

УДК 514.18:678.5.059:535.024:620.168:678.02:678.5.059

**Колосова О.П.**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*  
**ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ  
 ПРОСОЧЕННЯ ОРІЄНТОВАНИХ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ РІДКИМИ  
 ПОЛІМЕРНИМИ ЗВ'ЯЗУЮЧИМИ**

*Розглянуто приклади практичної адаптації методології геометричного і математичного моделювання для детермінації параметрів технологічного процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів розчинами полімерних зв'язуючих. Визначено комплекс структурних характеристик геометричної моделі орієнтованих волокнистих полімерних композитів, а саме пористість, питому внутрішню поверхню та ефективний (гідрравлічний) капілярний радіус. Отримано задовільне співпадіння теоретичних і практичних результатів досліджень. На основі мікроструктурного аналізу шліфів якісно встановлена ефективність застосування ультразвукової обробки при одержанні композитів. Досліджено, що в обробленому низькочастотним ультразвуком затверділому композиті практично відсутні сторонні вclusions між волокнами, а самі волокна розподілені практично регулярно. Отримані результати дають можливість оптимізувати кінетичні параметри процесу просочення та конструктивні параметри просочувального обладнання.*

**Ключові слова:** геом етричне моделювання, математичне моделювання, модель, структура, прогнозування, процес, технологія, просочення, параметр, полімер, зв'язуюче, волокно, композит

**Е.П.Колосова**

**ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
 ПРОПИТКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ЖИДКИМИ  
 ПОЛИМЕРНЫМИ СВЯЗУЮЩИМИ**

*Рассмотрены примеры практической адаптации методологии геометрического и математического моделирования для детерминации параметров технологического процесса пропитки ориентированных волокнистых наполнителей растворами полимерных связующих. Определен комплекс структурных характеристик геометрической модели ориентированных волокнистых полимерных композитов, а именно пористость, удельная внутренняя поверхность и эффективный (гидравлический) капиллярный радиус. Получено удовлетворительное совпадение теоретических и практических результатов исследований. На основе микроструктурного анализа шлифов качественно установлено применение ультразвуковой обработки при получении композитов. Установлено, что в обработанном низкочастотным ультразвуком затвердевшем композите практически отсутствуют посторонние включения между волокнами, а сами волокна распределены практически регулярно. Полученные результаты дают возможность оптимизировать кинетические параметры процесса пропитки и конструктивные параметры пропиточного оборудования.*

**Ключевые слова:** геометрическое моделирование, математическое моделирование, модель, структура, прогнозирование, процесс, технология, пропитки, параметр, полимер, связующее, волокно, композит

**E.P. Kolosova**

**GEOMETRIC AND MATHEMATICAL MODELING OF THE IMPREGNATION  
 PROCESS OF ORIENTED FIBROUS FILLERS BY LIQUID POLYMERIC BINDERS**

*The relevance and practical examples of adaptation of the methodology of geometric and mathematical modeling for determination of process parameters of impregnation of oriented fibrous fillers by solutions of polymeric binders is considered. The complex of the structural characteristics of the geometric model of oriented fibrous polymeric composites, namely porosity and specific internal surface of the effective (hydraulic) capillary radius is determined. A satisfactory agreement between the theoretical and practical research results is obtained. On the basis of microstructural analysis of thin sections is qualitatively established the effectiveness of ultrasonic treatment for formation of composites.*

*It is found that in low frequency ultrasonic treated hardened composite there is almost no foreign inclusions between the fibers, and the fibers themselves are distributed substantially regularly. The results obtained make it possible to optimize the kinetic parameters of the impregnation process and design parameters of the impregnation equipment.*

**Keywords:** geometric modeling, mathematical modeling, model, structure, prediction, process, technology impregnation, parameter, polymer, binder, fiber, composite.

**Постановка проблеми.** Просочувально-сушильне обладнання широко застосовується при виготовленні реактопластичних армованих полімерних композиційних матеріалів, і, зокрема, препрегів [1–4]. Оскільки основними структурними елементами будь-якого виду вищезазначеного обладнання є вузли для просочування і наступного сушіння, виникає необхідність прогнозування параметрів технологічного процесу просочення. Останній в основному зумовлює продуктивність просочувальних ліній, а також якість полімерної продукції, що одержується.

Просочування здійснюють для надання висушеним матеріалам, що просочилися, певних властивостей (міцності, волого- і вогнестійкості, пружності, забарвлення і т.п.). Власне процес просочування включає в себе наступні основні стадії [1–4]: нанесення просочувального складу на

поверхню армуючого волокнистого наповнювача (ВН) чи занурення ВН у просочувальну ванну; проникнення просочувального складу в макропори ВН; дифузію просочувального складу до поверхні волокон; дифузію просочувального складу всередину волокон.

Проте вказані стадії не мають чітких кордонів, оскільки реальні ВН володіють неоднорідною структурою. До того ж на різних ділянках вищевказані стадії просочування протікають з різною швидкістю, що нерідко приводить до їх поєднання.

Не зважаючи на досягнуті успіхи у формуванні, переробці, а також одержанні армованих композитів, конструювання намотувальних виробів на базі орієнтованих і рулонних ВН і полімерних зв'язуючих (ПЗ), а також процеси та обладнання для їх виробництва до цих пір у більшості випадків базуються на евристичних началах і особистому досвіді розробників. Це призводить до нераціональних, і тим більше до нерентабельних конструкцій та виробів з таких композитів.

Виходячи з вищенаведеного, використання геометричного та математичного моделювання при проектуванні технологічного процесу просочування уявляється головною ланкою в підвищенні продуктивності проектування й техніко-економічних показників будь-якого виду обладнання цього типу загалом. Тому необхідно дослідити цю проблему більш детально.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У загальному випадку структуру армованого полімерного композиту уявляють як капілярно-пористе середовище (тіло) [5]. Рушійними силами процесу просочування є саме капілярне всмоктування [5], а також сили, що впливають на розчин ПЗ і прискорюють його рух усередину ВН, або орієнтованого чи односпрямованого волокнистого наповнювача (ОВН).

Цим силам перешкоджають опір течії розчину ПЗ у порах ВН і поверхневе натягнення розчину ПЗ. Оскільки просочування ВН розчином ПЗ можна розглядати як витіснення повітря з пор і капілярів ВН та заміну його розчином ПЗ [1], цей процес можна класифікувати як один з прикладів капілярних явищ [5].

Тривалість перебування ВН в просочувальному розчині (час просочування) визначається швидкістю руху полотна і розмірами просочувальної ємності (ванни). У роботі [1] пропонується опис процесу просочування ВН рідким ПЗ проводити за допомогою відомого рівняння Дарсі (1):

$$V = \sqrt{S \left( \frac{2k_n \varepsilon_n}{\eta} \right) \frac{P}{t}}, \quad (1)$$

де  $V$  – швидкість просочування (або збільшення вмісту ПЗ);  $S$  – площа поверхні ВН, що просочується;  $k_n$  – експериментальна константа;  $\varepsilon_n$  – пористість ВН;  $\eta$  – в'язкість розчину ПЗ;  $P$  – тиск при просочуванні;  $t$  – час просочування.

Рівняння (1), зокрема, показує, що для збільшення вмісту ПЗ (або швидкості  $V$ ) у структурі ВН вдвічі необхідно в чотири рази збільшити час перебування ВН у розчині ПЗ. У той же час вміст ПЗ (або швидкість  $V$ ) є обернено пропорційним в'язкості розчину ПЗ, яка, як відомо, залежить від температури просочування [1].

Відомо [6–8], що базовим питанням при детермінуванні параметрів кінетичного рівняння процесу просочування є коректне знаходження характеристик геометричної (фізичної) моделі структури ОВН, на основі якої отримують це рівняння, а саме пористості  $\varepsilon$ , питомої внутрішньої поверхні  $S_{int}$  та ефективного (гідравлічного) капілярного радіусу  $r_{ef}$  того чи іншого типу використовуюваного для просочування типу ОВН.

Було досліджено, що при побудові геометричної (фізичної) моделі структури ОВН є доцільним використання структурного підходу (а саме мікροструктурного аналізу перетину композиту на основі ОВН) для визначення шуканих параметрів, зокрема, ефективного (гідравлічного) капілярного радіусу  $r_{ef}$  [8].

При цьому найбільш адекватним уявленням структури ОВН є структура капілярно-пористого тіла. Остання складається із системи паралельно-звивистих капілярів різних радіусів, яку для випадкової (стохастичної) величини їх розміщення можна адекватно описати за допомогою функції розподілу пор радіусу  $\rho$  по розмірах  $\varphi(\rho)$  [5].

Відповідно до використовуюваного підходу в роботі [8], після затвердіння просоченого ОВН за визначеного зусилля натягнення ОВН при просочуванні роблять мікрошліф його перетину у поперечному до волокон напрямі. Далі у перетині мікрошліфу експериментально досліджують розподіл довжин екстхорд волокон (відстаней між суміжними волокнами), або функцію розподілу

$\varphi(\rho) = G(\ell)$  випадкових пор за розмірами  $\ell$ . При цьому екстхорди являють у нашому випадку еквівалентний (ефективний) діаметр (чи подвійний радіус  $r_{ef}$ ) пор, причому довжини екстхорд носять випадковий характер.

Детермінацію теоретичної кривої розподілу  $\varphi(\rho) = G(\ell)$  проводять за умови найкращого наближення (тобто мінімального відхилення) теоретичної кривої розподілу до експериментальних ординат. Надалі за допомогою знайденої функції розподілу довжин екстхорд  $\varphi(\rho) = G(\ell)$  обчислюють пористість  $\varepsilon$ , питому внутрішню поверхню  $S_{num}$  та ефективний (або еквівалентний) капілярний радіус  $r_{ef}$  шуканого ОВН як капілярно-пористого тіла.

**Цілі статті.** Метою даної роботи є застосування методології геометричного та математичного моделювання для прогнозування параметрів технологічного процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими, що дозволить оптимізувати кінетичні параметри цього процесу та конструктивні параметри просочувального обладнання.

**Основні матеріали дослідження.** У роботі [10] була розглянута геометрична модель середовища орієнтованого волокнистого полімерного композиту (ОВПК) у вигляді системи циліндричних волокон, осі яких у загальному випадку паралельні і розташовані у вузлах подвійноперіодичної (регулярної) решітки паралелограмів, а простір між волокнами заповнений затверділим ПЗ. Визначення параметрів цієї геометричної моделі здійснюється на базі використання методології теорії інтегральної геометрії і геометричних імовірностей шляхом дослідження (функції) розподілу відстаней між суміжними колами, що розташовані у вузлах подвійноперіодичної решітки, і які перетинаються випадковими січними.

Здійснено детермінацію структурних параметрів цієї геометричної моделі ОВПК за припущення незмінності розташування волокон у структурі просоченого ОВН під час його сушіння за стаціонарності значення зусилля натягнення ОВН. Пористість  $\varepsilon$  у капілярно-пористому тілі згідно [5], наприклад, визначається так:

$$\varepsilon = N^0 \pi \beta_i \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho = \frac{N^0 \pi \beta_o \bar{\rho}^2}{4} = \frac{N^0 \pi \beta_o}{4} \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho, \quad (1)$$

де  $N^0$  — кількість замірів поміж волокнами у площині шліфу композиту.

У свою чергу, питому внутрішню поверхню  $S_{num}$  можна визначити таким чином [5]:

$$S_{num} = k_o N^0 \pi \beta \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho = \kappa_o N^0 \pi \beta_o \bar{\rho}, \quad (2)$$

де  $\bar{\rho}$  — середній радіус пор, а коефіцієнти  $\kappa_o$  і  $\beta_o$  можна трактувати як поправочні коефіцієнти, що враховують специфіку структури ОВН як капілярно-пористого середовища (і які означають відповідно шорсткуватість поверхні і звивистість еквівалентного циліндричного капіляра).

Якщо прийняти відповідно до робіт [6, 7] як ефективний (або еквівалентний капілярний радіус)  $r_{ef}$  шуканого ОВН гідравлічний радіус, що визначається за аналогією з «ідеальним» циліндричним капіляром як відношення подвоєного об'єму пор до їх поверхні, то будемо мати:

$$r_{ef} = \frac{2\varepsilon}{S_{num}} = \frac{2}{\kappa_o} \left[ \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho / \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho \right]. \quad (3)$$

Було, зокрема, встановлено [8], що для практичних обчислень функцію розподілу довжин екстхорд волокон, яка мінімізує відхилення від експериментальних ординат, зручно описувати у такому вигляді:

$$G(\ell) = \varphi(\rho) = \frac{c_\kappa b^{(1/c_\kappa)}}{\Gamma(1/c_\kappa)} e^{-b_\kappa \rho^{c_\kappa}}, \quad (4)$$

де  $b_k, c_k$  – позитивні константи, що визначаються за умови найкращого наближення теоретичної кривої (4) до експериментальних ординат;  $\Gamma$  – гамма-функція Ейлера.

Для цього випадку рівняння (4) наведемо й інші залежності. Так, зокрема, математичне очікування випадкової величини  $\rho$ , функція розподілу  $\varphi(\rho)$  якої описується за допомогою рівняння (4), має такий вигляд:

$$M(\rho) = \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho = \frac{\Gamma(2/c_k)}{b^{(1/c_k)} \cdot \Gamma(1/c_k)}. \quad (5)$$

Формула (1) для пористості  $\varepsilon$  прийме наступний вигляд:

$$\varepsilon = \frac{N^0 \pi \beta_o}{4} \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho = \frac{N^0 \pi \beta_o}{4} \cdot \frac{\Gamma(3/c_k)}{b^{(2/c_k)} \cdot \Gamma(1/c_k)}, \quad (6)$$

а формула для еквівалентного капілярного радіусу (3) запишеться таким чином:

$$r_{ef} = \frac{2}{\kappa_o} \left[ \int_0^{\infty} \rho^2 \varphi(\rho) d\rho / \int_0^{\infty} \rho \varphi(\rho) d\rho \right] = \sqrt{2} \frac{\Gamma(1/c_k)}{b^{(1/c_k)} \cdot \Gamma(2/c_k)}. \quad (7)$$

Рівняння (3), (4), (6) і (7) повністю визначають комплекс структурних характеристик геометричної моделі ОВПК, а саме пористість  $\varepsilon$ , питому внутрішню поверхню  $S_{num}$  та ефективний (гідравлічний) капілярний радіус  $r_{ef}$ .

#### **Прогнозування кінетичних параметрів поздовжнього просочування орієнтованих волокнистих наповнювачів рідкими полімерними зв'язуючими**

В роботі [11] було наведено прогностичне кінетичне рівняння процесу поздовжнього просочення ОВН рідкими ПЗ:

$$t_1 = \frac{\eta S_{mp} S_{num} \sigma \cos \theta}{\varepsilon^2 \gamma^2 g^2 r_{ef}} \left[ \ln \left| \frac{\exp(1)}{1 - \varepsilon \gamma g h / S_{y0} \sigma \cos \theta} \right| - \frac{\varepsilon \gamma g h}{S_{y0} \sigma \cos \theta} \right], \quad (8)$$

де  $t_1$  – час поздовжнього просочування;  $h$  – висота поздовжнього просочування;  $\sigma \cos \theta$  – змочувальна здатність;  $\theta$  – крайовий кут змочування;  $\eta$  – динамічна в'язкість розчину ПЗ;  $\gamma$  – динамічна в'язкість розчину ПЗ.

Рівняння (8) після підстановки відповідних величин з урахуванням рівнянь (2), (6) і (7) прийме такий вигляд:

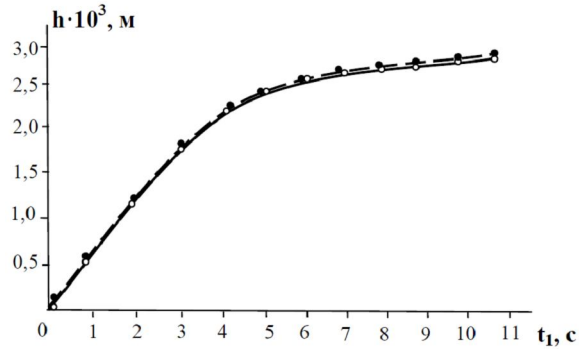
$$t_1 = \frac{\eta S_{mp} S_{num} \sigma \cos \theta}{\varepsilon^2 \gamma^2 g^2} \cdot \frac{b^{(1/c_k)} \cdot \Gamma(2/c_k)}{\sqrt{2} \cdot \Gamma(3/c_k)} \left[ \ln \left| \frac{\exp(1)}{S_{num} \sigma \cos \theta} \right| + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\varepsilon \gamma g h}{S_{num} \sigma \cos \theta} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Експериментальну перевірку прогностичного кінетичного рівняння (9) здійснювали на прикладі скловолокнистого і органоволокнистого джгутів (діаметром 2,5 мм і довжиною 100 мм), які просочували розчином епоксидної смоли марки ЕД-20 при температурі 50 °С і зусиллі натягнення джгута 30 Н/м. Виміряна реовіскозіметром динамічна в'язкість розчином епоксидної смоли при даній температурі склала  $\eta = 0,48$  Па·с, а змочувальна здатність  $\sigma \cos \theta$ , обрахована по максимальній висоті підйому зв'язуючого по волокну під дією сил поверхневого натягнення за формулою [12]:

$$\sigma \cos \theta = \frac{h_{\infty} \gamma g R_k}{2}, \quad (10)$$

де  $h_{\infty}$  – максимальна висота підйому рідини (поздовжнього просочування);  $R_k$  – радіус капіляра, склала  $\sigma \cos \theta = 2 \cdot 10^{-2}$  Н/м.

З рис. 1, на якому показана кінетична крива поздовжнього просочення, видно добрий збіг експериментальних і розрахованих за рівнянням (9) значень.

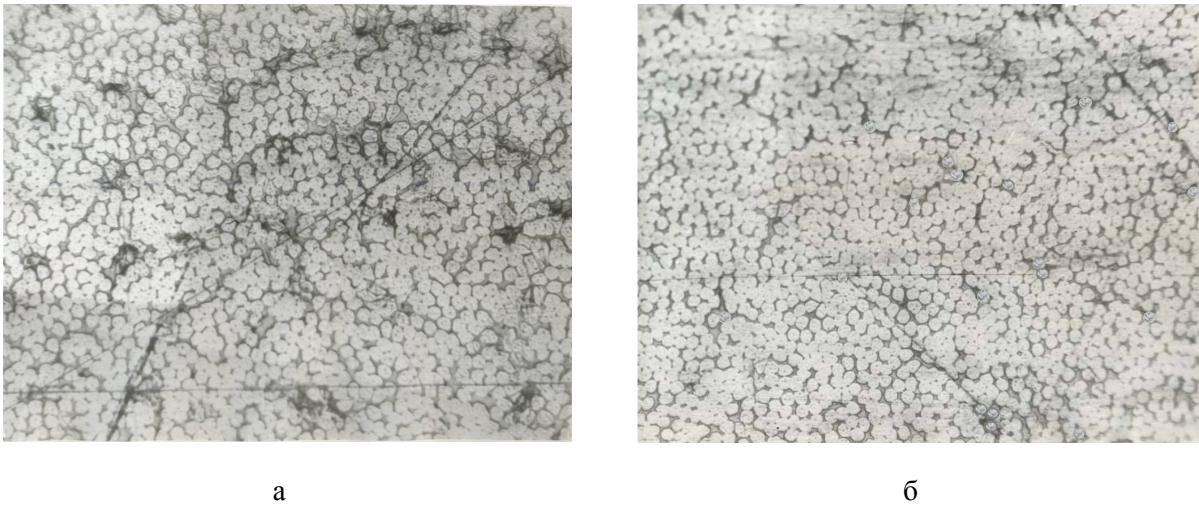


**Рис. 1. Кінетичні криві поздовжнього просочування скловолокнистого джгута розчином епоксидного зв'язуючого ЕД-20 при температурі 50 °С і зусиллі натягнення джгута 30 Н/м: (●) – прогностична крива, побудована за рівнянням (9); (○) – експериментальні значення**

Таким чином, розроблений удосконалений підхід дає можливість здійснювати моделювання параметрів технологічного процесу просочення ОВН рідкими ПЗ з врахуванням інтегральних характеристик ОВН як капілярно-пористого тіла.

**Порівняльний аналіз структури орієнтованих волокнистих наповнювачів, просочених рідкими епоксидними зв'язуючими, за ультразвукової дії**

На рис. 2 наведена типова фотографія мікросліфу поперечного перерізу орієнтованого епоксидного органопластика, одержаного за «вільного» просочення, тобто без ультразвукової (УЗ) дії, так з УЗ-дією.



**Рис. 2. Типова фотографія мікросліфу поперечного перерізу орієнтованого епоксидного органопластика, одержаного без УЗ-обробки (а) і за ефективних режимів УЗ-обробки (б). Збільшення  $\times 1200$**

Проведені дослідження [13] свідчать про покращення експлуатаційних властивостей затверділої полімерної матриці. Внаслідок цього можна очікувати й на поліпшення експлуатаційних властивостей ОВПК на її основі, про що опосередковано може свідчити розподіл волокон у структурі шліфу (див. рис. 2, б).

Порівнюючи якісно обидва шліфи (рис. 2, а,б), можна помітити, що в обробленому низькочастотним УЗ затверділому ОВПК практично відсутні сторонні включення (у т.ч. повітряні порожнини) між волокнами, а самі волокна розподілені практично регулярно. Це свідчить на користь застосування апроксимуючої подвійно-періодичної структурної моделі ОВПК для прогнозування технологічних параметрів процесу просочення (див. рис. 2, а,б), а також про ефективність застосування УЗ-обробки при одержанні ОВПК [14-15].

На рис. 3 показана експериментальна гистограма, а також теоретична крива розподілу довжин екстхорд суміжних волокон (кіл) (4)  $f_{\Delta}(z) = G(\ell)$  в структурі ОВПК.

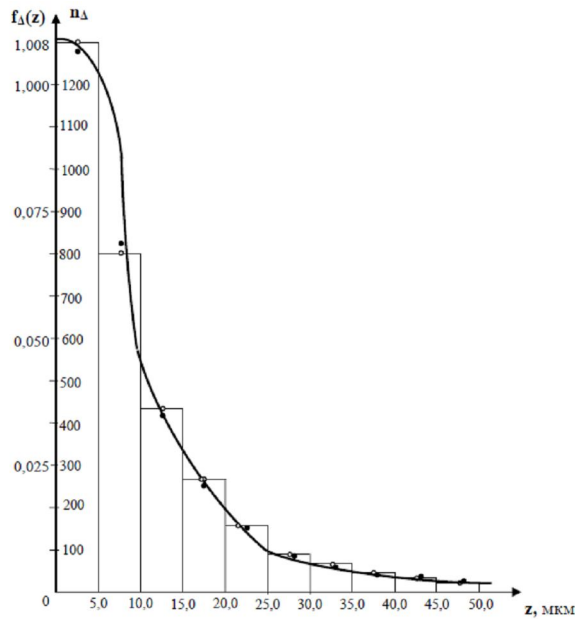


Рис. 3. Гістограма і криві розподілу довжин екстхорд суміжних волокон (кілі)  $f_{\Delta}(z)$ , отриманих за ефективних режимів низькочастотної ультразвукової дії: експериментальні ординати ( $\circ$ ); теоретичний розподіл (4) ( $\bullet$ );  $n_{\Delta}$  – кількість замірів

Наведемо значення виразів (5) – (7) для функції розподілу довжин екстхорд волокон, яка мінімізує відхилення від експериментальних ординат ( $\circ$ ) – див. рис. 3. Так, при кількості замірів поміж волокнами  $N^{\circ} = 2500$  у площині шліфу композиту (див. рис. 2, а, б) і значеннях  $\beta_o = 1,1$ ,  $\kappa_o \approx \sqrt{2}$  [6, 9] математичне очікування (5) дорівнює  $M(\rho) = 8,158$  мкм. При цьому постійні рівняння (4) для необробленого УЗ ОВПК становлять:  $b_{\kappa} = 0,129$ ,  $c_{\kappa} = 0,9812$ , пористість (6)  $\varepsilon = 0,28$  (тобто коефіцієнт армування або об'ємний вміст ОВН у структурі композиту складає  $\xi_a = 1 - \varepsilon = 0,72$ ), а ефективний (еквівалентний) капілярний радіус (7)  $r_{ef} = \bar{\rho} = 5,96$  мкм  $\approx 6$  мкм.

Знайдені для ОВПК, обробленого УЗ, постійні теоретичного рівняння (4) становлять:  $b_{\kappa} = 0,125$ ,  $c_{\kappa} = 0,992$ , пористість (6)  $\varepsilon = 0,27$  (тобто коефіцієнт армування чи об'ємний вміст ОВН у структурі композиту складає  $\xi_a = 1 - \varepsilon = 0,73$ ), а ефективний (еквівалентний) капілярний радіус (7)  $r_{ef} = \bar{\rho} = 5,77$  мкм  $\approx 5,8$  мкм.

За отриманими експериментальними ординатами ( $\circ$ ) гістограми розподілу довжин екстхорд суміжних волокон проводиться теоретична крива (4) з урахуванням її найменшого відхилення від експериментальних ординат ( $\circ$ ). Надалі здійснюють оптимізацію кінетичних параметрів процесу просочення (час, висота чи швидкість просочування) та конструктивні параметри (зокрема, габарити ванни) просочувального обладнання.

**Висновки.** Роглянуто приклад практичної адаптації методології геометричного і математичного моделювання для детермінації параметрів технологічного процесу просочення орієнтованих волокнистих наповнювачів розчинами полімерних зв'язуючих. Отримано задовільне співпадання теоретичних і практичних результатів досліджень. Також на основі мікроструктурного аналізу шліфів якісно встановлена ефективність застосування ультразвукової обробки при одержанні композитів. Отримані результати дають можливість оптимізувати кінетичні параметри процесу просочення та конструктивні параметри просочувального обладнання.

1. Шалун Г. Б. Слоистые пластики / Г.Б. Шалун, Е. М. Сурженко. – Л.: Химия, 1978. – 232 с.
2. Цыплаков О. Г. Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов. Ч.1 / Цыплаков О. Г. – Пермь, 1974. – 317с.
3. Плоткин Л. Г. Технология и оборудование пропитки бумаги полимерами / Л. Г. Плоткин, Г. В. Шалун – М.: Лесная промышленность, 1985. – 119 с.
4. Коновалов В. И. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / Коновалов В. И. – М.: Химия, 1989. – 224 с.
5. Аксельруд Г. А. Введение в капиллярно-химическую технологию / Г. А. Аксельруд, М. А. Альтшулер. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
6. Чизмаджев Ю. А. Макрокинетика процессов в пористых средах / Ю. А. Чизмаджев, В. С. Маркин, М. Р. Тарасевич и

- др. – М.: Наука, 1971. – 364 с.
7. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах / Л.И. Хейфец, А.В. Неймарк. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
  8. Колосов О.Є. До вибору фізичної моделі капілярно-пористого середовища на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів / О.Є. Колосов // Вісник НТУУ КПІ. Сер. «Машинобудування». – 2010. – №59. – С. 96 – 101.
  9. Цыплаков О. Г. Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов. Ч.1 / Цыплаков О. Г. – Пермь, 1974. – 317с.
  10. Колосов О.Є. Фізична модель структури капілярно-пористого середовища на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, Л.А. Кричковська, О.П. Колосова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №1. – С. 6–9.
  11. Колосов О.Є. Кінетика процесу просочування волокнистих наповнювачів композиціями епоксидних полімерів / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, Л.А. Кричковська, О.П. Колосова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №2. – С. 13–16.
  12. Малкин А.Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения / А.Я. Малкин, А.Е. Чалых. – М.: Химия, 1979. – 304 с.
  13. Колосов О.Є. Використання методів математичного та експериментально-статистичного моделювання для оптимізації технологічних параметрів ультразвукового одержання полімерних композиційних матеріалів / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, В.С. Кривошеев, О.П. Колосова // Журнал Кам.-Под. нац. ун-ту «Математичне та комп'ютерне моделювання. Сер.: Техн. науки». – 2014. – Вип. 11. – С. 61 – 72.
  14. Колосов О.Є. Математичне моделювання базових процесів виготовлення полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвукової модифікації / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, Є.М. Панов та ін. – К.: ВД «Едельвейс», 2012. – 268 с.
  15. Колосов О.Є. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку / О.Є. Колосов, В.І. Сівецький, О.П. Колосова. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – 295 с.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2015.