

Wojciech Koza, Jan Skowronek, Stanisław Chałupnik

KOMORA DO BADAŃ WSPÓŁCZYNNIKÓW EKSHALACJI RADONU

Streszczenie

Radon i jego pochodne obecne w powietrzu w domach są źródłem ponad połowy rocznej dawki promieniowania jonizującego, jaką przeciętny człowiek przyjmuje z otoczenia [2]. Jest drugim co do znaczenia, po tytoniu, czynnikiem wywołującym raka płuc. W większości przypadków jego źródłem są zawarte w skorupie ziemskiej naturalne szeregi promieniotwórcze. W budynkach mieszkalnych w wielu przypadkach mogą to być również materiały, z których są one zbudowane. Radon, będący gazem szlachetnym, dość łatwo ekshaluje z nich do powietrza. W zamkniętych pomieszczeniach jego stężenie może wzrosnąć na tyle, by stanowić zagrożenie dla zdrowia przebywających w nim osób.

W celu ograniczenia zagrożenia z tego źródła ważne jest wyznaczenie współczynników ekshalacji radonu z materiałów budowlanych i/lub surowców, z których te materiały zostały wykonane. Znajomość wartości współczynników ekshalacji może być także użyteczna do prognozowania zagrożenia na stanowiskach pracy, na których występują materiały zawierające rad, np. w kopalniach.

Do badań współczynników ekshalacji radonu buduje się specjalne komory pomiarowe, by uniemożliwić kontakt ze środowiskiem zewnętrznym.

W artykule przedstawiono budowę komory ekshalacyjnej o zmiennej objętości. Umożliwia to badanie próbek o różnych rozmiarach. Przedstawiono również wyniki testowania komory pod względem szczelności. Zaproponowano dwie metody wyznaczania współczynnika ekshalacji radonu, różniące się sposobem prowadzenia badań i zastosowanymi metodami pomiaru stężenia radonu. Pierwszy sposób polega na pomiarze stężenia radonu w ciągu pierwszych kilkunastu godzin po rozpoczęciu badań. Można wtedy przyjąć, że ekshalacja radonu powoduje liniowy wzrost jego stężenia w komorze, bowiem rozpad promieniotwórczy radonu jest wówczas znikomo mały w porównaniu z szybkością ekshalacji i można go zaniedbać w obliczeniach. Drugi sposób polega na pomiarze stężenia radonu w komorze po osiągnięciu równowagi dynamicznej między jego ekshalacją a rozpadem promieniotwórczym. Jest to sposób bardziej czasochłonny.

Do pomiarów stężenia radonu zastosowano zarówno metody czynne (pobór próbek powietrza do badań metodą przepompowywania przez układ detekcyjny), a także bierne. Stwierdzono, że stosując metody czynne należy zwrócić szczególną uwagę na szczelność układu pomiarowego. W części detekcyjnej zastosowano radiometrię z komórkami Lucasa lub sondy Barasol.

Opisano podstawy teoretyczne przedstawionych sposobów badania współczynnika ekshalacji radonu. Na zakończenie przedstawiono wyniki badania współczynnika ekshalacji z kilku różnych materiałów.

Development of the chamber for measurements of radon exhalation coefficients

Abstract

Radon and its progeny concentrations in dwellings are a source of significant effective dose for inhabitants, usually more than 50% of annual dose from all natural radionuclides in the environment. Radon, similarly as tobacco, is stated as one of the most important factors, inducing lung cancers. In most of the cases, main sources of radon in dwellings are natural series of radionuclides in underlying ground. But in some buildings, also construction materials may be additional and important source of radon. Radon, as a noble gas, relatively easy can migrate through solid materials and exhales from it to the air. In confined spaces, like dwellings, cellars, caverns or tunnels, radon concentration may grow to such level, to cause a health hazard for inhabitants or workers.

Determination of radon exhalation coefficients from building materials or/and ingredients of such materials is important to reduce negative influence of radon. Additionally, the knowledge of exhalation factors can be useful for the prediction of radon hazard at workplaces, located in confined spaces, like underground galleries in mines or in tunnels.

To enable investigations of radon exhalation coefficients, special chambers are constructed to seal samples of different materials inside, without contact with other radon sources.

In the paper a construction of exhalation chamber is described, with a possibility to regulate its volume. Such feature enables investigations of exhalation from different samples with a wide span of dimensions. Results of leaking tests of exhalation chamber are presented in the paper as well.

Two methods of the assessment of radon exhalation factor have been described, with application of different radon detectors and time regimes of measurements. First approach is based on radon measurements in the chamber within first several hours after sealing of the chamber. In this case a linear increase of radon concentration is taken into account, because the decay of this radionuclide in this period can be neglected. In the second method, measurements are done, when the dynamic equilibrium in the chamber is established (after at least 14 days). This method is a time-consuming one, but often giving more precise results.

For measurements of radon concentration in exhalation chamber different methods have been applied, active and passive ones. In active methods air from the chamber has been pumped through detection unit. We found, when active methods have been applied, very important issue was the proper sealing of the system to avoid any leakage, which can occur during pumping. Pylon AB-5 monitor and Barasol radon probe have been used as radon monitors.

The theoretical basis for both methods of investigation of radon exhalation coefficient is presented in the paper. Several results of experiments for different materials are included in the text.

1. WSTĘP

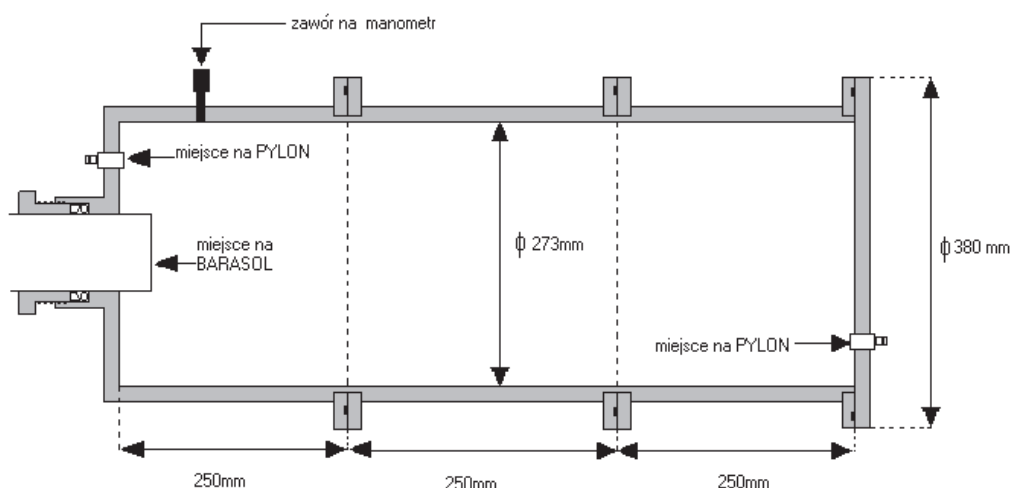
Badania, które przeprowadza się w wielu laboratoriach na świecie dowodzą, że radon oraz produkty jego rozpadu wdychane z powietrzem zwiększają ryzyko zachorowań na choroby nowotworowe wśród ludzi [1]. Radon i jego pochodne obecne w powietrzu w domach są źródłem ponad połowy rocznej dawki promieniowania jonizującego, jaką przeciętny człowiek przyjmuje z otoczenia [2]. Uwarunkowania geologiczne, a czasami wpływ górnictwa [3, 4] powodują, że w niektórych domach stężenie radonu i jego pochodnych może być dziesiątki, a nawet setki razy większe niż w innych [5, 6]. Atomy radonu rozpadają się, wytwarzając radioaktywne produkty rozpadu. Pochodne rozpadu dalej sukcesywnie rozpadają się emitując szkodliwe dla zdrowia cząstki alfa. Energia cząstek alfa wyemitowanych przez wchłonięte do płuc pochodne radonu absorbowana jest przez tkanki układu oddechowego i może w efekcie spowodować rozwój choroby nowotworowej.

Radon jest gazem szlachetnym i dlatego łatwo ekshaluje do powietrza. Zdolność przechodzenia radonu z materiałów stałych lub cieczy do powietrza określa się przez pomiar współczynnika ekshalacji: jest to aktywność radonu (w bekerelach) wydzielana do powietrza w jednostce czasu (sekundzie) z jednostki powierzchni (1 metra kwadratowego) tego materiału.

2. OPIS KOMORY EKSHALACYJNEJ I METOD BADAWCZYCH

Do badań współczynnika ekshalacji radonu zaprojektowano i zbudowano specjalną komorę. Komora ta została wykonana ze stalowej rury w postaci modułowej.

Składa się ona z trzech segmentów, co pozwala uzyskać objętości: 14,7, 29,3 oraz 43,9 l (rys. 1).



Rys. 1. Schemat komory radonowej

Fig.1. A sketch plan of radon exhalation chamber

W czasie wstępnych badań wykorzystano dwie różne metody pomiaru radonu. W pierwszej metodzie zastosowano radiometr typu AB-5 firmy PYLON z komorami scyntylacyjnymi. Powietrze z komory ekshalacyjnej zasysane było do komórki Lucasa, dołączonej do radiometru. Całość tworzyła układ zamknięty, w którym obieg powietrza był wymuszany za pomocą wbudowanej w radiometr pompy lub też powietrze dyfundowało do biernej komórki Lucasa. Dolny próg detekcji (LLD) dla metody scyntylacyjnej wynosił około 30 Bq/m^3 przy czasie pomiaru 30 minut.

W drugiej metodzie wykorzystano sondę „BARASOL” wyposażoną w krzemowy detektor półprzewodnikowy. Sonda ta zawiera układy: detekcji, obróbki sygnału, sterowania i zarządzania danymi oraz układ zasilania. Służy ona przede wszystkim do określania stężenia radonu w powietrzu glebowym. Może być dołączona do komory ekshalacyjnej. Omawiana metoda jest metodą bierną, radon dyfunduje do komory pomiarowej sondy poprzez membranę. Próg detekcji tej metody pomiarowej wynosi około 200 Bq/m^3 , przy czasie pojedynczego pomiaru 30 minut.

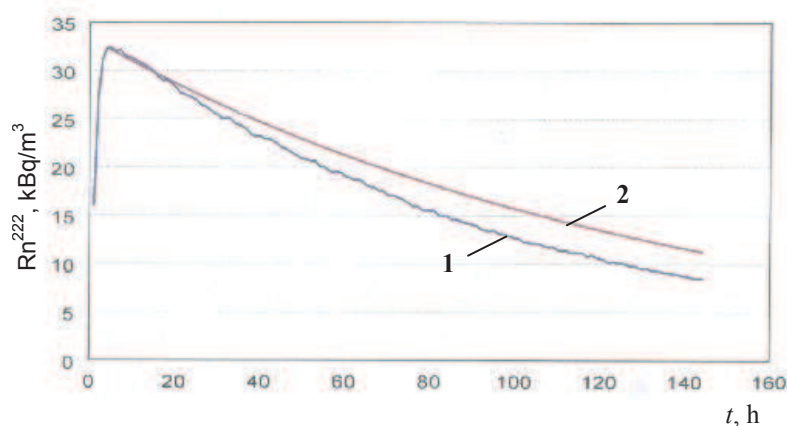
2.1. Badanie szczelności komory ekshalacyjnej przy użyciu komórek Lucasa

Badania szczelności komory ekshalacyjnej polegały na wytworzeniu w niej atmosfery radonu, a następnie śledzeniu jego rozpadu. Źródło atmosfery radonowej stanowiła komora radonowa o pojemności $7,25 \text{ m}^3$, w której utrzymywane było stałe stężenie radonu wynoszące około 35 kBq/m^3 . W komorze tej została umieszczona, na jedną dobę, otwarta komora ekshalacyjna. Po tym czasie została ona zamknięta i wyciągnięta z komory. Badania jej szczelności prowadzono dwoma metodami: czynną i bierną.

Metoda bierna

W metodzie biernej zastosowano komórkę scyntylacyjną typu PRD (Passive Radon Detector), która była połączona na stałe z radiometrem AB-5. Umożliwiło to bezpośrednio śledzenie zmian aktywności radonu w komorze. Komórkę PRD wprowadzono z jednej strony do komory ekshalacyjnej przez otwór montażowy sondy, co umożliwiło dyfuzję radonu z komory do komórki Lucasa. Jednak ze względu na nieco mniejszą średnicę komórki PRD, konieczne było zastosowanie dodatkowego uszczelnienia za pomocą uszczelek, wykonanych z gumy silikonowej.

Ponieważ radon jest gazem szlachetnym, podlegającym jedynie prawom rozpadu promieniotwórczego, jego ubytek w komorze spowodowany jest jego rozpadem, ale może być powiększony nieszczelnością układu. Porównując teoretyczny ubytek radonu wynikający z prawa rozpadu oraz wyniki pomiarów można było wyznaczyć nieszczelność układu (rys. 2).



Rys. 2. Test szczelności komory metodą bierną przy użyciu radiometru AB-5: 1 – krzywa teoretyczna zaniku Rn, 2 – wynik pomiaru metodą bierną

Fig. 2. Results of a leakage test of the chamber. Pylon AB-5 monitor was used in a passive mode. 1 – theoretical decay curve of Rn-222, 2 – results of experiment

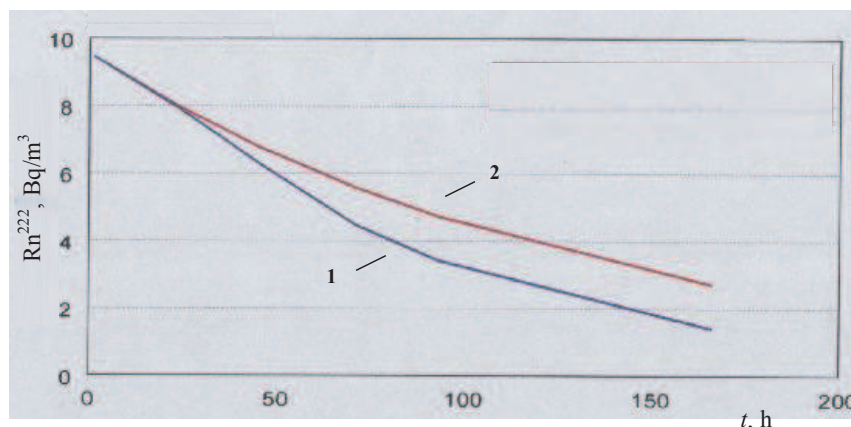
Doświadczalnie wyznaczone stężenie radonu było znacznie większe od teoretycznego spadku stężenia wynikającego z prawa rozpadu. Pomiar jednoznacznie wykazał nieszczelność układu. Stwierdzono że trudności ze szczelnym zamocowaniem komórki Lucasa w komorze ekshalacyjnej wykluczają zastosowanie tej metody.

Metoda czynna

Badania szczelności metodą czynną zostały przeprowadzone bezpośrednio po zakończeniu badania szczelności metodą bierną, dlatego początkowe stężenie radonu w komorze ekshalacyjnej wynosiło około 12 kBq/m³ (rys.3). Pomiar wykonany został przy użyciu komórki Lucasa typu 300A, dołączonej do radiometru AB-5. Komórka Lucasa podłączona była z jednej strony do komory ekshalacyjnej za pomocą przewodu z tworzywa sztucznego zakończonego szybkozłączką gazową. Drugi

konektor komórki połączony był przewodem z pompą powietrza, w jaką jest wyposażony radiometr AB-5. Z kolei wylot pompy, również za pomocą węża zakończonych szybkozłączką gazową, był połączony z komorą ekshalacyjną, co zapewniało zamknięty obieg powietrza w systemie. Komórka scyntylacyjna 300 A dołączona była w czasie pomiarów na stałe do fotopowielacza radiometru AB-5.

Tak jak w przypadku stosowania metody biernej, szczelność komory określono na podstawie porównania wartości stężenia radonu, wynikającego z prawa rozpadu promieniotwórczego, z wartościami otrzymanymi z pomiarów. Badania wykazały nieszczelność układu. Ucieczka radonu mogła zachodzić na drodze powietrza pomiędzy komorą ekshalacyjną, komórką Lucasa i radiometrem AB-5. Najprawdopodobniej nieszczelna była pompa powietrza, wymuszająca jego przepływ w układzie.



Rys. 3. Test szczelności komory metodą aktywną przy pomocy urządzenia Pylon-AB5:
1 – krzywa teoretyczna, 2 – wynik pomiaru metodą aktywną

Fig.3. Results of a leakage test of the chamber. Pylon AB-5 monitor was used in the active mode.
1 – theoretical decay curve of Rn-222, 2 – results of experiment

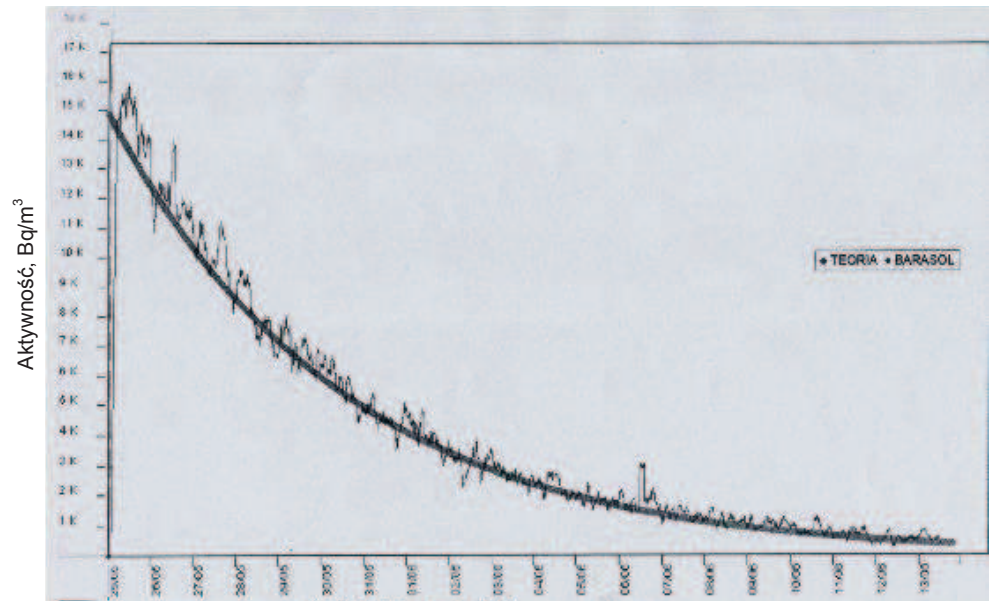
Oba testy wykazały, że radiometr typu AB-5 firmy PYLON nie może być stosowany do pomiarów ciągłych stężenia radonu w komorze ekshalacyjnej ze względu na nieszczelności w systemie pomiarowym. Możliwe jest natomiast wykorzystanie go do pomiarów chwilowych, co niejednokrotnie może być konieczne. Rozwiązanie może stanowić wykonanie dodatkowych pierścieni uszczelniających, gdyż metoda ta charakteryzuje się bowiem niższym progiem detekcji niż sonda Barasol.

2.2 Test szczelności komory dla radonu przy użyciu sondy Barasol

Podobnie jak w poprzednich badaniach, otwarta komora ekshalacyjna została umieszczona w dużej komorze radonowej o ustalonym stężeniu radonu w powietrzu. Komorę pozostawiono w niej na czas jednej doby, a następnie zamknięto i wyjęto na zewnątrz w celu wykonania testów szczelności z zastosowaniem sondy Barasol.

Stwierdzono, że wykreślona na podstawie uzyskanych wyników krzywa doświadczalna zmian stężenia radonu w komorze miała niemal identyczny przebieg jak

teoretyczna. Układ pomiarowy był więc dobrze przystosowany do ciągłego pomiaru zmian stężenia radonu w komorze, a wyniki badań świadczyły o tym, że system pomiarowy jest szczelny.



Rys. 4. Test szczelności komory przy użyciu sondy BARASOL

Fig. 4. Results of a leakage test with application of Barasol radon probe

3. POMIARY EKSHALACJI RADONU

3.1. Metoda wyznaczania współczynnika ekshalacji radonu

Współczynnik ekshalacji można wyznaczać albo podczas liniowego narastania stężenia radonu w komorze ekshalacyjnej przez kilka lub kilkanaście godzin od rozpoczęcia badań, albo też w stanie ustalonym, po okresie co najmniej 15 dni od umieszczenia próbki w komorze.

W pierwszym przypadku, dla czasu eksperymentu dużo krótszego od czasu połowicznego zaniku radu (około 91 godzin), można przyjąć, że stężenie radonu w powietrzu wewnątrz komory jest proporcjonalne do współczynnika ekshalacji radonu z określonego materiału i zależy liniowo od czasu ekspozycji i powierzchni, z której następuje ekshalacja [7].

Reasumując powyższe można napisać wzór

$$C_{Rn} = \frac{e_{Rn} P t}{V} \quad (1)$$

gdzie:

- C_{Rn} – stężenie radonu w komorze, Bq/m³;
 e_{Rn} – współczynnik ekshalacji, Bq/hm²;
 P – powierzchnia, z której następuje ekshalacja, m²;
 t – czas trwania ekshalacji, h;
 V – objętość powietrza w komorze, m³.

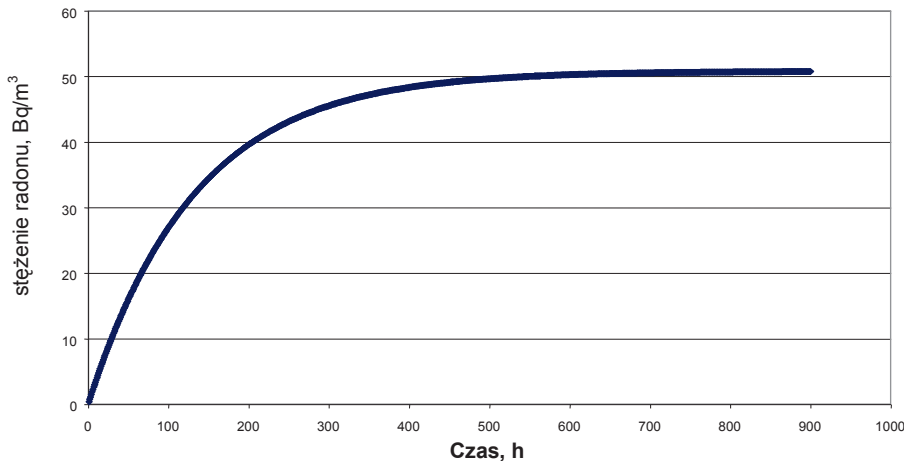
W związku z tym, że radon ulega rozpadowi, od wartości związanej z ekshalacją radonu z badanego materiału należy odjąć wartość składowej związanej z rozpadem radonu. Wzór na stężenie radonu w powietrzu w komorze ekshalacyjnej będzie następujący

$$C_{Rn} = \frac{e_{Rn}P}{V\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

czyli

$$e_{Rn} = \frac{C_{Rn}V\lambda}{P} \frac{1}{(1 - e^{-\lambda t})} \quad (3)$$

Rozpatrując zależność stężenia od ekshalacji radonu oraz rozpadu promieniotwórczego w czasie (rys. 5), można zauważyć, że po pewnym okresie, jest ona stała.



Rys. 5. Teoretyczny przebieg zmian stężenia radonu w komorze radonowej

Fig. 5. Theoretical grow curve of radon concentration in the exhalation chamber

Obszar oddzielony i zamknięty krzywą na rysunku 5 nazywa się obszarem równowagi dynamicznej między ekshalacją a rozpadem promieniotwórczym, tzn., że w tych samych przedziałach czasu tyle samo atomów pierwiastka promieniotwórczego jest uwalniane z materiału, ile się rozpada. Stan równowagi dynamicznej radonu jest osiąganym po okresie około 600 godzin. Stan ten można opisać następującymi równaniem

$$C_{\text{Rn}} = \frac{e_{\text{Rn}} P}{V \lambda} = \frac{e_{\text{Rn}} P T_{1/2}}{V \ln 2} \quad (4)$$

Jak wspomniano, dla krótkiego czasu badań t w porównaniu z czasem połowicznego zaniku radonu $T_{1/2\text{Rn}}$ ($t \ll T_{1/2\text{Rn}}$) można zaniedbać rozpad promieniotwórczy. Stężenie radonu w tym przedziale zwiększa się liniowo z czasem, co opisuje poniższy wzór

$$C_{\text{Rn}} = \frac{e_{\text{Rn}} P t}{V} \quad (5)$$

3.2. Przebieg pomiarów

Badaną próbkę umieszcza się w szczelnie zamkniętej komorze ekshalacyjnej na określony czas i monitoruje stężenie radonu w powietrzu za pomocą sondy Barasol. Na zakończenie badań powietrze z komory wraz z radonem jest zasysane do komórki Lucasa w celu wykonania pomiarów chwilowych. Należy dążyć do tego, aby objętość badanej próbki jak najmniej różniła się od objętości komory, aby stężenie radonu w komorze ekshalacyjnej było wyższe.

W przeciwieństwie do metody chwilowej, pomiar sondą Barasol wykonuje się w sposób ciągły od momentu zamknięcia układu pomiarowego. Umocowana w specjalnym kołnierzu dokręcanym do komory radonowej i odpowiednio uszczelniona sonda dokonuje pomiarów w interwałach czasu wynoszących 15 lub 30 min. Po zakończeniu pomiarów lub nawet w ich czasie wyniki mogą być przesyłane do zewnętrznego komputera.

Sonda Barasol została wykalibrowana przez producenta i wprowadzenie wyników do programu obsługi sondy pozwala na bezpośrednie odczytanie stężenia radonu.

3.3. Wyniki pomiarów współczynnika ekshalacji

W badaniach zostały wyznaczone współczynniki ekshalacji radonu z: cegły, kostek brukowych oraz osadów kopalnianych umieszczonych w pojemnikach typu Marinelli.

Współczynniki ekshalacji radonu oznaczono dwoma różnymi sposobami:

1. Pomiar wykonywano w krótkim czasie po umieszczeniu próbki w komorze, kiedy czas wykonania pomiaru był krótki w porównaniu z czasem połowicznego rozpadu radonu, więc wzrost stężenia radonu w komorze był w przybliżeniu liniowy. Powyższy fakt wskazuje, że do obliczenia współczynnika ekshalacji z cegły można posłużyć się wzorem

$$e_{\text{Rn}} = \frac{C_{\text{Rn}} V}{P t} \quad (6)$$

gdzie:

$$V = V_{\text{ukl}} - V_p,$$

V_{ukt} – objętość powietrza w komorze, pompie próżniowej, komórce Lucasa oraz w przewodach gumowych łączących poszczególne elementy układu, m³;

V_p – objętość próbki, m³;

P – powierzchnia, z której następuje ekshalacja, m²;

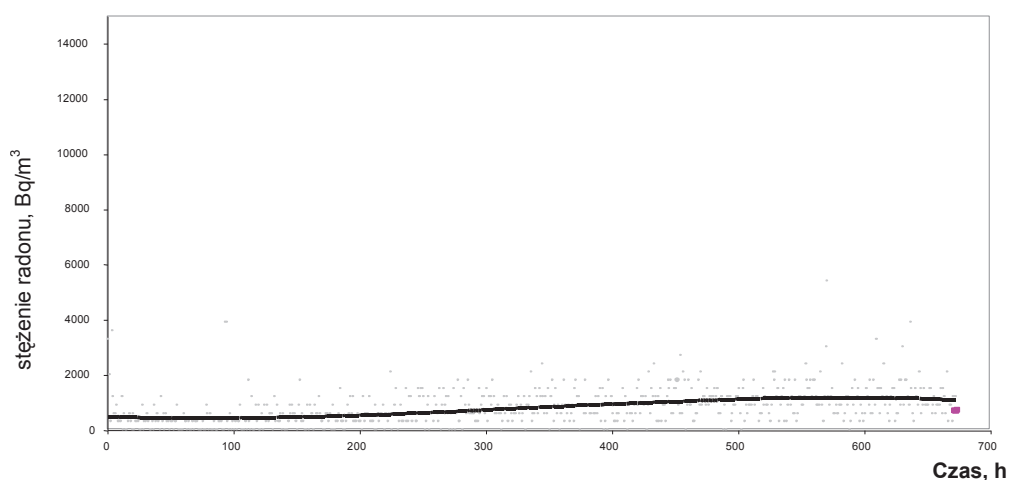
C_{Rn} – stężenie radonu, Bq/m³;

t – czas trwania ekshalacji, h.

2. Pomiar wykonano po ustaleniu równowagi między ekshalacją a rozpadem promieniotwórczym radonu. Do obliczenia współczynnika ekshalacji radonu użyto wzoru

$$e_{Rn} = \frac{C_{Rn} V \lambda}{P} \quad (7)$$

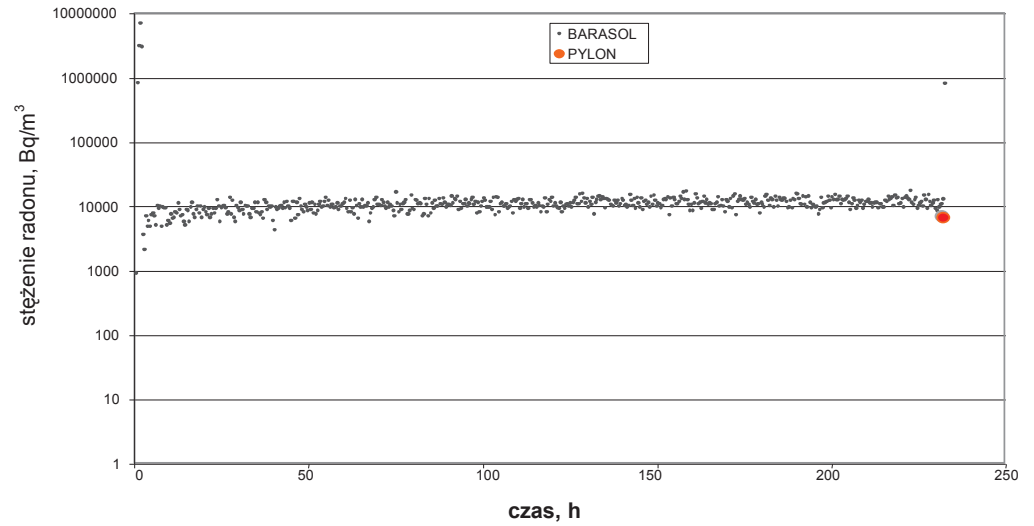
gdzie: λ – stała rozpadu ²²²Rn, 1/h.



Rys. 6. Porównanie wyników pomiarów stężeń radonu ekshalującego z kostki brukowej wykonanych sondą BARASOL oraz urządzeniem PYLON

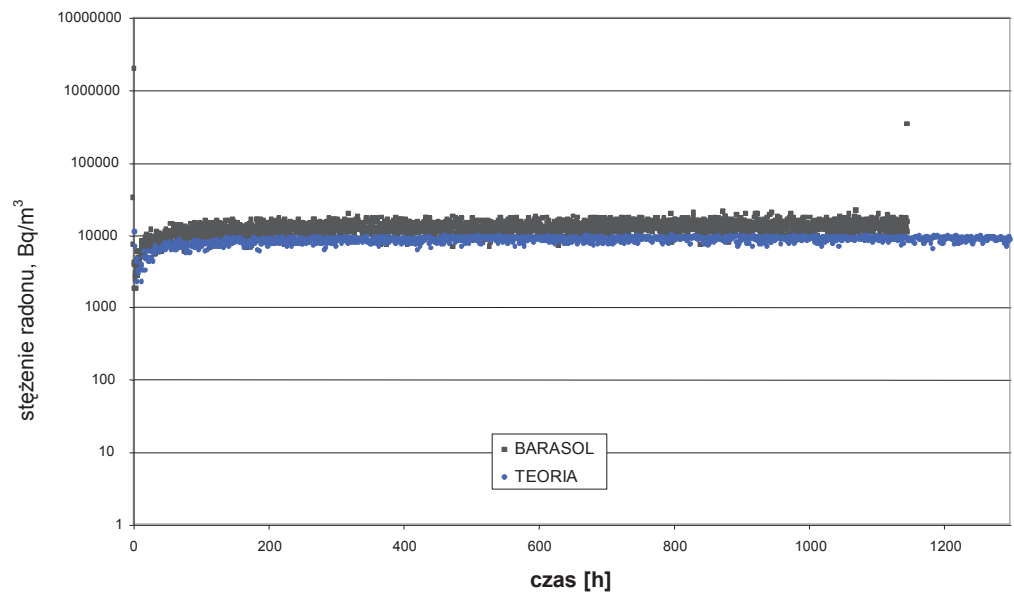
Fig.6. A comparison of investigation results of the radon exhalation from a granite cube, performed with application of Barasol probe and Pylon AB-5 monitor

Badania wykonano wykorzystując tylko jeden segment komory ekshalacyjnej o pojemności około 15 litrów. Pomiary z kostki brukowej oraz czerwonej cegły dokonane zostały, gdy stężenie radonu w komorze rosło liniowo z czasem, natomiast pozostałe pomiary przeprowadzono, gdy w komorze panowała równowaga dynamiczna pomiędzy ekshalacją radonu a jego rozpadem.



Rys. 7. Porównanie wyników pomiarów stężeń radonu ekshalującego z próbki osadu wykonanych sondą BARASOL oraz urządzeniem PYLON

Fig. 7. A comparison of exhalation coefficients for mine sediment, Barasol and Pylon AB-5 have been used.



Rys. 8. Porównanie teoretycznego stężenia radonu w komorze ekshalacyjnej ze stężeniem zarejestrowanym przez sondę BARASOL

Fig. 8. A comparison of theoretical changes of radon concentration in exhalation chamber with experimental results, obtained from Barasol probe

Tablica 1. Wyniki pomiarów współczynnika ekshalacji dla różnych materiałów

Badany materiał	C_{Rn} Bq/m ³	V_p m ³	P m ²	t h	e_{Rn} Bq/hm ²	Uwagi
Czerwona cegła	35 ± 25	0,0014	0,0864	19	0,29 ± 0,23	Pomiar metodą chwilową przyrządem firmy PYLON
Kostka brukowa	680 ± 65	0,0032	0,176	144	0,32 ± 0,04	Pomiar metodą chwilową przyrządem firmy PYLON
	1140 ± 230	0,001	0,346	144	0,34 ± 0,07	Pomiar metodą ciągłą sondą BARASOL
Osad kopalniany próbka 1	6870 ± 700	0,001	0,346	–	2,10 ± 0,22	Pomiar metodą chwilową przyrządem firmy PYLON
	11740 ± 1200	0,001	0,346	–	3,44 ± 0,45	Pomiar metodą ciągłą sondą BARASOL
	9420 ± 900	0,001	0,346	–	2,86 ± 0,30	Powtórny pomiar metodą chwilową przyrządem firmy PYLON
	8870 ± 1100	0,001	0,346	–	2,62 ± 0,30	Miesięczny ciągły pomiar sondą BARASOL
Osad kopalniany próbka 2	5950 ± 600	0,001	0,346	–	1,81 ± 0,20	Pomiar metodą chwilową przyrządem firmy PYLON
	4390 ± 440	0,001	0,346	–	1,34 ± 21	Powtórny pomiar metodą chwilową przyrządem firmy PYLON
	6110 ± 610	0,001	0,346	–	1,80 ± 0,20	Powtórny pomiar metodą chwilową przyrządem firmy PYLON

4. PODSUMOWANIE

Skonstruowano i przetestowano komorę ekshalacyjną do badania współczynnika ekshalacji radonu z materiałów stałych. Badania wykonane dwoma metodami wykazały, że układ pomiarowy złożony z komory ekshalacyjnej oraz radiometru AB-5 firmy PYLON był nieszczelny. Ucieczka radonu zachodziła najprawdopodobniej w pompie wymuszającej przepływ powietrza w układzie. Stwierdzono, że należy do minimum skrócić czas pracy pompy, w związku z czym powyższy zestaw nadaje się wyłącznie do chwilowego pomiaru stężenia radonu.

Szczelność układu, w skład którego wchodziła sonda, wykazana podczas miesięcznego testu, dowiodła możliwości prowadzenia długoterminowych ciągłych pomiarów. Jednak próg detekcji uzyskany tą metodą był wyższy niż z zastosowaniem komór Lucasa, dlatego sonda BARASOL lepiej sprawdza się dla wyższych stężeń radonów w powietrzu. Przy niższych stężeniach obserwowany był duży rozrzut wyników pomiarowych. Dlatego podczas przeprowadzania ciągłych eksperymentów, objętości komory ekshalacyjnej oraz próbek powinny być jak najbardziej zbliżone.

Współczynniki ekshalacji mierzone za pomocą zarówno sondy BARASOL, jak i radiometru AB-5 firmy PYLON są bardzo zbliżone do siebie i nie różnią się od wartości podawanych w literaturze dla badanych typów materiałów [8, 9].

Skonstruowana komora ekshalacyjna może więc być wykorzystywana do pomiarów ekshalacji radonu z próbek materiałów budowlanych, gleb, osadów kopalnianych, a także innych materiałów stałych.

Literatura

1. Skowronek J.: *Charakterystyka zagrożenia krótkożyciowymi produktami rozpadu radonu w kopalniach węgla kamiennego*. Komunikat nr 771. Prace Głównego Instytutu Górnicztwa, Katowice 1992.
2. Miklaszewicz A.: *Radon*. Warszawa, PWN 1978.
3. Wysocka M.: *Opracowanie metody długoterminowych pomiarów radonu przy pomocy detektorów śladowych*. Dokumentacja GIG, Katowice 1995.
4. Wysocka M., Mielnikow A., Chałupnik S.: *Radon in houses of the Upper Silesian Coal Basin*, Proc. of the 7th Tohwa University International Symposium Radon and Thoron in the Human Environment, World Scientific, Singapore, 1998.
5. Kemski J., Klingel R.: *Influence of underground mining on the geogenic radon potential*: Proc. of Workshop Radon in the Living Environment. Athens, Greece, 1999.
6. Akerblom G: *Investigation on mapping of risk areas*. Luela Sweden, Swedish Geol. Copm. Raport IRAP 86036., 1986.
7. Nazaroff W.W., Nero A.V. (eds): *Radon and its decay products in indoor air*. New York, John Wiley&Sons, Inc. 1988.
8. Fisenne I.: *Radiation protection*. Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment. Tutorial session, Salzburg 1993.
9. Colle R., Rubin R.J., Knab L.I., Hutchins T.M.R.: *Radon transport through and exhalation from building materials*. National Bureau of Standards Technical Note 1139 (National Technical Information Service, Springfield, Virginia), 1981.

Artykuł został opracowany na podstawie badań przy realizacji w Głównym Instytucie Górnicztwa pracy magisterskiej studenta Uniwersytetu Śląskiego.

Recenzent: doc. dr hab. Kazimierz Lebecki