



Чейлитко А. А.

## ЗАРОДЖЕННЯ ПОР ТА ЇХ ВПЛИВ НА ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛУ

*Досліджено зародження пор та проаналізовано теорії пористості. Надана інформація щодо впливу пор на властивості матеріалу. Розглянуто моделі, котрі описують складні пористі структури. Проаналізовано механізм розвитку пор. Класифіковано генезис пор. Розглянуто дифузійний генезис та генезис деструкції. Встановлено залежність кількості центрів поро-виникнення і швидкості зростання пор від температури.*

**Ключові слова:** пори, генезис пор, пориста система, дифузійний генезис, генезис деструкції, швидкість поро-виникнення.

### 1. Вступ

Перш ніж щось винайти або покращити, необхідно пізнати природу того, чи іншого фактора впливу або явища в цілому. У сучасному світі будівельні матеріали як ніколи потребують вдосконалення. Вони повинні не тільки володіти рядом параметрів, але й підтримувати ці параметри на протязі тривалого періоду часу.

В [1] наводяться дослідження процесів тепломасообміну в бетоні при фазових перетвореннях вологи в порах бетону. Зміна теплопровідності бетону під дією циклів заморожування-відтаювання носить нелінійний характер з максимумом функції на другому циклі. Підвищення теплопровідності і міцності бетонів пояснюється продовженням зрощування кристалогідратів в єдину монотонну структуру, при цьому зменшується пористість бетону (відбувається зрощення пор). Зниження теплопровідності і міцності бетону при подальших циклах заморожування-відтаювання можна пояснити за рахунок утворення мікротріщин, а значить зміною виду пористості бетону. Виходячи з цього, можна зробити висновок про самоорганізацію структури пористого бетону з метою протидіяти зовнішнім умовам.

Якщо подивитися на дослідження автора з точки зору синергетики, то стає очевидним, що пористість є не що інше як самоорганізована система, в яку на генетичному рівні закладена потенційна енергія адаптування до зовнішніх умов. Для підтвердження самоорганізованості пор і визначення загальних закономірностей їх виникнення та розвитку в різних матеріалах необхідно провести серію експериментів.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогоднішній день існують як різні підходи до пористості, так і різноманітна класифікація пор [2–5]. Розрізняють внутрішні закриті і зовнішні відкриті пори. Внутрішні закриті пори є замкнутими в об'ємі тіла системами пор, які можуть мати взаємне сполучення між собою. Відкриті зовнішні пори поділяють на наскрізні і тупикові. Таким чином, загальна пористість є сумою внутрішніх пір, наскрізних пор і тупикових пор в матеріалі.

По розташуванню і орієнтації пор в матеріалі розрізняють хаотичне і впорядковане розташування.

Також пору іноді розглядають як кристал і для характеристики різноманітності форм пор вводять поняття ступінь огранки, рівний відношенню характерного розміру пори до максимально можливого значення [2].

Щодо моделей, котрі описують складні пористі структури, можна виділити модель губчастого тіла і корпускулярну модель. У моделі губчастого тіла пори розглядаються як система розгалужених каналів, а в корпускулярній моделі тіла пори являють собою зазори (проміжки) між нещільно зрощеними частками, що представляють собою каркас тіла.

Для об'єднання або заперечення існуючих теорій необхідно в першу чергу розібратися з генезисом пористості, кінетикою і механізмом розвитку пор, еволюцією розвитку структурованих пористих систем. Необхідно розглядати елементарну пористу систему як термодинамічно нерівноважну, з можливими флуктуаційними відхиленнями ентропії від максимальних значень.

В [2, 3] автори розглядають пору як вільний об'єм або порожнечу, а точніше як локальне виділення вільного об'єму, що володіє певною формою, місцем локалізації та розмірами, що перевищують відстані між атомами кристалічної решітки матеріалу. Також автори роблять припущення, що пори бувають локалізовані (звичайні пори) і делокалізовані (розподілені між атомами порожнечі, котрі не викликають різких перепадів електронної щільності). Дані твердження носять досить спірний характер, оскільки існування абсолютної порожнечі суперечить досить багатьом сучасним теоріям фізики. Крім цього абсолютна порожнеча не може самоорганізуватися в складні системи, як це відбувається з пористими структурами. Тому найбільш доречно розглядати пору як систему організованих більш дрібних пор, зі своїми індивідуальними фізичними характеристиками. При цьому пора, яка утворилася в процесі організації/реорганізації, буде володіти новими властивостями.

Найменша пора, яку має сенс розглядати як термодинамічну систему, це пора з геометричним розміром більшим, ніж довжина вільного пробігу молекули. Безумовний науковий інтерес представляє розгляд генезису пор.

Існують основні два підходи до розгляду росту елементарної пористої системи. Перший з них розглядає зростання пор як диспергування псевдо суцільного середовища в процесах сублімації, конденсації, кристалізації, хімічних реакцій [2, 3]. Другий підхід пов'язаний

з розглядом зростання пористої системи шляхом складання пористих систем більш дрібного просторового масштабу (колоїдні системи, сипучі матеріали і т. д.). Цілоком природно, що існує також комбінований підхід до розгляду утворення пористої системи, який розглядає складніші пористі системи та їх комбінації (будівельні матеріали, піноскло, теплоізоляційні матеріали і т. д.).

Також варто згадати, що існує підхід, який розглядає пористість як дрібноструктурні тривимірні дефекти (метали, сплави, деякі мінерали) [2, 3].

Дані підходи не дозволяють дати відповіді на існуючі питання зростання системи пор і тим більше ніяким чином не вирішують завдання управління поро-виникненням, а лише дозволяють визначити галузі використання пористих матеріалів.

### 3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — генезис пористості виробничих матеріалів.

Проведені дослідження ставили за мету визначити особливості процесу зародження пор та їх вплив на властивості матеріалу.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- визначити принцип дії дифузійного генезису; розглянути, в яких саме пористих матеріалах пори виникають за рахунок дифузійного генезису; з'ясувати, до чого призводить велика швидкість фронту кристалізації;
- визначити принцип дії генезису деструкції; розглянути вплив виникнення розривів у структурі матеріалу; з'ясувати, чим саме обумовлений ріст системи пор;
- розглянути спосіб розрахунку швидкості поро-виникнення; побудувати та проаналізувати залежність кількості центрів поро-виникнення та швидкості росту пор від температури.

### 4. Дослідження генезису пор

**4.1. Генезис пористості.** Генезис пористої системи можна розділити на більш прості складові, такі як генезис при дифузійному скупченні газів (дифузійний генезис) і генезис за рахунок руйнування матеріалу (генезис деструкції).

До дифузійного генезису можна віднести поро-виникнення при утворенні газів в матеріалі за рахунок хімічних реакцій, за рахунок різниці меж насичення газами речовини в різних агрегатних станах, за рахунок переходу в газоподібний стан одного з компонентів вихідної суміші.

До генезису деструкції можна віднести виникнення пор за рахунок термодеструкції сполук (пористість при нагріванні полімерів), за рахунок деформації тіла, а також за рахунок впливу випромінювання з наступним розпадом хімічних зв'язків.

**4.2. Дифузійний генезис пор.** При з'єднанні різних хімічних компонентів для створення вихідної суміші іноді утворюються гази, які скупчуються в місцях найменшої щільності і утворюють газові бульбашки. Якщо тиск в газових бульбашках більше суми зовнішнього і гідростатичного тиску, то відбувається кипіння рідкої суміші матеріалу. Для інтенсифікації процесу поро-

виникнення можна істотно знизити тиск і провести скипання суміші.

Зниження зовнішнього тиску також збільшує поро-виникнення при кристалізації за рахунок погіршення заповнення рідким розплавом міждендритних проміжків. В [1] наводиться експериментальна графічна залежність кратності спучування по висоті  $\Delta h/h_0$  від надлишкового тиску в камері спучування  $P = 0-0,13$  МПа для матеріалу СГК-1 при температурі 1100 °К і швидкості нагріву 25 К/с. Дана залежність є спадною і при надмірному тиску 0,13 МПа кратність спучування зменшується в 1,4 рази. Автор робить висновки про те, що при підвищенні тиску відбувається ущільнення матеріалу, який спучується, за рахунок стиснення, і щільність матеріалу зростає в 1,3 рази. Таким чином, автор робить висновок, що в області пружно-пластичних деформацій можна говорити про гістерезис процесів спучування і стиснення, хоча зворотної залежності збільшення кратності спучування від зменшення тисків автор не наводить. Тому гістерезисний характер збільшення та зменшення пористості від зовнішнього тиску цією статтею не доведений і до кінця не вивчений.

Можна зустріти дані про зниження поро-виникнення при використанні вакуумної камери заповненої інертним газом [1]. Принцип її дії аналогічний принципу дії вакуумного деаератора. Тому при необхідності збільшення поро-виникнення скипанням необхідно правильно вибрати режим охолодження, для кристалізації матеріалу в момент найбільшого спучування.

Найбільш поширеними пористими матеріалами, в яких пори утворилися шляхом хімічної взаємодії компонентів суміші з подальшим газовиділенням, є пінобетон, газобетон, піноскло і пінополістирольні матеріали [6, 7].

Також утворення газів можливо не тільки за рахунок хімічної реакції, а й за рахунок переходу одного з компонентів суміші в газовий агрегатний стан. При цьому відбувається скупчення газу і утворення пори під дією внутрішнього тиску.

До дифузійного генезису також відноситься поро-виникнення за рахунок різниці меж насичення речовини в твердому і рідкому стані. Відомо, що розчинність газів в рідкому середовищі вище ніж у твердому. Тому при кристалізації розчину відбувається витіснення розчинених газів, але так як поверхня розчину вже кристалізувалася, то перед фронтом кристалізації починає накопичуватися надлишок газу. Газ, який скупчується, просувається разом з фронтом кристалізації до тих пір поки концентрація газу не перевищить максимально можливу концентрацію розчиненого газу в розчині. Концентрація на рухомому фронті кристалізації визначається співвідношенням [1]:

$$c(x) = c_0 \cdot \left[ \frac{1-k}{k} \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} + 1 \right], \quad (1)$$

де  $c_0$  — початкова концентрація газу, який розчинений в рідині;  $x$  — координата (початок координатної осі, пов'язаної з лінією розділу фаз);  $\delta$  — товщина шару газу перед фронтом кристалізації (дорівнює відношенню коефіцієнта дифузії газу в рідині до швидкості руху фронту кристалізації);  $k$  — коефіцієнт розподілу домішок (дорівнює відношенню розчинності газу в твердій фазі до розчинності газу в рідкій фазі).

Як видно з даного співвідношення, велика швидкість фронту кристалізації призводить до збільшення товщини шару газу перед фронтом кристалізації, що веде до збільшення концентрації газу і як наслідок до збільшення можливості утворення пор більших розмірів. За рахунок пор, які утворилися за фронтом кристалізації, знижується концентрація газів перед фронтом кристалізації і йде повторне збільшення концентрації газу в часі. Час, за який відбувається нове накопичення концентрації газу від початкового рівня до максимально можливого, назвемо періодом зародження газових пор при кристалізації. Для отримання рівномірної в просторі пористості, при постійній швидкості руху фронту кристалізації, необхідна сталість періоду зародження газових пор.

У всіх перерахованих випадках дифузійного генезису (поро-виникнення за рахунок хімічних реакцій, за рахунок різниці меж насичення газами речовини в різних агрегатних станах, за рахунок випаровування одного з компонентів вихідної суміші) найбільш відкритим питанням залишається місце зародження пори і швидкість її зростання.

Хоча місце зародження пір носить флуктуаційний характер, можна з упевненістю сказати, що найбільш життєздатні зародки пор виникають поблизу структурних недосконалостей. До таких недосконалостей можна віднести межу розділу різних хімічних структур, різних агрегатних станів одного елемента, пори і порожнечі, народжені деструкцією матеріалу. У рідкому агрегатному стані такі недосконалості дифундують за обсягом і можуть об'єднуватися. Для об'єднання зародкоутворюючів пор необхідно затратити певну енергію, яка витрачається на деформацію структури і переходить в потенційну енергію зародка пор.

**4.3. Генезис деструкції.** До генезису деструкції можна віднести виникнення пор за рахунок термодеструкції сполук (пористість при нагріванні полімерів), за рахунок деформації тіла, а також за рахунок впливу впрямління.

При деформаційних впливах, якщо локальні напруги перевищують певну критичну величину, виникають розриви в структурі матеріалу і утворюються пори, зростання яких обумовлено подальшою зміною локальних напружень. Подальше збільшення локальних напружень буде приводити до зростання пор і їх об'єднання в систему пор, яка буде залежати від загальних напружень в тілі. Тобто, необхідно розмежувати напруги, які йдуть в тілі при деформаційних впливах і локальні напруги в тілі при тих же деформаційних впливах. Відмінністю останніх буде сукупність дії загального поля напруг і теплових флуктуацій, викликаних неоднорідністю тіла.

Виникнення системи пор об'єднуючої окремі пори викликає спад загальної енергії тіла, але потенційна енергія системи пор зростає і відбувається зростання системи за рахунок поглинання дрібних пор, які знаходяться поруч. Це означає, що зростання системи пор буде йти в напрямку розташування пор. Тому необхідно створити теорію виникнення пор в об'єкті для розробки теорії управління ростом пористості. Однак варто звернути увагу, що зростання системи пор буде також обумовлене силами, котрі протидіють їй. Так, при квазікрихкому руйнуванні система пор матиме продовгуватий вид з двома гострими краями, а при в'язкому руйнуван-

ні (в пластичних матеріалах) — форму витягнутого еліпсу з співвідношенням радіусів 2 : 1 [4].

Варто зазначити що енергія, яку необхідно затратити системі пір для поглинання пори, згідно [8] збігається з енергією довговічності матеріалу.

## 5. Дослідження швидкості поро-виникнення

Так як число атомів при поро-виникненні не змінюється, а відбувається лише їх перегрупування, то згідно кінетичного закону діючих мас швидкість поро-виникнення можна записати у вигляді:

$$w_0 = \sum_{j=1}^m w_j, \quad (2)$$

де  $m$  — кількість газів, які беруть участь у поро-виникненні;  $w_j$  — швидкість виникнення молекули газу:

$$w_j = K \prod_{i=1}^{i_0} c_i^n, \quad (3)$$

де  $c$  — концентрація часток, котрі беруть участь у виникненні газу;  $n$  — порядок реакції за речовиною  $i$ , співпадає з відповідним стехіометричним коефіцієнтом.

Звідси випливає, що причиною поро-виникнення повинна служити молекула або атом, який знаходиться в іншій порі (зародок). При відсутності молекул або газу в порах з діаметром пори більшим, ніж довжина вільного пробігу молекул, всередині пори був би абсолютний тиск наблизений до нуля.

Константу рівноваги можна розписати за законом Арреніуса:

$$K = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right), \quad (4)$$

де  $K_0$  — предекспонента;  $E_a$  — енергія активації;  $R$  — універсальна газова постійна;  $T$  — температура.

За аналогією з хімічними реакціями, предекспоненціальний множник  $K_0$  характеризує повну кількість зародків пор і є функцією тиску і температури.

Тут енергія активації  $E_a$  — це потенційний бар'єр, який необхідно подолати для розриву міжмолекулярних зв'язків або деформаційних зсувів при об'єднанні пор. У даному випадку будемо називати енергію активації — необхідною вільною енергією. Вона буде залежати від в'язкості матеріалу, полів напруги і зовнішнього тиску.

Енергію активації і предекспоненту можна визначити з кінетичних дослідів, побудувавши залежність  $K(T)$  в логарифмічних координатах  $\lg K + 1/T$ . При цьому графік функції  $K(T)$  представить собою пряму або кілька прямих, залежно від мінливості генезису поро-виникнення. Кут нахилу даної прямої до осі абсцис визначить значення енергії активації  $E_a$ , а відрізок, що відсікається прямою на осі ординат — значення предекспоненти  $K_0$  [9].

Зміну концентрації центрів пор можна також представити наступною залежністю:

$$\frac{dn}{d\tau} = w_0 + fn - gn, \quad (5)$$

де  $w_0$  — швидкість зародження пор;  $f$  — константа швидкості виникнення пор;  $g$  — константа виродження пор.

Позначив  $f - g = \varphi$  отримаємо:

$$\frac{dn}{d\tau} = w_0 + \varphi n. \quad (6)$$

Якщо  $\varphi < 0$ , то  $dn/d\tau \rightarrow 0$  і швидкість росту центрів поро-виникнення зменшується, якщо  $\varphi > 0$ , то відповідно швидкість росту центрів поро-виникнення збільшується і логічно припустити, що росте і швидкість росту пор. Це означає, що існує таке значення  $\varphi$ , при якому швидкість росту пор досягає свого критичного моменту і виникає руйнування (розрив) матеріалу.

Швидкість зародження пор можна описати як суму швидкостей утворення газів, які в свою чергу підпорядковуються закону Арреніуса.

Підсумкове рівняння для швидкості зародження пор можна розписати у вигляді:

$$\left(\frac{dn}{d\tau}\right)_0 = w_0 = \sum_{j=1}^m \left[ K_{0j} \cdot \exp\left(-\frac{E_{aj}}{R \cdot T}\right) \prod_{i=1}^{i_0} c_{ij}^n \right]. \quad (7)$$

Енергія активації при зародженні осередків пор, тобто для швидкості зародження пор, буде залежати від генезису поро-виникнення. При кристалізації це енергія відриву молекул газу від молекул рідини. При спученні матеріалу енергія активації являє собою енергію, яку необхідно затратити для одержання молекул газу, тобто дорівнює величині енергії активації молекулярної реакції (є довідковими даними). При деструкції матеріалу це енергія, яку необхідно прикласти для руйнування структури матеріалу.

Розглянемо окремі випадки генезису пор.

При кристалізації, з допущенням, що з суміші відбувається витіснення тільки молекул одного газу:

$$w_0 = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) c, \quad (8)$$

де  $c$  — концентрація газу перед фронтом кристалізації, котра залежить від координати  $i$ , відповідно, від швидкості фронту кристалізації.

Підставивши рівняння для визначення концентрації газу перед фронтом кристалізації, одержимо рівняння для визначення швидкості народження пор:

$$w_0 = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \cdot c_0 \cdot \left[ \frac{1-k}{k} \cdot e^{-\frac{xw_{\text{фк}}}{D}} + 1 \right], \quad (9)$$

а враховуючи ізотермічність кристалізації, кількість центрів поро-виникнення можна знайти з наступного рівняння:

$$n_0(\tau) = n_0(\tau_0) + K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \times c_0 \left[ \frac{1-k}{k} \int_{\tau_0}^{\tau} e^{-\frac{xw_{\text{фк}}}{D}} d\tau + (\tau - \tau_0) \right], \quad (10)$$

де  $w_{\text{фк}}$  — швидкість фронту кристалізації, яка залежить від градієнту температур;  $k$  — коефіцієнт розподілу домішок (дорівнює відношенню розчинності газу в твердій фазі до розчинності газу в рідкій фазі);  $D$  — коефіцієнт дифузії, в даному випадку приймається постійною величиною.

Якщо  $x_0 = 0$ ,  $n_0(\tau_0) = 0$ ,  $\tau_0 = 0$ , тобто початок координат знаходиться в момент часу нульової концентрації центрів поро-виникнення, а швидкість руху фронту кристалізації постійна, то:

$$n_0(\tau) = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \cdot c_0 \left[ \tau - \frac{D(1-k)}{k \cdot w_{\text{фк}}^2} \cdot e^{-\frac{w_{\text{фк}}^2 \tau}{D}} \right]. \quad (11)$$

Але для використання даної формули, на неї необхідно накласти обмеження  $c < c_{\text{ж max}}$  (концентрація часток не перевищує максимально можливу концентрацію розчинності газу в рідкій суміші). При  $c = c_{\text{ж max}} + \Delta c$ ,  $\Delta c \rightarrow 0$  виникає утворення пори  $n_0(\tau) = n_0(\tau) + 1$  та зменшення концентрації газу до значення  $\Delta c$ .

Для утворення пор шляхом виникнення газу внаслідок бінарної хімічної реакції швидкість народження пор і кількість центрів поро-виникнення дорівнюватиме:

$$w_0 = K_{0j} \cdot \exp\left(-\frac{E_{aj}}{R \cdot T}\right) c_1^{\vartheta} c_2^{\vartheta}, \quad (12)$$

$$n_0(\tau) = n_0(\tau_0) + \int_{\tau_0}^{\tau} K_{0j}(\tau) \cdot \exp\left(-\frac{E_{aj}}{R \cdot T(\tau)}\right) c_1^{\vartheta}(\tau) c_2^{\vartheta}(\tau) d\tau, \quad (13)$$

де  $\vartheta$  — порядок реакції за речовиною, співпадає з відповідним стехіометричним коефіцієнтом;  $c_1$  і  $c_2$  — концентрації першого та другого компоненту, котрі беруть участь в реакції виникнення газу;  $E_{aj}$  — енергія розриву хімічних зв'язків.

Варто звернути увагу, що при даному генезисі пор предекспонента залежить від часу, так як вона є функцією температури.

При спученні суміші водяними парами, що знаходяться в суміші у вигляді зовнішньої вологи, енергія активації буде дорівнювати кількості тепла необхідного для утворення 1 моля води в парі (з рівняння Клапейрона-Клаузіуса). Швидкість поро-виникнення буде мати вигляд:

$$w_0 = K_{0j} \cdot \exp\left(-\frac{M(v_{\text{пара}} - v_{\text{ж}}) \frac{dP}{dT}}{R}\right) c_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (14)$$

де  $v$  — питомий об'єм при даній температурі.

Швидкість реакції можна отримати, задовольняючи вимогу  $n = 0$  при  $\tau = 0$  [10]:

$$W_n = \frac{\gamma f \omega_0}{\phi} (e^{\phi \tau} - 1), \quad (15)$$

де  $\gamma$  — ціле число порядку одиниці, показуючи, скільки молекул кінцевого продукту виникає в результаті вступу в реакцію одного активного центру.

Необхідно врахувати, що навіть при  $dn/d\tau \leq 0$  швидкість росту пор може бути позитивною. Отже, збільшення пористості складатиметься з швидкості утворення пор  $W_n$  і швидкості їх росту  $W_V$ .

Швидкість росту пор дорівнює:

$$W_V = \frac{dV}{d\tau}, \quad (16)$$

отже можна записати:

$$W_V = \frac{\partial L}{p_{\text{внеш}} d\tau}, \quad (17)$$

де  $\partial L$  — робота, котра виконується порою;  $p_{\text{внеш}}$  — зовнішній тиск (при квазістатичному процесі дорівнює тиску в порі).

Вважаючи процес рівноважним, можна записати:

$$W_V = \frac{1}{nkT} \cdot \left( T \frac{dS}{d\tau} - \frac{dU}{d\tau} \right), \quad (18)$$

де  $k$  — постійна Больцмана;  $n$  — концентрація молекул газу.

$$W_V = \frac{1}{nkT} \cdot \left( \frac{dH}{d\tau} - \frac{dG}{d\tau} - \frac{dU}{d\tau} \right), \quad (19)$$

де  $H$  — ентропія;  $G$  — енергія Гіббса.

Як впливає з даного рівняння, швидкість росту пори тим більше, чим менше зміна енергії Гіббса.

При ізотермічному процесі можна записати:

$$V(\tau) - V(\tau_0) = \frac{1}{nkT} \cdot (\Delta H - \Delta G) = \frac{\Delta S}{nk} = \frac{\Delta Q}{nkT}. \quad (20)$$

Дана формула дозволяє за експериментальними значеннями зміни об'єму і при знанні концентрації газу в порі визначити зміну енергії Гіббса, а значить визначити хід протікання реакції всередині пори (якщо така існує), або при знанні теплового потоку і різниці обсягів визначити концентрацію молекул в порі і відстежити їх зміну у часі. Знаючи зміну концентрації молекул усередині пори можна побудувати механізм росту пори.

## 6. Обговорення результатів теоретичного дослідження

Було класифіковано методи виникнення пор. Досліджено процеси дифузійного генезису пор та генезису деструкції. Розглянувши рівняння концентрації на рухомому фронті кристалізації (1), для дифузійного ге-

незису, було визначено, що велика швидкість фронту кристалізації призводить до збільшення товщини шару газу перед фронтом кристалізації, що веде до збільшення концентрації газу і як наслідок до збільшення можливості утворення пор більших розмірів. За рахунок пор, які утворилися за фронтом кристалізації, знижується концентрація газів перед фронтом кристалізації і йде повторне збільшення концентрації газу в часі. У всіх перерахованих випадках дифузійного генезису найбільш відкритим питанням залишається місце зародження пори і швидкість її зростання. Також було визначено, що утворення пористості при кристалізації створює гарні умови для дифузійного поро-виникнення. Так, майже всі розплави насичуються газами з навколишнього середовища внаслідок дифузії, механічного захоплення газу або хімічної взаємодії розплаву з навколишнім середовищем.

Було досліджено швидкість поро-виникнення. Побудовано схематичну залежність кількості центрів поро-виникнення  $n$  і швидкості росту пор  $W$  від температури  $T$ . Згідно отриманої залежності, було зроблено висновок, що до певного моменту зростає як кількість пор, так і самі пори, проте в деякий момент подальше зростання пор за рахунок розтягування внутрішньої поверхні пори вже неможливе і кількість пор дорівнює своєму максимально можливому значенню. Подальше зростання пор здійснюється за рахунок поглинання одних пор іншими, і так до максимально можливого свого значення, після якого відбувається руйнування матеріалу. Було отримано рівняння, котре дозволяє розрахувати швидкість росту пор (19).

## 7. Висновки

Однією з ключових цілей даної роботи, було створення класифікації методів виникнення пор, які, у подальшому, слугуватимуть фундаментом для експериментальних досліджень. І ця ціль була у повній мірі досягнута.

Іншою ж метою було дослідити швидкість поро-виникнення. Що і було з успіхом зроблено. Завдяки отриманій формулі (19), котра дозволяє розрахувати швидкість поро-виникнення, можна зовсім інакше поглянути на проблему вдосконалення пористості. Таке рівняння дозволить керувати структурою пористих матеріалів.

## Література

1. Павлюкевич, Н. В. Тепломасообмен ММФ-2000 [Текст]. Т. 8. Тепломасообмен в капілярно-пористих телах / ред. Н. В. Павлюкевич и др.; НАН Беларуси, АНК «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова» // IV Минский международный форум «Массоперенос MIF-2000», 22–26 мая 2000 г. — Минск, 2000. — 226 с. — ISBN 985-6456-11-8.
2. Шпак, А. П. Кластерные и наноструктурные материалы [Текст]. Т. 3. Пористость как особое состояние самоорганизованной структуры в твердотельных материалах / А. П. Шпак, П. Г. Черемской, Ю. А. Куницкий, О. В. Соболев. — К.: ВД «Академперіодика», 2005. — 516 с. — ISBN 966-360-029-2.
3. Чудновский, А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов [Текст] / А. Ф. Чудновский. — М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. — 456 с.
4. Чейлытко, А. А. Исследование влияния пор на теплопроводность материалов [Текст] / А. А. Чейлытко // Технологический аудит и резервы производства. — 2013. — № 2/2(10). — С. 14–17. — Режим доступа: \www/URL: http://journals.uran.ua/tarp/article/view/12964

5. Чейлытко, А. А. Экспериментальные исследования теплофизических характеристик пористого дисперсного материала в зависимости от различных режимов термообработки [Текст] / А. А. Чейлытко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 5/6(41). — С. 4–7.
6. Карнаузов, А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов [Текст] / А. П. Карнаузов. — Новосибирск: Наука, 1999. — 470 с.
7. Третьяков, А. Ф. Пористость материалов на основе тканых сеток [Текст] / А. Ф. Третьяков // Порошковая металлургия. — 1986. — № 8. — С. 70–75.
8. Чейлытко, А. О. Розробка теоретичних та технологічних основ теплової обробки вологих дисперсних матеріалів у вихрових апаратах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А. О. Чейлытко. — Харків: Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, 2011. — С. 145.
9. Фримантл, М. Химия в действии [Текст]: пер. с англ.; в 2-х ч. / М. Фримантл. — М.: Мир, 1998. — Ч. 1. — 528 с.
10. Зельдович, Я. Б. Теория горения и детонации [Текст] / Я. Б. Зельдович. — М.: Изд-во АН СССР, 1944. — 71 с.

#### ЗАРОЖДЕНИЕ ПОР И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА

Исследовано зарождение пор и проанализированы теории пористости. Предоставлена информация о влиянии пор на

свойства материала. Рассмотрены модели, которые описывают сложные пористые структуры. Проанализирован механизм развития пор. Классифицирован генезис пор. Рассмотрены диффузионный генезис и генезис деструкции. Установлена зависимость количества центров порообразования и скорости роста пор от температуры.

**Ключевые слова:** поры, генезис пор, пористая система, диффузионный генезис, генезис деструкции, скорость порообразования.

*Чейлытко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра теплоенергетики, Запорізька державна інженерна академія, Україна, e-mail: cheylitko@yandex.ua.*

*Чейлытко Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра теплоэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия, Украина.*

*Cheylitko Andrey, Zaporizhia State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: cheylitko@yandex.ua*

УДК 621.371:621.311.4

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.49134

**Дорошенко О. І.,  
Романюк О. В.,  
Песков С. А.,  
Борисенко С. О.**

## ВИЗНАЧЕННЯ БАЗОВОЇ (ОПТОВОЇ) ЦІНИ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ СПОЖИВАЧІВ

*Спираючись на фізику нормального режиму роботи електропередачі у статті пропонується новий науково обґрунтований підхід до визначення базової (оптової) ціни на електроенергію для промислових і дорівнених до них споживачів.*

**Ключові слова:** електроенергія, електропостачання, активна потужність, реактивна потужність, повна потужність, оптова ціна на електроенергію.

### 1. Вступ

Як відомо з [1], електроенергія як фізичне явище, є енергією поляризації діелектричного середовища електроенергетичної системи (ЕЕС), що оточує усі її струмоведучі частини (тобто, енергією електромагнітного поля системи).

Очевидно, що як товарна продукція ЕЕС, електроенергія є роботою, яку виконують генератори її електростанцій для створення різниці потенціалів на своїх затискачах (напруги), яку електропередавальні організації (ЕО), за допомогою своїх електричних мереж, постачають споживачам електроенергії. Таким чином, напругу можна вважати потенційною формою електроенергії, усі показники якості якої визначаються на державному рівні за допомогою [2].

Як відомо, сучасні електроенергетичні системи (ЕЕС) є великими за розмірами і потужністю та складними за технологією їх процесів. Безумовно, це системи кібернетичного типу з усіма специфічними властивостями, не врахування яких суттєво впливає на стратегію їх розвитку і функціонування [3]: «...Недоучет возможностей и особенностей электроэнергетики как большой системы приводит к ошибочным суждениям и серьезным просчетам...».

Так, наприклад, сучасне орієнтування на структурно-економічне проектування в умовах ринкових відносин в електроенергетиці призвело до ситуації в питаннях компенсації реактивного навантаження електроенергетичних систем, коли виробники, постачальники і споживачі електричної енергії (ЕЕ) розглядають його зі своїх власних позицій [4]. При цьому дискутується питання про плату за «реактивну електроенергію» без узгодженого розуміння її фізичної сутності, яке в нормативних документах відсутнє [5].

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

За визначенням [6]: «...Системность, как необходимое качество методических документов, предполагает внутреннее понятие технологичности положений, когда обеспечивается документальная достоверность информационного поля, когда имеется юридически-правовая возможность управляющих воздействий, когда существует аппарат контроля реализации решений и, наконец, функционирует профессионально подготовленный персонал, для которого исключена (минимизирована) возможность «субъективного фактора»...».