

РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙ В ДІАПАЗОНІ ТЕМПЕРАТУРИ 120-170 °С

А. Я. КАРВАЦЬКИЙ^{1*}, Т. В. ЛАЗАРЄВ², Д. Г. ШВАЧКО¹, О. С. ТИЩЕНКО¹

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

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

*email: admin@rst.kpi.ua

АНОТАЦІЯ Розглянуто різні способи визначення ефективної динамічної в'язкості вуглецевих композитних матеріалів на основі пеку як зв'язувального та термообробленої вуглецевої сировини в якості наповнювача. Запропоновано методику та розроблено дослідну установку, що дає змогу проводити вимірювання в'язкості в широкому діапазоні температури. Визначено температурні залежності динамічної в'язкості різних за складом вуглецевих композицій.

Ключові слова: в'язкість, реологічні властивості, в'язко-пластичний матеріал, рідина Bingham, вуглецева композиція, електродна маса.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CARBON COMPOSITION WITHIN TEMPERATURE RANG 120-170 °C

A. KARVATSKII^{1*}, T. LAZARIEV², D. SHVACHKO¹, O. TYSHCHENKO¹

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

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

ABSTRACT Carbon production is widely used in chemical and metallurgic industries. Particularly, electrode mass is used in forming of permanent self baking electrode (Soderberg's electrode) in electrical and thermal furnaces of ferrous and non-ferrous metallurgy. Elements of electric furnaces constructions, for instance, electrolysis units, are made of carbon blocks. Manufacturing of such class of products includes multistage technological process and during each stage monolithic product is formed out of powder filler and liquid binder. The given materials have unique physical properties: high thermal conductivity, thermal stress resistance, chemical inertia. That is the reason why it is so widely used in industry. Different methods of measurement of rheological properties of carbon composites were discussed, particularly, it concerns non-Newton liquids, such as Bingham liquid. The method and developed investigation equipment enables us to measure viscosity within wide temperature range. The method is based on locating the spherical body in viscous environment under definite isothermal temperature. It's possible to measure effective dynamic viscosity up to 107 Pa·s within temperature range up to 800 °C. Estimated error of experimental research does not exceed 10–15%. Having made the research, thermal dependence on effective factor of dynamic viscosity within temperature range 120–170 °C was found out. It concerns carbon composite materials where coke is used as a binder and thermally processed carbon material are used as a filler.

Keywords: viscosity, rheological properties, visco-plastic material, Bingham liquid, carbon composition, electrode mass

Вступ

Вуглецева продукція широко застосовується в хімічній та металургійній галузях промисловості. Зокрема, електродна маса використовується для формування неперервного самовипалювального електроду (електрод Содерберга) в електротермічних печах чорної та кольорової металургії. Елементи конструкцій електричних печей, наприклад, алюмінієвих електролізерів, виготовляються з вуглецевих блоків. Виробництво даного класу продукції передбачає багатоступінчастий технологічний процес, на різних етапах якого із сипкого наповнювача та рідкого зв'язувального формується монолітний виріб. Дані матеріали мають унікальні фізичні властивості: високу електропровідність, здатність витримувати значні термічні навантаження, хімічну інертність, що обумовило їх широке використання в промисловості.

Для отримання монолітного вуглецевого блоку

термооброблений та подрібнений наповнювач (антрацит, кокс) змішують з нафтовим чи кам'яновугільним пеком. Цей процес відбувається в спеціальних змішувачах за температури вищої ніж температура розм'якшення пеку (160–170 °С). Одержана вуглецева маса являє собою композитний матеріал, який проявляє в'язко-пластичні властивості, завдяки чому на етапі формування є можливим надання йому необхідної форми та геометричних розмірів. Подальше високотемпературне оброблення призводить до коксування зв'язувального та утворення монолітної структури виробу [1].

Ціль роботи

Склад та будова вуглецевого композиту обумовлює його в'язко-пластичні властивості, що залежать від температури. Тому загально науковою проблемою є визначення зв'язку між властивостями компонентів та ефективними властивостями їх суміші

під час нагрівання та формування. Невирішеною частиною наукової проблеми є експериментальне визначення ефективної динамічної в'язкості вуглецевої маси в широкому діапазоні температур, що відповідають технологічним умовам виробництва вуглевмісної продукції.

Метою даної статті є створення експериментальної установки та визначення ефективної динамічної в'язкості різних за складом вуглецевих мас у широкому діапазоні температур

Виклад основного матеріалу

Під час формування вуглецевої маси, матеріал проявляє неньютонівські властивості, що можуть бути описані моделлю в'язко-пластичної рідини Bingham [2, 3]. Для в'язко-пластичної рідини характерною особливістю є те, що вона до досягнення деякого критичного внутрішнього напруження веде себе як тверде тіло і тільки за умови перевищення значення внутрішнього напруження деякої критичної величини 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 τ_{shear} . Для двовимірного випадку зсувного руху модель в'язкості Bingham має вигляд:

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

де $\boldsymbol{\tau}$ – вектор напруження зсуву, Па; τ_{shear} – критичне напруження зсуву (статичне напруження зсуву), Па; μ_{eff} – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ – швидкість деформації, с⁻¹.

Робочий діапазон температури, що використовується на етапах змішування та формування вуглевмісної маси, становить 120–170 °С. Відомо, що даний матеріал має високе значення коефіцієнта ефективної динамічної в'язкості, який знижуються з підвищенням температури [2]. Тому особливий інтерес представляють дослідження саме в цьому діапазоні.

Серед основних способів визначення динамічної в'язкості композитних матеріалів слід відмітити методи з використанням циліндричного ротаційного віскозиметра та клас методів із зануренням у матеріал певного геометричного об'єкту.

В роботах [4–6] досліджено температурні залежності зсувних напружень від швидкості деформації для коксопекової суміші в діапазоні 160–220 °С. Автори досліджують суміш, що складається з 55 % пеку та 45 % коксу, різної фракції та використовують коаксіальний циліндричний віскозиметр. В результаті встановлено, що для даного складу вуглецевої маси та діапазону температури

критичне напруження зсуву і ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості складають відповідно: $\tau_{\text{shear}} = 2-4$ Па; $\mu_{\text{eff}} = 2-18$ Па·с. Отримані дані свідчать, що високий вміст зв'язувального за температури вищої за 160 °С, призводять до значного зниження динамічної в'язкості матеріалу.

В роботі [7, 8] представлено методику визначення реологічних властивостей вуглецевих композицій, що ґрунтується на екструзії матеріалу на лабораторному пресі. Дослідження проведені за температури 120 °С для сумішей, які містять 50, 45, 40, 38 % зв'язувального. Отримані результати показують, що досліджуваний матеріал має $\tau_{\text{shear}} = (2,1-7,5) \cdot 10^5$ Па; $\mu_{\text{eff}} = (2,1-20) \cdot 10^5$ Па·с, при цьому найвищі значення в'язкості та напруження зсуву характерні для низького вмісту наповнювача.

В [9] для дослідження критичного напруження зсуву застосовується метод занурення конуса. Розглянуто електродну масу з вмістом зв'язувального від 39,6 % до 30 % при ізостатичній температурі 110 °С. Показано, що становить $\tau_{\text{shear}} = (4,5-32) \cdot 10^5$ Па.

Автори [10] досліджували ефективну динамічну в'язкість за допомогою ротаційного лопатевого віскозиметра для електродної маси (19 % зв'язувального) в діапазоні температури 100–260 °С. Визначено, що $\mu_{\text{eff}} = (0,22-2,14) \cdot 10^4$ Па·с.

Представлені літературні дані в певній мірі корелюються між собою, проте не є вичерпними, тому інтерес представляє розроблення методики та проведення експериментальних досліджень для вуглецевих композитів, які використовуються для виготовлення подових блоків та електродів Содерберга.

Враховуючи значну динамічну в'язкість вуглецевої маси в робочому діапазоні температури змішування та формування виробів, застосування методу занурення геометричного об'єкту є раціональним способом для визначення фізичних властивостей даних матеріалів.

Відомо, що під час руху тіла у в'язкому середовищі виникають сили опору. За невеликої швидкості, коли за тілом не формуються турбулентні вихори, сила опору зумовлена лише в'язкістю середовища. У цьому випадку прилегли до тіла шари рідини рухаються разом з об'єктом, що призводить до утворення сил, які гальмують відносний рух тіла та середовища. Для тіл сферичної форми сила опору визначається за законом Стокса:

$$\mathbf{F} = 3\mu_{\text{eff}} D \mathbf{u}, \quad (2)$$

де D – діаметр сфери, м; \mathbf{u} – вектор швидкості руху середовища, м/с.

На сферу, що рухається, діють три сили: сила тяжіння, сила Архімеда та сила опору. Перші дві є незмінними, а сила опору прямо пропорційна швидкості, тому на початковому етапі занурення сфери в середовище, вона менша за силу тяжіння, що

призводить до рівноприскороного руху кулі. Проте, через певний час настає момент рівноваги всіх трьох сил, тоді сфера рухається зі сталою швидкістю, яка визначається співвідношенням:

$$V = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\mu_{\text{eff}}} g D^2, \quad (3)$$

де ρ_s – густина сфери, кг/м³; ρ_f – густина середовища, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Для випадку усталеного занурення сфери у в'язке середовище $u_z = V_z = h / \tau$, де h – відстань (м), що проходить сфера за час τ (с), u_z – вертикальна компонента вектора швидкості середовища, м/с; V_z – вертикальна компонента вектора швидкості сфери, м/с. Тоді

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_f)}{h} g_z D^2 \tau, \quad (4)$$

де g_z – вертикальна компонента вектора прискорення вільного падіння, м/с².

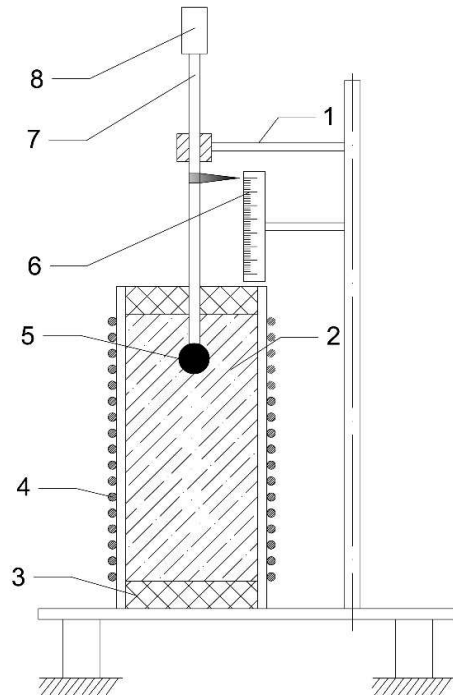
Отже коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості розраховується за виразом (4), якщо для відомих значень густини середовища та матеріалу сфери за результатами експериментальних вимірів визначити час τ , за який сфера діаметром D проходить відстань h за умови сталої швидкості кулі.

З використанням описаної методики визначення динамічної в'язкості вуглецевої маси розроблено експериментальну установку (рис. 1), що дає змогу вимірювати коефіцієнт динамічної в'язкості до 10⁷ Па·с в діапазоні температури до 800 °С. Оцінена похибка експериментальних досліджень не перевищує 10–15 %.

Установка являє собою теплоізолюваний циліндр діаметром 120 мм та довжиною 500 мм, з регульованим електричним периферійним нагрівником, що заповнюється досліджуваною масою. У циліндр опускається гладка сталеві куля діаметром 12 мм з'єднана з навантажувальною штангою для розміщення додаткової ваги. Реєструючи час та переміщення індикатора занурення кулі, визначається момент встановлення сталої швидкості та її значення. Коефіцієнт динамічної в'язкості розраховується за формулою (4).

Для проведення досліджень на розробленій експериментальній установці обрано три види вуглецевого композиційного матеріалу: вуглецева маса № 1 – 22±2 % зв'язувального; вуглецева маса № 2 – 27,6±2 % зв'язувального; електродна маса – 25±3 % зв'язувального. Склад досліджуваних зразків наведено в табл. 1.

Експериментальні дослідження проведені для діапазону температури від 110 °С до 190 °С. Результати вимірів коефіцієнта динамічної в'язкості та апроксимуючі функції представлені на рис. 2-4.



1 – штатив; 2 – досліджуваний матеріал; 3 – теплоізоляція; 4 – периферійний нагрівник; 5 – сталеві куля; 6 – індикатор переміщення; 7 – навантажувальна штанга; 8 – додаткова вага

Рис. 1 – Експериментальна установка для вимірювання коефіцієнта динамічної в'язкості вуглецевих композитних матеріалів

Таблиця 1 – Склад досліджуваних зразків вуглецевої маси

Зразок маси	Вміст зв'язувального, %	Наповнювач	
		Складові наповнювача	Вміст, %
Вуглецева маса № 1	22±2	Термооброблений антрацит, фракція (0–6) мм	70
		Графітована вуглецева сировина, фракція (0–6) мм	30
Вуглецева маса № 2	27,6±2	Графітована вуглецева сировина, фракція (0–10) мм	70
		Графітована вуглецева сировина, фракція (0–0,05) мм	30
Електродна маса	25±3	Термооброблений антрацит, фракція (0–16) мм	70
		Термооброблена вуглецеві сировина, фракція (0–0,5) мм	30

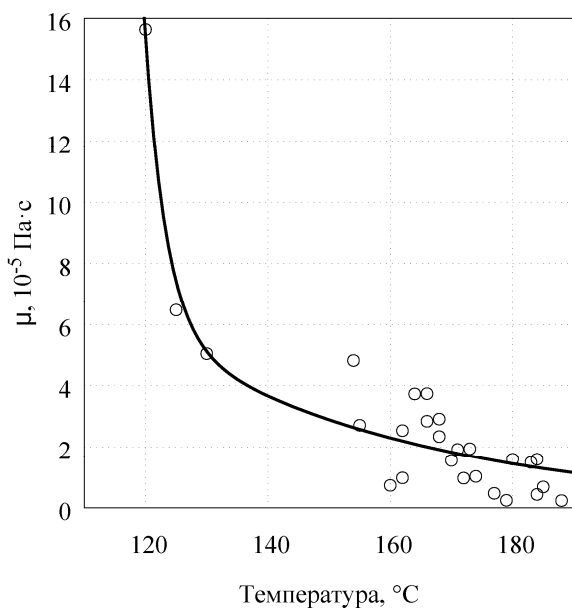


Рис. 2 – Температурна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості для вуглецевої маси № 1, $R^2 = 0,79$

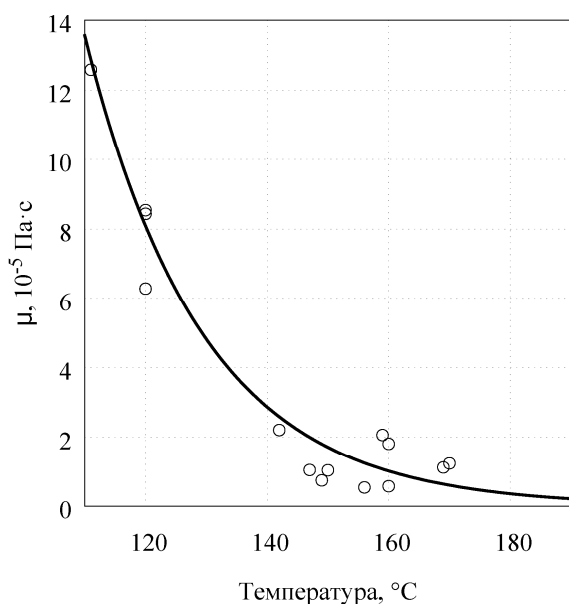


Рис. 3 – Температурна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості для вуглецевої маси № 2, $R^2 = 0,9$

Визначено, що в діапазоні температури від 120 °С до 170 °С коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості для різних вуглецевих мас складає: $(15,37-1,826) \cdot 10^5$ Па·с для вуглецевої маси № 1; $(8,085-0,609) \cdot 10^5$ Па·с для вуглецевої маси № 2; $(1,18-0,0518) \cdot 10^5$ Па·с для електродної маси. Отримані залежності мають експоненціальний характер, що знижується зі зростанням температури.

Найбільш суттєвий вплив на в'язкість має вміст зв'язувального в масі. Так, завдяки підвищенню

масової частки пеку в суміші на 5 %, в'язкість знижується майже вдвічі. Окрім того, суттєвим є вплив наявності в рецептурі крупної фракції більшої за 10 мм, що відзначається для електродної маси.

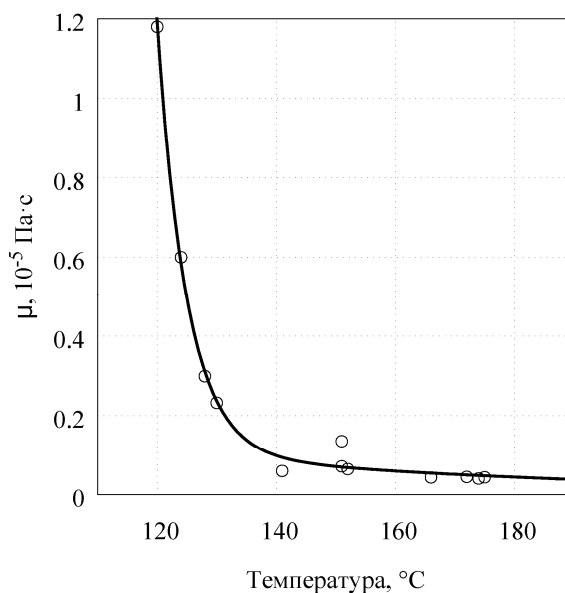


Рис. 4 – Температурна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості для електродної маси, $R^2 = 0,99$

Висновки

В роботі розглянуто різні методики вимірювання реологічних властивостей вуглецевої композиції, що відноситься до неньютонівських рідин, зокрема до рідини Bingham. Запропоновано методику та розроблено дослідну установку, що дає змогу проводити вимірювання в'язкості в широкому діапазоні температури. Спосіб ґрунтується на зануренні сферичного тіла у в'язке середовище, що знаходиться за певної ізотермічної температури. Проведено дослідження та визначено температурні залежності ефективного коефіцієнта динамічної в'язкості вуглецевих композитних матеріалів на основі пеку як зв'язувального та термообробленої вуглецевої сировини в якості наповнювача.

Список літератури

- 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 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.
- 3 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», Серія: Новые

- решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 31-37. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.
- 4 **Kravtsova, E. D.**, Plastic properties of pitch-coke compositions / **E. D. Kravtsova, E. M. Gil'debrandt, V. K. Frizorger** // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2009. – № 50 (2). – P. 114-117. – doi:10.3103/S1067821209020072
 - 5 **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.
 - 6 **Gildebrandt, E. M.** The Viscosity of Pitches and Coke Pitch Compositions / **E. M. Gildebrandt, V. K. Frizorger, E. P. Vershinina, E. D. Kravtsova** // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2008. – Vol. 49, Issue 6. – P. 456-458. – doi:10.3103/S1067821208060047.
 - 7 **Bhatia, G.** Rheological properties of carbon mixes using a capillary rheometer / **G. Bhatia** // *Carbon*. – 1973. – Vol. 11, Issue 5. – P. 437-440. – doi:10.1016/0008-6223(73)90301-1.
 - 8 **Bhatia, G.** Rheological properties of carbon mixes using a capillary rheometer-IV / **G. Bhatia** // *Carbon*. – 1976. – Vol. 14, Issue 6. – P. 319-321. – doi:10.1016/0008-6223(76)90003-8.
 - 9 **Фіалков, А. С.** Процессы и аппараты производства порошковых углеродистых материалов / **А. С. Фіалков**. – М.: Аспект Пресс. – 2008. – 687 с. ISBN 978-5-7567-0490-7.
 - 10 **Шуваев, Э. А.** О коэффициенте внутреннего трения электродных масс в процессе обжига / **Э. А. Шуваев, Г.В. Дмитриев** // *Сборник трудов челябинского электрометаллургического комбината*. – 1971. – № 3. – С. 195-199.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Sang-Min Lee, Dong-Su Kang and 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 **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.
- 3 **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*, 2016, **12**, 31-37. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.
- 4 **Kravtsova, E. D., Gil'debrandt, E. M., Frizorger, V. K.** Plastic properties of pitch-coke compositions. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2009 **50**(2), 114-117. http://doi.org/10.3103/S1067821209020072.
- 5 **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.
- 6 **Gildebrandt, E. M., Frizorger V. K., Vershinina E. P., Kravtsova E. D.** The Viscosity of Pitches and Coke Pitch Compositions. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2008, **49**(6), 456-458, doi:10.3103/S1067821208060047.
- 7 **Bhatia, G.** Rheological properties of carbon mixes using a capillary rheometer. *Carbon*, 1973, **11**(5), 437-440. doi:10.1016/0008-6223(73)90301-1.
- 8 **Bhatia, G.** Rheological properties of carbon mixes using a capillary rheometer-IV. *Carbon*, 1976, **14**(6), 319-321, doi:10.1016/0008-6223(76)90003-8.
- 9 **Fialkov, A. S.** Processy i apparaty proizvodstva poroshkovykh uglegrafitovykh materialov. M: Aspekt Press, 2008, 687 p., ISBN 978-5-7567-0490-7.
- 10 **Shuvaev, Je. A., Dmitriev, G. V.** O koefefficente vnutrennego trenija jelektroodnykh mass v processe obzhiga. *Sbornik trudov cheljabinskogo jelektrometallurgicheskogo kombinata*, 1971, **3**, 195-199.

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.

Лазарєв 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.

Швачко Денис Григорович – завідувач лабораторії, кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: max_shmag@ukr.net.

Denis Shvachko – head of the laboratory, Department of chemical, polymer and silicate engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: max_shmag@ukr.net.

Тищенко Олена Сергіївна – магістр, кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: missislen0k@yandex.ua.

Olena Tyshchenko – magister, Department of chemical, polymer and silicate engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: missislen0k@yandex.ua.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Карвацький, А. Я. Реологічні властивості вуглецевих композицій в діапазоні температури 120-170 °С / **А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарев, Д. Г. Швачко, О. С. Тищенко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 74-79. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.11.

Please cite this article as:

Karvatskii, A., Lazarev, T., Shvachko, D., Tyshchenko, O. Rheological properties of carbon composition within temperature rang 120-170 °C. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18 (1190)**, 74-79, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.11.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Карвацкий А. Я. Реологические свойства углеродных композиций в диапазоне температуры 120-170 °С / **А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев, Д. Г. Швачко, Е. С. Тищенко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 74-79. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.11.

АННОТАЦИЯ Рассмотрено различные способы определения эффективной динамической вязкости углеродных композитных материалов на основе пека как связующего и термообработанного углеродного сырья в качестве наполнителя. Предложена методика и разработана исследовательская установка, которая позволяет проводить измерение вязкости в широком диапазоне температуры. Определены температурные зависимости разных по составу углеродных композиций.

Ключевые слова: вязкость, реологические свойства, вязко-пластический материал, жидкость Bingham, углеродная композиция, электродная масса.

Поступила (received) 21.04.2016