

8. Edwards, J.R., Choi, J.-L. and Boles, J.A. (2008), “Large-eddy/Reynolds-averaged Navier-corner interaction”, *AIAA J*, vol. 46, no 4. pp. 977–991.
9. Jones, W.P. and Launder, B.E. (1972), “The prediction of laminarization with a 2-equation model of turbulence”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no 15, pp. 301–314.
10. Wilcox, D. C. (1993), *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc, California, USA.
11. Dechko, V.I., Karvatskii, A.Ya, Lokhmanets', Yu.V., Kudin, O.M. and Kolesnikov, O.V. (2012) *Matematychna modeljuvannja ta eksperymentaljni doslidzhennja skladnogo teploobminu pry rosti krystaliv* [Mathematical modeling and experimental studies of complex heat transfer during crystal growth], Instytut stintylyatsiynykh materialiv, Kharkiv, Ukraine.
12. Erlebacher, G., Hussaini, M., Speziale, C. and Zang, T. (1992), “Toward the large eddy simulation of compressible turbulent flows”, *J. Flui. Mech.*, vol. 238, pp. 1550–1585.
13. Grinstein, F., Margolin, L. and Rider, W. (2007), *Implicit Large Eddy Simulation*, Cambridge University Press, New York, USA.
14. Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J. (1995), “A New $k - \epsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows. – Model Development and Validation”, *Computers Fluids*, vol. 24, no. 3, pp. 227–238.
15. Menter, F., Kuntz, M. and Langtry, R. (2003), “Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model”. In: *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4* (Editors K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers), Begell House Inc., pp. 625–632.
16. ANSYS, ANSYS FLUENT. ANSYS CFX, available at: <http://www.ansys.com> (Accessed 11 March 2015).
17. The OpenFOAM Foundation, available at: <http://www.openfoam.org> (Accessed 11 March 2015).

УДК 678.027.37

КАРВАЦЬКИЙ А. Я., д.т.н., проф.; ЛАЗАРЄВ Т. В., м.н.с.; ТИЩЕНКО О.С., магістрант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСТРУДУВАННЯ ЕЛЕКТРОДНИХ ЗАГОТОВОК

Розроблено математичну й числову моделі пресового інструмента для екструдювання електродних заготовок із використанням наближення рідини Bingham-Papanastasiou для описання поведінки коксопекової суміші, що пресується. Проведено верифікацію розробленої числової моделі за даними експериментальних досліджень та встановлено, що відмінність між розрахунковими та експериментальними значеннями температур мундштука не перевищує 4 %.

Ключові слова: коксопекова суміш, електродні заготовки, екструзія, числове моделювання.

© Карвацький А. Я., Лазарєв Т. В., Тищенко О. С., 2015.

Постановка проблеми. Одним із важливих етапів технологічного циклу виготовлення вуглецево-графітової електродної продукції, на якому закладають фізичні властивості майбутніх виробів, є їхнє формування екструдюванням електродної маси крізь мундштук пресового інструмента [1]. Розроблення раціональних регламентів пресового інструмента, що забезпечують вихід якісної продукції, є, безумовно, актуальною задачею.

Електродна або коксопекова маса є композитним матеріалом, що складається з твердого вуглецевого наповнювача і кам'яновугільного або нафтового пеку [2] та має фізичні властивості неньютонівської рідини. Тому загальною науковою проблемою є правильність вибору моделі динамічної в'язкості рідини для моделювання течії електродної маси, що пресується. Аналіз літературних джерел свідчить, що коксопекова суміш відповідає властивостям рідини Bingham [3, 4], тобто залежно від фізичних умов може виявляти себе як тверде тіло й дуже в'язка рідина. Невирішеною частиною проблеми є відсутність адекватної числової моделі екструзії, яка б давала змогу в умовах виробництва відпрацьовувати раціональні регламенти пресування електродних заготовок за умови зміни складу коксопекової суміші й типорозмірів виробів.

Метою статті є створення математичної та числової моделей екструдювання електродних заготовок для розроблення раціональних регламентів пресового інструмента, що забезпечують вихід якісної продукції.

Виклад основного матеріалу. Ідеальна рідина Bingham є неньютонівською в'язко-пластичною рідиною [5]. Її характерною особливістю є те, що до певного критичного внутрішнього напруження вона веде себе як тверде тіло, а після цього починає рухатися як звичайна рідина. Це відбувається внаслідок того, що в'язко-пластична рідина має просторову жорстку внутрішню структуру, яка опирається будь-яким внутрішнім напруженням, меншим за критичне.

Математичну модель екструдуювання електродної маси крізь мундштук утворює система рівнянь нерозривності, руху та енергії для ламінарного руху нестискої ідеальної рідини Bingham:

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

де v – вектор швидкості, м/с; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; ρ – густина, кг/м³; t – час, с; p – тиск, Па;

$\bar{\tau}$ – 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); $\bar{\tau} : \nabla v$ – член, що відповідає дисипації механічної енергії, Вт/м³; (\cdot) – оператор подвійного скалярного добутку; q_v – об'ємна густина джерел теплоти, пов'язана із джоулевою теплою, Вт/м³.

Тензор зсувних напружень за моделлю Bingham:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\tau} = \left(\mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\gamma}|} \right) \dot{\gamma}, \quad |\tau| > \tau_{shear}; \\ \bar{\tau} = 0, \quad |\tau| \leq \tau_{shear}. \end{array} \right. \quad (2)$$

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

$|\dot{\gamma}| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\gamma}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\dot{\gamma} : \dot{\gamma})}$ і $|\tau| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\tau}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\tau : \tau)}$ – другі інваріанти від $\dot{\gamma}$, с⁻¹, і τ , Па; $\dot{\gamma} = \nabla v + v \nabla$ – швидкість деформації, с⁻¹.

Моделю Bingham (2) передбачає співіснування двох областей (пластичної й твердої), що ускладнює її програмну реалізацію. Для подолання цієї проблеми Papadastasiou [6, 7] увів у рівняння (2) експоненціальний множник m :

$$\bar{\tau} = \left(\mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\gamma}|} [1 - \exp(-m|\dot{\gamma}|)] \right) \dot{\gamma}. \quad (3)$$

Співвідношення (3) є справедливим для всіх $|\tau|$ і дає близькі до ідеальної рідини Bingham результати, коли $m \geq 100$, і забезпечує кращу наближеність до реальних в'язко-пластичних матеріалів, коли $m < 100$.

Початковими умовами системи рівнянь (1), (3) є розподіл компонент вектора швидкості, тиску й температури:

$$v_0 = v(x, y, z); \quad p_0 = p(x, y, z); \quad T_0 = T(x, y, z), \quad (4)$$

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

Межові умови об'єднують: для вхідного перерізу мундштука – нормальну швидкість, тиск і температуру (5); для відхідного перерізу – нульові градієнти тиску й температури (6); для бічних стінок мундштука – зсувні напруження та умови конвективного типу для теплового потоку (7):

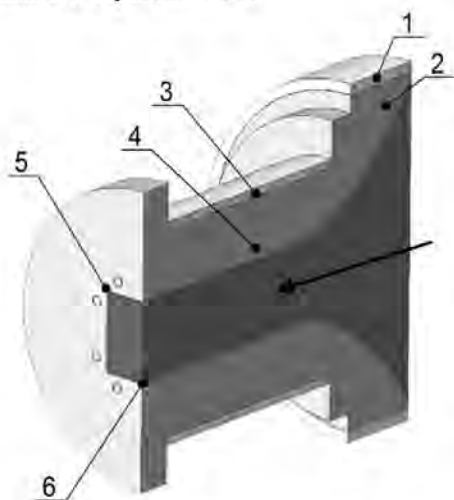
$$n \cdot v = v_{inlet}; \quad p = p_{inlet}; \quad T = T_{inlet}, \quad (5)$$

$$n \cdot \nabla p = 0; \quad n \cdot \nabla T = 0, \quad (6)$$

де n – зовнішня нормаль до поверхні вхідного й відхідного перерізу;

$$\bar{\tau} = \tau_{sh.stress}; \quad n \cdot (-\lambda(T) \nabla T) = \alpha(T - T_p), \quad (7)$$

де $\tau_{sh.stress}$ – тензор зсувних напружень, Па; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м · К); T_p – температура навколишнього середовища, К.



вхідна частина: 1 – індуктор, 2 – робоча поверхня; калібрувальна частина: 3 – індуктор, 4 – робоча поверхня; вихідний торець: 5 – кут, 6 – горизонтальна робоча поверхня; стрілка вказує напрям екструзії

Рис. 1 – Точки експериментального дослідження температур мундштука

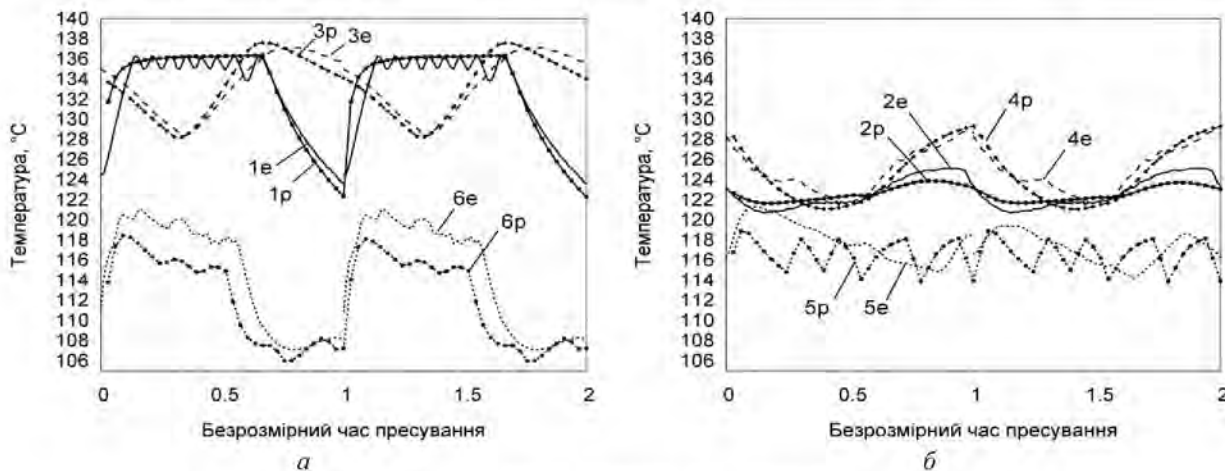
Для розв'язання задачі з мундштуком межові умови задають на поверхні контакту мундштука з доквіллям.

Для числової реалізації математичної моделі (1)–(7) використано відкритий програмний код OpenFOAM [8].

Перевірку адекватності розробленої числової моделі для розрахунків теплогідродинамічного стану обладнання для екструзування електродних заготовок виконували за допомогою експериментальних даних, одержаних на промисловому пресовому устаткуванні (рис. 1). Межові умови задавали на підставі цих же експериментальних даних.

Аналіз результатів (рис. 2) свідчить, що відмінність між розрахунковими та експериментальними даними по температурах в дослідних точках мундштука не перевищує 4 %, що є достатнім для інженерних розрахунків.

Висновки. Використовуючи наближення рідини Bingham-Papanastasiou для опису поведінки коксопекової суміші під час її пресування, розроблено математичну та числову моделі пресового інструмента для екструзування електродних заготовок. Здійснено верифікацію розробленої числової моделі за даними експериментальних досліджень та встановлено, що відмінність між розрахунковими та експериментальними значеннями температур мундштука не перевищує 4 %, що є прийнятним для інженерних розрахунків раціональних регламентів експлуатації пресового інструмента.



номери точок відповідають рис. 1, індекси e і p – експерименту й розрахунку

Рис. 2 – Порівняння зміння температури в контрольних точках мундштука з часом для двох послідовних кампаній

Перспективи подальших досліджень. Розроблення ресурсоенергозберігаючих регламентів пресового інструмента для екструзування електродних заготовок, що забезпечують вихід якісної продукції.

Список використаної літератури

1. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е. Ф. Чалых. – М. : Металлургия, 1972. – 432 с.

2. Теоретические и экспериментальные исследования теплоэлектрического и механического состояния высокотемпературных агрегатов / А. Я. Карватский, Е. Н. Панов, С. В. Кутузов [и др.]. – К. : НТУУ «КПИ», 2012. – 358 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.
4. 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.
5. *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.
6. *Papanastasiou T. C.* Flow of materials with yield / T. C. Papanastasiou // J. Rheology. – 1987. – Vol. 31. – P. 385–404.
7. 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.
8. *The OpenFOAM Foundation*. – Режим доступу : <http://www.openfoam.org> (дата звернення 11.03.15).

Надійшла до редакції 05.03.2015

Karvatskii A. Ya., D. Sc., Lazariev T. V., Tyshchenko O. S.,

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRODE WORKPIECES EXTRUSION

One of the important stages of technological cycle of carbon-graphite electrode production, on which the physical properties of the future products are formulated, is their formation with the help of electrode mass extrusion through the press instrument snout. The development of the rational regulations of the press instrument, which provide the conditions of manufacturing of the qualitative products with the usage of mathematical modeling, is undoubtedly the task of high actuality.

Electrode or coke-pitchy mass is a composite material, which consists of the solid carbon filler and charcoal or petroleum pitch and possesses the properties of non-Newtonian liquid. That is why the general scientific problem is the correct choice of the model of dynamic liquid for the electrode mass flow modeling, which is pressed. The analysis of the literature sources proves that coke mixture corresponds the properties of the Bingham viscous liquid and depending on the physical conditions it can perform as a solid matter and viscous liquid.

The unsolved part of the scientific problem is the creation of the adequate numerical extrusion model, which would enable to follow the rational regulations of electrode workpieces pressed in industrial conditions when the content of coke pitch mixture and product sizes are changed.

The perfect Bingham liquid is a non-Newtonian viscous liquid during flowing of which the pressure depends on the velocity gradient. The characteristic feature of the viscous liquid is that it performs as a solid matter until it reaches certain critical internal pressure. After exceeding of the internal pressure over critical value it starts moving as common liquid.

The mathematical model of extrusion process of electrode mass through the snout is performed as an equation system, which includes the equations of indissolubility, motion and energy for the laminar movement of the perfect incompressible Bingham liquid.

For the numerical realization of the mathematical model of the extrusion process free open program code OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) was used.

The check of the adequacy of the numerical model for the thermal and hydrodynamic equipment state calculations for the extrusion of electrode workpieces is done with the help of the experimental data, received from the industrial press equipment. The analysis of compared results showed that the difference between calculated and experimental temperature data in the researched spots of the snout doesn't exceed 4%, what is enough for engineering calculations in order to develop the rational regulations of the press instrument operation.

Keywords: *specific, professional duties, mechanical engineer, chemical production.*

References

1. Chalykh, E.F. (1972), *Tekhnologiya i oborudovanie elektrodnykh i elektrouholnykh predpriyatiy* [Technology and equipment electrode and electric carbonic enterprises], Metallurhiya, Moskva, Russia.
2. Karvatskii, A.Ya., Panov, E.N., Kutuzov, S.V., Shilovich, I.L., Vasil'chenko, G.N. and Leleka, S.V. (2012), *Teoreticheskie i jeksperimental'nye issledovanija teplojelektricheskogo i mehanicheskogo sostojanija vysokotemperaturnyh agregatov* [Theoretical and experimental studies of heat electrical and mechanical condition of high-temperature units], NTUU "KPI", Kiev, Ukraine.

3. Vershinina, E.P., Gil'debrandt, E.M. and Frizorger, V.K. (2011), "Plastic properties of homogenized coke-pitch compositions", *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, vol. 52, no. 3, pp. 205–208.
4. Hlatshwayo, S.R., Focke, W.W., Ramjee, S., Rand, B. and Manyala N. (2013), "Rheological behavior and thermal properties of pitch/poly(vinyl chloride) blends", *Carbon*, vol. 51, pp. 64–71.
5. Huilgol, R.R., Mena, B. and Piau, J.M. (2002), "Finite stopping time problems and rheometry of Bingham fluids", *J. Non-Newtonian Fluid Mech*, vol. 102, pp. 97–107.
6. Papanastasiou, T.C. (1987), "Flow of materials with yield", *J. Rheology*, vol. 31, pp. 385–404.
7. Chatzimina, M., Georgiou, G.C., Argyropaidas, I., Mitsoulis, E. and Huilgol R.R. (2005), "Cessation of Couette and Poiseuille flows of a Bingham plastic and finite stopping time", *J. Non-Newtonian Fluid Mech*, vol. 129, pp. 117–127.
8. The OpenFOAM Foundation, available at: <http://www.openfoam.org> (Accessed 11 March 2015).

УДК 678.057

КАЗАК І. О., к.п.н., ас.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

СИСТЕМНО-ФАКТОРНИЙ ПІДХІД У ПІДГОТОВЦІ ІНЖЕНЕРІВ-МЕХАНІКІВ ХІМІЧНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

Розглянуто системно-факторний підхід для інженерів-механіків за напрямом «Машинобудування» спеціальності «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів», який реалізується цілеспрямовано для посилення їхнього професійного рівня за фахом.

Ключові слова: системно-факторний підхід, інженер-механік, обладнання, хімічні виробництва і підприємства будівельних матеріалів, напрям машинобудування, завдання, фактори, системно-факторна модель.

© Казак І. О., 2015.

Постановка проблеми. Вищі навчальні заклади на сучасному етапі розвитку України зобов'язані розширити цілі підготовки фахівців різних галузей до необхідності формування особистостей, які спрямовані на ґрунтовне, доцільне, креативне вирішення професійних завдань, можуть виконувати посадові обов'язки в мінливих умовах організації праці, прагнуть до самовдосконалення і професійного зростання.

Реалізація поставлених цілей суттєво ускладнена, по-перше, розбудовою країни і переходом, зокрема, машинобудівельних об'єктів і хімічних виробництв на нові форми власності, встановленням ринкових відносин між підприємствами-виробниками, державою і споживачами, по-друге, орієнтуванням в економічних і політичних реформах на вимоги ЄС, по-третє, запровадженням у національну систему освіти положень Болонської декларації, за якими приймається двоступенева система підготовки, скорочується кількість аудиторних годин на користь годин самостійної роботи, підвищується значення практичної підготовки.

За таких обставин традиційна система підготовки усередненого фахівця перестає задовольняти вимогам до випускників вищої школи: вони опиняються на ринку праці з досвідним багажем, який вимагає суттєвих часових затрат для посилення професійної мотивації, пристосування до конкретних посадових обов'язків, набуття умінь з використання й проектування удосконалених засобів виробництва. Для роботодавця такий фахівець замість того, щоб забезпечувати прибуток, виявляється витратним. Це негативно впливає на вирішення питань працевлаштування випускників і свідчить про неефективне використання державних коштів в освітній галузі.

Таким чином, динаміка процесів на хімічних виробництвах вимагає обґрунтування нових підходів, програм до професійної підготовки майбутніх інженерів-механіків. Ці наукові і практичні новачки мають впливати на всю систему професійної підготовки, поширюючись, насамперед, на професійно-орієнтовані навчальні дисципліни, провідною серед яких для напряму «Машинобудування» спеціальності «Обладнання хімічних виробництв і будівельних матеріалів» є дисципліна «Процеси, апарати і машини галузі».

Аналіз попередніх досліджень. Проблема підготовки майбутніх фахівців технічного профілю була і є актуальною в дослідженнях вітчизняних і зарубіжних науковців. Це підтверджують дослідження: теоретичних положень професійної діяльності інженера та особливостей його підготовки, наведені в працях С. Артюха, Н. Брюханової, О. Коваленко, А. Мелецінека; сучасних технологій у професійній підготовці майбутніх фахівців технічного профілю – у працях О. Падалки, С. Сисоевої; методик навчання технічних дисциплін (Н. Брюханова, В. Богданов, К. Гомоюнов, О. Коваленко).