

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

www.ifj.edu.pl/reports/2005.html

Kraków, grudzień 2005

Raport Nr 1972/AP

Przenikanie radonu przez grunt
i do budynków

Jerzy Łoskiewicz, Mirosław Janik

Rozszerzona wersja referatu wygłoszonego na konferencji
"Radon w środowisku 2005" w dniu 21.IX.2005r.

Badania nad przechodzeniem radonu z gruntu do budynków i sposobami jego transportu w glebie i warstwach skalnych znajdują się na pograniczu kilku dziedzin nauki: fizyki radiacyjnej, agrotechniki i geologii. Nie należy zapominać też o głównym beneficjencie – budownictwie.

Początkowo Nazaroff [1] uważał, że głównym procesem powodującym przechodzenie radonu do budynków jest dyfuzja. Jednakże wkrótce stwierdzono istnienie podciśnienia wewnątrz budynku, związanego z wyższą temperaturą wewnątrz budynku (i mniejszą gęstością cieplejszego powietrza) niż na zewnątrz. To podciśnienie wewnątrz budynku wynosi ok. 1.5 do 5 Pa.

Jeżeli utworzymy model matematyczny oparty na lokalnej produkcji radonu z radu w gruncie otaczającym budynek, to transport radonu będzie się opierał na trzech równaniach:

1. Równaniu dyfuzji.

Strumień radonu \mathbf{j}_D będzie

$$\mathbf{j}_D = -D \text{ grad } C$$

gdzie: D – współczynnik dyfuzji radonu, C – stężenie radonu w powietrzu glebowym.

2. Równaniu Darcy opisującym przepływ gazu przez ośrodek porowaty:

Szybkość wypływu \mathbf{q}

$$\mathbf{q} = \nabla P (k/\mu)$$

tutaj k jest przepuszczalnością gleby, zaś μ jest lepkością gazu, a P jest ciśnieniem gazu.

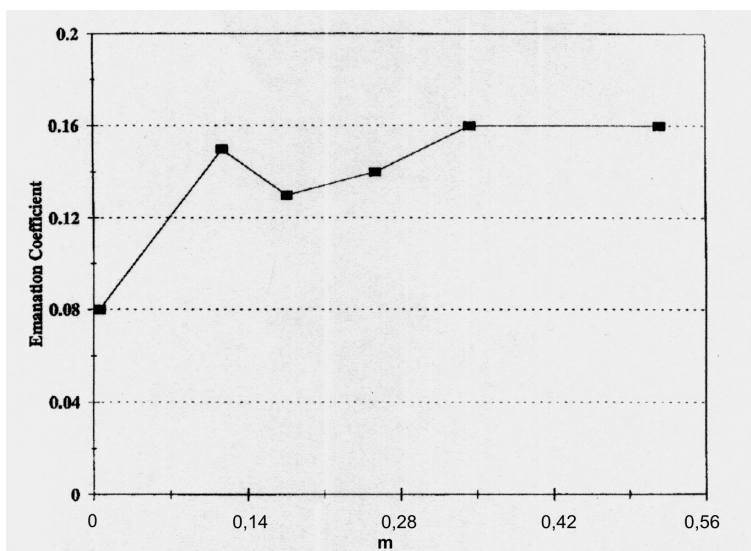
3. Równaniu ciągłości.

Gaz płynący z gleby wchodzi do budynku przez pęknięcia, łączenia elementów czy nieszczelności w doprowadzeniach rur. Ten przepływ gazu opisujemy używając równania zachowania masy (równanie ciągłości):

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{q})$$

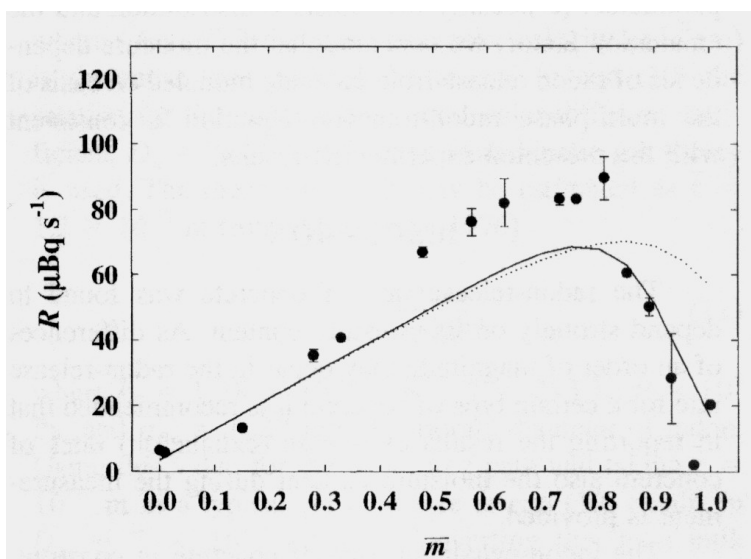
gdzie: ρ - gęstość gazu glebowego.

Rad zawarty w gruncie uwalnia radon dzięki procesom rozpadu promieniotwórczego. Emanacja radonu z ziaren gruntu zależy od wilgotności i przebiega różnie w ośrodkach o różnej porowatości. Rysunki (Rys.1 i 2) pokazują zależność współczynnika emanacji od wilgotności względnej m (% wilgotności maksymalnej) dla piasku, betonu i gleby gliniastej. Emanacja rośnie z wilgotnością, przy czym dla piasku i gliny dość szybko osiąga nasycenie, zaś dla betonu rośnie aż do pełnego nasycenia wodą.



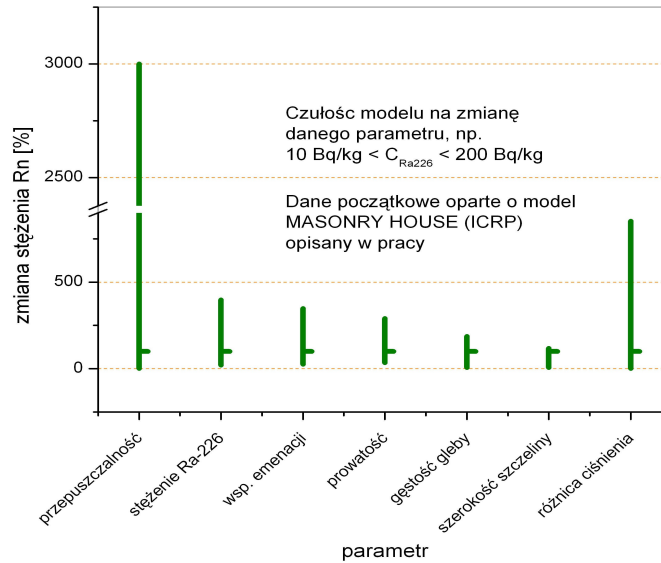
Rys. 1: Współczynnik emanacji radonu jako funkcja nasycenia wodą dla gleby gliniastej

Natomiast współczynnik uwalniania się radonu (ekshalacja) osiąga dla betonu maksimum dla około 80 % nasycenia porów wodą jak to widać. Pokazuje to Rys.3. Potem wilgoć zatrzymuje radon w wodzie.



Rys. 2: Szybkość uwalniania się radonu w funkcji średniego nasycenia wodą dla betonu

Drugim ważnym parametrem wpływającym na transport radonu w gruncie jest przepuszczalność gruntu wokół budynku. W pracy doktorskiej M. Janika [2] przeprowadzono analizę czułości stężenia radonu w budynku na różne parametry modelu takiego jak opisany powyżej. Analiza ta pokazała, że najsilniej działającym parametrem modelu jest przepuszczalność. Pokazane jest to na Rys.4.

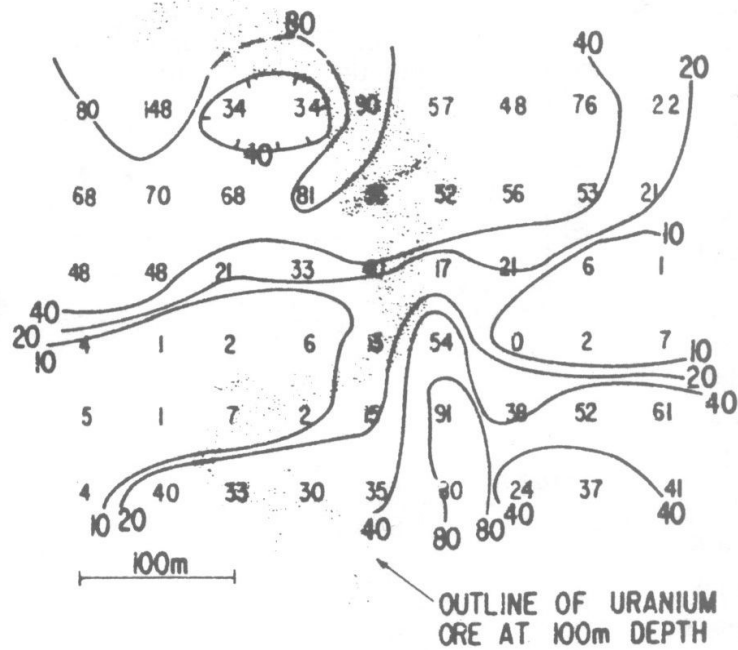


Rys. 3: Czułość modelu na zmianę parametrów wejściowych

Taki model pozwala wytłumaczyć wysokie stężenia radonu w niektórych domach. Jednakże pojawia się tu wątpliwość: w lecie często temperatura wewnątrz domu jest niższa niż na zewnątrz i mamy wobec tego nadciśnienie w budynku. Zatem stężenie radonu w domu powinno wyraźnie spadać. Dane doświadczalne są różne i istnieje wyraźna grupa przypadków, kiedy nie następuje spadek stężenia radonu w lecie. Holub et al [3] pokazali, że często stosowanie sztucznego podciśnienia o wartości 1,6 Pa a potem takiegoż nadciśnienia nie zmieniało stężenia radonu wewnątrz domu, z czego wyciągnęli wniosek o ważnej roli dyfuzji w procesie wchodzenia radonu do budynku.

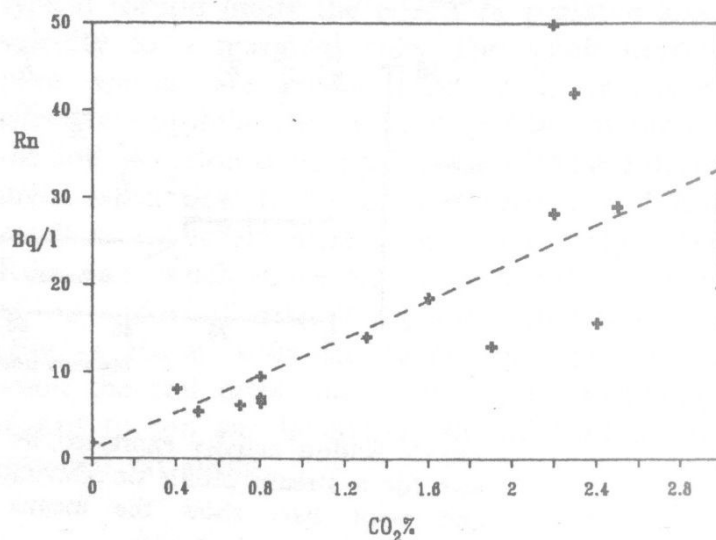
Jeżeli transport radonu odbywałby się wg tych wyżej wymienionych mechanizmów, to zasięg przemieszczania radonu sięgałby najwyżej kilkunastu metrów.

Takie twierdzenie zostało zakwestionowane dzięki pracom Fleischera et al [4]. Zajmowali się oni innym zagadnieniem, a mianowicie sposobem poszukiwania złóż uranu używając stężeń radonu dla umiejscowienia złoża. Stosowali do tego celu pojemniki z plastikowym detektorem śladów. W stanie New Mexico dla ciała rudnego położonego na głębokości około 100 m zarejestrowali oni pozytywną anomalię na powierzchni. Przedstawia to Rys.5. Jest to jeden z przykładów, których było wiele a ten jest dostatecznie wyrazisty. Zatem radon może być transportowany na znaczne odległości – 100 m a może i więcej. Zaczęto więc poszukiwać innych mechanizmów transportu radonu.



Rys. 4: Pole radonu nad ciałem rudnym w stanie New Mexico

Kristiansson i Malmquist [5] a potem Ball, Cameron et al [6] wysunęli hipotezę, że taki transport na odległości kilkuset metrów może być wywołany unoszeniem radonu przez strumień innego gazu np. CO_2 lub pary wodnej czy też SO_2 . Z pracy Ball'a i Camerona pochodzi Rys. 6 uzyskany na złożu rud miedzi w Pn. Walii gdzie przedstawiona jest zależność stężenia radonu w gazie od stężenia CO_2 w tym samym gazie. Autorzy uważają, że dwutlenek węgla produkowany tu jest biologicznie na złożach sulfidów.



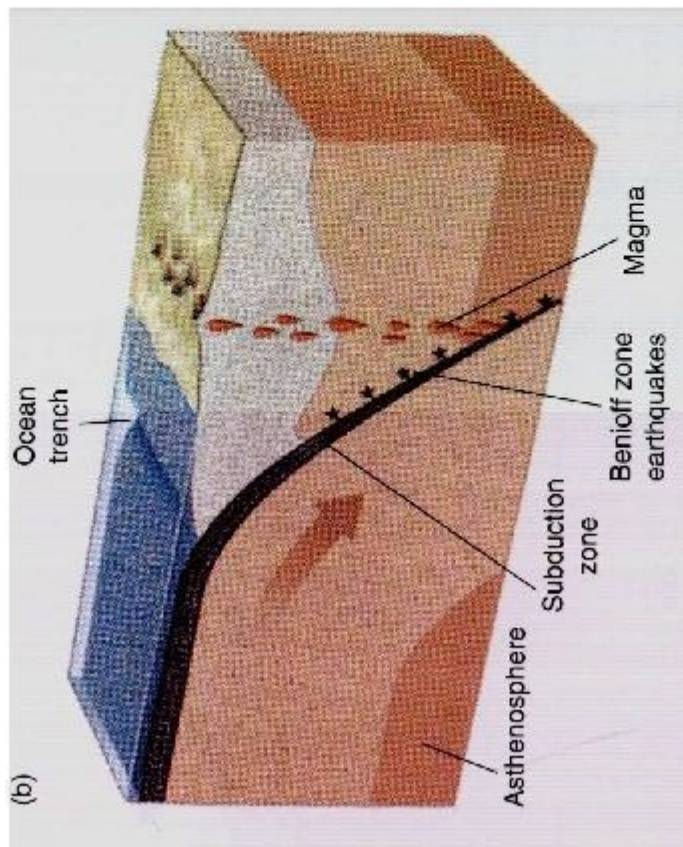
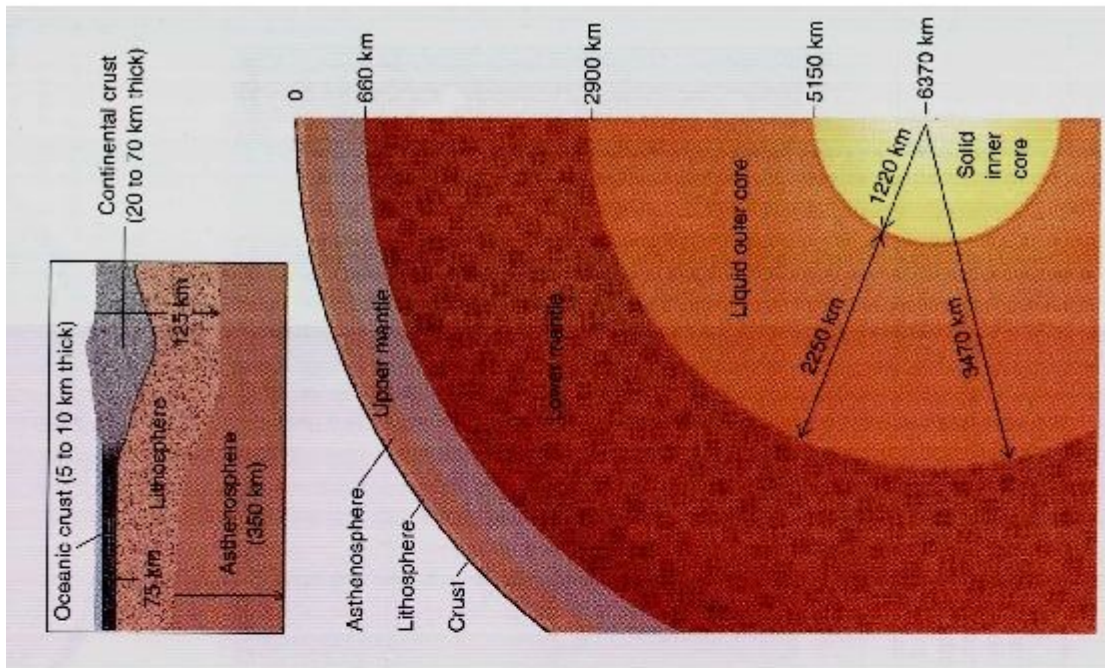
Rys. 5: Zależność Rn od CO₂ ze złoży rud miedzi w Gwynedd (Pn Walia)

Warto podkreślić, że jednym ze źródeł CO₂ mogą być procesy związane z ruchem płyt tektonicznych i wypiętrzaniem łańcuchów górskich.

Rys.7 pokazuje rozkład płyt tektonicznych litosfery ziemskiej i prędkości ruchu tych płyt w cm/rok [7]. Tam gdzie strzałki są skierowane ku sobie występuje zderzenie płyt i w konsekwencji tworzenie się łańcuchów górskich. Jeżeli mamy zderzenie płyty oceanicznej z płytą lądową, to cięższa płyta oceaniczna zapada się pod lżejszą płytę lądową. Pokazane jest to na Rys. 8. Oceaniczna płyta schodzi głębiej – do astenosfery – jest ogrzewana, a nawet ulega stopieniu. Ponieważ składa się w swej górnej części z wapienia, to przy wzroście temperatury CaCO₃ ulega rozkładowi wydzielając najpierw parę wodną a potem CO₂. Jest to jedno z ważnych naturalnych źródeł dwutlenku węgla w atmosferze.

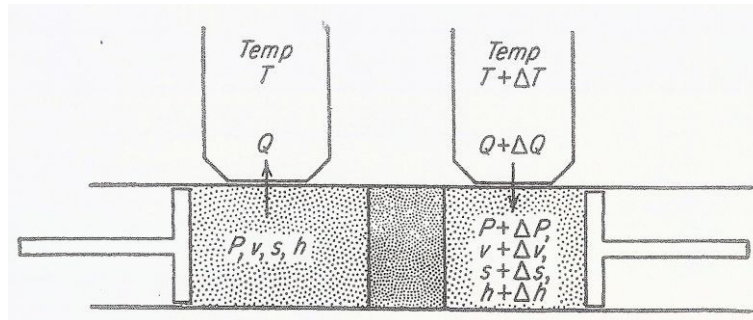
W ostatnich zaś latach zwrócono uwagę na skutki istnienia gradientu temperatury pomiędzy budynkiem i glebą. Źródłem tego gradientu jest ogrzewanie domu a także działanie promieni słonecznych (właściwy efekt cieplarniany w miniskali) oraz dobowe fluktuacje temperatury.

Oprócz powstawania różnicy gęstości gazu wewnątrz i na zewnątrz budynku, możemy mieć tu do czynienia z tzw. efektem Knudsen. Efekt ten odkryty w latach 20-tych XX wieku daje w określonych warunkach, dość szokujące, na pierwszy rzut oka, rezultaty.



Rys. 7: Zderzenie płyt litosfery

Wyidealizowane doświadczenie pokazane jest na Rys. 9. Z lewej strony znajduje się zbiornik z gazem, w którym jest on utrzymywany w stałej temperaturze T_0 i ma stałe ciśnienie p_0 . Zbiornik ten oddzielony jest od zbiornika po prawej stronie rysunku porowatym korkiem. W zbiorniku po prawej stronie mamy wyższą temperaturę $T_1 = T_0 + \Delta T$. Jeżeli pory w korku są dostatecznie małe to po prawej stronie ustali się ciśnienie p_1 większe niż p_0 . To właśnie jest efuzja termiczna czyli efekt Knudsena (Zemansky [8])



Rys. 8: Schemat doświadczenia pokazującego efekt Knudsena

Zjawiska takie można opisać używając mechaniki statystycznej, która pozwala znaleźć związki pomiędzy parametrami mikroskopowymi a makroskopowymi.

Statystyczny opis gazu jest dany przez jego funkcję rozkładu $f(t, \mathbf{q}, \mathbf{p})$ molekuł gazu w ich przestrzeni fazowej. Jest ona funkcją uogólnionych współrzędnych \mathbf{q} i odpowiadających im uogólnionych pędów \mathbf{p} , a w przypadku stanu nie ustalonego również czasu t . Molekuły gazu poruszają się i zderzają między sobą. Powoduje to zmianę, wskutek zderzeń, funkcji rozkładu:

$$df/dt = C(f)$$

Równania tego typu noszą nazwę równań transportu. Najważniejszym jest równanie Boltzmann'a. Funkcja rozkładu dla stanu ustalonego oczywiście spełnia takie równanie i jest zerowym przybliżeniem dla stanów nieustalonych. Równanie Boltzmann'a daje nam mikroskopowy opis sposobu, w jaki stan gazu zmienia się w czasie. Możemy przejść od tego równania transportu do typowych równań mechaniki płynów jak równanie Stokes'a i inne. Dają one makroskopowy opis zmienności parametrów gazu w czasie. Aby taki makroskopowy opis był ważny średnia droga swobodna λ molekuł musi być dużo mniejsza od typowego rozmiaru problemu L (np. średnicy rury). Ten stosunek $K = \lambda/L$ nosi nazwę liczby Knudsena. W tych warunkach, wyrażenia na przewodnictwo cieplne i tarcie wewnętrzne (lepkość) są liniowymi funkcjami gradientów temperatury i prędkości gazu. Są one jednak tylko pierwszymi członami rozwinięcia funkcji rozkładu $f(t, \mathbf{q}, \mathbf{p})$ dla stanu równowagi w szereg

potęgowy złożony z wyrazów $K_n^{(m)}$ [9]. Gdy $K_n > 1$, to należy wziąć pod uwagę dalsze człony rozwinięcia a więc będzie $f = f_0 + \delta f$.

Teraz gaz przechodząc przez materiał porowaty napotyka – z gruba rzecz biorąc – dwa rodzaje porów. W mikroporach średnia droga swobodna molekuł gazu jest większa niż poprzeczny przekrój kanalika porowego. Tutaj więc liczba Knudsen K_n będąca stosunkiem drogi swobodnej do średnicy kanalika porowego jest > 1 . Dla makrokanałów $K_n < 1$ i wskutek gradientu ciśnienia następuje przepływ, który jest zależny od lepkości gazu.

Zajmijmy się teraz efektem Knudsen czyli tzw. efuzją termalną lub termodyfuzją. Efekt ten zachodzi dla mikroporów. Tutaj molekuly zaniedbywalnie słabo oddziałują jedna z drugą; zderzają się one wyłącznie ze ściankami kanalika. Wobec tego zmienia się $C(f)$, a więc także i funkcja rozkładu. Powstaje wówczas efuzyjny (termodyfuzyjny) strumień gazu dający efekt Knudsen. Wygląda to tak: przekaz masy gazu zachodzi wówczas przez mikropory łączące znaczną objętość gazu (gdzie mamy ciśnienie P_1 i temperaturę T_1) z naczyniem, gdzie temperatura jest T_0 ($T_0 < T_1$) a ciśnienie P_0 . W takim przypadku stan równowagi osiągniemy, gdy

$$P_0 / \sqrt{T_0} = P_1 / \sqrt{T_1}$$

Jest to oczywiście wynik całkowicie różny od sytuacji, gdy $K_n < 1$ czyli dla dużych porów. Wówczas

$$P_1 = P_0$$

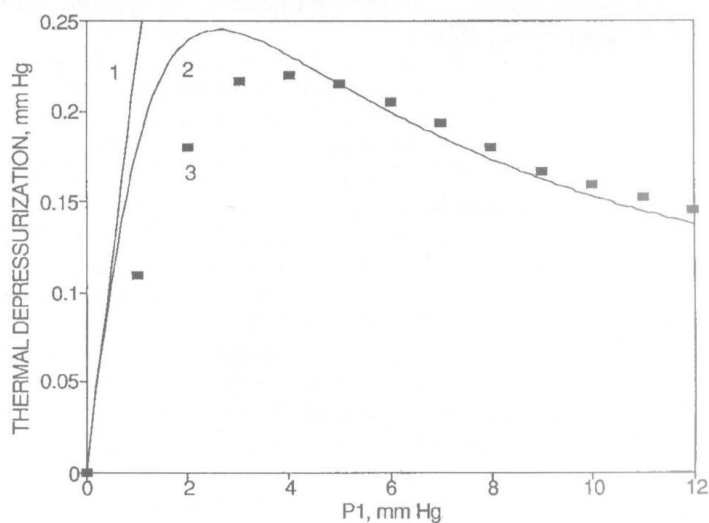
Natomiast efekt Knudsen powoduje, że ciśnienie rośnie w objętości cieplejszej:

$$P_1 = P_0 \cdot \sqrt{T_1} / \sqrt{T_0}$$

Mikropory w ścianach betonowych budynku spełniają warunki efektu Knudsen. Zatem radon (dzięki efuzji termicznej lub termodyfuzji) przenika do budynków, ponieważ panuje tam wyższa temperatura.

Jeżeli idzie o praktyczną stronę zagadnienia, to istotny tu jest obszar przejściowy o wartościach liczby Knudsen od 1 do ~ 8 . Badali ten obszar Mason i Malinauskas [10]. Ich wynik przedstawiony jest na Rys. 10. Pokazana jest tu obniżka ciśnienia spowodowana różnicą temperatur (200°K) w funkcji ciśnienia P_1 – od ciśnienia zależy liczba molekuł gazu w jednostce objętości a więc i λ .

Zakładając średni promień kanalika porowego $\langle r \rangle = 2.5 \times 10^{-8}$ m, porowatość betonu $\varepsilon_b = 0.12$ i różnicę temperatur 8° K to dla typowego strumienia gazu glebowego wartość $j_k = 1.05 \times 10^{-7}$ kg/m²s, co pokazane jest w pracy Goldmana i Minkina [11]. Wynik w sytuacji rzeczywistej zależy od wielu parametrów gleby i betonu a także od wilgotności.



Rys. 9: Efekt Knudsena w obszarze przejściowym

Zatem obserwacja Holuba dotyczy występowania zarówno dyfuzji jak i efuzji termalnej. Ta ostatnia szczególnie istotna będzie na glebach gliniastych, posiadających liczne mikrokanaliki porowe.

Literatura

1. W.W.Nazaroff, A.V. Nero Eds. Radon and its decay products in indoor air. John Wiley and Son, New York 1988
2. M. Janik Przenikanie radonu z gleby do budynku. Modelowanie komputerowe i weryfikacja w budynkach mieszkalnych. Praca doktorska IFJ PAN Kraków 2005.
3. R. F. Holub and L.K. Killoran; Is diffusion or forward flow the Main Mechanism of Radon Infiltration into Underground Openings? Rad. Prot. Dosimetry 56 (1994) 161
4. R.L. Fleischer, H. R. Hart, and A. Mogro-Campero Radon Emanation over an ore body: Search for long-distance transport of Radon. Nucl. Instr. Methods 179 (1980) 169
5. K. Kristiansson and L. Malmquist Evidence for Nondiffusive Transport of Rn^{222} in the Ground and a New Physical Model for the Transport. Geophysics 47 (1982) 1444
6. T.K. Ball, D.G. Cameron, T.B. Colman, P.D. Roberts. Behaviour of Radon in the geological environment: a review. Quarterly Journal of Engineering Geology 24 (1991) 169
7. G.R. Thompson and J. Turk, Modern Physical Geology, Saunders College Publishing Orlando Fl., 1997
8. M.W.Zemansky Heat and Thermodynamics 1957
9. E.M. Lifshitz and L.P. Pitaevskii Physical Kinetics, Landau and Lifshitz Course of Theoretical Physics Vol. 10 Nauka, Moskwa 1979, English Edition Butterworth and Heinemann 1981
10. E.A. Mason and A.P. Malinauskas Gas Transport in Porous Media: The Dusty-Gas Model, Elsevier, New York 1983
11. S. Goldman, L.M. Minkin, V.P. Makarov Non-Isothermal Gaseous Exchange between Soil and Atmosphere Chemosphere 24 (1992) 1961, also L. Minkin Thermodiffusion in Concrete Slab as a Driving Force for Indoor Radon Entry Health Physics 80 (2001) 151