

УДК 666.973.6

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ПІНОБЕТОНУ  
ТА МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРУ ЙОГО СТРУКТУРИ**

**Ветох О.М.**, к.т.н., доцент,  
**Мартинов В.І.**, к.т.н., доцент,  
**Антонюк Н.Р.**, к.т.н., доцент,  
*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
vetoh.ogasa@gmail.com

**Анотація.** Проведено аналіз видів моделювання і їх застосування при розв'язку наукових і інженерних завдань, а також при визначенні й оптимізації структури ніздрюватих бетонів.

На фізичних моделях процесів структуроутворення будівельних матеріалів щільної й макропористої структури вивчено вплив водопотреби суміші, розміру пор і їх форми на характер розподілу твердої складової. Аналіз отриманих результатів дозволив вирішити шляхи підвищення властивостей ніздрюватих бетонів за рахунок управління характеру розподілу твердої фази.

Запропоновані методики, які при їх подальшому вдосконаленні можуть бути застосовані для прискореного прогнозування властивостей ніздрюватих бетонів, а також для синтезу штучних будівельних композитів із прогнозованими структурою й властивостями.

**Ключові слова:** структура, ніздрюватий бетон, фізична модель, внутрішні поверхні розділу, композиційні будівельні матеріали, пінобетон, міжпорові перегородки, комп'ютерне моделювання, фрактальна розмірність.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПЕНОБЕТОНА  
И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРА ЕГО СТРУКТУРЫ**

**Ветох А.М.**, к.т.н., доцент,  
**Мартинов В.И.**, к.т.н., доцент,  
**Антонюк Н.Р.**, к.т.н., доцент,  
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
vetoh.ogasa@gmail.com

**Аннотация.** Проведен анализ видов моделирования и их применение при решении научных и инженерных задач, а также при определении и оптимизации структуры ячеистых бетонов.

На физических моделях процессов структурообразования строительных материалов плотной и макропористой структуры изучено влияние водопотребности смеси, размера пор и их формы на характер распределений твердой составляющей. Анализ полученных результатов позволил решить пути повышения свойств ячеистых бетонов за счет управления характера распределений твердой фазы.

Предложенные методики, которые при их дальнейшем усовершенствовании могут быть применены для ускоренного прогнозирования свойств ячеистых бетонов, а также для синтеза искусственных строительных композитов с прогнозируемыми структурой и свойствами.

**Ключевые слова:** структура, ячеистый бетон, физическая модель, внутренние поверхности раздела, композиционные строительные материалы, пенобетон, межпоровые перегородки, компьютерное моделирование, фрактальная размерность.

## MODELING OF FOAMED CONCRETE PROCESS STRUCTURE FORMATION AND EVALUATION METHODS OF ITS NATURE STRUCTURE

**Vietokh A.M.**, PhD., Assistant Professor,

**Martinov V.I.**, PhD., Assistant Professor,

**Antoniuk N.R.**, PhD, Assistant Professor,

*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

*vetoh.ogasa@gmail.com*

**Abstract.** The analysis of simulation types and their application in solving scientific and engineering problems, as well as in defining and optimizing the structure of foam mortar has been conducted.

Analysis of the obtained results allowed us to outline ways of enhancing the properties of foam mortar by controlling the nature of the solid phase distribution.

Developed software for computer aided engineering of materials structure formation of the macro porous structure and quantification indices such as the length of the internal surface of the section and equipotential fields tension. This software also allows to assess the character of the solid phase distribution in interporous partitions of foam mortar real structures.

Materials computer simulation of macro porous structure confirms the hypothesis about the influence of the nature of the solid component distributions on properties of foam mortars, and explains why with the average density growing and reducing the pore size of the foam mortar strength is increasing.

**Keywords:** structure, foam mortar, physical model, the inner surface of the partition, composite building materials, foam concrete, interporous partitions, computer aided engineering, fractal dimension.

**Вступ.** Одним з найбільш ефективних сучасних будівельних матеріалів є ніздрюватий бетон. Виробництво і попит на цей матеріал постійно зростають. Висока пористість ніздрюватого бетону забезпечує хороші теплоізоляційні властивості. Ця якість зумовлює його функціональне призначення в будівництві. З ніздрюватого бетону виготовляють в основному стінові конструкції. Особливості технології пінобетону дозволяють його використовувати для наливних підлог, утеплювати покрівлі, заповнювати різні порожнини (катакомби, тунелі та ін.). Тривалість функціонування системи (матеріалу, конструкції) залежить від умов експлуатації. Ці умови, в свою чергу, визначають будівельно-експлуатаційні властивості, що підлягають контролю.

Будівельно-експлуатаційні властивості композиційних будівельних матеріалів (КБМ), у тому числі й ніздрюватих бетонів, безпосередньо пов'язані з характером їхньої структури. При вивченні процесів структуроутворення й аналізу структури КБМ доцільно використовувати методи системного підходу [1, 2]. Це вимагає інтенсифікації та підвищення ефективності наукових досліджень.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Огляд літературних джерел (Берталанфі Л., Садовський В.М., Прангішвілі І.В., Могілевський В.Д., Горлов Ю.П., Меркін А.П., Устенко А.А., Вировой В.М., Дорофєєв В.С., Суханов В.Г., Мартинов В.І.) дозволив узагальнити і систематизувати інформацію про види моделювання і їх застосування, а також визначення й оптимізацію структури ніздрюватих бетонів.

**Мета досліджень** полягає в оцінюванні характеру структури матеріалів макропористої будови. Дослідження проводилися на підставі загальної схеми системних досліджень [3, 4].

**Об'єкт і методи дослідження.** В якості об'єкту досліджень був обраний пінобетон, як різновид ніздрюватого бетону. Подання пінобетону у вигляді системи дозволяє виявленні в процесі досліджень закономірності поширювати на ніздрюватий бетон в цілому.

Фахівці в області ніздрюватих бетонів, розглядаючи його структуру, виділяють дві фази в якості базових: тверду й газову [5]. Традиційно прийнято зводити властивості

ніздрюватих бетонів до їхньої середньої густини та характеру пористості. Для вивчення характеру пористості розроблено ряд методів і інструментів, що дозволяють визначати розмір, форму пор, розподіл їх по розмірах тощо. В основі проведених досліджень закладена гіпотеза про те, що властивості ніздрюватих бетонів визначаються характером розподілів твердої фази. Авторами виділені елементи твердої фази, що дозволяють розглядати пінобетон як об'єкт-систему. Особливості структуроутворення й експлуатації ніздрюватих бетонів обґрунтовують доцільність подання їх у вигляді відкритих, динамічних, самоорганізуючих систем [6].

Вибір модельного подання, досліджуваного процесу або матеріалу в цілому, визначався з умов рішення того або іншого завдання. При вивченні процесів структуроутворення матеріалів щільної або макропористої структури, а також характеру структури цих матеріалів, автори виходили з умов цілісності об'єкта в умовах його дискретної будови. Для рішення завдань визначення впливу рецептурно-технологічних факторів на фізико-механічні властивості, оптимізації складів була прийнята модель суцільного середовища. Вид моделей досліджуваної системи визначає відповідні методи досліджень.

**Результати досліджень.** Оптимізація дій систем техногенного походження по досягненню мети полягає в створенні системи з оптимальними параметрами й в умінні раціонально управляти нею в період експлуатації. Створення будівельних матеріалів починається з вибору вихідних сировинних матеріалів з необхідним комплексом властивостей і підбором складу інгредієнтів. Одночасно проводиться вибір способу виготовлення продукції, контролю виробництва і якості на всіх стадіях. Одним з визначальних етапів є технологічний етап.

При вивченні процесу структуроутворення й характеру структур композиційних будівельних матеріалів були застосовані різні види моделей.

На рис. 1, а зображена структура цементного каменю. Подібний характер структур спостерігається у всіх об'єктах, утворення яких супроводжується початковим зменшенням об'єму системи.

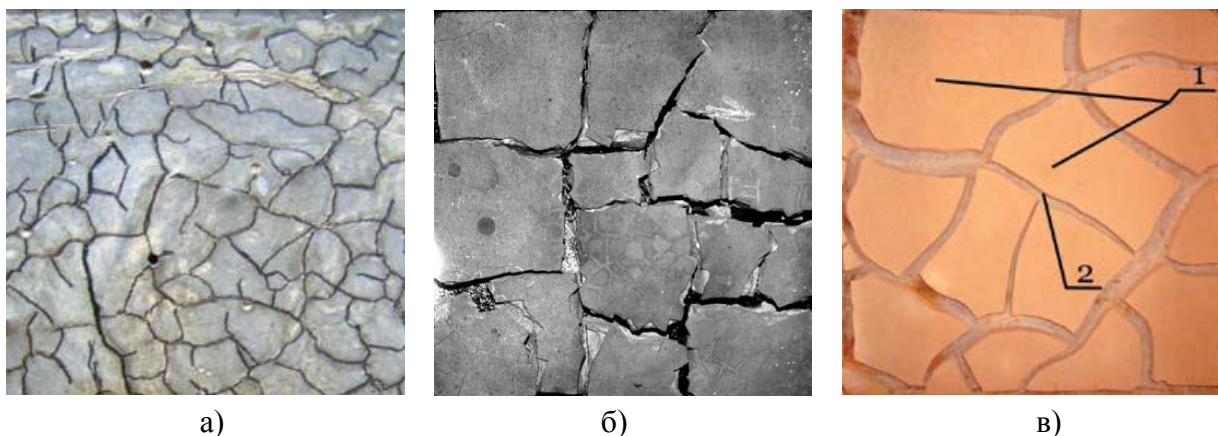


Рис. 1. Візуалізація структур: а – цементний камінь; б – характер руйнування цементного каменю; в – фізична модель структури цементного каменю;  
1 – структурний елемент, 2 – внутрішня поверхня розділу

При вивченні характеру структур моделей композиційних будівельних матеріалів був застосований метод аналогій. На рис. 1, в наведено загальний вид фізичної моделі цементного каменю. Модель була виготовлена з водоглиняної суспензії. Об'ємні зміни в моделі відбувалися за рахунок видалення вологи при висиханні в умовах навколишнього середовища. Візуалізація структури дозволила чітко виділити елементи структури. До них віднесені частки твердої фази (1, рис. 1, в) і внутрішні поверхні розділу (ВПР) (2, рис. 1, в). Внутрішні поверхні розділу є активними елементами структури цементного каменю, оскільки забезпечують його цілісність як об'єкта. З іншого боку, вони є найбільш слабкими ланками, тому що руйнування

відбувається саме по ВПР. Цей процес зафіксований на рис. 1, б, де показано характер руйнування зразка цементного каменю, підданого багаторазовим температурним впливам. Для руйнування об'єкта потрібно затратити певну кількість енергії. Кількість енергії пропорційна геометричним характеристикам внутрішніх поверхонь розділу (загальна довжина, площа, об'єм). Структурні елементи твердої фази та ВПР є взаємозалежною діалектичною парою. Від розміру структурних елементів і їхньої конфігурації залежить геометрія внутрішніх поверхонь розділу. Таким чином, властивості цементного каменю повинні корелювати з геометрією ВПР.

В пінобетоні в якості в'язучого використовується переважно портландцемент, отже, у міжпорових перегородках при їхньому твердінні будуть відбуватися ті ж процеси, що і в цементному камені, що твердіє, з утворенням таких же елементів структури. Однак, через малу товщину міжпорових перегородок візуалізація їх у ніздрюватому бетоні практично неможлива. В цьому випадку на допомогу приходить фізичне моделювання. На рис. 2 представлено вид фізичної моделі матеріалу макропористої структури. На моделі чітко видно структурні елементи твердої фази і внутрішні поверхні розділу, що утворилися в міжпоровому просторі в результаті зменшень об'єму матриці.

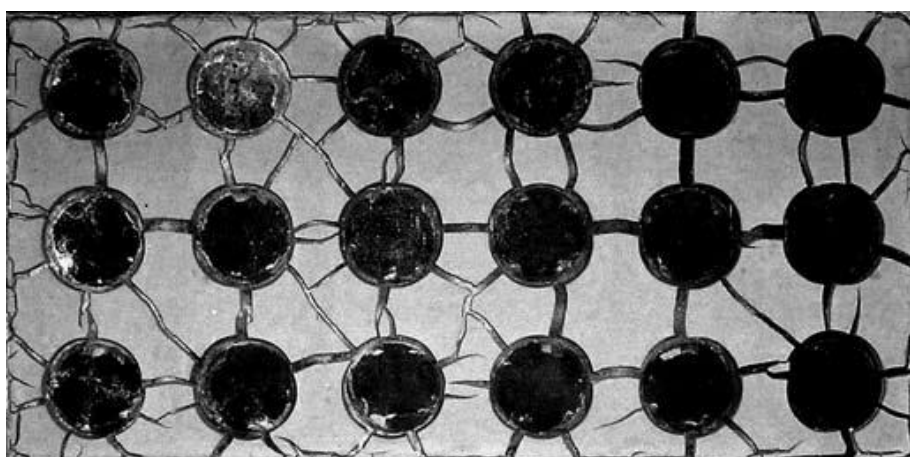


Рис. 2. Вид фізичної моделі матеріалу макропористої структури

Кількісний характер структури моделі оцінювали в слідуючій послідовності. Спочатку модель структури матеріалу фіксується цифровою відеокамерою. Оцифровані знімки піддаються комп'ютерній обробці для кількісного опису структурних параметрів. Це дає можливість прорахувати кількість структурних елементів, їх розміри, розподіл по розмірах. Для внутрішніх поверхонь розділу – довжину, площу та середньоарифметичну ширину. Цей метод був використаний при визначенні впливу водовмісту (водотвердого відношення), характеру орієнтування пор, їхнього розміру й форми на зміну перерахованих вище характеристик структури [7].

З розвитком комп'ютерної техніки почало широко застосовуватися комп'ютерне моделювання. У процесі рішення завдання про моделювання силових полів (рис. 3) у моделі матеріалу макропористої структури була висунута гіпотеза про тотожність силових полів різного походження. Повітряні включення в пінобетонній суміші являють собою сферу, оточену водною плівкою, яка втримується за рахунок мономолекулярного шару поверхнево-активної речовини, молекули якої чітко орієнтовані стосовно водного середовища. Виходячи із цього, повітряні включення були представлені як заряджені частки з однойменними зарядами.

Для моделювання силових ліній і полів застосовано закон Кулона. Для побудови силових ліній використовувалася формула (1):

$$E = (q/R_2). \quad (1)$$

Для побудови силових полів використовувалася формула (2):

$$F = (q/R). \quad (2)$$

Принцип суперпозиції визначає силові лінії й поля (3):

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n \text{ та } F = F_1 + F_2 + \dots + F_n. \quad (3)$$

Силові лінії і поля зв'язані між собою (4):

$$E = -\text{grad } F. \quad (4)$$

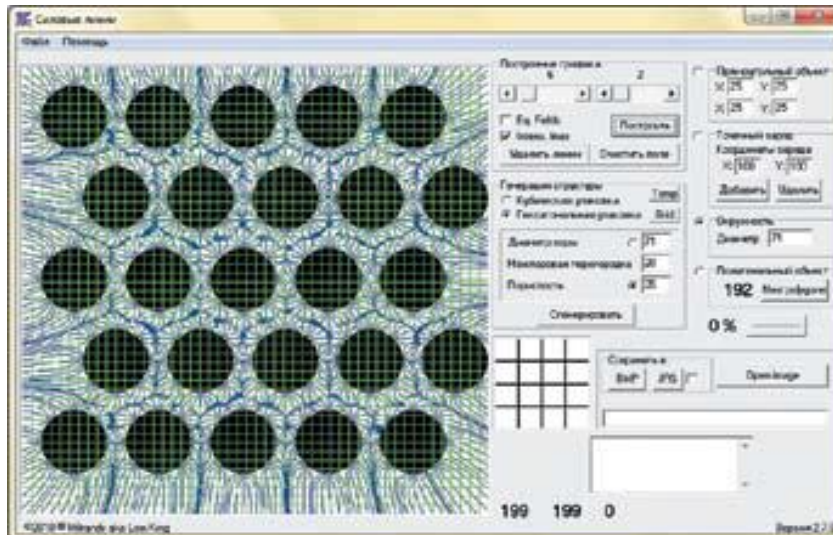


Рис. 3. Фрагмент комп'ютерної програми для побудови силових ліній

Розроблена комп'ютерна програма дозволила одержати віртуальні моделі з аналогічними фізичним моделям параметрами. Як видно на рис. 4, розташування внутрішніх поверхонь розділу на фізичній і комп'ютерній моделях ідентично. Таким чином, можна зробити висновок, що комп'ютерна модель у достатній мірі передає реальну картину формування внутрішніх поверхонь розділу.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє також зробити кількісну оцінку характеру структури реального матеріалу через показник сумарної напруженості міжпорового простору.

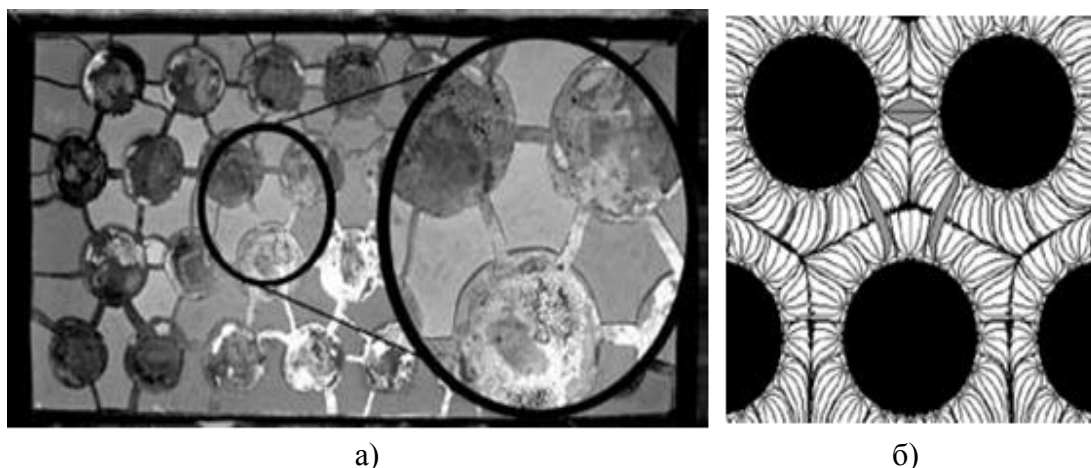


Рис. 4. Порівняння фізичної й комп'ютерної моделей:  
а – фізична модель; б – комп'ютерна модель

На рис. 5, а зображено розташування силових ліній на реальній фотографії поверхні зразка пінобетону, на рис. 5, б – розподіл еквіпотенційних полів у цій же структурі. На



підставі екіпотенційного поля розраховується його напруженість. Програмою також передбачено розрахунок фрактальної розмірності.

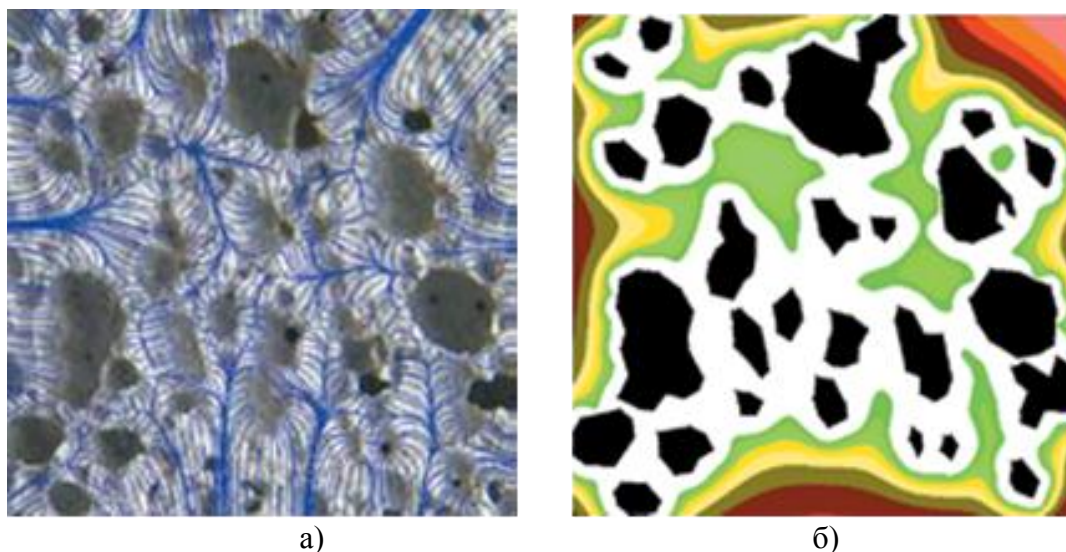


Рис. 5. Комп'ютерна обробка зразків пінобетону:  
а – розподіл силових ліній у міжпоровому просторі, б – екіпотенційні поля

**Висновок та перспективи подальшого дослідження.** Проведено аналіз видів моделювання і їх застосування при визначенні та оптимізації структур ніздрюватих бетонів.

Запропоновані методики та розроблене програмне забезпечення при їх подальшому удосконаленні можуть бути застосовані для прискореного прогнозування властивостей ніздрюватих бетонів, а також для синтезу штучних будівельних композитів з прогнозованими структурою і властивостями.

### Литература

1. Берталанфи Л. Общая теория систем: Обзор проблем и результатов / Л. Берталанфи // Системные исследования: Ежегодник. – М.: Наука, 1969. – С. 30-54.
2. Садовский В.Н. Общая теория систем: задачи и методы построения / В.Н. Садовский // Всесоюзное совещание по теории систем. – М., 1971. – С. 126-129.
3. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности / И.В. Прангишвили. – Москва: Изд. «Синтег», 2000. – 519 с.
4. Могилевский В.Д. Методология систем. Вербальный подход / В.Д. Могилевский. – М.: Экономика, 1999. – 251 с.
5. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, А.А. Устенко. – М.: Стройиздат, 1980. – 396 с.
6. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции: структура, самоорганизация, свойства / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов. – Одесса.: ТЕС, 2010. – 168 с.
7. Мартынов В.И. Анализ структурообразования и свойств неавтоклавного пенобетона. / В.И. Мартынов, В.Н. Выровой, Д.А. Орлов // Строительные материалы. – М., 2005. – № 1. – С. 48-49.

Стаття надійшла 12.06.2017