

RADONO PERNAŠOS IŠ DIRVOŽEMIO Į PATALPAS MATAVIMO  
IR MODELIAVIMO REZULTATAIErika Streckytė<sup>1</sup>, Donatas Butkus<sup>2</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>erika.streckyte@gmail.com; <sup>2</sup>donatas.butkus@vgtu.lt

**Santrauka.** Nagrinėjama radono dujų patekimo į patalpas procesas, šį procesą spartinantys ir lėtinantys parametrai. Nustatoma radono dujų patekimo į patalpas priklausomybė nuo aplinkos temperatūros bei drėgno kitimo. Pastebėta, kad, didėjant aplinkos ir patalpos temperatūrų skirtumui, didėja ir radono tūrinis aktyvumas patalpos ore (vasarą radono tūrinis aktyvumas siekė  $45,0 \pm 3,0$  Bq/m<sup>3</sup>, kai temperatūrų skirtumas buvo 3,1 °C, o rudenį –  $62,0 \pm 5,0$  Bq/m<sup>3</sup>, esant temperatūrų skirtumui 3,9 °C), didėja radono ekshalicijos iš dirvožemio intensyvumas, o didėjant drėgmės kiekiui patalpose radono tūrinis aktyvumas ore mažėja. Sumodeliuotos radono tūrinio aktyvumo patalpos ore reikšmės buvo panašios kaip ir išmatuotos naudojant radono monitorių RTM2200. Pirmajame aukšte radono tūrinis aktyvumas ore buvo didesnis nei antrajame. Žiemos sezonu jo vertė buvo didžiausia ( $47,0 \pm 10,5$  Bq/m<sup>3</sup>), o vasaros sezonu – mažiausia ( $15 \pm 1,8$  Bq/m<sup>3</sup>).

**Reikšminiai žodžiai:** radonas, tūrinis aktyvumas, aplinkos temperatūra, temperatūrų skirtumas, modeliavimas.

**Įvadas**

Radono dujos susidaro įvairių tipų uolienose ir dirvožemiuose (Burian *et al.* 2011). Daugiausia radono dujų yra molyje ( $10\text{--}120$  kBq/m<sup>3</sup>), o mažiausia – žvyre ir stambiame smėlyje ( $4\text{--}20$  kBq/m<sup>3</sup>) (Abromaitytė *et al.* 2003).

Radono tūrinis aktyvumas dirvožemio ore kinta ir pagrindinai priklauso nuo atmosferos slėgio, drėgmės kiekio dirvožemyje, išalo, natūralių (ledo, sniego) ir dirbtinių (betonas, asfaltas) dangų (Микляев, Петрова 2007). Radono ekshalicijos intensyvumui didelės įtakos turi tokie parametrai, kaip atmosferos slėgis, temperatūra, vėjo greitis, dirvožemio drėgmė bei tipas ir kt.

Radono tūrinis aktyvumas dirvožemio ore labai priklauso nuo sezoniskumo. Tūrinis aktyvumas ore vasaros sezonu esti mažesnis, o žiemos sezonu – didesnis. Tai lemia aplinkos ir dirvožemio oro temperatūrų skirtumas (Fronka *et al.* 2011).

Radono ir jo trumpaamžių skilimo produktų tūriniam aktyvumui tirti įvairiose šalyse yra taikomi įvairūs skaičiavimo modeliai. Modeliuojant butus taikoma tiek natūrali, tiek mechaninė ventiliacija, modeliuojami specialūs plyšiai, pro kuriuos į vidų galėtų patekti radono dujos (Jasaitis 2007). Radono dujų patekimo iš dirvožemio oro į gyvenamuosius namus procesas gana sudėtingas. Modeliuojant šį procesą, reikia į modelį įvesti kuo daugiau parametrų, nuo kurių priklauso radono dujų patekimas į pastatus. Tai dirvožemio savybės, struktūra, meteorologinės sąlygos (pvz., temperatūra, drėgmė ir kt.) ir kt. (Rogers, Nielson 1991).

Pasak Michel van der Pal (2003), yra dvi priežastys, lemiančios radono aktyvumo koncentracijos patalpos ore matavimo ir modeliavimo rezultatų skirtumus: 1) netikslios į modelį įvedamos parametrų vertės ir 2) neišsamus modelio aprašymas. Matavimų, atliktų namuose ar butuose, vertės yra daug tikslesnės nei gautos modeliuojant, gali būti išmatuojamos ne tik vidutinės, bet ir maksimalios bei minimalios radono tūrinio aktyvumo vertės. Modeliuojant procesai yra supaprastinami, dažniausiai naudojamos tik vidutinės vertės.

Modeliavimo privalumas tai, kad, keičiant įvairius parametrus, galima greitai gauti rezultatus. Modelių yra daug ir įvairių. Galima modeliuoti radono ekshaliciją iš dirvožemio, sklaidą, aktyvumo koncentracijas, radono pasiskirstymą dirvožemyje pagal gylį, taip pat radono aktyvumo koncentraciją viename ar kitame gylyje, radono srauto tankio kaitą kylant dujoms nuo žemės paviršiaus, srauto greitį ir kt. (Zhuo *et al.* 2006).

M. Goto su bendraautoriais (Goto *et al.* 2007) sukūrė radono ekshalicijos sklaidos iš dirvožemio pasiskirstymo modelį. Šis modelis buvo sukurtas darant prielaidą, kad dirvožemis yra vienodo porėtumo. Sumodeliuotas radono ekshalicijos intensyvumo kitimas įvairiose platumose. Tolstant nuo pusiaujo šiaurės ašigalio link ir nuo pusiaujo pietų ašigalio link radono ekshalicijos intensyvumas mažėjo. Pagrindinė šios tendencijos priežastis yra drėgnis. Tolstant nuo pusiaujo ašigalių link drėgnis didėja, dėl to mažėja radono ekshalicijos iš dirvožemio intensyvumas.

Siūlomas ir radono pernašos vienalyčiame dirvožemyje modelis (Yakovleva 2005). Jį taikant galima apskaičiuoti radono aktyvumo koncentracijos dirvožemio ore pasiskirstymą pagal gylį, radono aktyvumo koncentracijos dirvožemio ore pusiausvyrą, radono srauto tankį dujoms kylant nuo žemės paviršiaus bei konvekcinių radono srauto greitį. Pritaikius modelį Vakarų Sibiro teritorijai modeliuota, kaip kinta radono tūrinis aktyvumas keičiant dirvožemio gylius. Gauti analogiški rezultatai kaip ir išmatavus: 35 cm gylyje radono tūrinis aktyvumas siekė 6,8 kBq/m<sup>3</sup>, o 70 cm gylyje – 11,4 kBq/m<sup>3</sup>.

H. Kojima, K. Nagano (1999) sukūrė modelį radono ekshalicijos iš dirvožemio intensyvumui nustatyti. Autoriai, siekdami tikslumo, šį matematinį modelį kūrė įvesdami kuo daugiau parametrų. Šiame modelyje radono ekshalicijos intensyvumas priklauso nuo vandens kiekio dirvožemyje, grunto ir atmosferos slėgių skirtumo, vėjo greičio, grunto tipo ir kt.

L. M. Hubbard su bendraautorais (Hubbard *et al.* 1992) pasiūlė radono patekimo į patalpas, tūrinio aktyvumo jose ir pasišalinimo iš jų modelį. Jį taikant galima sumodeliuoti radono dujų patekimą į patalpas iš grunto. Modeliavimas buvo atliktas pasirinkus 902 namus ant jūros kranto. Surinkti duomenys: namų aukščiai, pamatų plotai, oro srautų tankiai, slėgių skirtumai, radono tūrinis aktyvumas dirvožemio ore, patalpos ir aplinkos temperatūros ir kt. Sumodeliavus gautos reikšmės mažai skyrėsi nuo gautų išmatavus radono tūrinį aktyvumą tuose namuose. Radono tūrinis aktyvumas patalpų ore svyravo nuo 100 iki 400 Bq/m<sup>3</sup>.

Modeliai vienas nuo kito skiriasi skaičiavimams naudojamais parametrais, tačiau svarbiausieji parametrai yra radono tūrinis aktyvumas bei jo pasiskirstymas dirvožemyje.

Darbo tikslas – pasiūlyti radono dujų, patenkančių į patalpas, kiekio nustatymo skaitinį matematinį modelį ir gautąsias vertes palyginti su patalpos ore išmatuotu radono tūriniu aktyvumu.

## Tyrimų metodika

Sukurtas skaitinis matematinis modelis, kurį taikant galima sumodeliuoti radono dujų patekimą iš dirvožemio, esančio po pastatu, į patalpas. Modelyje įvertinami šie parametrai: aplinkos bei patalpos temperatūra, patalpų drėgnis, radono tūrinis aktyvumas dirvožemio ore, patalpos tūris, dujų srauto tūris, radono dujų srauto greitis, pamatų plotas, namo aukštis bei kt.

Skaitinio matematinio modelio pagrindinė lygtis, nusakanti radono dujų patekimą į patalpas (Morkūnas *et al.* 2009):

$$C = \frac{1}{(\lambda + n) \cdot V} \cdot C_g \cdot L, \text{ Bq/m}^3, \quad (1)$$

čia  $\lambda$  – radono skilimo konstanta, s<sup>-1</sup> ( $2,1 \cdot 10^{-6}$  s<sup>-1</sup>);  $V$  – patalpos tūris, m<sup>3</sup>;  $C_g$  – radono tūrinis aktyvumas dirvožemio ore, Bq/m<sup>3</sup>;  $L$  – dirvožemio dujų srautas, m<sup>3</sup>/h;  $n$  – patalpų vėdinimo koeficientas, h<sup>-1</sup>.

Formulėje (1) grunto dujų srautas yra tiesiogiai proporcingas radono tūriniam aktyvumui patalpoje, randamas pagal formulę (Hubbard *et al.* 1992)

$$L = \sqrt{\frac{v \cdot H_s}{2} \cdot \frac{\Delta T}{T_{\text{pat}}}} \cdot 2 \cdot A_{\text{gr}} \cdot \frac{1}{\frac{\Theta_{\text{pat}}}{100}} \cdot 3600, \text{ m}^3/\text{h}, \quad (2)$$

čia  $H_s$  – namo aukštis, m;  $v$  – radono srauto greitis, m/s;  $\Delta T$  – aplinkos ir patalpos oro temperatūrų skirtumas, °C;  $T_{\text{pat}}$  – patalpos oro temperatūra, °C;  $\Theta_{\text{pat}}$  – patalpos drėgnis, %;  $A_{\text{gr}}$  – grindų plotas, pro kurį vyksta ekshalicija, m<sup>2</sup>.

Patalpų vėdinimo koeficientas randamas taip (STR 2.09.02:2005):

$$n = \frac{L}{V}, \text{ h}^{-1}, \quad (3)$$

čia  $L$  – dirvožemio dujų srautas, m<sup>3</sup>/h;  $V$  – patalpos tūris, m<sup>3</sup>.

Radono srauto greitis išreiškiamas (Yakovleva, Ryzhakova 2002):

$$v = \frac{D_e}{h_1} \cdot \ln \left( \frac{1}{\frac{C_2}{C_1} - 1} \right) + \frac{\lambda \cdot h_1}{\ln \left( \frac{C_2}{C_1} - 1 \right)}, \text{ m/s}, \quad (4)$$

čia  $h_1$  – gylis, esantis arčiau žemės paviršiaus, m;  $D_e$  – radono difuzijos koeficientas, m<sup>2</sup>/s;  $C_1$  – radono tūrinis aktyvumas  $h_1$  gylyje, Bq/m<sup>3</sup>;  $C_2$  – radono tūrinis aktyvumas  $2h_1$  gylyje, Bq/m<sup>3</sup>.

Radono difuzijos koeficientas (Goto *et al.* 2007):

$$D_e = D_0 \cdot \varepsilon \cdot (T / 273)^{3/4} \cdot \exp(-6 \cdot \Theta \cdot \varepsilon - 6 \cdot \Theta^{14 \cdot \varepsilon}), \text{ m}^2/\text{s}, \quad (5)$$

čia  $D_0$  – radono difuzijos ore koeficientas, m<sup>2</sup>/s ( $1,1 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s);  $\varepsilon$  – porėtumas,  $\varepsilon = 0,55$ ;  $T$  – dirvožemio temperatūra, °C;  $\Theta$  – dirvožemio drėgnis, %.

Taip gaunama skaitinio matematinio modelio bendroji išraiška, o sezoniskumui išskirti taikyti koeficientai. Jie išvesti iš daugelio matavimo duomenų ir yra pakankamai tikslūs. Taigi į modelį įtraukti šie koeficientai:

- rudens  $K_R = 2,76$ ;
- žiemos  $K_Z = 2,77$ ;
- pavasario  $K_P = 2,61$ ;
- vasaros  $K_V = 2,06$ .

Pritaikius koeficientus gaunami skaitinio modeliavimo rezultatai geriau atitinka skirtingų sezonų matavimo rezultatus.

## Hubbardo skaitinis matematinis modelis

Į pastatą patenkantis radono dujų kiekis apskaičiuojamas pagal (6) formulę (Hubbard *et al.* 1992):

$$Q^+(\beta) = L^+ \sqrt{\frac{2}{\rho_{\text{apl}}} \cdot \Delta P_s^+(\beta)}, \text{ Bq/m}^3, \quad (6)$$

čia  $\beta$  – matavimo vietos aukštis;  $Q^+(\beta)$  – radono tūrinio aktyvumo srautas,  $\text{Bq/m}^3$ ;  $L^+$  – paviršiaus plotas, pro kurį vyksta filtracija,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta P_s^+(\beta)$  – kamine susidaręs slėgių skirtumas, Pa;  $\rho_{\text{apl}}$  – aplinkos oro srauto tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;  $H_s$  – pastato aukštis su kaminu, m.

Paviršiaus plotas, pro kurį radono dujos patenka į pastatą, skaičiuojamas pagal (7) formulę

$$L^+ = L_{\text{sienu}} + L_{\text{grindu}}, \text{ m}^2. \quad (7)$$

Kamine susidaręs patalpos ir aplinkos oro slėgių skirtumas skaičiuojamas pagal formulę

$$\Delta P_s^+(\beta) = -\rho_{\text{apl}} \cdot g \cdot H_s(\beta) \left( \frac{T_{\text{pat}} - T_{\text{apl}}}{T_{\text{pat}}} \right), \quad (8)$$

čia  $g$  – laisvojo kritimo pagreitis,  $\text{m/h}^2$ ;  $T_{\text{pat}}$  – patalpos temperatūra, K;  $T_{\text{apl}}$  – aplinkos temperatūra, K.

Taigi įrašę (7) ir (8) lygtis į (6) lygtį gauname, kad į pastatą patenkančio radono aktyvumo koncentracija yra

$$Q^+(\beta) = \sqrt{\frac{g \cdot H_s \cdot \beta \cdot |\Delta T|}{2 \cdot T_{\text{pat}}}} \cdot \left( 2L_{\text{grindu}} + \frac{4L_{\text{sienu}} \cdot \beta}{3} \right), \text{ Bq/m}^3. \quad (9)$$

## Radono tūrinio aktyvumo dirvožemio ore matavimo pagal gylį metodika

Radono tūrinio aktyvumo tyrimams buvo naudojamas prietaisas *RTM2200*, pagrįstas išstobulinta *SARAD* technologija – nauju *DACM* (duomenų surinkimo ir valdymo modulis).

Šis prietaisas per ilgą laiką tarpą gali surinkti didelius duomenų kiekius. Jie vėliau perkeltami į kompiuterį ir apdorojami.

Įjungus prietaisą, ekrane nurodomi pagrindiniai monitoriaus valdymo parametrai.

Iš pradžių grąžtu dirvožemyje 0,2 m gylyje buvo išgręžtas vertikalus gręžinys. Tada į gręžinį statomas matavimo zondas, kuris turi guminį maišelį (1 pav.). Pripūsus guminį maišelį gręžinys užsandarinamas, kad į jį neprasi-skverbtų išorės oras.

Zondas sujungiamas su šalia stovinčiu radono monitoriumi, pusę valandos iš kiekvieno gylio siurbiamas oras, ir matuojamas radono tūrinis aktyvumas dirvožemio ore.



1 pav. Matavimo zondas išgręžtame gręžinyje (autorius nuotrauka)

Fig. 1. Borehole probes (author's picture)

Baigus matavimą viename gylyje, zondas, iš jo išleidus orą, ištraukiamas. Imamas dirvožemio ėminys, ir termopora matuojama dirvožemio temperatūra. Tada gręžiama iki 0,4 m gylio, ir vėl kartojamos ankstesnės procedūros (gręžinio sandarinimas, temperatūros, radono tūrinio aktyvumo matavimas).

## Radono tūrinio aktyvumo patalpos ore matavimo metodika

Radono tūriniam aktyvumui patalpose matuoti naudojamas tik radono monitorius (2 pav.).

Radono tūrinis aktyvumas patalpų ore matuotas pradedant nuo viršutinio aukšto (miegamąjo). Radono monitorius ant stovo, maždaug 1 m aukštyje. Vienas matavimas trunka valandą. Tada matavimas nutrauktas, duomenys automatiškai išliks atminties kortelėje. Lygiai taip pat ir tiek pat laiko matuota pirmajame namo aukšte – virtuvėje.

*RTM2200* radono monitorius patalpose buvo statomas taip, kad jokie veiksniai jo rodmenims neturėtų įtakos, stengtasi monitorių statyti viduryje patalpos, toliau nuo langų, durų, elektrinių prietaisų ar krosnies.



2 pav. Radono tūrinio aktyvumo matavimo monitorius *SARAD RTM2200* (autorius nuotrauka)

Fig. 2. Display for measuring the volumetric activity of radon *SARAD RTM2200* (author's photo)

Matavimų metu buvo fiksuojama patalpų temperatūra pirmajame ir antrajame aukštuose bei aplinkos ore. Matavimų ekspedicijos vyko kiekvienu metų sezonu. Siekta nustatyti, kaip kinta radono tūrinis aktyvumas patalpose esant skirtingoms patalpos ir aplinkos temperatūroms.

Tyrimai atlikti Vilniuje, Liepynėje (miesto dalis į šiaurės rytus nuo miesto centro), šalia miškelio. Radono tūrinis aktyvumas matuotas 2011–2012 m. spalio, gruodžio, birželio ir rugpjūčio mėnesiais.

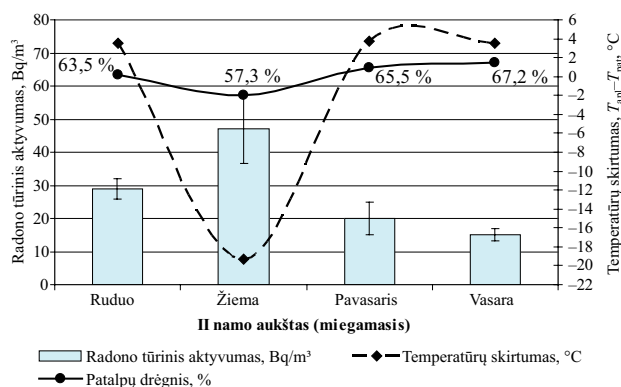
Dirvožemio granulimetrinė sudėtis apibūdinama pagal sausų grumstų kietumą, drėgnos masės klįsingumą, lipnumą, minklumą – ar voliojasi į 4–5 mm storio virvutę, pagal šiurkštumą ar švelnumą, trinant dirvožemį tarp pirštų. Lauko sąlygomis granulimetrinė sudėtis nustatoma čiuopiant (Dirvožemio ekologija 2011).

Iš paimtų dirvožemio mėginių nustatyta, kad daugiausia toje vietovėje prie paviršiaus vyrauja priemolis, giliau – priemolis, molis.

## Rezultatų analizė

Eksperimento metu nustatyta, kad radono tūrinis aktyvumas patalpose priklauso nuo aplinkos ir patalpos oro temperatūrų skirtumo. Kuo didesnis šis skirtumas, tuo patalpose didesnis radono tūrinis aktyvumas. Aplinkos temperatūra nuolat kinta, o pastatuose dažniausiai esti pastovi. Žiemą temperatūrų skirtumas didžiausias, vasarą – mažiausias. Kuo didesnis temperatūrų skirtumas, tuo pastate mažesnis oro slėgis, o po pastatų slėgis išlieka nepakitęs. Tai lemia slėgių skirtumą. Esant temperatūrų skirtumui susidaro varomoji jėga, o dėl jos atsiranda natūralioji trauka. Šis efektas vadinamas „kamino efektu“.

Žiemą „kamino efektas“ esti didžiausias, palyginti nei kitais metų laikais, todėl radono aktyvumo koncentracija žiemą pastatuose esti didžiausia (3 ir 4 pav.).



3 pav. Radono aktyvumo koncentracijos priklausomybė nuo temperatūrų skirtumo ir pasiskirstymas II aukšte (miegamajame) visais metų sezonais

Fig. 3. The dependence of the concentration of radon activity on difference in temperatures and distribution in the second floor (bedroom) in all seasons

Didžiausias vidutinis radono tūrinis aktyvumas patalpų ore užfiksuotas žiemą tiek antrajame, tiek pirmajame namo aukštuose:  $47,0 \pm 10,5$  Bq/m<sup>3</sup>, aplinkos ir patalpos oro (II aukštas) temperatūrų skirtumui esant  $-19,3$  °C, ir  $71,0 \pm 11,5$  Bq/m<sup>3</sup>, kai temperatūrų skirtumas (I aukštas)  $-18,2$  °C, o mažiausias – vasaros sezonu:  $15,0 \pm 1,8$  Bq/m<sup>3</sup>, temperatūrų skirtumui (II aukštas) esant  $3,5$  °C, ir  $45,0 \pm 3,0$  Bq/m<sup>3</sup>, kai temperatūrų skirtumas  $3,1$  °C (I aukštas). Temperatūros ir drėgno parametrai pateikti 1 lentelėje.

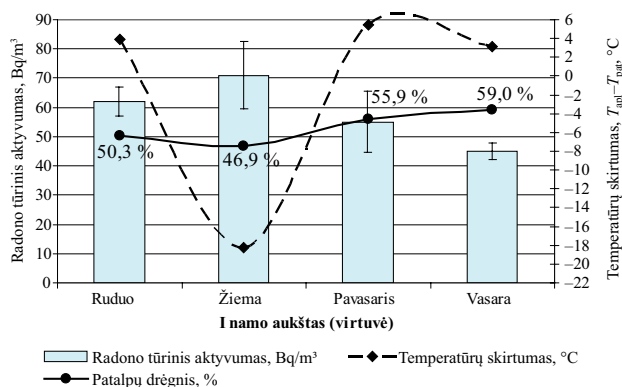
1 lentelė. Temperatūros ir drėgno parametrai

Table 1. The parameters of temperature and humidity

Patalpa	Sezonas	Aplinkos oro temperatūra, °C	Patalpos oro temperatūra, °C	Oro drėgnis, %
I aukštas (virtuvė)	ruduo	20,0±0,1	16,1±0,5	50,3±2,4
	žiema	-1,9±0,1	16,3±1,0	46,9±3,3
	pavasaris	22,5±0,5	17,1±1,5	55,9±1,6
	vasara	24,5±0,5	21,4±0,8	59,0±2,0
II aukštas (miegamasis)	ruduo	20,0±0,1	16,5±0,3	63,5±4,0
	žiema	-1,9±0,1	17,4±0,5	57,3±0,8
	pavasaris	22,5±0,5	18,8±1,1	65,5±3,0
	vasara	24,5±0,5	21,0±0,4	67,2±3,0

Iš 3 ir 4 pav. matyti, kad radono tūrinis aktyvumas skirtinguose aukštuose yra skirtingas. Pirmame aukšte nustatyta didesnis nei antrame. Taigi pagrindinis radono šaltinis yra gruntas, ant kurio stovi namas. Antrame aukšte radono tūrinis aktyvumas žymiai sumažėjęs, nes nėra tiesioginio sąlyčio su gruntu.

Radono tūrinį aktyvumą patalpų ore lemia ne tik aplinkos ir patalpos temperatūrų skirtumas, bet ir daugelis kitų veiksnių, pavyzdžiui, tokių kaip patalpų oro drėgnis. Pavyzdžiui, pirmajame aukšte žiemos sezonu patalpos



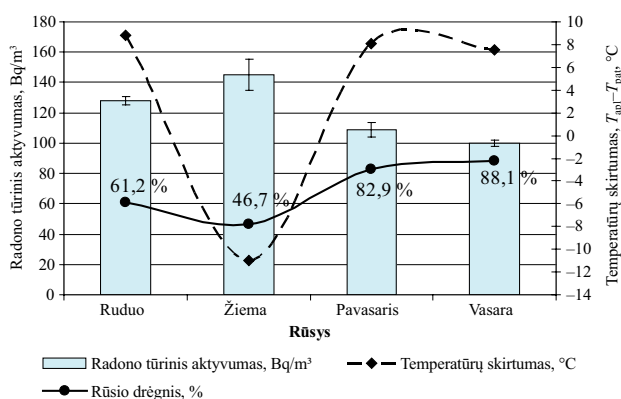
4 pav. Radono aktyvumo koncentracijos priklausomybė nuo temperatūrų skirtumo ir pasiskirstymas I aukšte (virtuvėje) visais metų sezonais

Fig. 4. The dependence of the concentration of radon activity on difference in temperatures and distribution in the first floor (kitchen) in all seasons

drėgnis buvo  $46,9 \pm 3,3$  %, o radono tūrinis aktyvumas ore siekė  $71,0 \pm 11,5$  Bq/m<sup>3</sup>, vasaros sezonu patalpos drėgnis buvo  $59,0 \pm 2,0$  %, o radono tūrinis aktyvumas ore siekė  $45,0 \pm 3,0$  Bq/m<sup>3</sup>.

Matavimų rezultatai rodė, kad, didėjant patalpose temperatūrai bei mažėjant drėgniui, didėja radono dujų kiekis.

Išmatavus radono tūrinį aktyvumą rūsyje gauti šie rezultatai (5 pav.): rudenį –  $128,0 \pm 3,0$  Bq/m<sup>3</sup> (temperatūrų skirtumas tarp aplinkos ir rūsio oro  $8,8$  °C), žiemą –  $145,0 \pm 1,3$  Bq/m<sup>3</sup> (temperatūrų skirtumas  $-11,0$  °C), pavasarį –  $109,0 \pm 3,0$  Bq/m<sup>3</sup> (temperatūrų skirtumas  $8,1$  °C), o vasarą –  $100,0 \pm 3,0$  Bq/m<sup>3</sup> (temperatūrų skirtumas  $7,5$  °C). Radono tūrinis aktyvumas rūsio ore gautas didesnis nei pirmajame pastato aukšte.



5 pav. Radono aktyvumo koncentracijos priklausomybė nuo temperatūrų skirtumo ir pasiskirstymas rūsyje visais metų sezonais

Fig. 5. The dependence of the concentration of radon activity on difference in temperatures and distribution in the basement in all seasons

Taikant pasiūlytą skaitinį matematinį modelį (aprašytą metodikoje) buvo siekiama panagrinėti, kaip kinta radono tūrinis aktyvumas patalpos ore kintant aplinkos ir patalpos temperatūrų skirtumui.

Iš literatūros buvo žinoma, kad, didėjant aplinkos temperatūrai, didėja ir temperatūrų skirtumas tarp aplinkos ir patalpos (esant pastoviai patalpos temperatūrai). Dėl to didėja ir radono tūrinis aktyvumas patalpos ore, o modeliuojant buvo norima išsiaiškinti, kaip jautriai radono tūrinis aktyvumas priklauso nuo aplinkos temperatūros.

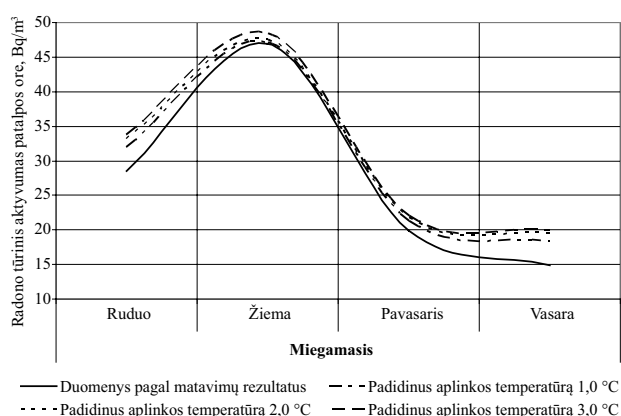
Tikėtasi, kad patalpos temperatūra išliks nepakitusi. Techninėmis priemonėmis stengtasi išlaikyti ją nepakitusią, t. y. žiemos sezonu buvo daugiau šildoma, o vasaros sezonu – daugiau vėdinama.

Modeliuota keičiant aplinkos temperatūrą  $1$  °C –  $3$  °C (temperatūra buvo ir didinama, ir mažinama) visais sezonais, atitinkamai keitėsi aplinkos bei patalpos temperatūrų skirtumas.

Sezonų ypatumai (slėgis pastate ir po juo, drėgmės kiekis ir kt.) įvertintas koeficientais  $K_R$ ,  $K_Z$ ,  $K_P$ ,  $K_V$ . Rezultatai pateikti 6–9 paveiksluose.

Kaip matyti 6 pav., sumodeliavus radono tūrinį aktyvumą patalpos ore II aukšte, kitimo tendencija tokia pati kaip ir nustatyta atliekant matavimus.

Didžiausias radono tūrinis aktyvumas ore pastebimas žiemos sezonu – apie  $47,0$  Bq/m<sup>3</sup>, pakėlus aplinkos temperatūrą  $1$  °C laipsniu (padidėjo ir temperatūrų skirtumas), o apie  $49,0$  Bq/m<sup>3</sup> – pakėlus aplinkos temperatūrą  $3$  °C laipsniais. Mažiausia radono aktyvumo koncentracija nustatyta vasaros sezonu, t. y. apie  $18,5$  Bq/m<sup>3</sup>, pakėlus aplinkos temperatūrą  $1$  °C laipsniu, o pakėlus  $3$  °C laipsniais – apie  $20$  Bq/m<sup>3</sup> (6 pav.).



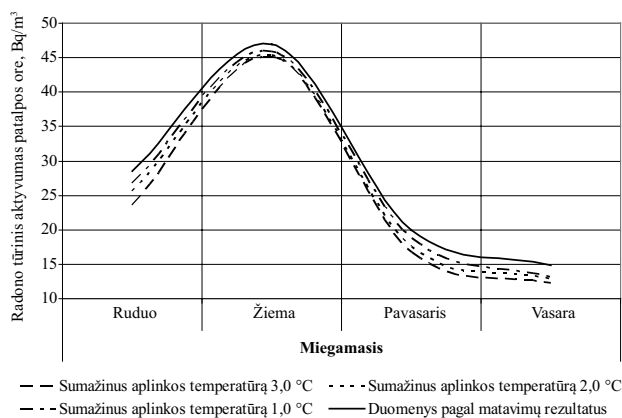
6 pav. Radono aktyvumo koncentracijų pasiskirstymas II aukšte (miegamajame) visais metų sezonais padidinus aplinkos temperatūrą

Fig. 6. The distribution of the concentration of radon activity in the second floor (bedroom) increasing ambient temperature in all seasons

Buvo modeliuojama ir mažinant aplinkos temperatūrą, taip pat  $1$  °C –  $3$  °C (7 pav.). Mažinant aplinkos temperatūrą mažėjo patalpos ir aplinkos temperatūrų skirtumas ir radono aktyvumo koncentracija patalpos ore. Pavyzdžiui, žiemos sezonu sumažinus aplinkos temperatūrą  $1$  °C laipsniu (sumažėjo ir temperatūrų skirtumas) radono tūrinis aktyvumas sumažėjo nuo  $46,9$  iki  $45,9$  Bq/m<sup>3</sup>, o sumažinus aplinkos temperatūrą  $3$  °C laipsniais – dar sumažėjo iki  $45,1$  Bq/m<sup>3</sup>.

Modeliuojant I aukšte, radono aktyvumo koncentracijos reikšmės gautos didesnės nei antrajame aukšte, nes I aukštas turi sąlytį su dirvožemiu. Kaip jau žinoma iš literatūros, kuo arčiau žemės paviršiaus, tuo radono tūrinis aktyvumas ore yra didesnis, o kuo toliau – tuo radono koncentracija labiau išsisklaido atmosferoje ir yra mažesnė.

Pirmajame aukšte, virtuvėje, gauti tokie modelavimo rezultatai: pakėlus aplinkos temperatūrą  $1$  °C (temperatūrų skirtumas taip pat padidėjo), radono tūrinis



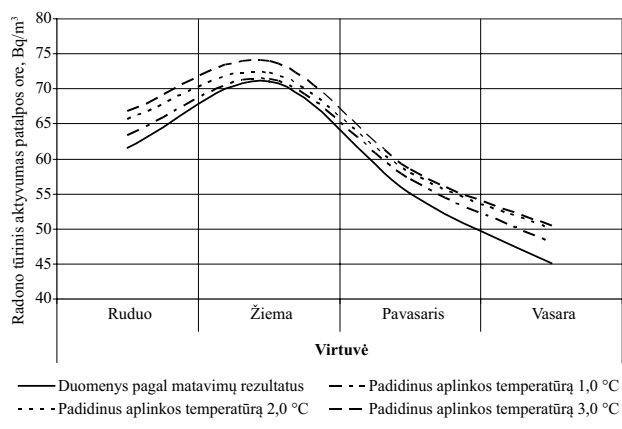
7 pav. Radono aktyvumo koncentracijų pasiskirstymas II aukšte (miegamajame) visais metų sezonais sumažinus aplinkos temperatūrą

Fig. 7. The distribution of the concentration of radon activity in the second floor (bedroom) decreasing ambient temperature in all seasons

aktyvumas patalpos ore padidėjo nuo 71,0 iki 71,5 Bq/m<sup>3</sup>, o 3 °C – iki 74,0 Bq/m<sup>3</sup> (žiemos sezonu). Vasaros sezonu pakėlus aplinkos temperatūrą 1,0 °C, radono tūrinis aktyvumas padidėjo nuo 45,1 iki 48,0 Bq/m<sup>3</sup>, o 3,0 °C – iki 50,5 Bq/m<sup>3</sup>.

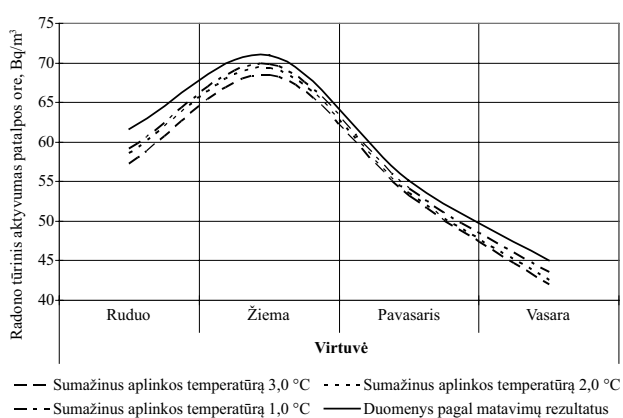
Sumažinus aplinkos temperatūrą, pirmajame aukšte gauti tokie rezultatai: sumažinus 1 °C (temperatūrų skirtumas sumažėjo), radono tūrinis aktyvumas sumažėjo nuo 71,0 iki 70,0 Bq/m<sup>3</sup>, o 3 °C – iki 68,5 Bq/m<sup>3</sup> (žiema), vasaros sezonu atitinkamai nuo 45,0 iki 43,9 Bq/m<sup>3</sup> (sumažinus temperatūrą 1 °C) ir iki 68,5 Bq/m<sup>3</sup> (sumažinus temperatūrą 3 °C).

Skaitinis modeliavimas buvo pritaikytas ir radono tūriniam aktyvumui rūšio ore nustatyti. Iš matavimo rezultatų akivaizdu, kad radono tūrinis aktyvumas kuo arčiau



8 pav. Radono aktyvumo koncentracijų pasiskirstymas I aukšte (virtuvėje) visais sezonais pakėlus aplinkos temperatūrą

Fig. 8. The distribution of the concentration of radon activity in the first floor (kitchen) increasing ambient temperature in all seasons

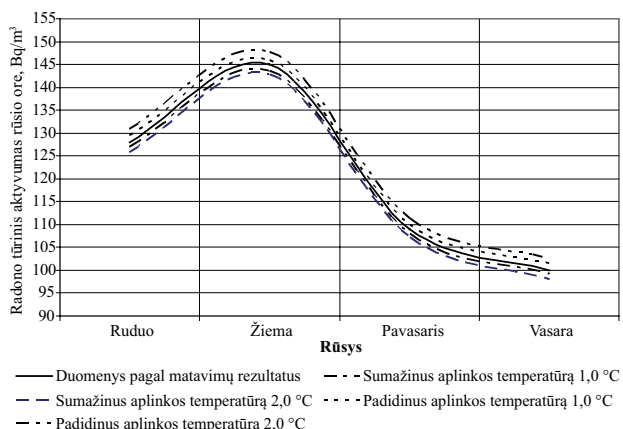


9 pav. Radono aktyvumo koncentracijų pasiskirstymas I aukšte (virtuvėje) visais metų sezonais sumažinus aplinkos temperatūrą

Fig. 9. The distribution of the concentration of radon activity in the first floor (kitchen) decreasing ambient temperature in all seasons

žemės paviršiaus tuo didesnis. Buvo pabandyta aplinkos oro temperatūrą pora laipsnių kelti, o paskui ją mažinti. Kaip ir pirmajame bei antrajame aukštuose keliant aplinkos oro temperatūrą didėjo aplinkos bei rūšio oro temperatūrų skirtumas, ir atvirkščiai, mažinant aplinkos oro temperatūrą skirtumas mažėjo (10 pav.).

Skaitinio modeliavimo rūšyje rezultatai: pakėlus aplinkos oro temperatūrą 1,0 °C (padidėjo temperatūrų skirtumas) žiemos sezonu radono tūrinis aktyvumas svyravo nuo 145,0 iki 146,1 Bq/m<sup>3</sup>, o pakėlus aplinkos oro temperatūrą iki 2,0 °C – pakito iki 147,7 Bq/m<sup>3</sup>. Tą patį sezoną sumažinus aplinkos oro temperatūrą 1,0 °C (sumažėjo temperatūrų skirtumas) radono tūrinis aktyvumas kito nuo 145,0 iki 143,7 Bq/m<sup>3</sup>, o sumažinus aplinkos oro temperatūrą iki 2,0 °C – pakito iki 142,8 Bq/m<sup>3</sup>.



10 pav. Radono aktyvumo koncentracijų pasiskirstymas rūšyje padidinus ir sumažinus aplinkos temperatūrą visais metų sezonais

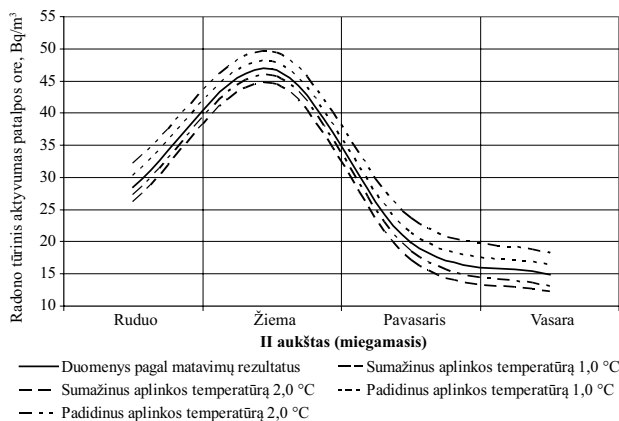
Fig. 10. The distribution of the concentration of radon activity in the basement increasing and decreasing ambient temperature in all seasons



Gautiems skaitinio modeliavimo rezultatams palyginti buvo modeliuota pagal Hubbardo sukurtą skaitinį matematinį modelį (Hubbard *et al.* 1992). Hubbardo modelis, kuriuo siekiama nustatyti radono tūrinį aktyvumą patalpos ore, taip pat grįstas aplinkos ir patalpos temperatūrų skirtumo kitimu. Skirtingai nuo šiame darbe sukurto skaitinio modelio, Hubbardo modelyje vertinami kamine susidarantys aplinkos ir patalpos slėgių skirtumai.

Pagal Hubbardo skaitinį modelį gauti rezultatai ir rodiklių kitimo tendencijos buvo labai panašūs į šiame darbe sukurto skaitinio modelio rezultatus.

Šiame modelyje taip pat, didėjant aplinkos ir patalpos temperatūrų skirtumui, radono tūrinis aktyvumas patalpos ore didėja, ir atvirkščiai. Kaip matome iš 11–13 pav., patalpės, esančios arčiausiai žemės, ore radono tūrinis aktyvumas yra didžiausias.

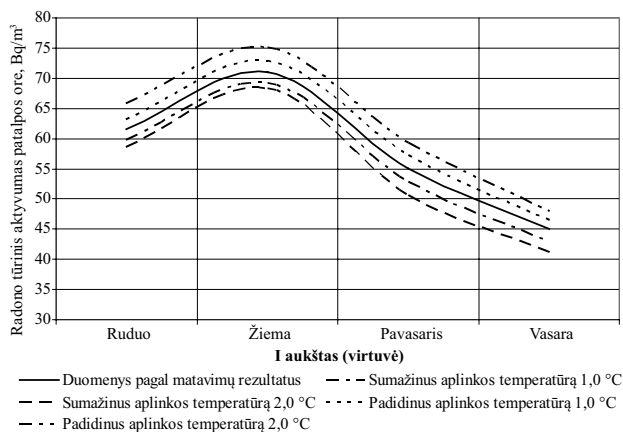


11 pav. Radono aktyvumo koncentracijų pasiskirstymas II aukšte visais metų sezonais padidinus ir sumažinus aplinkos temperatūrą (pagal Hubbardo skaitinį modelį)

Fig. 11. The distribution of the concentration of radon activity in the second floor increasing and decreasing ambient temperature in all seasons of the year (according to Hubbard model)

II pastato aukšte buvo 1,0 °C ir 2,0 °C didinama bei mažinama aplinkos temperatūra. Žiemos sezonu gauti rezultatai: radono tūrinis aktyvumas skiriasi (yra didesnis) 1,1 Bq/m<sup>3</sup> nuo matavimo duomenų ir 0,8 Bq/m<sup>3</sup> nuo sukurtojo modelio rezultatų, vasaros sezonu radono tūrinis aktyvumas padidėjo 1,7 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su matavimų duomenimis, ir 1,8 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su sukurtojo modelio rezultatais (padidinus aplinkos temperatūrą 1,0 °C laipsniu). Sumažinus aplinkos temperatūrą 1,0 °C (sumažėjo temperatūrų skirtumas tarp aplinkos ir patalpos) gauti šie rezultatai: radono tūrinis aktyvumas patalpos ore skiriasi (yra mažesnis) 1,1 Bq/m<sup>3</sup> nuo matavimo duomenų ir 0,2 Bq/m<sup>3</sup> nuo sukurtojo modelio rezultatų žiemos sezonu ir 1,8 Bq/m<sup>3</sup> nuo matavimo duomenų bei 0,1 Bq/m<sup>3</sup> nuo sukurtojo modelio rezultatų vasaros sezonu.

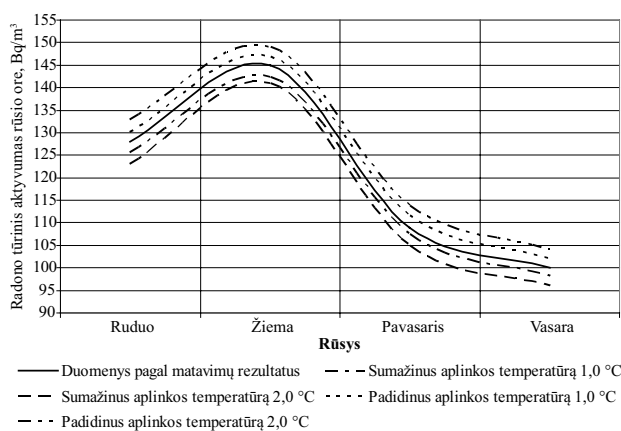
Radono tūrinis aktyvumas I aukšto ore yra didesnis nei II aukšte. Atlikus skaitinį modeliavimą pagal Hubbarda gauti tokie rezultatai: radono tūrinis aktyvumas patalpos ore padidėjo 2,0 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su matavimų duomenimis, ir 1,5 Bq/m<sup>3</sup>, lyginant su sukurtojo modelio žiemos sezono rezultatais, bei 1,4 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su matavimų duomenimis, ir 1,5 Bq/m<sup>3</sup>, lyginant su sukurtojo modelio vasaros sezono rezultatais, padidinus aplinkos oro temperatūrą 1,0 °C. Sumažinus aplinkos oro temperatūrą 1,0 °C, sumažėjo temperatūrų skirtumas, radono tūrinis aktyvumas patalpos ore sumažėjo 1,8 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su matavimų duomenimis, 0,7 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su sukurtojo modelio žiemos sezono rezultatais, bei 2,1 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su matavimų duomenimis, ir 0,6 Bq/m<sup>3</sup>, lyginant su sukurtojo modelio vasaros sezono rezultatais.



12 pav. Radono aktyvumo koncentracijų pasiskirstymas I aukšte visais metų sezonais padidinus ir sumažinus aplinkos temperatūrą (pagal Hubbardo skaitinį modelį)

Fig. 12. The distribution of the concentration of radon activity in the first floor increasing and decreasing ambient temperature in all seasons of the year (according to Hubbard model)

Radono tūrinis aktyvumas rūšio ore didžiausias, nes ši patalpa turi sąlytį su dirvožemiu. Pakėlus aplinkos temperatūrą 1,0 °C (padidėjo ir temperatūrų skirtumas) gauti šie rezultatai: radono tūrinis aktyvumas rūšio ore padidėjo 1,9 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su matavimų duomenimis, ir 0,8 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su sukurtojo modelio žiemos sezono rezultatais, bei 2,1 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su matavimų duomenimis, 0,6 Bq/m<sup>3</sup>, lyginant su sukurtojo modelio vasaros sezono rezultatais, o sumažinus aplinkos temperatūrą 1,0 °C radono tūrinis aktyvumas rūšio ore sumažėjo 2,6 Bq/m<sup>3</sup>, lyginant su matavimų duomenimis, 1,3 Bq/m<sup>3</sup>, palyginti su sukurtojo modelio žiemos sezono rezultatais, ir 1,6 Bq/m<sup>3</sup>, lyginant su matavimų rezultatais, ir 0,8 Bq/m<sup>3</sup>, lyginant su sukurtojo modelio vasaros sezono rezultatais.



13 pav. Radono aktyvumo koncentracijų pasiskirstymas rūsyje visais metų sezonais padidinus ir sumažinus aplinkos temperatūrą (pagal Hubbardo skaitinį modelį)

Fig. 13. The distribution of the concentration of radon activity in the basement increasing and decreasing ambient temperature in all seasons of the year (according to Hubbard model)

Apibendrinant galima sakyti, kad gauti rezultatai pagal Hubbardo skaitinį matematinį modelį skiriasi  $1,1\text{--}2,0\text{ Bq/m}^3$  nuo matavimo duomenų,  $0,8\text{--}1,5\text{ Bq/m}^3$  nuo darbe sukurto modelio rezultatų (pakėlus aplinkos temperatūrą  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ ) ir  $1,1\text{--}2,6\text{ Bq/m}^3$  nuo matavimo duomenų,  $0,2\text{--}1,3\text{ Bq/m}^3$  nuo darbe sukurto modelio rezultatų (sumažinus aplinkos temperatūrą  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ ) žiemos sezonu. Vasaros sezonu skiriasi  $1,4\text{--}2,1\text{ Bq/m}^3$  nuo matavimo duomenų,  $0,6\text{--}1,8\text{ Bq/m}^3$  nuo darbe sukurto modelio rezultatų (pakėlus aplinkos temperatūrą  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ ) ir  $1,6\text{--}2,1\text{ Bq/m}^3$  nuo matavimo duomenų,  $0,1\text{--}0,8\text{ Bq/m}^3$  nuo darbe sukurto modelio rezultatų (sumažinus aplinkos temperatūrą  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Lyginant matavimų ir modeliavimo rezultatus, gautos tos pačios tendencijos: radono tūrinis aktyvumas patalpos ore didėja keliant aplinkos temperatūrą (didėja aplinkos ir patalpos temperatūrų skirtumas) ir mažėja mažinant temperatūrą (mažėja temperatūrų skirtumas). Modeliuojant buvo įvertinamas drėgmės kiekis, slėgis ir kt. parametrai patalpose. Siekta kuo tiksliau nustatyti radono aktyvumo koncentracijos priklausomybę nuo temperatūrų skirtumo. Modeliuojant nustatyta, kad aplinkos temperatūros padidinimas ar sumažinimas turi didelę įtaką radono dujų, patenkančių į patalpas, kiekiui.

## Išvados

1. Nustatyta, kad didžiausias radono tūrinis aktyvumas patalpų ore yra žiemos sezonu, o mažiausias vasaros sezonu. Antrajame pastato aukšte pavasarį –  $20\pm 4,8\text{ Bq/m}^3$ , vasarą –  $15\pm 1,8\text{ Bq/m}^3$ , rudenį radono tūrinis aktyvumas patalpų ore siekė  $29,0\pm 3,0\text{ Bq/m}^3$ , žiemą –  $47,0\pm 10,5\text{ Bq/m}^3$ .

2. Nustatyta, kad radono tūrinis aktyvumas patalpų ore priklauso nuo aplinkos ir patalpos oro temperatūrų skirtumo: didėjant temperatūrų skirtumui radono tūrinis aktyvumas patalpos ore didėja. Pavyzdžiui, pirmame aukšte vasarą radono tūrinis aktyvumas virtuvės ore buvo  $45,0\pm 3,0\text{ Bq/m}^3$ , kai temperatūrų skirtumas siekė  $3,1\text{ }^\circ\text{C}$ , o rudenį pirmojo aukšto ore, esant temperatūrų skirtumui  $3,9\text{ }^\circ\text{C}$ , buvo  $62,0\pm 5,0\text{ Bq/m}^3$ .
3. Modeliuojant pastebėta, kad, keliant ar mažinant temperatūrą, radono tūrinis aktyvumas patalpos ore kinta. Pavyzdžiui, pirmame aukšte vasaros sezonu aplinkos temperatūrą pakėlus  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ , radono tūrinis aktyvumas padidėjo  $3,0\text{ Bq/m}^3$  (I aukštas),  $3,5\text{ Bq/m}^3$  (II aukštas), žiemos sezonu –  $0,5\text{ Bq/m}^3$  (I aukštas),  $0,3\text{ Bq/m}^3$  (II aukštas). Sumažinus aplinkos temperatūrą  $1\text{ }^\circ\text{C}$ , radono tūrinis aktyvumas sumažėjo  $1,4\text{ Bq/m}^3$  (I aukštas),  $1,7\text{ Bq/m}^3$  (II aukštas) vasaros sezonu, o žiemos sezonu –  $1,1\text{ Bq/m}^3$  (I aukštas),  $0,9\text{ Bq/m}^3$  (II aukštas).
4. Rūsyje, kaip ir abiejuose aukštuose, keliant aplinkos oro temperatūrą didėja temperatūrų skirtumas tarp aplinkos bei rūsio oro, ir atvirkščiai, mažinant aplinkos oro temperatūrą – skirtumas mažėja. Pavyzdžiui, žiemos sezonu padidinus aplinkos oro temperatūrą  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ , radono tūrinis aktyvumas padidėjo nuo  $145,0$  iki  $146,1\text{ Bq/m}^3$ , o sumažinus ją  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ , sumažėjo nuo  $145,0$  iki  $143,7\text{ Bq/m}^3$ .
5. Sukurto skaitinio modelio rezultatams palyginti buvo modeliuota ir pagal Hubbardo skaitinį matematinį modelį. Vasaros sezono rezultatai  $1,4\text{--}2,1\text{ Bq/m}^3$  skiriasi nuo matavimo duomenų,  $0,6\text{--}1,8\text{ Bq/m}^3$  – nuo darbe sukurto modelio rezultatų (pakėlus aplinkos temperatūrą  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ ) ir  $1,6\text{--}2,1\text{ Bq/m}^3$  nuo matavimo duomenų,  $0,1\text{--}0,8\text{ Bq/m}^3$  – nuo darbe sukurto modelio rezultatų (sumažinus aplinkos temperatūrą  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ ). Žiemos sezono – skiriasi  $1,1\text{--}2,0\text{ Bq/m}^3$  nuo matavimo duomenų,  $0,8\text{--}1,5\text{ Bq/m}^3$  nuo darbe sukurto modelio rezultatų (pakėlus aplinkos temperatūrą  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ ) ir  $1,1\text{--}2,6\text{ Bq/m}^3$  nuo matavimo duomenų,  $0,2\text{--}1,3\text{ Bq/m}^3$  nuo darbe sukurto modelio rezultatų (sumažinus aplinkos temperatūrą  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ ).

## Literatūra

- Abromaitytė, R.; Pilkytė, L.; Morkūnas, G. 2003. Radono rizikos tyrimai Panevėžio miesto plėtros zonoje, *Sveikatos mokslai* 13(3): 32–35.
- Burian, I.; Otahal, P.; Vosahlik, J.; Pilecka, E. 2011. Czech Primary Radon Measurement Equipment, *Radiation Protection Dosimetry* 145(2–3): 333–336.  
<http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncr041>



- Fronka, A.; Jilek, K.; Moucka, L.; Brabec, M. 2011. Significance of independent radon entry rate and air exchange rate assessment for the Purpose of radon mitigation effectiveness proper evaluation: case studies, *Radiation Protection Dosimetry* 145(2–3): 133–137. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncr051>
- Goto, M.; Moriizumi, J.; Yamazawa, H.; Iida, T.; Zhuo, W. 2007. Estimation of global Radon Exhalation Rate Distribution, *Journal of HealthPhysics* 80(2): 169–172.
- Hubbard, L. M.; Hagberg, N.; Enflo, A. 1992. Temperature effect on radon dynamics in two Swedish dwellings, *Journal of Radiation Protection Dosimetry* 45(1/4): 381–386.
- Yakovleva, V. S. 2005. A theoretical method for estimating the characteristics of radon transport in homogeneous soil, *Journal of Annals of Geophysics* 48(1): 195–198.
- Jasaitis, D. 2007. *Trumpaamžių radono skilimo produktų tūrinių aktyvumų patalpose tyrimas ir įvertinimas*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius. 131 p.
- Kojima, H.; Nagano, K. 1999. The influence of meteorological and soil parameters on radon exhalation, *Journal of Living Environment*, 19–23.
- Morkūnas, G.; Pilkytė, L.; Ladygienė, R.; Gricienė, B. 2009. *Radonas ir gamtinė apšvita*. Vilnius: Kriventa. 33 p.
- Pal, M. 2003. *Radon Transport in Autoclaved Aerated Concrete*. Proefschrift. Technische Universiteit, Eindhoven. 135 p.
- Rogers, V. C.; Nielson, K. K. 1991. Radon entry modeling, *Journal of Health Physics* 60: 261–265.
- STR 2.09.02:2005. Statybos techninis reglamentas. Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas, *Valstybės žinios* 75–2729.
- Zhuo, W.; Dda, T.; Furukawa, M. 2006. Estimation of global radon exhalation rate distribution, *Journal of Nuclear Science and Technology* 43(4): 479–482. <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.2006.9711127>
- Микляев, П. С.; Петрова, Т. Б. 2007. *Основные факторы, определяющие поступление радона с поверхности почвы в атмосферу*. Москва. 28 с.

## THE RESULTS OF MEASURING AND MODELLING SOIL-INDOORS RADON TRANSPORTATION

E. Streckytė, D. Butkus

### Abstract

The article presents the entry of radon gas into premises and introduces the parameters accelerating and slowing this process. The paper determines the dependence of radon gas entering the premises on ambient temperature and humidity changes. It is noted that a growth in differences under ambient and indoor temperature increases indoor radon concentrations in the air due to an increase in the intensity of radon exhalation from soil. Also, an increase in the moisture content indoors decreases the volumetric activity of radon in the air. The simulated values of radon volumetric activity in ambient air were similar to those measured using radon monitoring device RTM2200. Radon concentration in the air of the first floor was higher than that in the second floor. Indoor radon concentrations were highest in the winter and lowest in summer season.

**Keywords:** radon, volumetric activity, ambient temperature, difference in temperatures, modelling.