвигового течения (течение Куэтта) эти модели запишутся следующим образом (рис. 1):

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau} = \tau_{\text{shear}} + \mu_{\text{eff}} \dot{\boldsymbol{\gamma}}, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau} = \tau_{\text{shear}} + K \dot{\boldsymbol{\gamma}}^n, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sqrt{\boldsymbol{\tau}} = \sqrt{\tau_{\text{shear}}} + \sqrt{\mu_{\text{eff}} \dot{\boldsymbol{\gamma}}}, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\boldsymbol{\tau}$ – вектор напряжения сдвига, Па; τ_{shear} – критическое сдвиговое напряжение (статическое напряжения сдвига), Па; μ_{eff} – эффективней коэффициент динамической вязкости, Па·с; $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ – скорость деформации, c^{-1} ; K, n – коэффициенты модели Herschel-Bulkley.



1 – ньютоновская жидкость; 2 – жидкость Bingham; 3 – жидкость Herschel-Bulkley; 4 – жидкость Casson

Рис. 1 – Зависимость сдвиговых напряжений от скорости деформации для различных моделей вязко-пластичной жидкости

По данным работ [3, 4] коксопечковая масса близка к наиболее простой из указанных моделей – модели Bingham. Для общего трёхмерного случая тензорная форма уравнения (1) будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \bar{\boldsymbol{\tau}} = \left(\mu_{\text{eff}} + \frac{\tau_{\text{shear}}}{|\dot{\boldsymbol{\gamma}}|} \right) \bar{\dot{\boldsymbol{\gamma}}}, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \bar{\dot{\boldsymbol{\gamma}}} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ – тензор напряжения сдвига, Па; $|\dot{\boldsymbol{\gamma}}| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\boldsymbol{\gamma}}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\bar{\dot{\boldsymbol{\gamma}}} : \bar{\dot{\boldsymbol{\gamma}}})}$ – второй инвариант от $\bar{\dot{\boldsymbol{\gamma}}}$, c^{-1} ; $\bar{\dot{\boldsymbol{\gamma}}} = \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla$ – скорость деформации, c^{-1} ; \mathbf{v} – вектор

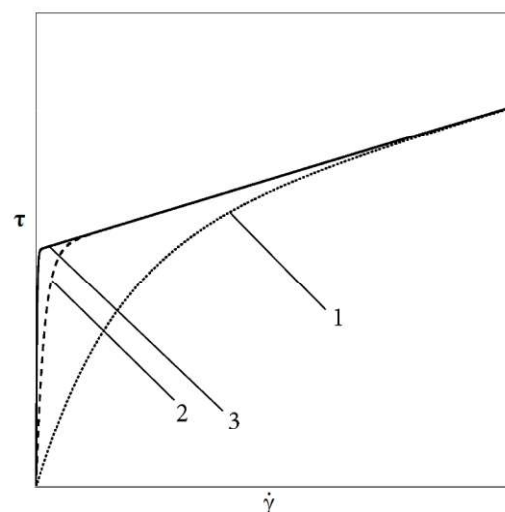
скорости, м/с; ∇ – оператор Гамильтона, m^{-1} ; $|\boldsymbol{\tau}| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\boldsymbol{\tau}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\bar{\boldsymbol{\tau}} : \bar{\boldsymbol{\tau}})}$ – второй инвариант от $\bar{\boldsymbol{\tau}}$, Па.

Модель Bingham (4) предусматривает сосуществование двух областей (пластичной и твёрдой), что влечёт за собой существенные вычислительные трудности при моделировании в области сильной нелинейности физических свойств жидкости. Для преодоления данной проблемы Papanastasiou [8] предложил регуляризацию уравнения напряжённо-деформированного состояния потока вязко-пластичного материала при помощи введения экспоненциального множителя в уравнение (4)

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \left(\mu_{\text{eff}} + \frac{\tau_{\text{shear}}}{|\dot{\boldsymbol{\gamma}}|} [1 - \exp(-m|\dot{\boldsymbol{\gamma}}|)] \right) \bar{\dot{\boldsymbol{\gamma}}}, \quad (5)$$

где m – экспоненциальный множитель, с.

Уравнение (5) (модель Bingham-Papanastasiou) справедливо для всех значений $|\boldsymbol{\tau}|$ и даёт близкие результаты к идеальной жидкости Bingham при значениях $m \geq 100$ (рис. 2).



1 – $m = 1$; 2 – $m = 10$; 3 – $m = 100$

Рис. 2 – Зависимость сдвиговых напряжений от скорости деформации для модели жидкости Bingham-Papanastasiou с различными значениями параметра m

Учитывая вышесказанное, математическая модель процесса экструзии коксопечкового композита может быть представлена системой уравнений, которая включает нестационарные, нелинейные уравнения неразрывности, движения и энергии [9] для ламинарного потока несжимаемой жидкости Bingham-Papanastasiou для прессмассы (6) и уравнения энергии (7) с внутренним источником теплоты для элементов прессового инструмента:

$$\left\{ \begin{aligned} & \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ & \rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}; \\ & \rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}h) \right] = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + \bar{\bar{\tau}} : \nabla \mathbf{v}, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + q_v, \quad (7)$$

где ρ – плотность, кг/м³; t – время, с; p – давление, Па; $h = \int_0^T c_p(T) dT$ – массовая энтальпия, Дж/кг; T – абсолютная температура, К; c_p – массовая изобарная теплоёмкость, Дж/(кг·К); λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\bar{\bar{\tau}} : \nabla \mathbf{v}$ – член, который соответствует диссипации механической энергии, Вт/м³; (\cdot) – оператор двойного скалярного произведения; q_v – объёмная плотность источника теплоты, Вт/м³.

За начальные условия систем уравнений (6, 7) принимаются распределение полей компонентов вектора скорости, давления и температуры:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}(x, y, z); \\ p_0 = p(x, y, z); \\ T_0 = T(x, y, z), \end{cases} \quad (8)$$

где (x, y, z) – декартовы координаты, м.

Для учёта различных этапов процесса прессования применяются динамические граничные условия (9)–(12). Данные граничные условия отражают изменение в расчётной области во время подпрессовки материала, прессовании отдельных заготовок и простоя для технологических операций, а также изменение режима работы нагревательных элементов прессового инструмента.

Для массы, движущейся во внутреннем пространстве мундштука, задаются: во входном сечении – нормальная скорость и температура (9); в выходном сечении – нулевой градиент давления и температуры (10); на поверхности контакта масса-элементы прессового инструмента – условия проскальзывания и условия абсолютного теплового контакта (11):

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{inlet}(t); \\ T = T_{inlet}(t), \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla p = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \bar{\bar{\tau}} = 0; \\ \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где \mathbf{n} – внешняя нормаль к поверхности входного или выходного сечения; $\bar{\bar{\tau}}_{wall}$ – тензор сдвиговых напряжений на границе контакта масса-твёрдое тело, Па; $\{T\} = T^+ - T^-$; $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}^+ + \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}^-$.

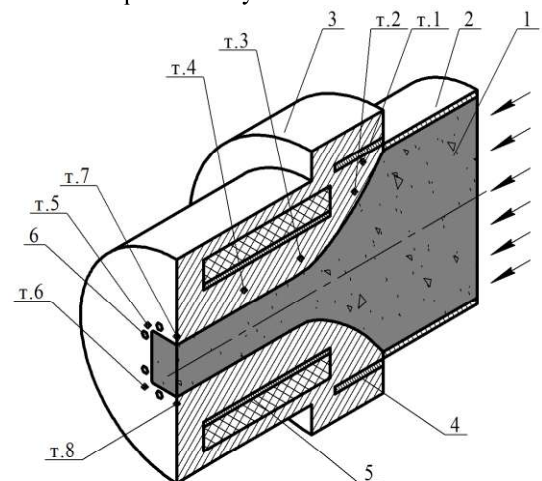
Для элементов прессового инструмента задаются: условия теплообмена с окружающей средой, условия абсолютного теплового контакта и внутренний источник теплоты.

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot (-\lambda(T) \nabla T) = \alpha(T - T_\infty); \\ \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0; \\ q_v = q(t), \end{cases} \quad (12)$$

где T_∞ – температура окружающей среды, К; q – внутренний источник теплоты, вносимый нагревательными элементами, Вт/м³.

Для численной реализации представленной математической модели (1)–(12) использован свободный открытый программный код для решения задач вычислительной гидродинамики OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) [10].

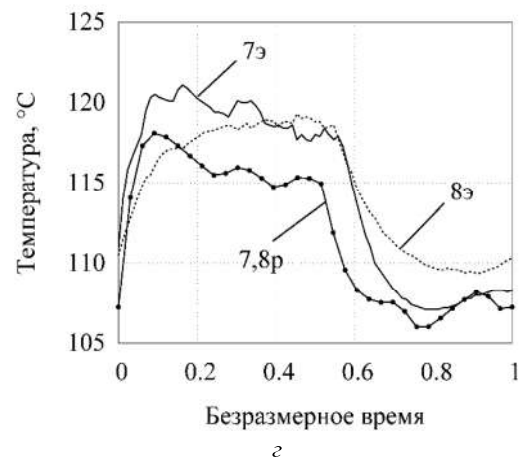
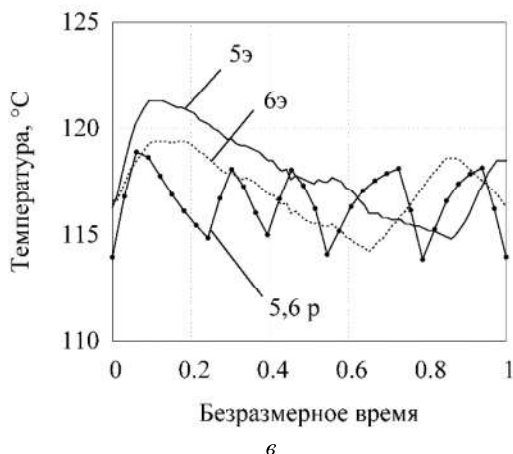
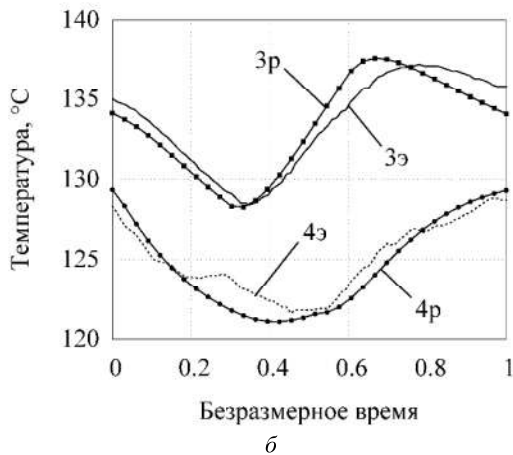
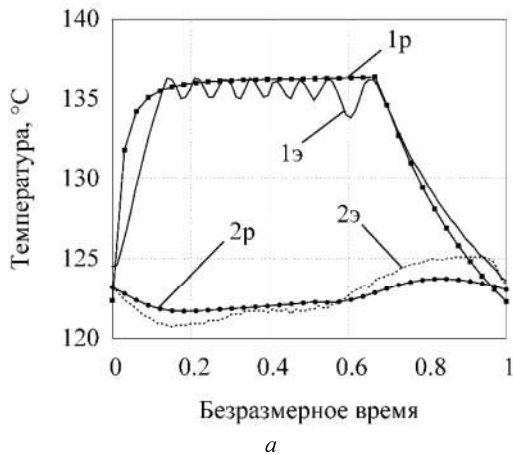
Проверка адекватности разработанной численной модели процесса экструзии углеродных заготовок через мундштук выполнена при помощи экспериментальных данных, которые получены на промышленном прессовом оборудовании (рис. 3), что также дало возможность задать корректные начальные и граничные условия.



1 – пресс-масса; 2 – массовый цилиндр; 3 – мундштук; 4, 5 – основные нагреватели; 6 – дополнительные нагреватели; т. 1–8 – контрольные точки измерения температуры

Рис. 3 – Модель процесса прессования углеродных заготовок

Результаты верификации численной модели по экспериментальным данным представлены на рис. 4. Распределение температуры на конец кампании прессования в среднем сечении прессового инструмента и на поверхности массы показаны на рис. 5.



т. 1–8 – контрольные точки измерения температуры; э – экспериментально измеренные значения температуры; р – температуры, полученные в результате моделирования

Рис. 4 – Сопоставление экспериментальных и расчётных данных по изменению температуры в контрольных точках на протяжении кампании прессования

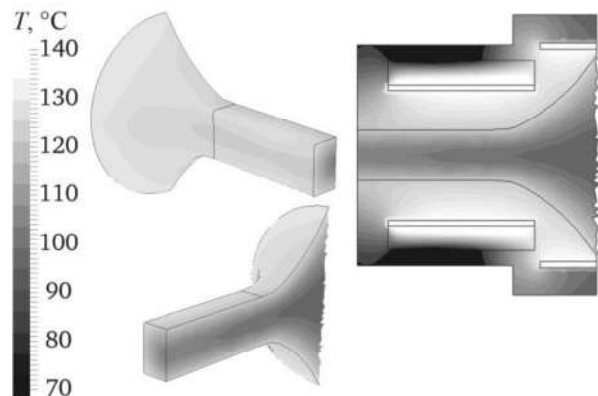


Рис. 5 – Распределение температуры по среднему сечению прессового инструмента и на поверхности прессмассы на конец кампании прессования

Обсуждение результатов

Анализ результатов моделирования показывает, что на температурное поле углепексовой массы, во время прессования заготовок, существенное влияние оказывают основные нагреватели. Дополнительный подогрев углов для прямоугольных заготовок обеспечивает уменьшение тепловых угловых эффектов, что снижает вероятность прилипания массы к стенкам мундштука и, соответственно, дефектов в заготовках.

Сопоставления расчётных и экспериментальных данных по температуре в контрольных точках показывает, что разница между ними составляет 4–6 %. Соответственно разработанный подход может быть успешно применён для инженерных расчётов и разработки

рациональных регламентов проведения процесса прессования углеродных изделий.

Выводы

В работе рассмотрен процесс формирования заготовок углеродных изделий методом экструзии через мундштук. Предложена математическая модель, описывающая нестационарные физические поля в прессовом инструменте во время проведения технологического процесса. Модель учитывает нелинейные вязко-пластичные свойства углепеккового композита за счёт применения модели вязкости Bingham-Papanastasiou, а также изменение граничных условий на различных этапах кампании прессования углеродных заготовок. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными подтверждает её адекватность с погрешностью в 4–6 %, что даёт возможность применять указанный подход к задаче разработки рациональных регламентов эксплуатации прессового оборудования для изготовления углеродных заготовок.

Список литературы

- 1 Sang-Min Lee Bulk graphite: materials and manufacturing process / Sang-Min Lee, Dong-Su Kang and Jea-Seung Roh // *Carbon Letters*. – 2015. – Vol. 16, № 3. – P. 135-146. – doi:10.5714/CL.2015.16.3.135.
- 2 Фялков, А. С. Процессы и аппараты производства порошковых углеграфитовых материалов / А. С. Фялков. – М.: Аспект Пресс. – 2008. – 687 с.
- 3 Vershinina, E. P. Plastic properties of homogenized coke-pitch compositions / E. P. Vershinina, E. M. Gil'debrandt, V. K. Frizorger // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2011. – Vol. 52, Issue 3. – P. 205-208. – doi:10.3103/S1067821211030230.
- 4 Hlatshwayo, S. R. Rheological behavior and thermal properties of pitch/poly vinyl chloride blends / S. R. Hlatshwayo, Focke, W. W. Walter, S. Ramjee, B. Rand, N. Manyala // *Carbon*. – 2013. – Vol. 51. – P. 64-71. – doi:10.1016/j.carbon.2012.08.012.
- 5 Mitsoulis, E. Flows of Viscoplastic Materials: Models and Computations / E. Mitsoulis // *Rheology Reviews*. – 2007. – P. 135-178.
- 6 Huilgol, R. R. Finite stopping time problems and rheometry of Bingham fluids / R. R. Huilgol, B. Mena, J. M. Piau // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 2002. – Vol. 102. – P. 97-107. – doi:10.1016/S0377-0257(01)00166-5.
- 7 Chatzimina, M. Cessation of Couette and Poiseuille flows of a Bingham plastic and finite stopping time / M. Chatzimina, G. C. Georgiou, I. Argyropaidas,

- E. Mitsoulis, R. R. Huilgol // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 2005. – Vol. 129. – P. 117-127. – doi:10.1016/j.jnnfm.2005.07.001.
- 8 Papanastasiou, T. C. Flow of materials with yield / T. C. Papanastasiou // *J. Rheology*. – 1987. – Vol. 31. – P. 385-404. – doi:10.1122/1.549926.
- 9 Panov, E. N. Mathematical Model of Solid-Fuel Gasification in a Fluidized Bed / E. N. Panov, A. Ya. Karvatskii, T. B. Shilovich, T. B. Lazarev, A. S. Moroz // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2014. – Vol. 50, No. 5-6. – P. 312-322. – doi:10.1007/s10556-014-9900-3.
- 10 The OpenFOAM Foundation. [Web] <http://www.openfoam.org>.

Bibliography (transliterated)

- 1 Sang-Min Lee, Dong-Su Kang, Jea-Seung Roh Bulk graphite: materials and manufacturing process. *Carbon Letters*, 2015, 16(3), 135-146, doi:10.5714/CL.2015.16.3.135.
- 2 Fialkov, A. S. Processy i apparaty proizvodstva poroshkovykh uglegrafitovykh materialov. Moskov: Aspekt Press, 2008, 687 p.
- 3 Vershinina, E. P., Gil'debrandt, E. M., Frizorger, V. K. Plastic properties of homogenized coke-pitch compositions. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2011, 52(3), 205-208, doi:10.3103/S1067821211030230.
- 4 Hlatshwayo, S. R., Focke, W. W., Ramjee, S., Rand, B., Manyala, N. Rheological behavior and thermal properties of pitch/poly vinyl chloride blends. *Carbon*, 2013, 51, 64-71, doi:10.1016/j.carbon.2012.08.012.
- 5 Mitsoulis, E. Flows of Viscoplastic Materials: Models and Computations. *Rheology Reviews*, 2007, 135-178.
- 6 Huilgol, R. R., Mena, B., Piau, J. M. Finite stopping time problems and rheometry of Bingham fluids. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 2002, 102, 97-107, doi:10.1016/S0377-0257(01)00166-5.
- 7 Chatzimina, M., Georgiou, G. C., Argyropaidas, I., Mitsoulis, E., Huilgol, R. R. Cessation of Couette and Poiseuille flows of a Bingham plastic and finite stopping time. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 2005, 129, 117-127, doi:10.1016/j.jnnfm.2005.07.001.
- 8 Papanastasiou, T. C. Flow of materials with yield. *J. Rheology*, 1987, 31, 385-404, doi:10.1122/1.549926.
- 9 Panov, E. N., Karvatskii, A. Ya., Shilovich, T. B., Lazarev, T. B., Moroz, A. S. Mathematical Model of Solid-Fuel Gasification in a Fluidized Bed. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2014, 50(5-6), 312-322, doi:10.1007/s10556-014-9900-3.
- 10 The OpenFOAM Foundation. [Web] <http://www.openfoam.org>.

Сведения об авторах (About authors)

Лазарев Тарас Валериевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, НИЦ «Ресурсосберегающие технологии», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина; 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.

Карвацкий Антон Янович – доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, профессор, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина; 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.

Лелека Сергей Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник, НИЦ «Ресурсосберегающие технологии», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина; e-mail: sleleka@rst.kpi.ua.

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

Педченко Анатолий Юрьевич – аспирант, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина; e-mail: anatolek@rst.kpi.ua.

Anatoliy Pedchenko – Postgraduate student, Department of chemical, polymer and silicate engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: anatolek@rst.kpi.ua.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

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.

Please cite this article as:

Lazariev, T., Karvatskii, A., Leleka, S., Pedchenkon, A. the mathematical model of extrusion of viscoplastic carbon composition. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 12 (1184), 31-37, doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лазарев, Т. В. Математична модель процесу екструзії в'язко-пластичної вуглецевої маси / **Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 31-37. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.

АНОТАЦІЯ Розглянуто процес формування вуглецевих виробів із коксопекового композиту. Розроблено математичну та числову моделі пресового інструменту для екструзії електродних заготовок з використанням наближення рідини Bingham-Rapanastasiou для опису поведінки вуглецевої маси. Проведена верифікація розробленої числової моделі за даними експериментальних досліджень та визначено, що різниця між розрахунковими та експериментально вимірними значеннями температури мундштука преса не перевищує 4–6 %.

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

Поступила (received) 10.03.2016