

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича

На правах рукопису

КРЮЧКОВ

Юрій Миколайович

МОДЕЛЮВАННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ ТА МАСОПЕРЕНОСУ
В ПОРОШКОВИХ ПРОНИКНИХ МАТЕРІАЛАХ
З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ СТРУКТУРНИХ ЕФЕКТІВ

Спеціальність: 05.16.06. - Порошкова металургія та
композиційні матеріали

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант:
чл.-кор. НАН України
Косторнов А.Г.

Київ - 1994

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики
та Інституті проблем матеріалознавства НАН України

Офіційні опоненти :

Доктор технічних наук, професор	Л. І. Тучинський
Доктор технічних наук, професор	В. В. Новіков
Доктор технічних наук, професор	І. М. Федоткін

Головна організація :

Дніпропетровський державний університет.

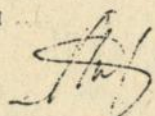
Захист дисертації відбудеться *30 січня* 1995 р.
в годин на засіданні спеціалізованої ради
Д.016.23.02 в Інституті проблем матеріалознавства НАН України
(252680, м. Київ-142, ДСП, ул. Кржижанівського, 3)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ІПМ НАН України

Автореферат розісланий *12.12.* 1994 р.

Вчений секретар ради

доктор техн. наук

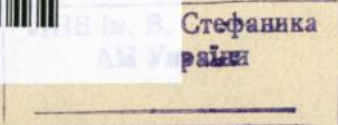


Р. В. Минакова

ЛННБ України ім. В. Стефаніка



00777249 (-)



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Розвиток і вдосконалення виробництва порошкових (керамічних, металевих) та композиційних матеріалів, розширення сфери їх використання в різних галузях техніки підвищує вимоги до структури як виробів, так і їх заготовок. Оптимізація технології формування і наступної обробки пористих заготовок передбачає вдосконалення моделювання пористої структури порошкових матеріалів і здійснюваних з їх допомогою технологічних процесів.

Існуючі методи моделювання структури і властивостей порошкових матеріалів не дозволяють в аналітичному вигляді врахувати ряд нелінійних структурних ефектів: залежність властивостей матеріала і параметрів його пористої структури від радіуса міжчасткових контактів і витягнутості складаючих матеріал часток, впливу на гідрогазодинамічні процеси у пористих матеріалах, зв'язку капілярів між собою внаслідок об'ємного капілярного (обумовлюється тривимірністю локальних течій при загальній одновимірності течії рідин і газів у пористому середовищі) перколяційних (обумовлених, наприклад, блокуванням більш крупних локальних об'єктів мілкими) ефектів.

Спільність підходу до аналізу порової структури і дисперсності вихідних матеріалів важлива при аналізі і прогнозуванні властивостей високопористих матеріалів, а також для скорочення експериментальних витрат, зумовлених великим розкидом одержаних даних в порогсвій області.

По цій причині питання вдосконалення моделей і методів моделювання і визначення структурних параметрів порошкових та композиційних матеріалів являється актуальним.

Ціллю і завданням роботи є розробка наукових основ моделювання пористої структури проникних порошкових матеріалів і процесів масопереносу в них шляхом аналітичного обчислення нелінійних структурних ефектів, а також структурна і перколяційна оцінка властивостей порошкових і композиційних матеріалів.

Наукова новина роботи. В цій роботі представлені вперше розроблені автором моделі і аналітичні та експериментальні методи:

- по вихідним матеріалам:

методи розрахунку процесів седиментації стоксовських суспензій

з використанням традиційного і запропонованого автором підходу, новий алгоритм для розрахунку седиментаційних процесів;

- по методам визначення параметрів структури пористих матеріалів і розрахунку технологічних процесів при їх виготовленні: моделі, які описують пористі матеріали із монодисперсних пошків, включаючи кластерну модель структури порошкових матеріалів з урахуванням закономірності розподілення координаційного числа в системі, процеси дренажу в середовищі з несполученими і сполученими капілярами для розрахунку параметрів пористої структури проникних матеріалів;

залежності для питомої поверхні і середнього радіусу пор (з урахуванням як координаційного числа, так і розмірів часток і міжчасткових контактів), пробойного радіусу пор, звивистості порового простору і проникності порошкових матеріалів; засобів і значення параметрів пористої структури проникних матеріалів;

метод розрахунку параметрів фільтраційного масопереносу в пористих, частково насичених рідинами матеріалах;

методики розрахунку гідродинамічних параметрів пористих форм, поля тиску при наборі відливки в процесі шлікерного литва і кінетики шлікерного литва з урахуванням тривимірності решітки монокапілярної моделі матеріала форм, впливу перетинання капілярів і середнього координаційного числа капілярної решітки; полікапілярна модель для моделювання процесів капілярного просочення і дренажу, що враховує вплив перетинання капілярів різних розмірів;

- по опису чи прогнозу і оцінці порошкових (композиційних) матеріалів:

методики розрахунку перколяційних характеристик дво- і тривимірних моделей пористих порошкових матеріалів;

узгальнена аналітична модифікація теорії перколяції для аналізу структури і властивостей пористих або композиційних матеріалів;

методика визначення структурних особливостей решіток, утворюваних в процесі кристалізації дисперсної фази, яка враховує вплив пористості та витягнутості викристалізованих часток;

метод розрахунку порогів перколяції для моделювання пористих і композиційних матеріалів, що враховує далекодію чи витягнутість складаючих систему часток;

методики перколяційної оцінки ступеню неоднорідності порис-

тої структури проникних матеріалів, матричності бідисперсних порошкових і композиційних матеріалів, структурної якості пористих матеріалів і якості міжчасткових контактів.

Метод дослідження. В цій роботі використані аналітичні структурно-геометричний, та структурно-перколяційний методи для моделювання пористих і композиційних матеріалів.

Практичне значення досліджень, виконаних в роботі, полягає в тому, що одержані в ній результати призначені для оптимізації і контролю технології виготовлення і експлуатаційних властивостей проникних і композиційних матеріалів, скорочення трудомісткості і тривалості експериментальних досліджень, виявлення факторів, суттєво впливаючих на технологію виготовлення і властивості проникних матеріалів.

Основні положення, які виносяться на захист:

Теоретичні :

1. Модель структури монодисперсних порошкових матеріалів із часток і кластерна модель на її основі.
2. Необхідність урахування об'ємного капілярного ефекту в розрахунках фільтраційних процесів в пористих матеріалах і розроблені для цього тривимірні моделі порової структури:
 - а) монодисперсних порошкових матеріалів;
 - б) моно- і полікапілярна моделі пористого середовища.
3. Аналітична модифікація теорії перколяції.

Методичні :

1. Методична єдність підходу до визначення дисперсності порошоків по седиментаційним кривим і параметрів порової структури проникних матеріалів в методі газорідинної порометрії.
2. Необхідність урахування пружності міжчасткових контактів при розрахунку модуля пружності неоднорідних систем змінною величини перколяційного індексу.
3. Розроблені на основі теоретичних положень:
 - а) метод визначення параметрів фільтраційного масопереносу в пористих матеріалах.
 - б) методи розрахунку гідродинамічних параметрів проникних матеріалів, кінетики шлікерного литва і поля тиску при наборі відливки в процесі литва на монокапілярній моделі;
 - в) методи визначення параметрів пористої структури проникних матеріалів і розрахунку кінетики дренажних процесів на полікапілярній моделі;
 - г) аналітичний метод розрахунку порогів перколяції для моделю-

седиментації і дренажу. Розглянута узагальнена модель для опису структурних параметрів засипок і пористих матеріалів із монодисперсних порошоків.

Розглянуто одержання розрахункових виразів інтегральної функції розподілення порошкових матеріалів по седиментаційній кривій в гравітаційному полі $M_i = f(t)$, $1 < i < n$, де M_i - сумарна маса часток i -х фракцій, які осіли за момент часу за відповідний час t_i . Вона вивчається їх часткою m_i і відношенням t_i відносно часу повного осадження i -х фракцій. Записавши для неї вираз в моменти $t_1 - t_n$ і віднімаючи кожен наступну рівність із попередньої, знаходимо значення інтегральної функції розподілення

$$y_i = \frac{\sum_1^i m_i}{\sum_1^n m_i} ;$$

$$y_1 = t_1 t_2 (M_1/t_1 - M_2/t_2) / [(t_2 - t_1) M_n] ;$$

$$y_i = t_1 t_{i+1} (M_i/t_i - M_{i+1}/t_{i+1}) / [(t_{i+1} - t_i) M_n] , \quad y_n = 1. \quad (1)$$

Для контролю розподілення часток порошкових матеріалів по розмірам в області менше, ніж 1 мкм, зручно проводити дисперсний аналіз у полі центробіжних сил.

При інтегруванні виразу закону Стокса для седиментації в центробіжному полі, знаходимо час, за який частки з седиментаційним діаметром D_i переміщуються з кола радіусом R_n до кола радіусом R_0 і величину радіуса $R_{j,i}$, до якого пройшла седиментація i -ї фракції, коли із суспензії повністю осіла більш крупна j -а ($j=1,2,\dots,n-1$) фракція:

$$C_i t_i = -\ln(R_0/R_n), \quad R_{j,i} = R_0 \exp(-t C_{j,i}), \quad \text{де } C_i = D_i^2 (\rho - \rho_x) \omega^2 / (18\mu),$$

ω - кутова швидкість обертового ротора центрифуги, $R_{n(o)}$ - радіус, який відповідає поверхні рідини (приймальній чаші вагів).

В результаті маємо:

$$m_n = (M_n - M_{n-1})(R_0 - R_n) / [R_0 \exp(-t_{n-1} C_n) - R_n] \quad (2)$$

$$m_i = \frac{(M_i - M_{i-1})(R_n - R_0) - R_0 \sum_{j=i+1}^n [m_j \exp(-t_{i-1} C_j) - \exp(-t_i C_j)]}{R_0 \exp(-t_{i-1} C_i) - R_n} \quad (3)$$

Як m_j під знаком суми використовуються раніше розраховані по (3) значення m_i послідовно від m_n до m_{i+1} .

Аналогічні вирази одержані для випадка, коли приймальна ча- ша седиментаційних вагів виконана у вигляді бокової поверхні (або її частини) циліндра з радіусом R_0 .

В роботі одержані також розрахункові вирази при фізично більш стрункому підході до аналізу седиментаційного процесу, в якому враховується, що за час $t_i - t_{i-1}$ осаджується тільки половина час- тини часток i -й фракції з діаметром, який відповідає часу седимен- тації $0,5(t_i + t_{i-1})$.

Моделювання процесів дренажу для розрахунку параметрів пористої структури проникних матеріалів і контролю технологічних параметрів процесу виготовлення керамічних, гіпсових та інших ви- робів на основі порошкових матеріалів.

Для рішення оберненої задачі процесу обезводнювання проник- них матеріалів в моделі пористого середовища з неперехрещеними капілярами диференцюємо вирази для насичення капіляра $m=(1-k)/k$ і підставляємо їх в рівняння Пуазейля для течії витісненої газом рідини з наступним інтегруванням його від $1(0)$ до $m(t)$ по наси- ченню (часу). В результаті одержимо:

$$m = [1 - r_{\Sigma,i}^2 (P - 2 \gamma \cos \theta / r_{\Sigma,i}) t / (4\mu l_K^2)]^{0,5}, \quad (4)$$

Нехай відома часова залежність витрати стисненого повітря (під постійним тиском) при обезводнюванні пористого зразка. Для визначення розподілення об'єма пор по розмірам запишемо рівняння (4) для капіляра i -ї групи пор з радіусом $r_{\Sigma,i}$, і, прирівнявши величину m до нуля, вирішимо його відносно $r_{\Sigma,i}$:

$$r_{\Sigma,i} = \gamma \cos \theta / P + [(\gamma \cos \theta / P)^2 + 4\mu l_K^2 / (t_i P)]^{0,5}. \quad \text{Тут } t_i - \text{ час}$$

спорожнення пор i -ї групи при постійному тиску повітря.

В роботі описаний метод для визначення коефіцієнта звивис- тості з використанням ефективного розподілу об'єма пор по розмірам, одержаного дренаванням насиченого рідиною зразка при постійному тиску повітря, а також шляхом ступінчатого підйому тиску повітря перед зразком і виміру витрати повітря, яке прохо- дить через зразок.

Розроблений також метод визначення параметрів пористої структури проникних матеріалів, який застосовується для моделі

пористого середовища як з несполученими, так і з сполученими капілярами. Він оснований на вимірванні кінетики витрати повітря через насичений рідиною зразок при двох постійних значеннях тиску повітря перед зразком.

Запропоновано уточнення методу газорідинної порометрії (ГРП) шляхом вимірювання на ступенях підйому тиску газу вологомісткості зразка (по його вазі) замість витрати газу (в доповнення до нього).

Структурні параметри моделі пористих матеріалів із малодисперсних порошків. Для оцінки структури проникних порошкових матеріалів використані розмір D часток, з яких складаються матеріали, пористість Π і питома поверхня S_0 , середнє координаційне число Z і радіус d_K міжчасткових контактів.

Площа контактів між частками і середнє координаційне число в системі (середнє число контактів, які приходяться на одну частку) урахуються через пористість системи у вигляді:

$$1 - \Pi_2 = (1 - Z)(1 - 2h_2/D)^2 \cdot \text{tg}(\pi/Z), \quad (5a)$$

$$1 - \Pi_3 = (1 - 2/Z)^2 [1 - 8(1 - 1/Z)(0,5 - h_3/D)^3], \quad (5b)$$

$$\text{де } h_0 = [D - (D^2 - d_K^2)^{0,5}] / 2, \quad h_3 = h_0 - 4h_0^2(1,5D - h_0) / (3d_K^2), \\ h_2 = h_0 - 0,25D^2 [\arcsin(d_K/D) + (d_K/D)(1 - 2h_0/D)] / d_K. \quad (6)$$

Одержані вирази дають змогу розрахувати через гідравлічний радіус r_r , питомий периметр (питому поверхню) $S_{02}(3)$ і еквівалентний радіус пор $r_{\Sigma 2}(3)$ дво- і тривимірних систем:

$$S_{02} = 4(1 - \Pi_2) \{1 - (Z/\pi) [\arcsin(d_K/D) - 2(h_0 - h_2)/D]\} / D, \quad (7a)$$

$$S_{03} = 6(1 - \Pi_3) \{1 - Z[h_0/D - d_K/D(h_0 - h_3)/D]\} / D, \quad (7b)$$

$$r_{\Sigma 2}(3) = 2r_r = 2\Pi_2(3) / S_{02}(3). \quad (8)$$

По одержаним виразам проведено розрахунок координаційного числа Z дво- і тривимірних систем для різних значень пористості і розмірів міжчасткових контактів. Результати розрахунку наведені в табл. 1. Із таблиці видно, що збільшення розміру контакта при великих значеннях пористості незначно знижує координаційне число.

При пористостях, достатньо близьких до мінімальних, вплив d_k на нього різко збільшується.

Заслужує уваги той факт, що для тривимірної системи співвідношення d_k/D практично не впливає на залежність $r_3/D=f(z)$.

Описана модель дає змогу визначити питому контактну довжину (площу) S міжчасткових контактів в одиничній площі чи об'єму модельованого матеріалу міститься відповідно

Таблиця 1

Пористість %	Z при d_k/D рівному				
	0	0,05	0,1	0,2	0,4
	$M_n = 2$				
0,093	6,000	5,969	5,938	5,812	5,344
0,215	3,992	3,992	3,984	3,952	3,811
0,395	3,004	3,004	2,996	2,984	2,945
0,660	2,383	2,382	2,382	2,379	2,367
0,840	2,193	2,193	2,193	2,191	2,188
	$M_n = 3$				
0,260	11,188	11,125	10,938	10,250	8,250
0,320	8,969	8,938	8,844	8,438	7,094
0,476	5,875	5,844	5,812	5,656	5,125
0,550	4,992	4,984	4,981	4,969	4,500
0,660	4,047	4,047	4,031	3,969	3,766
0,840	2,969	2,969	2,961	2,938	2,867

Розглянемо двофазну пористу статистичну систему, в якій частки обох фаз А і В мають однакові розміри. Прийнемо, що імовірність утворення одноимених А-А і В-В і різноимених (міжфазних) АВ контактів прямо пропорційна добутку відповідних об'ємних концентрацій $v_A^2/2$, $v_B^2/2$ і $v_A v_B$. Тоді питома середня площа контактів визначається виразами:

$$S_{ок2}(z) = S_{ок2}(z) v^2, \quad S_{омф2}(z) = S_{ок2}(z) v(1-v), \quad (10)$$

де $S_{ок2}(z)$ - розраховується по виразам (9), v - об'ємна концентрація однієї із фаз.

Як приклад використання розглянутої моделі описаний метод розрахунку міцності індивідуальних міжчасткових контактів в порошкових матеріалах по експериментальним даним.

Розглянута модель порової структури дає змогу урахувати величину середнього контакту і координаційне число для пористих монодисперсних вузькофракційних порошкових матеріалів.

Порова структура монодисперсних проникних матеріалів. На основі вищеописаної моделі розроблена тривимірна модель порової структури монодисперсних проникних матеріалів у вигляді решітки з кроком $D - 2h$, де h - висота кульового сегмента, матеріал якого перерозподілився на міжчастковий циліндричний контакт. Пору представлена у вигляді порожнини паралелепіпедоїдної елементарної ячейки, яка обмежена частиною поверхні чотирьох сферичних часток (при $Z = 6$). При збільшенні z відбувається утворення кубовидних пор ($Z = 8$), які з'єднуються між собою через дві тетраедричні.

Залежність звивистості ξ від пористості системи враховується наступним чином. Із розгляду простої кубічної решітки ($Z=6$) виходить, що максимальна ξ відповідає нахилу ячейки під кутом 45° , тобто рівна $\sqrt{2}$. Приймаючи, що в середньому $\xi = 1 + (\sqrt{2} - 1)/2$ і використовуючи вигляд залежності для ξ в моделі хаотично розположених сфер, одержимо для порошкових матеріалів:

$$\xi = 1 / [P(1 - \ln P)].$$

Урахування розміру міжчасткових контактів проведемо виходячи з того, що збільшення d_k , не скорочуючи траєкторію шляху, зменшує висоту елементарної ячейки у співвідношенні $(D - 2h)/2$:

$$\xi = 1 / [P(1 - (1 - 2h/D) \ln P)], \quad (11)$$

де h розраховується по виразу (7).

Розглянута модель дає змогу коректніше співвідносити гідро- і газодинамічні параметри порового простору із структурою матеріала. Зокрема, вона дає змогу більш коректно оцінити і визначення проникності:

$$K = P^2 r^2 [1 - (1 - h/D) \ln P] / 8 = P^4 D^2 [1 - (1 - h/D) \ln P] / [12Z(1 - P)^2]. \quad (12)$$

По проникності (експериментальній) матеріала, можна розрахувати середній радіус капілярів: $\bar{r} = (8K/P^2) / [1 - (1 - h/D) \ln P]^{0.5}$.

При $Z = 12$ протікання рідини через пору решітку проходить від однієї кубоподібної пори до другої паралельно по двом тетраедричним порам. Приймаючи, що із збільшенням Z від 6 до 12 кількість утворених подвійних тетраедричних пор пропорційна величині $Z/6$, одержуємо: $r = 2P(6/Z)^{0.5} / S_0$.

Оскільки збільшення d_k при постійній пористості приводить до

збільшення середнього радіуса пор r , а збільшення звивистості ξ при однаковій пористості приводить до протилежного результату, то обидва фактори в значній мірі компенсують один одного і їх можна виключити, залишивши залежність середнього розміру пор від збільшення числа капілярів від пористості при $Z > 6$. Тоді, приймаючи в попередньому виразі $h = 0$, одержимо аналогічний формулі Козені, фізично коректніший вираз, який краще узгоджується з експериментальними даними:

$$\bar{r} = \Pi D(6/Z)^{0,5} / [3(1 - \Pi)]. \quad (13)$$

Залежність (12) задовільно узгоджується з експериментальними даними для порошкових матеріалів на основі бронзи (див. табл. 2).

Таблиця 2.

Фракція, мм	S_0 , м ² /кг	Фактор форми	Насипна щільність кг/м ³	Π , %	$K \cdot 10^{13}$, м ²	
					Розрахунок	Експеримент
-0,1+0,063	15,7	0,99	2580	34-36	47-65	50-60
-0,16+0,1	8,5	0,98	2600	35-37	151-207	120-145
-0,2+0,16	8,1	0,97	2610	36-38	243-332	220-270
-0,315+0,2	5,8	0,98	2700	37-38	555-647	510-560
-0,4+0,315	4,9	0,98	2670	37-38	778-907	720-830

Таким чином, розглянута тривимірна модель порової структури порошкових проникних матеріалів із монодисперсних і фракціонованих матеріалів дає змогу урахувати величину середнього контакту і координаційне число твердої фази, питому поверхню, середню питому поверхню контактів і ефект роздвоєння капілярів в порошкових матеріалах при зниженні їх пористості.

Розділ другий. "Моделювання гідродинамічних процесів в пористих матеріалах" присвячений моделюванню гідродинамічних процесів в пористих матеріалах, які використовуються в технології виготовлення і контролю порошкових, керамічних та інших матеріалів з урахуванням капілярних ефектів.

Метод визначення коефіцієнту конвективної дифузії. Для моделювання масопереносу в пористих, частково насичених рідинами матеріалах (при розробці теплових труб і розрахунках процесів сушки різних матеріалів) необхідно визначити коефіцієнти фільтраційного переносу пароподібних рідин.

Розглянемо метод [7,34] визначення коефіцієнта конвективної

дифузії, який оснований на рішенні одномірної лінійної задачі фільтраційного переносу парогазової суміші під дією градієнта тиску при вимірюванні релаксації тиску заданого об'єму повітря через пори зразка. В цьому випадку граничні умови для рівняння масопереносу можна записати в вигляді:

$$P(h, t) = 0, \quad k_p \frac{\partial P(0, t)}{\partial x} = \frac{1}{\Pi b^2 S} \frac{\partial G}{\partial t}$$

Тут P - надмірний тиск парогазової суміші в матеріалі, h - товщина зразка, t - час, k - коефіцієнт проникності матеріала для парогазової суміші, b - ступінь заповнення пор парогазовою сумішшю, S - площа нормального до напрямку фільтрації перерізу зразка, G - маса повітря в заданому об'ємі.

Підстановкою $\partial G / \partial t = [\partial G / (\partial P)] [\partial P / (\partial t)]$ і заміною $\partial G / \partial P$ по рівнянню Клапейрона-Менделєєва приводимо рівняння до маючого відоме аналітичне рішення, прологарифмувавши яке при $x = 0$, одержимо вираз для розрахунку коефіцієнта конвективної дифузії:

$$a_p = (\ln P_2 - \ln P_1) h^2 / [\mu_1^2 (t_2 - t_1)], \quad \mu_1 t g \mu_1 = h P S / V';$$

де $a_p = k_p / C_p$ - коефіцієнт конвективної дифузії, C_p - об'ємна ємність матеріалу по відношенню до парогазової суміші, $P_{1(2)}$ - значення тиску заданого об'єму повітря в момент часу $t_{1(2)}$.

Запропонована методика підвищує точність і зменшує об'єм розрахунків (за рахунок виключення численного диференцювання експериментальних кривих) при визначенні коефіцієнтів фільтраційного масопереносу методом нестационарної фільтрації газу.

Гідродинамічні параметри пористих форм і модель шлікерного литва на монокапілярій моделі. Існуючі методи розрахунку всмоктувочої властивості пористих форм для шлікерного литва виробів із порошкових матеріалів, оснований на моделі пористого середовища у вигляді системи паралельних, неперехрещених капілярів еквівалентного радіуса, тому вони не враховують тривимірності реальної пористої структури форм.

Пористу структуру матеріалу форми представимо у вигляді тривимірної решітки із циліндричних капілярів з еквівалентним радіусом r_3 . Звистість капілярів ξ і координаційне число Z , які утворюються в матеріалі капілярної решітки, визначимо за допомогою

моделі хаотично розміщених сфер:

$$\zeta = [\Pi(1 - 0,51\ln\Pi)]^{-1}, \quad Z = -81\ln\Pi, \quad \text{де } \Pi - \text{пористість.}$$

Прийmemo капілярну сітку в середньому прямокутної. Залежність її координаційного числа від пористості при $Z < 6$ врахуємо розтягом сітки в напрямку фільтрації, а при $Z > 6$ - збільшенням кількості транспортних і поперечних каналів пропорційно відношенню $Z/6$.

Співвідношення між r та кроком h кубічної капілярної сітки знайшли з геометричного аналізу з наступною апроксимацією одержаних значень: $r_3/h_T = 0,4118\Pi - 0,2964\Pi^2 - 0,0117$.

Визначимо співвідношення між довжиною капілярів в елементарній ячeyці в напрямку фільтрації і в поперечних напрямках l'_Π/l_T в залежності від пористості:

$$l'_\Pi/l_T = [1 - (r_3/h_T)(\zeta+1) - (\zeta-1)/4](-81\ln A - 2)/(8\zeta),$$

где $A = \Pi$ при $\Pi > 0,4724$ и $A = 0,4726$ при $\Pi < 0,4724$.

Врахований залишковий повітровміст $\Delta\Pi$ в матеріалі після його просичення водою. По моделі повітря залишається в поперечних капілярах. Тому, враховуючи частку пористості, яка приходитьcя на поперечні капіляри $\Pi_\Pi/\Pi = 4(l'_\Pi/l_T)/(1 + 4(l'_\Pi/l_T))$, одержуемо:

$$l'_\Pi/l_T = (\Pi_\Pi/\Pi - \Delta\Pi/\Pi)/4.$$

Тоді усереднена швидкість просичення пористого матеріалу, описується слiдуyчим рівнянням:

$$dl/(dt) = (2\gamma\cos\theta/r_3) r_3^2/[8\mu l(1+4l'_\Pi/l_T)(1+2l'_\Pi/l_T)], \quad (14)$$

де t - тривалість фільтрації.

У виразі (14) враховано, що транспортних капілярів в запропонованій моделі менше ніж в моделі неперехрещених капілярів в $(1+4l'_\Pi/l_T)$ раз, а $(1+2l'_\Pi/l_T)$ разів, а враховує поступове зменшення швидкості в поперечних капілярах до нуля (швидкість в них в середньому в 2 рази менше, ніж в транспортних капілярах).

Заміниючи 1 виразом $\zeta V/(\Pi S)$ і інтегруючи рівняння (14) від 0 до V (від 0 до t), одержимо в загальному випадку:

$$t/V^2 = 2\mu(1+4l'_\Pi/l_T)(1+2l'_\Pi/l_T) / [\Pi^4 S^2 r_3^3 (1 - 0,51\ln\Pi)^2 \gamma\cos\theta],$$

де V - об'єм всмоктоної рідини, S - площа фільтрації.

Із останнього рівняння одержуємо вираз для r_3 :

$$r_3 = 2\mu(1 + 4l'_p/l_T)(1 + 2l_p/l_T)V^2 / [\Pi^4 S^2 t(1 - 0,5ln\Pi)^2 \gamma \cos\epsilon] \quad (15)$$

і питомого об'ємного опору матеріала форми :

$$\eta = 8(1 + 4l'_p/l_T) / [r_3^2 \Pi(1 - 0,5ln\Pi)].$$

В табл. 3 приведені гідродинамічні параметри пористої структури форм, розраховані по експериментальним залежностям просищення пористих зразків. Із неї видно, що знехтування тривимірності пористої структури матеріалу форм приводить до заниження значень еквівалентного радіуса пор більш ніж в п'ять разів і до відповідного завищення питомого об'ємного опору матеріалу форм.

Таблиця 3

Матеріал	Π , м ³ /м ³	l'_p/l_T	$t/V^2 \cdot 10^{12}$, с/м ⁶	$\eta \cdot 10^{-14}$, м ⁻²	r_3 , мкм	
					по (15)	по звичайній методі
Полівінілхлорид, cos $\epsilon=0,9$	0,350	0,135	2,30	0,0858	1,640	0,2710
Гіпс(Куйбишевський комбінат, α -напівгідрат), cos $\epsilon=1$	0,500	0,173	3,56	1,280	0,396	0,086
	0,440	0,198	5,53	1,512	0,379	0,074
	0,395	0,154	10,00	2,936	0,276	0,049
	0,350	0,135	21,40	7,424	0,176	0,029
Кераміка, cos $\epsilon=1$	0,300	0,112	35,00	9,180	0,162	0,025
	0,383	0,149	60,00	90,93	0,0498	0,0086
	0,350	0,135	102,50	170,30	0,0368	0,0062
	0,326	0,124	125,00	177,80	0,0364	0,0058

Так, для гіпсу еквівалентні радіуси, розраховані по відомій методіці, відносяться до мікропор, в той час як реальний об'єм мікропор в гіпсових матеріалах не перевищує 1-2%.

Розглянутий процес шлікерного литва на проаналізованій вище моделі пористої структури. Визначений еквівалентний радіус пор матеріалу форм, який забезпечує максимальну швидкість набору відливки при заданій пористості:

$$r_{3,1}^{OPT} = \{ \Pi_0 r_{0,0}^2 (1 + 4l'_p/l_T) / [k \Pi_0^2 \epsilon_0 (1 + 4l'_{po}/l_{To})] \}^{0,5}$$

Моделювання поля тиску при наборі відливки в процесі шлікерного литва. Керамічні відливки, одержані шлікерним литвом, відно-

сяться до стиснених осадків, тому при оптимізації процесу литва потрібно враховувати вплив стисливості відливки на розподілення тисків у ній і на її густину (вологість). Густина відливки однозначно визначається тиском на частки відливки, тому достатньо визначити кінетику його зміни в процесі набору відливки.

Приймаємо, що модель ущільнення відливки описується моделлю Терцагі, яка являється паралельним сполученням тіл Гука (пружне тіло) і Ньютона (в'язке тіло). Тоді лінійну модель процесу литва можна представити у вигляді:

рівняння консолідації відливки

$$\partial P / (\partial t) = \bar{b} \partial^2 P / (\partial x^2), \quad 0 \leq x \leq h, \quad t > 0;$$

$$\text{граничних умов} \quad P[x=h(t), t] = P_3 \quad \text{і}$$

$$P(x=0) = P_3 [\eta_0 / (\zeta \Pi_0)] / [\bar{\eta} + \eta_0 / (\zeta \Pi_0)];$$

і рівняння фільтрації з утворенням осадка, наприклад:

$$\partial h / (\partial t) = P_3 \zeta / \{\mu h [\bar{\eta} + \eta_0 / (\zeta \Pi_0)]\}, \quad (16)$$

де t - тривалість набору відливки; $\bar{b} = G(\bar{\mu} \eta)$ - коефіцієнт консолідації, усереднений по перерізу відливки; G - усереднений по перерізу відливки модуль стискання; μ - в'язкість фільтрату; $\bar{\eta} = \eta_1' (1 + 0,5 P_3 / \zeta \bar{G})$ - середній питомий об'ємний опір стисненої відливки, η_1' - середній питомий опір відливки, одержаний рішенням рівняння (16); $P_3 = 2 \Pi_0 \gamma \cos \theta / g_3$ - ефективний тиск (рушійна сила); Π_0 - відкрита пористість матеріалу форм; γ - поверхневий натяг фільтрата; θ - крайовий кут змочування.

Інтегруючи рівняння (16) по h і t , одержимо

$$h^2 = 2 P_3 \zeta^2 \Pi_0 t / [\mu (\eta_0 + \bar{\eta}_1' \zeta \Pi_0)].$$

В роботі описана методика розрахунку поля тиску на частки відливки з використанням методу кінцевих різниць і наведений приклад розрахунку.

Полікапілярні моделі для моделювання процесів шлікерного литва і капілярного просочення. В роботі проведений якісний опис процесу шлікерного литва в пористі форми на моделі пористого се-

редовища з перехрещеними капілярами різних радіусів і показано, що її застосування дає змогу упростити процес оптимізації шлікерного литва в пористі форми і полегшити обробку параметрів процесу. Для кількісного аналізу фільтраційних процесів в пористих матеріалах ця модель пористої структури модифікована зведенням до капілярної з урахуванням координаційного числа капілярної решітки і звивистості капілярів від відкритої пористості капілярів.

Одержана система звичайних диференціальних рівнянь для опису процесу просочення на полікапілярній моделі з n груп сполучених капілярів ($i=1,2,\dots,n$):

$$\frac{d(l_1 - l_2)}{dt} = \left(\frac{P_1 - P_2}{l_1 - l_2} - \varphi \right) \frac{\Pi_1 r_1^2}{8\mu \xi}, \quad i=1;$$

$$\frac{d(l_i - l_{i-1})}{dt} = \left(\frac{P_i - P_{i+1}}{l_i - l_{i+1}} - \varphi \right) \frac{i \sum_{i=1}^i \Pi_i r_i^2}{8\mu \xi \Pi_i} -$$

$$- \left(\frac{P_{i-1} - P_i}{l_{i-1} - l_i} - \varphi \right) \frac{i-1 \sum_{i=1}^{i-1} \Pi_i r_i^2}{8\mu \xi \Pi_i}, \quad 2 < i < n;$$

$$\frac{dl_n}{dt} = \frac{[P_n - (l_n - l_0)\varphi] \sum_{i=1}^n \Pi_i r_i^2}{8\mu \xi \Pi_n l_n} -$$

$$- \left(\frac{P_{n-1} - P_n}{l_{n-1} - l_n} - \varphi \right) \frac{n-1 \sum_{i=1}^{n-1} \Pi_i r_i^2}{8\mu \xi \Pi_n}, \quad i = n.$$

Розглянутий підхід дає змогу розрахувати процес просочення матеріалів з не повністю виведеною рідкою фазою.

Аналогічна система рівнянь одержана в роботі для розрахунку шлікерного литва.

Результати розрахунку кінетики процесу вертикального просочення водою пористого керамічного зразка бікапілярної структури показали, що кінетика процесу капілярного просочення залежить не тільки від радіусів капілярів, але і від співвідношення числа капілярів в різних групах, тому визначення розподілення пор по розмірам в проникних матеріалах по кінетиці всмоктування ними рідини слід визнати недоцільним.

Фільтраційне зневоднювання пористих матеріалів. В роботі викладений фізично коректний метод розрахунку процесу витіснення змочуючих рідин із однорідних пористих середовищ, оснований на моделі пористого середовища у вигляді сполучених звивистих капілярів різних радіусів.

Швидкість витіснення рідин із капілярів i -ї групи через i -п капілярів виразимо у вигляді:

$$dl/dt = (P + P_{k,i}) \frac{\sum_i^n U_i r_i^2}{[8\mu(1_K - l_i)]}. \quad (17)$$

Підставляючи в (17) вираз для насичення капілярів $m_{i,j} = (1_K - l_i)l_K$ після інтегрування від 0 до m_i і від 0 до t одержимо:

$$m_{i,j} = [1 - (P + P_{k,i})t_i / (4\mu U_i l_K^2) \sum_i^n U_i r_i^2]^{0,5}$$

Таким чином, на відміну від процесу витіснення рідини газом в моделі несполучених капілярів, де рідина витісняється одночасно із усіх капілярів, капілярний тиск яких менший тиску газу, в реальному пористому середовищі рідина витісняється послідовно, починаючи з найбільших капілярів.

На базі викладених вище уявлень був розроблений спосіб литва під тиском [40].

При відомому розподіленні об'єму пор по розмірам (визначеному по зміні вологомісткості матеріалу при ступінчастому підйомі тиску, який витискує вологу повітря) і кривій зміни вологомісткості при витискуванні вологи із матеріала під постійним тиском повітря, визначаємо коефіцієнт звивистості для капілярів i -ї групи:

$$\xi_i = \{t_i [(P + P_{k,i}) \sum_i^n U_i r_i^2 / (4\mu U_i h^2)]\}^{0,5}$$

Звивистість пор можна визначити одночасово з розподіленням об'єму пор по розмірам по кінетиці витіснення рідини із пор газом із двох зразків з однаковою пористою структурою при двох різних тисках газу:

$$P_{k,i} = (l_1^2 t_{i,2} P_2 - l_2^2 t_{i,1} P_1) / (l_2^2 t_{i,1} - l_1^2 t_{i,2})$$

$$\xi_i = \{t_{i,1(2)} (P_{1(2)} + P_{k,i}) \sum_i^n U_i r_i^2 / (4\mu U_i h^2)\}^{0,5}$$

Розрахунок кінетики процесу обезводнення (дренажу) на основі моделі пористого середовища у вигляді сполучених звивистих капілярів різних радіусів зводиться до наступних етапів:

1. Визначається розподіл вологовмісткості по розмірам і коефіцієнти звивистості капілярів.
2. Розраховується тривалість опорожнення капілярів i -х груп при заданому тиску повітря.
3. Визначається кількість груп і капілярів, які повністю опорожнилися до заданого проміжку часу.
4. Визначається вміст маси матеріалу в задані проміжки часу

$$U(p, t) = U_m - \sum_{i=1}^i U_i - U_{i+1} \left\{ 1 - \left[1 - \left(t - \sum_{i=1}^i t_i \right) / t_{i+1} \right]^{0.5} \right\}$$

Описана вище модель пористого середовища дає змогу передбачити і урахувати деякі технологічні ефекти, які мають місце в пористих матеріалах при їх обробці. Так, наприклад, значне підвищення ефективної міцності гіпсових матеріалів на розтяг при їх фільтраційному обезводнюванні можна використати для його інтенсифікації [38].

Розділ 3. "Параметри структури пористих матеріалів з точки зору теорії перколяції" присвячений розробці аналітичної теорії розрахунку перколяційних характеристик для задачі зв'язків і вузлів на моделюючих ці матеріали решітках. В ньому розглянуто статистичний опис процесу масопереносу в пористих середовищах, ускладненого капілярними ефектами на моделі пористого середовища із перехрещених звивистих капілярів довжиною Δl у вигляді кубічної решітки.

В результаті одержано вираз для перколяційної вірогідності (визначає долю вузлів, які належать бескінечному кластеру моделюючої решітки) q_c і звивистості шляху по провідним зв'язкам через решітку:

$$\xi = [1 + (a - a_c)^{-1}] \xi' / [1 + (1 - a_c)^{-1}] ,$$

$$\xi' = \xi_0 (0,5 l_i / a + \Delta l) / \Delta l ,$$

де ξ - коефіцієнт звивистості пористого середовища, одержаний експериментально або теоретично, для фільтраційних процесів, які не ускладнені капілярними явищами.

Оскільки функція зв'язності Q_c перколяційної системи визначається через перколяційну вірогідність $Q_c = a q_c$, а звивистість зворотня по величині провідності решітки b_c

$$b_c = [1 + (1 - a_c)^{-1} \Delta l / ((0,5l_1/a + \Delta l) [1 + (a - a_c)^{-1}]),$$

то розглянутий підхід дає змогу одержати перколяційні характеристики для простої кубічної решітки в аналітичному вигляді.

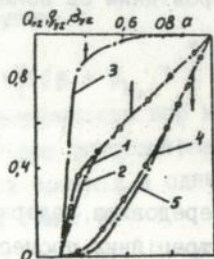
В роботі розглянуто одержання виразів для визначення параметрів пористої структури кавернозних матеріалів з використанням моделі хаотично розположених кіл (сфер) і теорії перколяції.

Оцінена точність визначення розподілення об'єму пор по розмірам їх горл методом ртутної порометрії (в ній звичайно нехтують впливом збільшення порового перерізу на капілярний тиск) і показано, що розміри горл, визначені таким чином, виходять заниженими в середньому на 15,5%. Описана методика коректування порометричної кривої, яка враховує як гофровку пор, так і перколяційні ефекти.

Перколяційні характеристики пористих зернистих матеріалів.

Опис структури різних макро- і мікронеоднорідних матеріалів, наприклад порошкових, і їх властивостей може успішно здійснюватися з урахуванням методів теорії перколяції, наприклад задачі вузлів.

Описано одержання розрахункових виразів для перколяційних характеристик в задачі вузлів на простій кубічній решітці. На мал.1 приведені залежності перколяційних характеристик для цієї задачі, розраховані по виведеним виразам. Вони добре погоджуються з відомими чисельними розрахунками.



Мал.1. Перколяційна вірогідність (1,2), функція зв'язності (3) і провідність (4,5) простої кубічної решітки в задачі вузлів: 1,3,4 - розрахунок; 2,5 - експериментальні дані

В роботі описаний також метод одержання розрахункових виразів для перколяційних параметрів двовимірних гетерогенних систем в задачах зв'язків і вузлів.

Узагальнена теорія перколяції для аналізу структури і властивостей пористих композиційних матеріалів. Описані в теорії перколяції задачі звичайно вирішуються з допомогою числових експериментів на конкретних решітчастих моделях з заданим координаційним числом Z . Це ускладнює використання одержаних результатів для аналізу структури і властивостей гетерогенних матеріалів.

Для одержання залежності перколяційних характеристик неоднорідних систем від їх пористості (об'ємного вмісту) використовуємо загальні принципи їх поведінки в залежності від частки провідних зв'язків чи вузлів і координаційного числа моделюючих решіток:

1. Пороги перколяції на моделюючій решітці в задачах зв'язків і вузлів зв'язані єдиною лінійною залежністю від її координаційного числа:

$$a_{kc}(y) = A_c(y) / Z + B_c(y), \quad (18)$$

де $A_c = 1,59$; $A_y = 1,359$; $B_c = -0,017$; $B_y = 0,08$ - для тривимірної і $A_c = 1,8324$; $A_y = 1,174$; $B_c = -0,0419$; $B_y = 0,3$ - для двовимірної систем.

2. Вираз для перколяційної вірогідності (функції зв'язності) неоднорідних систем через частку провідних зв'язків (вузлів) в узагальнених координатах $Za - B_c(y)$ не залежить від координаційного числа моделюючої решітки.

На основі перших двох принципів можна одержати допоміжне значення $a_{bc}(y)$ для розрахунку перколяційної вірогідності і функції зв'язності гетерогенних систем. Його можна одержати, якщо взяти за основу просту кубічну (квадратну) упаковку ($Z = 6$ або 4) і привівняти значення A_c для Z і $Z = 6(4)$:

$$a_{bc}(y) = Z[a - B_c(y)]^{1/6} + B_c(y). \quad (19)$$

3. Відношення порогів перколяції (різності між одиницею і порогоми) до корнів рівнянь, одержаних методом самоузгодженого поля (різності між одиницею і корнями) в задачі зв'язків (вузлів) являється постійною величиною.

4. Залежність провідності решітки від частки провідних вузлів в узагальнених координатах $(1-a) / (1-a_{ку})$ не залежить від координаційного числа Z решітки.

5. Залежність провідності решітки від узагальненої частки провідних зв'язків $[2(a-B_c)]$ відрізняється лише масштабом відносно $[(1-B_c)Z - A_c]$.

Останні три принципа витікають із аналізу виразу для провідності неоднорідних систем в задачі зв'язків (вузлів), одержаних методом самоузгодженого поля при $a \rightarrow 1$ (відповідає дотичним у точці $a = 1$ до залежностей, одержаних із числових експериментів).

Узагальнене значення $a_{ву1}$ (відповідає простій кубічній упаковці) знаходимо із співвідношення:

$$(1 - a)/(1 - a_{ку}) = (1 - a_{ву1})/(1 - a_{ку, z=6}).$$

Із нього одержимо

$$a_{ву1} = 1 - 0,693(1 - a)/(1 - a_{ку}), \quad (20)$$

де $a_{ку}$ визначається по (34) чи (36).

Прирівнюючи відношення $[(a-B_c)Z - A_c]/[(1-B_c)Z - A_c]$ для довільного значення Z і $Z = 6$ і використовуючи одержані раніше значення A_c і B_c , одержимо узагальнений вираз $a_{вс1}$ для розрахунку провідності порошкової системи в задачі зв'язків:

$$a_{вс1} = 0,248 + 0,752[(a+0,017)Z - 1,59]/(1,017Z - 1,59).$$

З урахуванням вищевикладеного, перколяційні характеристики тривимірних систем можна записати в наступному вигляді:

$$q_c(a) \Big|_{Q_y(a)} = (m_c(y) + 1 - 1/a_{вс}(y)) / (m_c(y) + a_{вс}(y) - 1); \quad (21)$$

$$Q_c(a) = a q_c(a), \quad q_y(a) = a Q_y(a); \quad (22)$$

$$b_c(y)(a) = K_c(y) / \{ (0,51_c(y) / a_{вс}(y) + 1) [1 + (a_{вс}(y) - a_{кс}(y), z=6)^{-1}] \};$$

$$l_c(y) = [1 - a_{вс}(y) + a_{вс}(y) l_c(y)] l_c(y) b_c^{-1} + a_{вс}(y) l_c(y) (l_c(y) b_c^{-1}); \quad (23)$$

$$m_C = 4a_{BC} [1 + (3a_{BC} + 4a_{BC}^3 + a_{BC}^4) / (1 - a_{BC})^3 + 34a_{BC}^4 (1 + 3a_{BC})]; \quad (24)$$

$$m_Y = m_Y(a) = m_C(a_{BC} = 0,713a_{BY});$$

$$l_C = 4a_{BC1} [1 + (6a_{BC1} + 9a_{BC1}^2 + 29a_{BC1}^3) / (1 - a_{BC1})^3 + 139a_{BC1}^4 (1 + 6a_{BC1})];$$

$$l_Y = l_Y(a) = l_C(a_{BC1} = 0,713a_{BY1});$$

де $K_C = 7/3$; $K_Y = 2,443$; а значення $a_{BC}(y)$ и $a_{BC}(y)_1$ розраховуються по виразам (19), (20) і (21) відповідно.

Як приклад розглянуто метод коректування значень інтегральної залежності розподілення об'єму пор по розмірам їх горл, одержаної методом ртутної або газорідинної (по витісненню рідини із просиченого нею зразка газом) порометрії.

Розділ 4. "Моделювання структури і властивостей пористих композиційних матеріалів" присвячений застосуванню теорії перколяції до опису структури і властивостей. В ньому на прикладі гіпсової системи розглянуті структурні особливості решіток, які утворюються в процесі кристалізації дисперсної фази, з використанням моделі матеріалу у вигляді хаотично розположених сфер в комплексі з теорією перколяції. Якщо представити кристали у вигляді циліндрів довжиною L і діаметром D , то вираз для пористості матиме вигляд:

$$\Pi = \exp(-\pi D^2 LN/4),$$

де N - число кристалів в одиничному об'ємі.

Приймаючи, що вірогідність перекриття вибраної точки на поверхні іншими кристалами дорівнює пористості Π системи, одержимо:

$$S_0 = \pi D(L + 0,5) N \Pi = 4 \Pi \ln(1/\Pi) (L + 0,5D) / (DL). \quad (25)$$

Із цих виразів визначається еквівалентний радіус пор r_3 :

$$r_3 = 2\Pi/S_0 = 0,5DL / [(L + 0,5D) \ln(1/\Pi)]. \quad (26)$$

Враховуючи, що критичні об'ємні концентрації в задачах хаотично розположених перехрещених і дотичних сфер рівні відповідно

0,29 і 0,15, а також залежності L і D від П, одержимо вираз для критичної пористості гіпсової системи:

$$P_{кр} = 1 - 1,93[10,68 \exp(-0,497П) + 2,2]^{-1}. \quad (27)$$

По виразам (25), (26) і (27) були розраховані питома поверхня і еквівалентний радіус пор і міцність матеріала в широкому інтервалі значень пористості двоводного гіпса. Одержані значення задовільно узгоджуються з результатами обробки експериментальних даних по кінетиці всмоктування рідини в гіпсові форми, представлені в таблиці 2.

Метод розрахунку порогів перколяції для моделювання пористих і композиційних матеріалів, які складаються із часток з дальньою взаємодією (сферомагнетиків) чи витягнутих в одному напрямку часток. Особливості зміни властивостей таких матеріалів від пористості (концентрації дисперсної фази) можуть бути враховані через відповідні значення порогів перколяції.

Урахування залежності порогу перколяції від ступеня зв'язку між далекими сусідами (від номеру координаційної групи N) можна здійснити додавкою до часток першої координаційної групи часток інших груп з урахуванням схильності до провідності системи, яка пропорціональна величині $(1 - a_{ку2}(z))$. В результаті одержимо:

$$a_{ку2}(z) = (A_2(z) + B_2(z)Z_p) / [(Z_q - Z_p)(1 - A_2(z)/Z_p2(z) - B_2(z)) + Z_p],$$

де $A_2 = 1,174$, $B_2 = 0,3$, $A_3 = 1,359$, $B_3 = 0,08$, Z_q - сумарна кількість часток в координаційних групах, які охоплені сферою впливу вихідної частки; визначається по Z_p , розрахованому по виразам (56). Проведені розрахунки показали добру збіжність розрахованих значень з відомими даними.

Для урахування видовження утворюючих пористу чи композиційну систему часток, представимо їх у формі прямих колових циліндрів із співвідношенням довжини до діаметра L/D, рахуючи, що зниження порога перколяції в системі пропорційно величині (L/D-1). Приймемо, що зниження вірогідності подій утворення зв'язаних ланцюжків циліндрів пропорційно величині порога перколяції в ступені, рівній числу одиничних циліндрів в ланцюжку (оскільки це вірогідність подій, що відбуваються одночасово), причому для зручності

будемо базуватися на квадратній і простій кубічній решітках:

$$a_{\text{кцМ}, Z=2M} = 2Ma_{\text{куМ}, Z=2M} \left[1 + \left(a_{\text{куМ}, Z=2M}^{L/D-1} - 1 \right) / M / (2M-1+L/D) \right], \quad (28)$$

де в квадратних скобках ураховує, що в звичайній перколяційній системі ланцюжок із L/D елементів може утворюватись по M напрямках, а в нашому випадку - тільки в якому-небудь одному, $a_{\text{куМ}, Z=2M}$, розраховується по виразу (18).

Результати розрахунку по одержаному рівнянню порога перколяції в задачі вузлів для простої кубічної решітки в залежності від довжини провідних циліндрів L/D задовільно узгоджуються з відомими даними, одержаними числовим моделюванням.

На основі останнього виразу одержані залежності модуля пружності E і границі плинності при пластичній деформації від пористості матеріала:

$$E_p = E_0 \left[(1 - \Pi - 0,524a_{\text{кцЗ}}) / (1 - 0,524a_{\text{кцЗ}}) \right]^{1,8}$$

$$\sigma_{T3} = \sigma_{T0} (1 - \Pi) \left[(1 - \Pi - 0,524a_{\text{кцЗ}}) / (1 - 0,524a_{\text{кцЗ}}) \right]^{0,5}$$

де $a_{\text{кцЗ}} = 1,836(2,694 + 0,306^{L/D}) / (15 + 3L/D)$, σ - нагрузка,

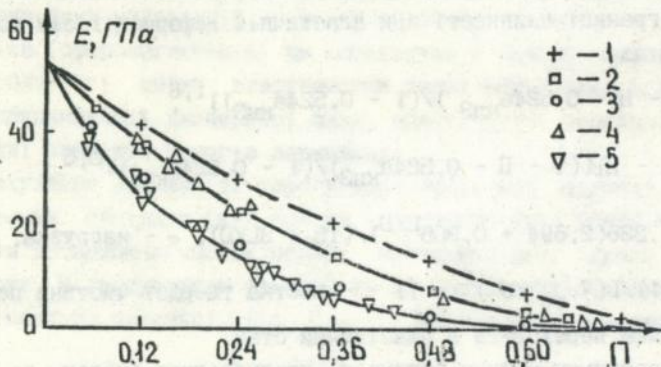
$K = (1/\nu - 1) / [(v\sigma_{T0} / \sigma)^2 - 1]$ - частка твердої частини пористого тіла, яка переходить в пластичний стан.

При розрахунку модуля пружності неоднорідних систем, на відміну від їх провідності, необхідно ураховувати пружність контактів між частками. Якщо вона порівняна з пружністю матеріалу часток, наприклад у випадку спечених пористих металів або кераміки, то $v=t$. Якщо пружність контактів нехтовно мала в порівнянні з пружністю часток, які утворюють матеріал, то $v_2=1,5t$ і $v_3=2t$, так як для досягнення провідності в пористій системі необхідно, щоб середнє координаційне число для часток було не менше 2 і для дво- і для тривимірної системи, а для придбання системою пружності необхідно, щоб середнє координаційне число для часток було не менше 3 для двовимірної і не менше 4 для тривимірної системи.

Правомірність висунутого припущення підкріплюється прикладом гіпсової системи. У сухих зразків, одержаних із напівводного гіпса, коли після схвачення гіпсу зразок не підлягав ущільненню чи іншій дії, що порушує структуру матеріалу, при зволоженні міцність знижується приблизно на 55% (коефіцієнт розм'ягчення

рівний 0,45). Для такої системи індекс збільшується в 1,45 раза. У системи, яка підлягає ущільненню після затвердіння, контакти між частками порушені і індекс перколяції для неї збільшується в два рази (до 3,6).

По відомим залежностям L і D кристалів двоводного гіпса від P розраховали модуль пружності модельної гіпсової системи. На мал. 2 представлені залежності модуля пружності гіпсової системи від пористості, розраховані по залежності (28) при індексі перколяції відповідно рівному 1,8; 2,5 і 3,6 в порівнянні з експериментальними даними. З нього видно, що розраховані залежності задовільно узгоджуються з експериментальними даними.



Мал. 2. Розрахунковий модуль пружності гіпсової системи при перколяційному індексі: 1-1,8; 2-2,5; 3-3,6. Експериментальні для гіпсових зразків: 4 - неущільнений і 5 - ущільнений після схвачування і твердіння.

Для оцінки ступеня неоднорідної порової структури проникних матеріалів в роботі запропоновано модифікувати характеристику матеріалу "ступінь регулярності порової структури" шляхом використання значення "максимального радіусу", визначеного, наприклад, по останній бульбашці в методі ГРП, замість текучого значення максимального радіусу, визначеного по першій бульбашці у відомому методі. Вона розвиває методику А. Г. Косторнова, так як характеризує при $C = \text{const}$ не тільки регулярність порової структури, але і її неоднорідність (C в порошкових матеріалах не рівна 1). Це дає змогу порівнювати її з другими матеріалами, в тому числі з тими, у яких C близька до 1, при будь-якій товщині (фільтри Петряно-

ва-Соколова).

В роботі одержана залежність критичної (в більшій мірі відповідаючий фізичній суті термін - статистично представницькій) товщині (вираженій кількістю шарів n , розміром D , які укладаються на даній товщині) від пористості P матеріала:

$$n = 34 \cdot (2,2437/Z - 0,024)^{1,7} (Z^2 - 0,6Z - 1,76) / [(Z-2)^2], \quad (29)$$

де Z розраховується по виразу (56).

Результати розрахунку n по виразу (29) і по відомій емпіричній залежності, яка добре узгоджується з експериментальними даними, наведені в таблиці 5. Відхилення результатів розрахунків між ними не перевищує 10%, що свідчить про відповідність запропонованої моделі структури пористих порошкових систем.

Таблиця 5.

Пористість	n		
	По виразу (29)	По емпіричному виразу	Відхилення, %
0,260	6,95	6,88	1,1
0,306	9,94	10,47	5,4
0,336	12,69	13,29	4,8
0,390	18,46	19,44	5,4
0,417	25,43	23,05	9,4
0,480	34,00	33,00	3,0
0,500	38,98	36,39	6,7

Кластерна модель структури порошкових матеріалів. Розглянемо дво (три-) вимірну систему із хаотично укладених кіл (сфер) однакового діаметра D . Пористість системи $P_{2(3)}$ в цьому випадку статистично достатньо точно визначається середнім числом контактів часток з сусідами (середнім координаційним числом $Z_{2(3)}$).

Кластери (прийемо, що в середньому вони являються коловими або сферичними) в залежності від пористості системи і у відповідності з фрактальним підходом можуть бути різного порядку, тобто кластери можуть виступати у ролі часток при формуванні кластерної системи більш високого порядку.

Для двовимірної (тривимірної) системи із геометричних уявлень з урахуванням, що на внутрішню частину кластера приходиться примірно 0,45 (0,43) площі (об'єму) часток зовнішнього шару, при середньостатистичному числі часток в кластері $N_{2(3)}$:

$$N_2 = 3Z + 1 \quad \text{и} \quad N_3 = 16 + 3Z/4 + Z^2/8.$$

Методика розрахунку параметрів пористої структури кластерної моделі слідує.

По середній пористості розраховуємо середньостатистичні параметри структури Z , S_0 і r_3 . Далі по значенню Z , закону розподілення часток по координаційному числу, наприклад нормальному, розраховуємо кількість часток в кластері і його зовнішньому шарі, середнє координаційне число часток Z_K , яке приходить на внутрішню частину кластера і середнє координаційне число часток $Z_{МК}$, яке приходить на міжкластерну пористість:

$$Z_{K2}(3) = \frac{1}{N_{H2}(3)/N_2(3)} \int_0^{N_{H2}(3)/N_2(3)} f_z(N/N_2(3)) dN + K_{2(3)} \int_0^1 f_z(N/N_2(3)) dN,$$

$$Z_{МК2}(3) = (1 - K_{2(3)}) \int_0^{N_{H2}(3)/N_2(3)} f_z(N/N_2(3)) dN,$$

де $N_{H2}(3)$ - число часток в зовнішньому шару дво(три-)вимірного кластера; $f_z(N/N_2(3))$ - функція (закон) розподілення числа часток N по координаційному числу Z ; $K_2 = 0,45$; $K_3 = 0,43$.

Потім по значенням $Z_{МК}$ і Z_K з використанням рівнянь (56) розраховуємо середні значення пористості $\Pi_{K(МК)}$, питомої поверхні $S_{0K(МК)}$ і еквівалентних радіусів капілярів $r_{ЭК(МК)}$ в кластерах (міжкластерному просторі).

Для нормального розподілення по значенням $\Pi_2(3)$ і $D=10$ мкм розраховані параметри $Z_2(3)$ ($Z_{K2}(3)$ і $Z_{МК2}(3)$), $\Pi_{K2}(3)$, $\Pi_{МК2}(3)$, $S_{02}(3)$ ($S_{0K2}(3)$ і $S_{0МК2}(3)$), $r_{э2}(3)$ ($r_{ЭК2}(3)$ і $r_{ЭМК2}(3)$).

Результати розрахунків показали, що при значній пористості відливки еквівалентні радіуси капілярів в кластерах і між ними суттєво відрізняються. При спіканні часток при випалюванні капілярні сили в кластерах будуть перевищувати аналогічні сили в міжкластерному просторі і усадка кластерних утворень буде проходити частково за рахунок збільшення під дією розтягуючих напру-

жень розмірів капілярів в міжкластерному просторі. Тобто поряд з усадкою матеріалу на початку процесу спікання може спостерігатися збільшення середнього розміру пор в матеріалі.

Структурний аналіз матричних порошкових і композиційних матеріалів. Системи, які утворені формуванням або спіканням, підрозділяються на статичні і матричні.

Перколяційна оцінка ступеня матричності порошкових систем базується на тому, що порогова концентрація провідної фази більш точно визначає матричність, ніж співвідношення розмірів компонентів.

Для оцінки порогової концентрації бідисперсних матеріалів урахуємо, що при рівних розмірах часток провідної і непровідної фаз порогова концентрація провідника рівна 0,15 і що із зменшенням розмірів часток провідної фази (зменшення відношення $d_{пр}/d_{непр}$) її порогова концентрація $\nu_{кр}$ зменшиться в $(1 - \nu_{непр})$ разів. Так, якщо концентрація непровідної фази відповідає вільній засипці, то порогова концентрація рівна $0,367 \times 0,15 = 0,055$. Якщо ж розміри провідної фази збільшуються в порівнянні з непровідною, матричною фазою, то порогова концентрація в границі збільшується в два рази внаслідок того, що мілкі частки непровідної фази можуть з вірогідністю 0,5 попасти між крупними частками. З урахуванням вищесказаного можна записати:

$$\nu_{кр} = A \cdot d_{пр(непр)} / (0,03d_{непр(пр)} + d_{пр(непр)}) + B,$$

де $A = 0,1 (-0,15)$ і $B = 0,055 (0,3)$ для $d_{пр} < d_{непр}$ ($d_{пр} > d_{непр}$).

Результати розрахунків по останньому рівнянню задовільно узгоджуються з відомими експериментальними даними.

Із проведеного аналізу витікає перколяційна оцінка матричності порошкових систем:

$$w = \{1 - 0,15(1 + \Pi) / [A \cdot d_{пр(непр)} / (0,03d_{непр(пр)} + d_{пр(непр)}) + B]\} / 0,85.$$

При концентрації провідної фази $\nu_{кр} = 0,15(1 + \Pi)$ матричність перетворюється в нуль, так як система відповідає статистичній структурі. При $\nu_{кр} = 1 - \Pi$ (порог перколяції відсутній) матричність системи приймає значення, рівне 1, що відповідає чисто матричній

структурі. Поняття матричності порошкової системи дозволяє систематизувати різноманітні структури по її значенню і проводити їх аналіз на загальній основі.

Як приклад в роботі запропонована методика розрахунку концентраційних залежностей електропровідності систем ПАХ - мідь і поліетилен (ПЕ) - поліоксиметилен (ПОМ) - сажа. В методиці використані геометричні і перколяційні параметри дво- і тривимірних систем. На відміну від розрахунків тільки по виразу узагальненої провідності, розрахунки по запропонованій методиці добре узгоджуються з експериментом у всьому діапазоні концентрацій наповнювача.

Слід відмітити, що описаний в дисертації підхід може бути використаний для визначення або уточнення критичної пористості і критичного індекса по експериментальним даним. Це дуже важливо, оскільки порогові значення і критичні індекси можуть бути використані для опису провідності неоднорідних систем у всьому діапазоні їх пористості (для композитів - концентрації непровідної матричної фази).

Задаючи значення оцінювальної характеристики пористого матеріалу при двох значеннях пористості, після логарифмування одержаних виразів, можна записати наступну систему рівнянь:

$$[\ln(1 - \Pi_1 / \Pi_{кр})] / [\ln(1 - \Pi_2 / \Pi_{кр})] = \ln(\hat{\sigma}_1 / \hat{\sigma}_0) / \ln(\hat{\sigma}_2 / \hat{\sigma}_0), \quad (30a)$$

$$t = \ln(\hat{\sigma}_1 / \hat{\sigma}_0) / [\ln(1 - \Pi_1 / \Pi_{кр})] = \ln(\hat{\sigma}_2 / \hat{\sigma}_0) / [\ln(1 - \Pi_2 / \Pi_{кр})], \quad (30b)$$

де $\hat{\sigma}_{1(2)}$ і $\hat{\sigma}_0$ - визначальна властивість (електропровідність, міцність, модуль пружності і т. п.) при пористості $\Pi_{1(2)}$ компактного ($\Pi = 0$) матеріалу.

Резюмуючи вищесказане, оціним структурну досконалість пористих порошкових матеріалів коефіцієнтом структурної якості $K_{ск}$ і коефіцієнтом якості міжчасткових контактів $K_{мк}$ через значення порогів і індексу перколяції (останній для неоднорідних тривимірних систем приймаємо рівним 1,8): $K_{ск} = \Pi_{кр} / \Pi_{кр, теор}$; $K_{мк} = 1,8 / t$.

Для монодисперсних порошкових матеріалів можна взяти за основу тетраедричну упаковку з $\Pi = 0,66$, яка мінімально стійка при нульовій міцності міжчасткових контактів (для урахування типу фор-

мування можна також використати пористість вільної насипки чи пресоки).

Для бідисперсних і біпористих матеріалів (замість провідної та непровідної фаз повинні фігурувати матрична фаза і наповнювач) згідно з вищевикладеним маємо:

$$P_{кр, теор} = 1 - A d_{пр(непр)} / (0,03 d_{непр(пр)} + d_{пр(непр)}) - B,$$

$A = 0,1$ ($-0,15$) і $B = 0,055$ ($0,3$) для $d_{пр} < d_{непр}$ ($d_{пр} > d_{непр}$).

Для волокнових матеріалів по виразу (28):

$$P_{кр, теор} = [1 - 0,31(2 + 0,306^{L/D-1})] / (5 + L/D).$$

Для матеріалів, одержаних кристалізацією із пересичених розчинів, залежність (28) з урахуванням того, що критична об'ємна концентрація в задачі хаотично розположених перехрещених сфер рівна 0,2864:

$$P_{кр, теор} = [1 - 0,965(2 + 0,306^{L/D-1})] / (5 + L/D).$$

Значення $P_{кр}$ і t визначаються по експериментальним даним і виразам (30а), (30б).

Таким чином, запропонований підхід дає змогу однозначно оцінювати структурну досконалість і якість міжчасткових контактів пористих матеріалів, задаючись двома значеннями оцінюваної характеристики пористого матеріалу.

Взявши за основу монодисперсну порошкову систему можна одержати теоретичні коефіцієнти структурної якості $K_{ск, т} = P_{кр, теор} / 0,66$ / 0,66 (див. таблицю). З неї видно, що по пружним властивостям при

Матеріал	К _{ск, т} згідно відношенню D / D _{тв} нап або L/D								
	1	4	10	60	100	0,25	0,1	0,01	
Монодисперсний	1								
Біпористий	1,28	1,29	1,30	1,37	1,38	1,28	1,28	1,28	
Кристалізаційний	1,08	1,32	1,39	1,49	1,50	-	-	-	
Волокновий		1,41	1,45	1,50	1,51	-	-	-	

однаковій пористості найбільш ефективними являються волокнові матеріали, далі ідуть матеріали, одержані кристалізацією із пересичених розчинів (з витягнутими кристалами), далі біпористі порошкові матеріали і, нарешті, звичайні монодисперсні матеріали.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Комплекс моделей пористої структури проникних матеріалів, методів розрахунку їх гранулометричних, структурних, масопереносних і перколяційних параметрів, розроблених на основі єдиного підходу до дисперсних і пористих систем, дав змогу створити наукову основу моделювання пористої структури проникних порошкових матеріалів і процесів масопереносу в них з аналітичним урахуванням наявних нелінійних структурних ефектів, здійснити їх перколяційну оцінку по ступені неоднорідності, матричності і структурної досконалості.
2. Аналіз дисперсних і пористих систем, проведений на основі спільності їх характеристик, дав змогу використати підхід, закладений у методі газоріднинної порометрії, для розробки методів розрахунку дисперсного складу вихідних моно- і бімінеральних порошкових матеріалів.
3. Розроблена аналітична структурна модель засипок і спечених порошкових матеріалів із монодисперсних часток дала змогу:
 - а) урахувати структурний ефект, обумовлений міжчастковими контактами в порошкових матеріалах;
 - б) запропонувати кластерну модель структури порошкових матеріалів для аналізу процесу Уособлення часток при спіканні порошкових матеріалів;
 - в) розробити модель порової структури порошкових матеріалів, яка дає змогу коректніше співвідносити гідро- і газодинамічні параметри порового простору із структурою матеріалу (більш коректно визначати проникність, середній радіус і звивистість капілярів).
4. Показана доцільність урахування об'ємного капілярного ефекту в розрахунках масопереносних процесів в пористих порошкових матеріалах на запропонованих тривимірних моделях порової структури. Це урахування дозволило:
 - а) виключити суперечне фізичній сутності заниження значень радіусів капілярів пористих матеріалів в методі розрахунку гідродинамічних параметрів проникних матеріалів по кінетиці всмоктування ними рідин та розробити нові способи оптимізації шлікерного литва на основі методів розрахунку кінетики шлікерного литва і поля тиску при наборі відливки в процесі литва;
 - б) запропонувати способи оптимізації шлікерного литва та дрепування пористих матеріалів на основі розроблених методів визначення параметрів пористої структури проникних матеріалів та роз-

рахунку кінетики дренажних процесів.

5. Запронована аналітична модифікація теорії перколяції для обліку перколяційних ефектів в порошкових та композиційних матеріалах дозволяє:

а) розраховувати аналітично їх перколяційні характеристики в широкому інтервалі пористості (об'ємного вмісту матричної фази), врахувати дальнюдію, співвідношення розмірів компонентів і витягнутість часток, утворюючих пористі матеріали;

б) проводити аналітичну корективку порометричних кривих, при аналізі пористої структури проникних матеріалів, дозволяючи суттєво підвищити точність визначення розподілення пор по розмірам в цих матеріалах;

в) запропонувати методи моделювання параметрів порової структури і фізичних характеристик порошкових та композиційних матеріалів;

6. Показана необхідність врахування пружності міжчасткових контактів при розрахунку модуля пружності неоднорідних систем і доцільність його врахування зміною величини перколяційного індексу.

7. Модифікований перколяційний підхід до опису структури та властивостей порошкових матеріалів для перколяційної оцінки ступеня неоднорідності пористої структури порошкових проникних матеріалів і матричності бідисперсних порошкових та композиційних матеріалів дозволив здійснити їх перколяційно-структурну оцінку по:

а) модифікованому параметру ступеня неоднорідності пористої структури (в комплексі зі значенням статистично представої мінімальної товщини по А.Г. Косторнову),

б) ступеню матричності;

в) коефіцієнтам структурної якості пористих порошкових матеріалів і якості міжчасткових контактів.

Викладені в дисертаційній роботі моделі матеріалів, їх структури і методи розрахунку структурних параметрів призначені для контролю та оптимізації структури проникних та композиційних матеріалів, технології їх виготовлення і процесів, здійснюваних в цих матеріалах або з їх застосуванням.

Основні результати дисертації надруковані

в таких роботах:

1. Крючков Ю.Н. Моделирование тепломассопереносных процессов в производстве керамических и гипсовых материалов и изделий.

К.: Наукова думка, 1994. 251 с.

2. Пиевский И.М., Крючков Ю.Н. Расчет кинетики фильтрационной сушки гипсовых строительных материалов "Промышленная теплотехника". 1986. Т.8. №.6. С.68-70.

3. Крючков Ю.Н. Определение пористой структуры керамических материалов//Стекло и керамика. 1986. №9. С.23-24.

4. Крючков Ю.Н. Параметры пористой структуры пористых порошковых материалов //Порошковая металлургия". 1987. №7. С.90-95.

5. Крючков Ю.Н. Влияние пористой структуры форм на кинетику шликерного литья//Стекло и керамика. 1988. №3. С.25-26.

6. Крючков Ю.Н. К расчету процесса вытеснения смачивающих жидкостей газом из однородных пористых сред//Инж.-физ. ж. 1989. Т.56. №6. С.1030-1031.

7. Крючков Ю.Н. Определение коэффициентов фильтрационного массопереноса // Промышленная теплотехника. 1989. Т.11. №5. С.36-39.

8. Крючков Ю.Н. Расчет нестационарного поля давления в отливке при шликерном литье керамических изделий//Стекло и керамика. 1990. №1. С.25-26.

9. Крючков Ю.Н. Обработка седиментационной кривой при экс-прессном анализе дисперсного состава огнеупорных порошков //Огнеупоры. 1991. №2. С.18-19.

10. Крючков Ю.Н. Коэффициент извилистости частично насыщенной смачивающей жидкостью пористой среды при фильтрации газа//Порошковая металлургия. 1991. №2. С.50-55.

11. Крючков Ю.Н. Метод обработки седиментационных кривых//Хим. технология. 1991. №2. С.51-53.

12. Крючков Ю.Н. Исследование геометрических особенностей наполненных полимерных систем каркасной структуры//Коллоид. ж. 1991. Т. №4. С.752-755.

13. Крючков Ю.Н. Физическая сущность процесса шликерного литья в пористые формы//Стекло и керамика. 1991. №3. С.22-24.

14. Крючков Ю.Н. Поликапиллярная модель пористой среды для анализа фильтрационных процессов в керамических материалах//Там же. 1991. №10. С.13-14.

15. Крючков Ю.Н. Гидродинамические параметры пористой структуры форм для шликерного литья//Там же. 1992. №1. С.24-26.

16. Крючков Ю.Н. Оптимизация процесса изготовления керамических изделий методом шликерного литья//Там же. 1992. №2. С.14-15.

17. Крючков Ю.Н. Перколяционные характеристики пористых и композиционных порошковых материалов//Порошковая металлургия. 1992. №7. С.71-75.
18. Крючков Ю.Н. Параметры структуры макропористых стекол //Стекло и керамика. 1992. №7. С.6-7.
19. Крючков Ю.Н. Анализ процессов пропитки и дренажа на поликапиллярной модели//Тезисы докладов 2-го международного форума Тепло-массообмен ММФ-92. Киев, 1992. С.140-143.
20. Крючков Ю.Н. Структурные особенности решеток, образующихся в процессе кристаллизации дисперсной фазы//Стекло и керамика. 1992. №11. С.31-32.
21. Крючков Ю.Н. Расчет перколяционных характеристик двумерных систем //Порошковая металлургия. 1993. №2. С.55-58.
22. Крючков Ю.Н. Учет перколяционных эффектов при анализе структуры и свойств порошковых и композиционных материалов//Докл. АН Украины, сер. : Математика, естествознание, технические науки. 1993. №11. С.97-99.
23. Крючков Ю.Н. Кластерная модель структуры формованных порошковых материалов//Стекло и керамика. 1993. №3. С.19-21.
24. Крючков Ю.Н. "Точность" обработки седиментационных кристаллов//Стекло и керамика. 1993. №7. С.15-17.
25. Крючков Ю.Н. Структурная модель монодисперсных порошковых материалов//Порошковая металлургия. 1993. №9-10. С.66-72.
26. Крючков Ю.Н. Учет неоднородности пористой структуры керамических материалов при контроле их гидравлических параметров//Тезисы докладов 4-й Европейской конференции-выставки по материалам и технологиям "Mattex - 93". Санкт-Петербург, 1993 г. Т.1. С.66.
27. Крючков Ю.Н. Метод расчета порогов перколяции для моделирования пористых и композиционных материалов // Порошковая металлургия. 1993. №11-12. С.79 -85.
28. Крючков Ю.Н. Оценка степени неоднородности пористой структуры пористых материалов//Порошковая металлургия. 1994. №1-2. С.85-89.
29. Крючков Ю.Н. Обобщенная теория перколяции для анализа структуры и свойств гетерогенных систем//Инж.-физ. ж. 1994. Т.66. №3. С.348 -352.
30. Крючков Ю.Н. Структурный анализ порошковых пористых материалов статистической и матричной структуры// Порошковая металлургия. 1994. №3-4. С.76-79.

31. Крючков Ю.Н. Алгоритм обработки седиментационных кри- вых// Порошковая металлургия. 1994. N5-6. С.101-104.
32. Пористая структура керамических материалов из монодис- персных порошков//Стекло и керамика. 1994. N5-6. С.33-35.
33. Оценка аутогезии и адгезии порошковых керамических мате- риалов//Стекло и керамика. 1994. N7-8. С.28-29.
34. А.с. 1260762 СССР, МКИ G 01 N 15/08. Способ определения коэффициента конвективной диффузии во влажных пористых материалах /Ю.Н.Крючков //Откр. Изобретения, 1986. N36.
35. А.с. 1395499 СССР, МКИ В 01 В 1/26. Способ изготовления керамических изделий /Ю.Н.Крючков//Откр. Изобретения. 1989. N18.
36. А.с. 1453259 СССР, МКИ G 01 N 15/08. Способ определения распределения объема пор по размерам /Ю.Н.Крючков //Откр. Изобре- тения. 1989. N3.
37. А.с. 1592158 СССР, МКИ В 01 В 1/26. Способ батарейного литья керамических изделий и пористая форма для его осуществления /Ю.Н.Крючков//Откр. Изобретения. 1990. N34.
38. А.с. 1740356 СССР, МКИ С 04 В 40/02. Способ изготовления гипсобетонных пустотных изделий /Ю.Н.Крючков//Откр. Изобретения. 1992. N22.
39. Авт. свид. СССР N1260762, МКИ G 01 N 15/08. Способ седи- ментационного анализа дисперсных материалов /Ю.Н.Крючков, Г.З.Комский //Откр. Изобретения, 1992. N.23.
40. Авт. свид. 1763191 СССР, МКИ В 28 В 1/26. Способ литья под давлением керамических изделий в пористых формах с каналами /Ю.Н.Крючков //Откр. Изобретения, 1992. N35.
41. Авт. свид. СССР. Положительное решение по заявке N N4906937. Способ литья под давлением керамических изделий /Ю.Н.Крючков //Откр. Изобретения, 1993.

13. Крючков Ю.Н. Физический



Крючков Ю. Н. "Моделирование пористой структуры и массопереноса в порошковых проницаемых материалах с учетом нелинейных структурных эффектов?"

Диссертация в форме рукописи на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.06. - Порошковая металлургия и композиционные материалы. Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, г. Киев, 1995.

Защищается комплекс моделей пористой структуры проницаемых материалов, методов расчета их гранулометрических, структурных, массопереносных и перколяционных параметров, разработанных на основе единого подхода к дисперсным и пористым системам, который позволил создать научную основу моделирования пористой структуры проницаемых порошковых материалов и процессов массопереноса в них с аналитическим учетом проявляющихся нелинейных структурных эффектов, осуществить их перколяционную оценку по степени однородности, матричности и структурного совершенства.

Ключевые слова: модели, пористая структура, параметры, порошковые проницаемые материалы, композиты, перколяция степень однородности, матричность, структурное совершенство.

Kryuchkov Yu.N. Simulation of porous structure and mass-transfer in powder permeable materials including nonlinear effects.

The thesis in form of manuscript, is for the degree of Doctor of Science (technical) in specialization 05.16.06. - Powder metallurgy and compositional materials. Institut of Problem of material Science, Kiev 1995.

The complex of permeable materials porous structure models and calculating methods were designed on the basis of common approach to dispersed and porous systems, which made it possible to create the scientific foundation for simulating of permeable powder materials porous structure and mass-transfer processes with due analytical account of nonlinear structural effects. This approach also allowed to bring off percolational estimation of uniformity degree, matrixity, structural perfection of the materials.

Key words: models; porous structure, parameters, powder permeable materials, compositions, percolation, uniformity degree, matrixity, structural perfection.

Для заметок

Підп. до друку 28.11.94. Формат 60x84/16. Папір офс.
Друк. офс. Умов. друк. л. 2,2 . Умов. фарб.-відб. 2,2
Сбл.-вид. л. 1,6 . Тираж 100, прим. Зам. 893.

Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М.Францевича АН України
252680 Київ 680, дСП, вул.Кржижанівського,3.

дільниця Оперативної поліграфії
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М.Францевича АН України
252680 Київ 680, дСП, вул.Кржижанівського,3.

455248

AB 31.567