

**ГІДРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ ВОЛОГОГО
ЗАЛІЗОБЕТОННОГО КРІПЛЕННЯ ПРИ ПІДЗЕМНІЙ ПОЖЕЖІ**

Запропоновано модель двофазного потоку вологої кріплення при підземному виробленні корисних копалин у випадку пожежі, що відрізняється від існуючих моделей гідродинамічного процесу, у тому числі, широко застосовуваної моделі гомогенного плинну і погоджується з реальною умовою пористої структури кріплення, що випаровується усередині.

Різні емпіричні моделі гідродинаміки, призначені для розрахунку руху води в каналах пористого матеріалу або в каналах звичайних розмірів, незастосовні для двофазних потоків у водонасичених залізобетонних кріпленнях при пожежі в шахті.

Якщо вважати, що залізобетонні кріплення відносяться до конструкцій пористої структури, то рух двофазної рідини при нагріванні від пожежі буде спрямований крізь пористу структуру своїм звивистим капілярним каналам від внутрішньої поверхні, під впливом високої температури, до зовнішньої. При цьому газові (парові) і рідинні (водяні) фази підкоряються закону Дарсі по-різному. Спільний рух у порах кріплення рідини і пара можна вважати спрощеним, як однофазний потік, але зі зменшенням проникності пористої структури внаслідок наявності іншої фази.

Стационарний одномірний рух двофазної (пароводяної) суміші в проникній пористій структурі кріплення можна описати системою рівнянь наступного виду:

$$\begin{aligned} -\frac{dp_1}{dz} &= \frac{\alpha v_{d_1} \gamma_{s_1} g_1}{f_1} \\ -\frac{dp_2}{dz} &= \frac{\alpha v_{d_2} \gamma_{s_2} g_2}{f_2} \\ P_1 - P_2 &= \Delta P_k \\ \omega_1 + \omega_2 &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

Інтенсивність об'ємного теплообміну (h_v) визначається з формули:

$$\frac{h_v d_r^2}{\lambda'} = 18 \frac{(1-P)^2}{P} \left[1 - (1-\omega)^{1/2} \right]^4, \quad (2)$$

де $\lambda' = 0,68 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ – теплопровідність води; h_v – питома внутрішньопорова поверхня; d_r – діаметр частки заповнювача кріплення; P – пористість; ω – насиченість водою; α – в'язкісний параметр опору для кріплення, можна приймати $\alpha = 1,2 \cdot 10^{12} \cdot \text{м}^{-2}$.

Тут P_1, P_2 – тиски фаз в біля границі розділу пари і води; ΔP_k – капілярний тиск; ω_1, ω_2 – насиченість матеріалу кріплення кожної фази, тобто пара і води (об'ємний зміст фаз у внутрішньопоровому просторі); f_1, f_2 – відносні фазові проникності, що враховують збільшення гідравлічного опору через присутність іншої фази в пористій структурі кріплення. Природно, відносні фазові проникності залежать тільки від виду пористої структури кріплення і від насиченості її кожною фазою, що утворюється від ступеня омивання поверхні потоком теплоти при пожежі. На рис.1 наведений приклад залежностей відносних фазових проникностей для пароводяної суміші від насиченості ω пористого середовища кріплення змочувальною фазою водою при пожежі.

Вони отримані на основі узагальнення ряду даних з досвіду при пожежі пористих матеріалів і мають наступний аналітичний опис:

$$\begin{aligned} f_1 &= \left(\frac{\omega - 0,2}{0,8} \right)^{3,5} \text{ при } 0,2 \leq \omega_s \leq \omega < 1, \\ f_1 &= 0 \text{ при } 0 < \omega < 0,2, \\ f_g &= \left(\frac{0,9 - \omega}{0,9} \right)^{3,5} \cdot (1 + 3\omega) \text{ при } 0 < \omega < \omega_{ss} = 0,9, \\ f_g &= 0 \text{ при } 0,9 = \omega_{ss} \leq \omega < 1. \end{aligned} \quad (3)$$

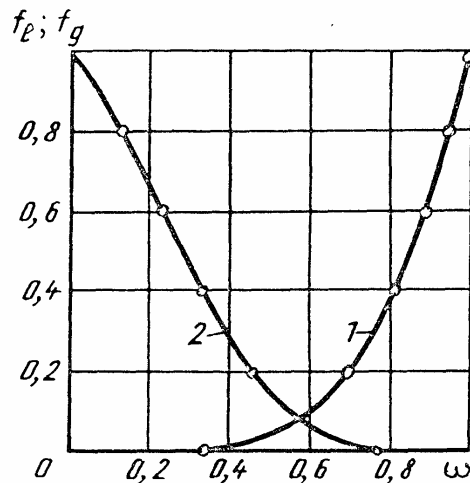


Рис.1. Відносні фазові проникнення рідини (1) і газу(2) в залежності від насиченості пористого середовища рідинної фази при течії газоводяного потоку в ґрунтах

Слід зазначити, що при малому вмісті кожної з фаз у пористому каркасі її відносна проникність дорівнює нулю - дана фаза нерухома. У нашому випадку по графіках з рис.1 впливає, що для рідкої фази гранична мінімальна величина насиченості $\omega_s = 0,2$, а для газу (пари) 1 - $\omega_{ss} = 0,1$. Фізичне пояснення цієї властивості полягає в наступному. При малому вмісті змочувальної фази (води) $\omega < \omega_s$ вода збирається навколо точок контакту часток у вигляді затиснених жорсткісних кілець. Ці кільця ізольовані друг від друга і не утворюють безупинної рідкої фази в пористій структурі кріплення - рідину нерухома. В міру збільшення її вмісту кільця розширюються і при $\omega = \omega_s$ зливаються й утворюють безупинну рідинну фазу, після чого і стає можливим її плин. Дані по відносним проникненням різних двофазних потоків у різноманітних пористих матеріалах кріплення можна представити в так званих «нормованих координатах»:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_{ss} - \omega_s}, \quad \bar{f}_1 = \frac{f_1}{f_1(\omega_{ss})}, \quad \bar{f}_g = \frac{f_g}{f_g(\omega_s)}. \quad (4)$$

У цьому випадку

$$\text{при } \omega = \omega_s, f_1 = 0, f_g = f_g(\omega_s) \text{ маємо } \bar{\omega} = 0, \bar{f}_1 = 0, \bar{f}_g = 1;$$

$$\text{при } \omega = \omega_{ss}, f_g = 0, f_1 = f_1(\omega_{ss}) \text{ маємо } \bar{\omega} = 1, \bar{f}_1 = 1, \bar{f}_g = 0.$$

Слід зазначити, що перехід до «нормованих координат» дозволяє проводити зіставлення при плинні двофазних сумішей в різних кріпленнях у структурному відношенні пористості з різними значеннями ω_s і ω_{ss} , оскільки в цьому випадку досліджується ідентична область насиченості, у якій обидві фази рухливі. У підсумку одержимо досить несподівані результати: у нормованих координатах відносні проникності для різних пористих кріплень і двофазних потоків дуже близькі між собою. Причому відомі перетворені результати майже симетричні щодо лінії $\bar{\omega} = 0,5$ і близькі до парабол:

$$f_l \approx \bar{\omega}^2; \quad f_g \approx (1 - \bar{\omega})^2. \quad (5)$$

Звідси впливає, що можна припустити гіпотези про малу залежність нормованої відносної проникності \bar{f}_g незмочувальної фази (газ або водяна пара) від структури порового простору. Мікробудова пористих кріплень робить основний вплив на нормовану відносну проникність змочувальної водяної фази. Це зв'язано з тим, що змочувальна фаза (вода) має кращий фізико-хімічний контакт із пористим матеріалом кріплення і займає всі недоступні для незмочувальної фази (пари) ділянки порового простору, унаслідок чого поширення води має складний характер. Простір, у якому рухається незмочувальна фаза, стає більш гладким, і основний паровий (газовий) потік проходить по спрямованих шляхах, конфігурація яких обумовлена новою, вторинною структурою, утвореною після розподілу води в порах кріплення.

У деяких випадках, наприклад, при розрахунку руху пароводяного потоку в глибинних шарах Землі, використовується модель «гомогенного плинну». Ця модель служить для визначення втрат тиску при русі двофазного потоку в каналах звичайних розмірів. У ній приймається, що двофазний потік поводить як

деяка гомогенна суміш, що підкоряється рівнянням руху для однофазної рідини. Для опису гомогенної суміші необхідні середні параметри, такі як – швидкість, термодинамічні властивості (наприклад, температура і щільність) і переносні властивості (в'язкість). Ці уявні властивості суміші розраховуються як середньозважені. Справедливість допущення гомогенної моделі при наявності теплової і динамічної рівноваги в потоці підвищується в тих випадках, коли одна з фаз тонко диспергована в іншій. На перший погляд це справедливо для двофазного потоку в тонкій пористій структурі.

Як рівняння, що описують плин гомогенного теплоносія, що випаровується, у пористих матеріалах, використовуються рівняння нерозривності і руху однофазного потоку в наступному виді:

$$\begin{aligned} g &= const \\ -dp/dz &= \alpha v_d \gamma_s g, \end{aligned} \quad (6)$$

у якій питома вага γ_s і динамічна в'язкість v_d визначаються складом суміші.

Якщо питомий обсяг однозначно виражається через видатковий паровміст потоку x :

$$\gamma_s = \gamma_{s_1} + x(\gamma_{s_2} - \gamma_{s_1}), \quad (7)$$

то для розрахунку динамічного коефіцієнта в'язкості пароводяної суміші іноді використовують виражень, що істотно відрізняються:

$$v_{d_I} = x \frac{\gamma_{s_2}}{\gamma_s} v_{d_2} + (1-x) \frac{\gamma_{s_1}}{\gamma_s} v_{d_1}; \quad (8)$$

$$v_{d_{II}} = x v_{d_2} + (1-x) v_{d_1}; \quad (9)$$

$$\frac{1}{V_{d_{III}}} = \frac{x}{V_{d_2}} + \frac{1-x}{V_{d_1}}. \quad (10)$$

З наведеної раніше моделі видно, що в процесі течія двофазного потоку в середині пористої структури кріплення під дією температури від пожежі має місце роздільна течія фаз – парового мікроструменю та рідинна мікроплівка, що обкутає частки матеріалу та заповнює всі нерівності структури кріплення. Тому спочатку розрахунок характеристик потоку проведемо по моделі відносної фазової провідності з роздільним плинном фаз. Отримані результати, з метою більш повного представлення про властивості такого потоку, порівняємо з результатами по моделі гомогенного плинну.

При аналізі втрат тиску на тертя важливе значення має параметр двофазності $F = (dp/dz)/(dp/dz)_{одно}$, що уявляє собою відношення обумовленого тертям градієнта тиску (dp/dz) двофазного потоку до аналогічної величини $(dp/dz)_{одно}$ для однофазного потоку рідини при однакових питомих масових витратах. Падіння тиску на ділянці від початку області випару L до деякого перетину z_1 може бути знайдено інтегруванням (6):

$$(P_L - P_{z_1}) / (P_0 - P_1)_{одно} \int_L^{z_1} F[x(z_1)] dz_1. \quad (11)$$

Тут $(P_0 - P_1)_{одно} = \alpha v_{d_1} \gamma_{s_1} g \delta$ – перепад тисків на пористій структурі кріплення на ділянці довжиною δ при русі насиченою водою.

Для розрахунку інтеграла (11) потрібно знати обумовлену теплообміном залежність масового паровмісту потоку x_1 від координати z_1 . У практичному і теоретичному планах важливим є окремий випадок лінійної залежності $x_1 = (z_1 - l)/(k - l)$, яка характеризується постійним по довжині ділянки кріплення середнім об'ємним тепловиділенням $q_v = const$. Він реалізується при постійному уздовж капілярного каналу зовнішньому тепловому потоці, причому тут $l = L/\delta$, $k = K_1/\delta$ (де K_1 – каталітична активність пористої структури, тобто K_1 визначається з рівнянь швидкості хімічної реакції усередині пористої структури і залежить від температури нагрівання, при відсутності даних для практичних цілей можна приймати $K_1 = 2 \div 4$). У цьому випадку розрахунок інтеграла (11) істотно спрощується:

$$\int_l^{z_1} F[x_1(z_1)] dz_1 = (k - l) \int_0^{x_1} F(x_1) dx_1 = (k - l) I(x_1), \quad (12)$$

де $I(x_1) = \int_0^{x_1} F(x_1) dx_1$.

У застосуванні до потоку, що випаровується, у пористих структурах кріплення рівняння (12), що описує плин двофазних сумішей у пористих матеріалах відповідно до моделі відносної фазової проникності при $g = const$, здобуває наступний вид:

$$-\frac{dp_1}{dz} = \frac{\alpha v_{d_1} \gamma_{s_1} g (1 - x_1)}{f_1}, \quad (13)$$

$$-\frac{dp_2}{dz} = \frac{\alpha v_{d_2} \gamma_{s_2} g x_1}{f_2}, \quad (14)$$

$$P_2 - P_1 = \Delta P_k, \quad (15)$$

$$\varphi + \varpi = 1, \quad (16)$$

Тут ω – насиченість пористої структури кріплення водою.

При русі теплоносія, що випаровується, у пористих структурах кріплення нагріваються при пожежі, на відміну від фільтрації двофазних сумішей у сильно пористих матеріалах (наприклад, у ґрунтах), не може бути нерухомої затисненої фази. На початку області випару пухирці пари, що утворюються, при пожежі миттєво заповнюють пори в кріпленнях і є джерелами парових мікроструменів - немає нерухомих затиснених пухирців. Наприкінці зони випару, обволікаюча пористий каркас кріплення рухома мікроплівка при припиненні підведення рідини відразу ж випаровується і зникає. Тому для відносних фазових проникнень виконуються умови:

$$\text{при } x_1 = 0 \quad (\varphi = 0, \quad \varpi = 1), \quad f_1 = 1, \quad f_2 = 0$$

$$\text{при } x_1 = 1 \quad (\varphi = 1, \quad \varpi = 1), \quad f_1 = 0, \quad f_2 = 1 \quad (17)$$

Таким чином, у досліджуваному процесі функції f_1 , f_2 відмінні від нуля при зміні насиченості кріплення водою ω у всьому діапазоні від 0 до 1, таке само, як приведені раніше в «нормованих координатах» (4) відносні фазові проникності. Тому, з огляду на умови (17), а також вид парабол (5), представлених у «нормованих координатах» відносних фазових проникнень для двофазних (пароводяних) сумішей у різних пористих кріпленнях, як перше наближення приймаємо залежність відносних фазових проникнень від насиченості водяною фазою при пожежі у виді статичних функцій:

$$f_1(\omega) = \omega^p, \quad f_2(\omega) = (1 - \omega)^q. \quad (18)$$

При змушеному плинні від пожежі суміші, що випаровується, у пористих структурах кріплення капілярний тиск ΔP_k звичайно мало в порівнянні з повним перепадом тисків, тому градієнти тиску рідинної і парової фаз можна прийняти рівними $dp_1/dz = dp_2/dz$.

Дорівнюючи в цьому випадку праві частини (13) і (14), одержуємо наступне відношення:

$$\frac{x}{f_2(\omega)} = \frac{(1-x) v'}{f_1(\omega) v''}. \quad (19)$$

Підставляючи в нього функції (18), знаходимо аналітичну залежність між видатковим масовим паровмістом потоку x і насиченістю ω пористої структури кріплення рідинною фазою:

$$x = \frac{(1-\omega)^q}{\left[(1-\omega)^q + \frac{v''}{v'} \omega^p \right]}. \quad (20)$$

Якщо показники ступеня p , q у (18) однакові і рівні n ($p = q = n$), то за допомогою співвідношень (19) можна виразити ω через x :

$$\omega = \frac{(1-x)^{1/n}}{\left[(1-x)^{1/n} + \left(\frac{x v''}{v'} \right)^{1/n} \right]}. \quad (21)$$

Останнє вираження є більш зручним, чим (20), тому що масовий паровміст потоку визначається характером теплового потоку при пожежі і може бути розраховано. Величину параметра двофазності визначимо з будь-якого рівняння (13), (14) з обліком (21):

$$F = \left[(1-x)^{1/n} + \left(\frac{x v''}{v'} \right)^{1/n} \right]^n. \quad (22)$$

Звідси випливає, що параметр двофазності задовольняє граничним умовам: $x = 0, F = 1$; $F = v''/v'$. Використовуючи вираження для масових витрат кожної фази

$$\rho' u_o' (1-x) = \rho' u' \omega, \quad (23)$$

$$\rho' u_o' x = \rho'' u'' (1-\omega). \quad (24)$$

Визначимо дійсні швидкості фільтрації рідкої u' , паровий u'' фаз і порівняємо їхній з початковою швидкістю u_o' рідкої фази:

$$\frac{u'}{u_o'} = (1-x)/\omega, \quad (25)$$

$$\frac{u''}{u_o''} = x\rho' / (1-\omega)\rho'' \cdot \quad (26)$$

Звідси виразимо також і відношення швидкостей (ковзання) фаз:

$$\frac{u''}{u'} = \frac{x}{1-x} \cdot \frac{\omega}{1-\omega} \cdot \frac{\rho'}{\rho''} \cdot \quad (27)$$

Рух гомогенного потоку, що випаровується, усередині пористої структури кріплення описується системою рівнянь (6)-(10). Параметр двофазності для нього, як випливає з (6), є відношенням кінематичних коефіцієнтів в'язкості $\nu = \nu_d \cdot \gamma_s$ (од. вим. $m^2/3$ чи m^2/s , ν_d – динамічна в'язкість, Па·з, Ра·с) гомогенного і рідинного потоків: $F = \frac{\nu_d \gamma_s}{\nu_{d1} \gamma_{s1}}$

З урахуванням виражень (7) і (8) можна одержати співвідношення:

$$F_1 = 1 + x \left(\frac{\nu''}{\nu'} - 1 \right) \cdot \quad (28)$$

Для гомогенних потоків з динамічною в'язкістю γ_d , що розраховується по кожній з формул (8)-(10), інтеграл (12) обчислюється аналітично. Наприклад, з використанням вираження (28) одержуємо:

$$I_1(x) = x + \frac{x^2}{2} \left(\frac{\nu''}{\nu'} - 1 \right) \cdot \quad (29)$$

Порівняння результатів, отриманих по двох моделях, приведені на рис. 2, 3, 4, 5. Тут показані деякі характеристики двофазного потоку, що випаровується, у пористих структурах кріплення при пожежі в залежності від його витратного масового паровмісту x . Розрахунки виконані з використанням фізичних властивостей води і водяника пари в стані насичення при тиску 0,1 МПа. Інтеграл $I(x)$ на рис. 2,б розрахований відповідно до формули (12) за значеннями параметра $F(x)$, приведеним на рис. 2,а.

З представлених на рис. 2 результатів випливає, що різні схеми (8)-(10) розрахунку динамічної в'язкості гомогенної суміші приводять до істотно відрізняються результатам. Зменшення відносних фазових проникнь у моделі різного плинуну (збільшення показника ступеня n) значно збільшує гідравлічний опір.

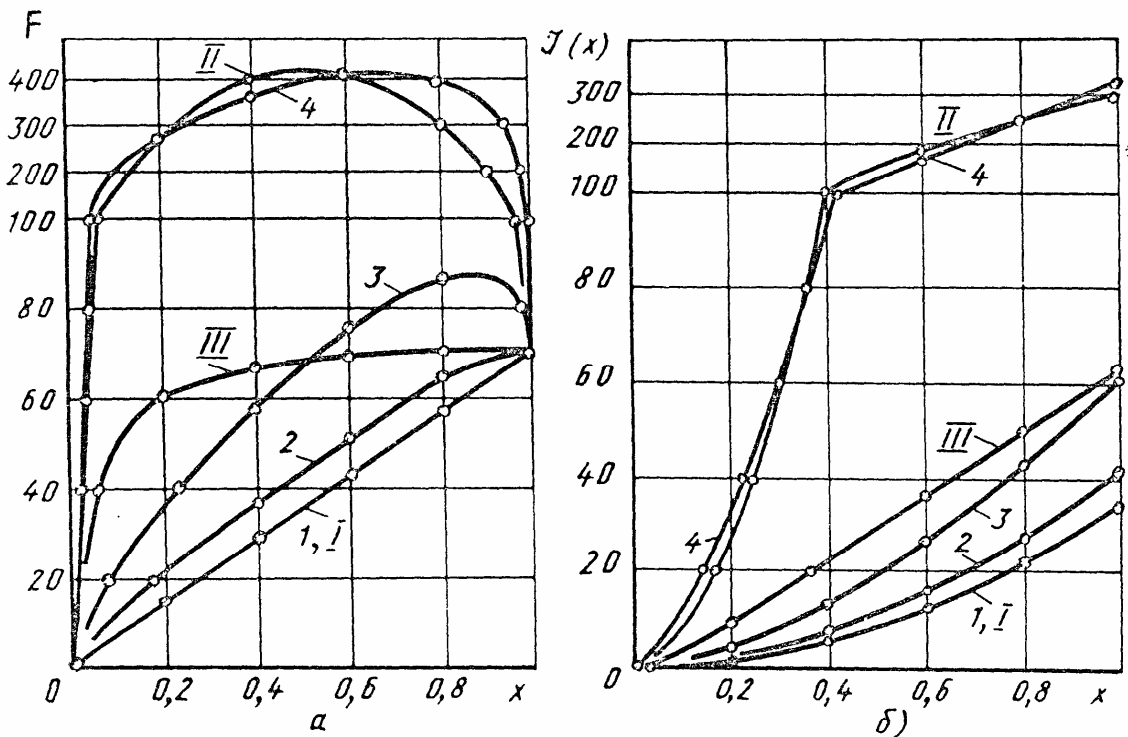


Рис. 2. Параметр двофазності F (а) та інтеграл (12) $I(x)$ (б) в залежності від x :
1, 2, 3, 4 – для моделі відносно фазової проникнення при $n = 1, 2, 3, 6$ – відповідно;
I, II, III – для гомогенної моделі при розрахунку ν_d по формулах (8), (9), (10) відповідно

При великій насиченості кріплення рідкою фазою у випадку гомогенного плинущу в'язкість суміщi менше, ніж при роздільному плинущу фаз (див. рис. 3). Пояснюється це невикорвано високою швидкістю плинущу рідкої фази в гомогенній суміщi (див. рис. 4). Слід зазначити також своєрідність зміни швидкості рідкої фази при $n = 2$; 3 – швидкість спочатку зростає, досягає максимуму і потім зменщується.

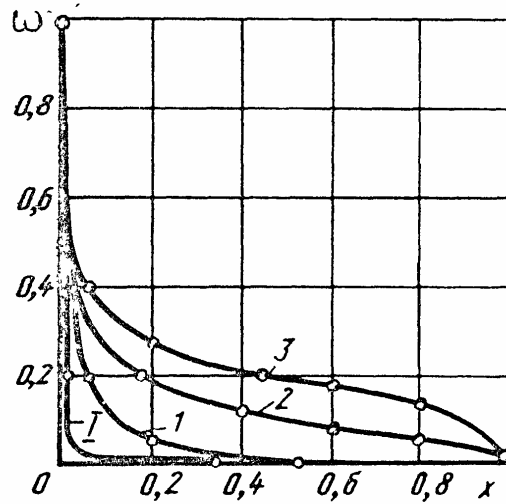


Рис. 3. Залежність насиченості ω пористої матриці рідинною фазою від x : 1, 2, 3 – для моделі відносної фазової проникності при $n = 1, 2, 3$ відповідно; I – для гомогенної моделі

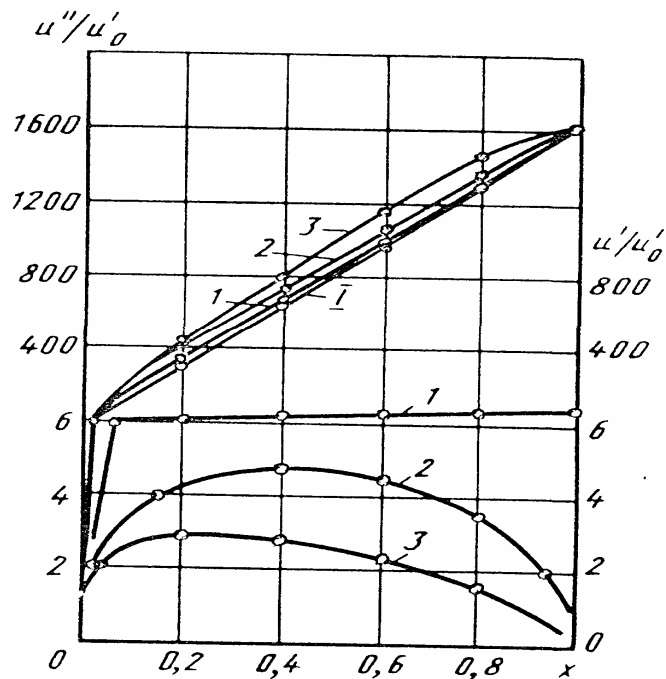


Рис. 4. Відносні швидкості фільтрації u''/u'_0 парової та u'/u'_0 рідинної фаз в залежності від x (позначення такі самі, що на рис. 3)

З приведених на рис. 2 даних особливо важливо відзначити повний збіг результатів по опору двофазного потоку, отриманих за допомогою формули (8) для гомогенної суміщi (лінія I) і по моделі відносної фазової проникності при $n = 1$ (лінія 1). Дійсно, при $n = 1$ формула (22) цілком збігається з вираженням (28). Однак, для цих випадків спостерігається істотне, принципове розходження швидкостей рідкої фази (див. рис. 5). Отже, можна затверджувати, що модель гомогенного потоку при розрахунку динамічної в'язкості по формулі (8), що припускає рівність швидкостей фаз, у дійсності є моделлю

роздільного плинину з різними швидкостями фаз. За допомогою формул (21) і (22) неважко показати, що при $n = 1$ ширі швидкості фаз не рівні, а їхнє відношення залишається постійним

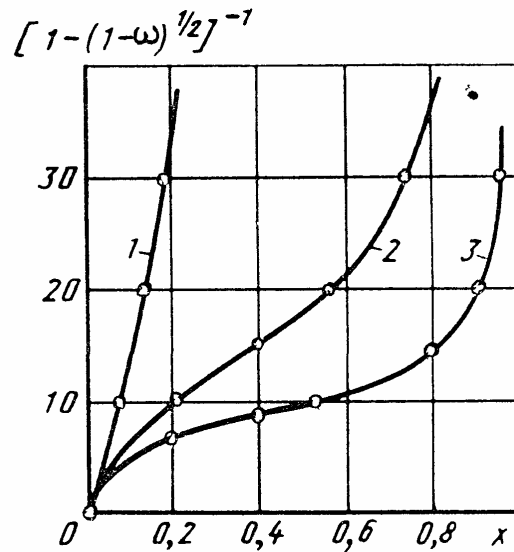


Рис. 5. Залежність інтенсивності h_v об'ємного внутрішньопорового теплообміну множника від x :
1, 2, 3 – для моделі відносної фазової проникнення при $n = 1, 2, 3$ відповідно

$$u'' / u' \Big|_{n=1} = v_{d1} / v_{d2} \quad (30)$$

Аналогічний висновок можна зробити й у відношенні інших виражень (9), (10). Наприклад, на рис. 2 значення параметра двофазності F і інтеграла $I(x)$ для гомогенної моделі розраховуються по формулі (9) в'язкістю дуже близькі до результатів моделі відносної проникності при $n = 6$ – лінії II і 4 відповідно.

З огляду на аналітичні вираження (5) для нормованих відносних фазових проникнень і зауваження щодо умов (17) при виборі функцій виду (18), можна відзначити достатню відповідність представлених на рис. 3 і рис. 4 результатів при $n = 2, 3$ фізичній картині плинину.

Таким чином, запропонована модель двофазного потоку вологого кріплення при пожежі відрізняється від моделі гомогенного плинину і узгоджується з реальною умовою пористої структури кріплення, що випаровує усередині, а в деяких випадках наближається до показників гомогенного плинину.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Рембеляк Т. «Про розрахунок балки під діафрагмою при раптово прикладеному температурному імпульсі». Вісник Національного технічного університету України «КПІ», серія «Гірництво», вип.4, Київ-2000р. с.18-24.
2. Koh J.C.Y., Dutton J.L. Benson B.A. Fundamental Study of transpiration cooling //NASA CR-134523. 1973, 163 p.

РЕМБЕЛЯК Тадеуш – доктор-інженер Краківської гірничо-металургійної академії (Польща).

Наукові інтереси:

– фізичні процеси гірничого виробництва.

Гидродинамические процессы двухфазного потока влажного железобетонного крепления при подземном пожаре /Т. Рембеляк/

Предложена модель двухфазного потока влажной крепи при подземной выработке ископаемых в случае пожара, которая отличается от существующих моделей гидродинамического процесса, в том числе и от широко применяемой модели гомогенного течения, согласуется с реальным условием испаряющегося внутри пористой структуры крепи.

Hydrodynamical processes of a two-phase flow of damp ferro-concrete fastening at a underground fire /T. Rembelyak/

The model of a biphas flow of damp underground manufacture is offered by underground development of minerals in case of a fire, which differs from existing models hydrodynamic of process, including from widely used model of homogeneous current, will be coordinated with natural by a condition evaporating inside porous structure of underground manufacture.