

Mgr. Aleš FROŇKA, Ph.D.
Státní ústav radiační ochrany,
v.v.í.

Radonová diagnostika budov

Radon Diagnostics of Buildings

Recenzent
doc. Ing. Martin Jiránek, CSc.

Nejvýznamnějším zdrojem ozáření obyvatelstva ionizujícím zářením ve vnitřním prostředí budov je radon ($Rn-222$) a jeho krátkodobé produkty přeměny [1]. Regulace expozice radonu v budovách byla vždy soustředěna na dosažení dvou základních cílů. Prvním cílem je vyhledání budov s vysokou úrovní objemové aktivity radonu (OAR) a provedení protiradonových ozdravných opatření vedoucích ke snížení individuálních expozic obyvatel. Druhým cílem regulace je zavedení účinných nástrojů v oblasti prevence proti pronikání radonu z geologického podloží a tím dosažení plošného snižování ozáření obyvatelstva ve všech budovách sloužících k bydlení nebo pobytu osob. Do oblasti prevence jsou obecně zařazeny postupy pro zajištění radiační ochrany při výstavbě nových budov a při provádění rekonstrukcí stávajících domů. Zajištění kvalitní prevence je z hlediska účinnosti usměrňování expozic obyvatelstva radonu v budovách považováno za nejdůležitější regulační nástroj. V článku jsou popsány základní postupy měření radonu, více prostoru je věnováno speciálním postupům radonové diagnostiky budov a významným praktickým výstupům měření radonu v posledních několika letech.

Klíčová slova: radon, měření, diagnostika, blower door test, stopovací plyn, infračervená termografie

The most significant source of population exposure to ionizing radiation in the indoor environment is radon ($Rn-222$) and its short-lived decay products [1]. Control of exposure to radon in buildings has always been focused on achieving two basic goals. The first goal is to find buildings with high radon concentrations (OAR) and implement appropriate remedial measures to reduce exposures of individual residents. The second goal of the control is to introduce effective tools of prevention against radon penetration from the geological basement and thereby achieve a reduction in surface exposure of the population in all buildings used for living or stay of occupants. As the prevention are generally classified procedures for radiation protection during construction of new buildings and during reconstruction of existing houses. Ensuring quality prevention is considered, from the efficiency point of view, as the most important regulatory tool for reduction of population exposure to radon in buildings. The article describes basic ways of radon measurement, more space is devoted to special ways of radon diagnostics of buildings and to important practical outcomes of radon measurement in the past few years.

Keywords: radon, measurement, diagnostics, blower door test, tracer gas, infrared thermography

ÚVOD

Výsledky analýzy bytové výstavby za posledních 10 let jednoznačně ukazují na dvě zásadní oblasti, které jsou z hlediska regulace ozáření od radonu v budovách nejvýznamnější. První oblastí je výstavba nových bytů v rodinných domech, druhá oblast zahrnuje modernizaci a rekonstrukce stávajících rodinných domů. Mezi stavební úpravy s nejvýznamnějším dopadem na úroveň objemové aktivity radonu ve vnitřním ovzduší obytných místností patří zejména veškeré úpravy zaměřené na snižování energetické náročnosti budov (zateplení obvodového pláště budovy, výměna oken a vstupních dveří, zásahy do kontaktních konstrukcí budovy, změny technických systémů budov a další). Tato oblast je klíčová především z důvodu celkového počtu dotčených bytů a s tím souvisejícího počtu exponovaných osob.

Systém regulace ozáření by měl reagovat zejména na požadavky směrnice Rady EU 2010/31/EU [2] na energetickou náročnost budov, které byly do našich právních předpisů implementovány zákonem č. 318/2012 Sb., o hospodaření energií, a vyhláškou č. 78/2013, o energetické náročnosti budov. Skutečnost je taková, že v případě rekonstrukcí stávajících budov cílených na snížení energetické náročnosti dochází k požadovanému snížení bez ohledu na hygienické požadavky a doporučení týkající se kvality vnitřního prostředí staveb, které vede velmi často k výraznému zvýšení koncentrace škodlivých látek ve vnitřním ovzduší [3].

RADON VE VNITŘNÍM PROSTŘEDÍ BUDOV

Objemová aktivita radonu ve vnitřním prostředí budov není v průběhu času konstantní a vykazuje i významnou prostorovou variabilitu mezi

jednotlivými místnostmi. Okamžitá hodnota OAR ve vnitřním ovzduší budovy je výsledkem tří navzájem si konkurujících jevů: rychlosti přísunu radonu, intenzity větrání a radioaktivní přeměny radonu. Běžné hodnoty intenzity větrání v budovách se pohybují v rozsahu od 0,03 do 3,0 h^{-1} . Při těchto úrovních intenzity větrání můžeme při popisu dynamiky OAR v místnosti zanedbat proces radioaktivní přeměny radonu.

Přeměnová konstanta radonu $2,1 \cdot 10^{-6} s^{-1}$ reprezentuje přibližně 2,5 % celkové hodnoty intenzity větrání na úrovni 0,03 h^{-1} ($8,33 \cdot 10^{-6} s^{-1}$). Rychlost přísunu radonu [$Bq \cdot h^{-1}$] a intenzita větrání [h^{-1}] jsou primárně řízeny tlakovým rozdílem mezi vnitřním a vnějším prostředím stavby. Tlakový rozdíl je vyvolán kombinací účinku teplotního rozdílu mezi vnější a vnitřní teplotou vzduchu budovy (tzv. komínovým efektem), působení větru, provozu vдуchotechniky a otopných soustav. Tlakový rozdíl mezi vnějším a vnitřním prostředím budovy se pro standardní dvoupodlažní rodinný dům v úrovni podlahy prvního nadzemního podlaží pohybuje v rozmezí 2 až 5 Pa [4, 5].

V případě přirozeného větrání se v určité výšce v budově nachází tzv. neutrální rovina (nulový tlakový rozdíl), která vymezuje hranici směru toku vzduchu. Tlakový rozdíl v důsledku komínového efektu při teplotním gradientu 20 K odpovídá přibližně hodnotě 4,3 Pa (hodnota srovnatelná s efektem působení větru při rychlosti 5 $m \cdot s^{-1}$). Rozložení tlakového pole v reálné budově je značně komplikované a vykazuje výraznou dynamiku související především s časovými změnami rychlosti a směru větru. Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím výslednou úroveň OAR ve vnitřním prostředí budov je způsob jejich užívání a především způsob a intenzita větrání a vytápění jednotlivých částí budovy.

Analýza nárůstových křivek OAR

Z časových charakteristik objemové aktivity radonu v místnosti můžeme odhadovat rychlosti přísunu radonu do místnosti a intenzitu větrání měřeného prostoru. Pro tyto účely je možné použít model konstantního přísunu radonu a konstantní intenzity větrání aplikovaný na vybrané úseky časové řady OAR získané z kontinuálního monitoru radonu. Nejvhodnější jsou časové úseky reprezentující nárůst OAR v době uzavření budovy, kdy je významně potlačen uživatelský vliv. Obecně je hlavním problémem analýzy nárůstových křivek omezená platnost předpokladů použitého modelu, ustálenost intenzity větrání a přísunu radonu. Například pro rozsah intenzity větrání v budovách (0,05 až 0,3 h⁻¹) odpovídá doba nárůstu objemové aktivity radonu do stacionárního stavu 10 až 60 hodin. Předpoklad konstantní intenzity větrání a přísunu radonu do místnosti s ohledem na závislost obou veličin na teplotním (tlakovém) gradientu mezi interiérem a vnějším prostředím je pro takto dlouhý časový úsek neopodstatněný. Diferenciální rovnice prvního řádu s konstantními koeficienty popisující dynamiku objemové aktivity radonu v místnosti budov tak nebude dostatečně přesně popisovat studovaný proces (1). Zahnutí časové variability obou vstupních parametrů do modelu navíc komplikuje jejich vzájemná závislost. Právě z těchto důvodů se osvědčila aplikace měřicí techniky „blower door“, která požadavky popsání fyzikálního modelu většinou splňuje.

$$\frac{da_{\text{Rn}}(t)}{dt} = \frac{\Phi_{\text{Rn}}}{V} - (\lambda + k) \cdot a_{\text{Rn}}(t) \quad (1)$$

kde je:

$\frac{da_{\text{Rn}}(t)}{dt}$	časová derivace objemové aktivity radonu v čase t [Bq.m ⁻³ .s ⁻¹],
$a_{\text{Rn}}(t)$	časově proměnná a měřená objemová aktivita radonu v místnosti v čase t [Bq.m ⁻³],
Φ_{Rn}	konstantní rychlost přísunu objemové aktivity radonu do měřené místnosti v čase t [Bq.s ⁻¹],
λ	přeměnová konstanta radonu 2,1.10 ⁻⁶ [s ⁻¹],
k	konstantní intenzita větrání místnosti [s ⁻¹],
V	objem místnosti [m ³].

Analytickým řešením diferenciální rovnice s počáteční podmínkou $a(t=0) = a_0$ získáme vztah popisující časový nárůst OAR v místnosti při konstantním přísunu radonu a větrání:

$$a_{\text{Rn}}(t) = \frac{\Phi_{\text{Rn}}}{(\lambda + k)V} (1 - e^{-(\lambda + k)t}) + a_0 e^{-(\lambda + k)t} \quad (2)$$

kde je:

a_0 počáteční hodnota objemové aktivity radonu v místnosti [Bq.m⁻³].

POSTUPY MĚŘENÍ RADONU

Obecně lze měření radonu rozdělit do tří hlavních kategorií. Dlouhodobá integrální měření, krátkodobá integrální a kontinuální měření a speciální metody radonové diagnostiky budov.

1. Dlouhodobá integrální měření OAR

Slouží pro účely hodnocení úrovně ozáření osob (stanovení expozice radonu a jeho krátkodobým produktům přeměny). Stanovují se dlouhodobé průměrné hodnoty OAR v obytných a pobytových místnostech budov – jedná se o integrální měřicí metody (nejčastěji se používají stopové detektory vyrobené ze speciální fólie – Kodak LR115, citlivé na záření alfa emitované radonem a jeho produkty přeměny). Systém měřicích metod a hodnoticích postupů je závislý na způsobu užívání objektu.

Standardní doba expozice detektorů činí ideálně 1 rok (řádově měsíce). Výsledky měření jsou ovlivněny individuálními uživatelskými zvyklostmi (pobytový režim, doba pobytu, počet uživatelů, režim větrání a vytápění, provoz vzduchotechniky – digestoře, větrací a klimatizační jednotky, čističky vzduchu apod.).

2. Krátkodobá integrální a kontinuální měření

Slouží pro účely klasifikace budov z hlediska efektivity provedených protiradonových opatření (stávající budovy, novostavby), hodnocení stavu pro kolaudační řízení, pro potřeby přidělení státní dotace na protiradonová ozdravná opatření, při koupi a prodeji objektu, oceňování staveb apod.

Jde o krátkodobá stanovení průměrných hodnot OAR za definovaných podmínek měření (kontrola mechanismů přísunu radonu a intenzity větrání objektu za účelem eliminace falešně negativních výsledků měření a s tím související chybné interpretace dat a celkového hodnocení objektu).

Standardní doba měření je minimálně 1 týden. Nejčastěji se používají elektretové ionizační komory detekující ionty vzniklé ionizací vzduchu působením alfa částic emitovaných radonem a jeho krátkodobými produkty přeměny v citlivém objemu detektoru.

Kontinuální monitory radonu se využívají především v případech, kdy je nezbytná znalost časového vývoje OAR v pobytových a obytných místnostech budov, zejména při hodnocení budov s charakteristickým pobytovým režimem (pracoviště, předškolní a školská zařízení apod.).

3. Radonová diagnostika

Obecně je radonová diagnostika definována jako sada speciálních radiometrických a neradiometrických měřicích metod používaných pro identifikaci zdrojů radonu a kvalitativní a kvantitativní analýzu přísunových cest radonu do vnitřního prostředí budov. Celý přístup je založen na hodnocení budovy z hlediska funkčnosti protiradonových opatření (preventivních nebo ozdravných) a nezabývá se hodnocením úrovně ozáření osob pobývajících v budově. Z toho vyplývá i výrazně rozdílná interpretace experimentálních dat a relativní nezávislost diagnostických výstupů a hodnocení na způsobu užívání objektu. Volba jednotlivých metod a měřicí techniky, včetně rozsahu a celkové doby měření, je vždy závislá na účelu prováděných diagnostických měření a na typu budovy, především na charakteru jejího provozu a stavebně technickém stavu.

Mezi hlavní aplikace radonové diagnostiky patří:

- ❑ zjištění příčin nedostatečné účinnosti preventivních nebo ozdravných protiradonových opatření,
- ❑ získání podkladů pro návrh nápravných opatření (volba technologie ozdravného opatření, dimenzování systému a jeho instalace),
- ❑ získání podkladů pro optimalizaci provozu ozdravných protiradonových opatření s aktivními prvky (nastavení výkonového stupně ventilátorů, volba cyklického režimu provozu aktivních prvků apod.),
- ❑ ověření věrohodnosti výsledků krátkodobých měření ve sporných případech (výsledky radonové diagnostiky slouží pro objektivizaci úrovně OAR ve vnitřním prostředí budov),
- ❑ získání nových poznatků o transportu radonu a jeho chování ve vnitřním prostředí budov (tato aplikace má význam pro zobecnění některých charakteristických vlastností dynamiky radonu, jejíž pochopení je důležité pro správnou interpretaci měřených dat v různých časových úsecích a při různých podmínkách měření – identifikace hlavních ovlivňujících faktorů).

Níže je uveden podrobný seznam diagnostických postupů cílených na identifikaci zdrojů radonu a studium transportu radonu z podlahy budovy do jejího interiéru a následnou distribuci radonu ve vnitřním ovzduší.

- ❑ Kontinuální monitorování OAR v interiéru budovy, zahrnující i neobývané prostory budov (suterény, sklepy, chodby, technické místnosti, haly, půdy, neobytná podkrovní apod.) s využitím kontinuálních monitorů radonu přednostně umístěných v prostorech v přímém kontaktu s podlažím.
- ❑ Měření dávkových příkonů záření gama ve vzduchu pro účely identifikace stavebních materiálů s vyšším obsahem přírodních radionuklidů.
- ❑ Detailní prohlídka objektu a hodnocení kvality stavebních konstrukcí ovlivňujících přísun radonu a výměnu vzduchu v budově (stavebně technický průzkum budovy).
- ❑ Blower door (BD) testy budovy nebo jejich jednotlivých místností využívající zvýraznění konvektivní složky přísunu radonu do vnitřního prostředí vytvořením výrazného tlakového spádu; stanovení celkové průvzdušnosti obvodového pláště budovy; měření šíření tlakového pole vytvořeného BD technikou v blízkosti objektu – prokázání přímé komunikace mezi podlažím a vnitřním ovzduším budovy.
- ❑ Simultánní kontinuální monitorování radonu v půdním vzduchu a v interiéru budovy při provádění BD testu; vzorkování vzduchu z odběrových sond instalovaných v blízkosti budovy nebo přímo v jejím půdorysu.
- ❑ Jednorázové odběry vzorků vzduchu z netěsností kontaktních konstrukcí identifikovaných na základě BD testů a použití infračervené zobrazovací techniky před a po provedení BD testu.
- ❑ Stanovení radonového indexu pozemku (měření OAR ve vzorcích půdního vzduchu a *in situ* stanovení plynopropustnosti zemin přímým měřením).
- ❑ Nezávislé stanovení přísunu radonu a intenzity větrání metodou stopovacích plynů.
- ❑ Záznam meteorologických veličin z přenosné meteorostanice instalované v bezprostřední blízkosti budovy.
- ❑ Kontinuální záznam teploty a relativní vlhkosti vzduchu a koncentrace CO₂ ve vnitřním ovzduší.
- ❑ Kontinuální záznam tlakových diferencí mezi vnitřním a vnějším prostředím budovy.
- ❑ Měření OAR ve vzorcích vody (v případě vlastního zdroje vody – vrtaná nebo kopaná studna).
- ❑ Záznam údajů o způsobu užívání budovy (provoz technických systémů – vytápění, větrání; doby pobytu a počtu pobývajících osob).
- ❑ Měření objemové aktivity produktů přeměny radonu ve vnitřním prostředí budov.

Výše uvedený výčet metod není zcela kompletní, nicméně zahrnuje nejdůležitější postupy, které byly a jsou rutinně využívány pro nalezení jednotlivých zdrojů radonu a jejich kvantitativní hodnocení.

APLIKACE POKROČILÝCH METOD RADONOVÉ DIAGNOSTIKY BUDOV

Modifikovaný blower door test budovy

Metoda blower door testu (BD) se ve stavebním inženýrství používá k určení celkové průvzdušnosti obvodového pláště budovy nebo její ucelené části. Tato diagnostická metoda vychází z měření a výpočtu celkové intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa zajištěném při BD testu budovy [8, 9, 10].

Využití měřicí techniky blower door v radonové diagnostice budov pro potřeby získání kvalitativních a kvantitativních informací o infiltraci radonu z podlaží budovy do jejího vnitřního ovzduší bylo popsáno v řadě publikací [12, 13, 14].

Hlavním kvalitativním výsledkem BD testů je usnadnění lokalizace přísnových cest radonu zvýšením konvektivní složky přísunu radonu přes

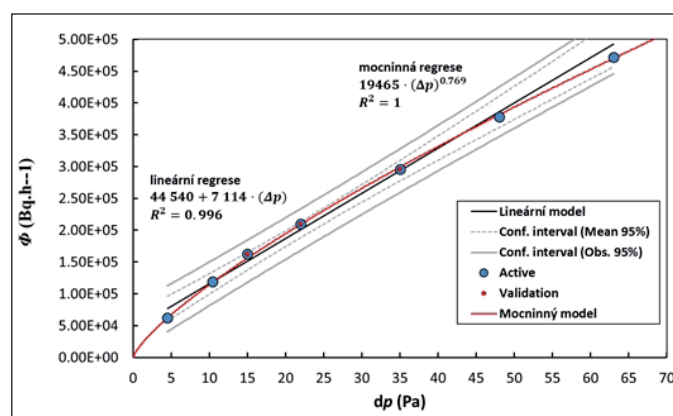
kontaktní konstrukce budovy. Stanovení průvzdušnosti těchto konstrukcí a výpočet objemového toku vzduchu z podlaží stavby do interiéru budovy za přesně definovaných experimentálních podmínek je umožněno analýzou kontinuálního záznamu OAR v testované budově (místnosti) při tlakovém spádu uměle vytvořeném pomocí BD techniky. Pro přesnější a spolehlivější statistické zpracování experimentálních dat je podstatná skutečnost, že při BD testu budovy je po celou dobu měření zajištěna konstantní intenzita větrání a konstantní přísun radonu do místnosti, tedy zásadní předpoklad modelu používaného pro analýzu nárůstových křivek OAR. Předpoklad konstantní intenzity větrání je v praxi prakticky vždy zajištěn až na výjimečné situace, kdy je homogenní tlakové pole vytvořené pomocí BD významně ovlivněno účinky nárazu větru.

Hlavním výstupem BD testu místnosti jsou závislosti přísunu radonu a celkové intenzity výměny vzduchu na tlakové diferencii mezi měřenou budovou (místností) a vnějším okolím [15].

Experimentálně získané závislosti, BD charakteristiky místnosti, jsou kvantitativní ukazatele popisující infiltraci radonu z podlaží budovy přes její kontaktní konstrukce ve srovnání s celkovou infiltrací budovy (místnosti) přes její obálku (systémovou hranici). Na obr. 1 je pro ilustraci znázorněna radonová BD charakteristika reprezentující závislost přísunu radonu do místnosti na tlakovém rozdílu. Pro analýzu radonových BD charakteristik byl zvolen infiltrační model popisující přísun radonu jako mocninou funkci tlakové difference vytvořené BD ventilátorem. Navržený model vychází z předpokladu, že dominantním mechanismem přísunu radonu do budovy je tlakově řízená konvekce vzduchu z podlaží objektu. To se ve většině případů ukazuje být oprávněným předpokladem, zvláště pak v situacích, kdy jsou hlavními přísunovými cestami do budovy netěsnosti v kontaktních konstrukcích (nesprávně ošetřené instalační prostupy, netěsnosti ve styku stěn a podlah apod.).

Stanovení výměny vzduchu metodou stopovacích plynů

Jednou z nejdůležitějších metod radonové diagnostiky budov je nezávislé stanovení násobnosti výměny vzduchu pomocí techniky stopovacích plynů [16, 17], která umožňuje současné a oddělené stanovení násobnosti výměny vzduchu a přísunu radonu do měřené místnosti. Metoda upravená pro potřeby radonové diagnostiky budov byla vyvinuta Ing. Karlem Jílkem v SÚRO v.v.i. a úspěšně aplikována při realizaci diagnostických měření v nových i stávajících budovách. Hlavní principy této metody jsou podrobně popsány a diskutovány v odborných publikacích [18, 20]. Stanovení výměny vzduchu v budovách metodou aplikace značkovacího plynu [11] je možné použít jednak pro určení celkové intenzity větrání budovy, ale také pro potřeby detailní analýzy výměny vzduchu mezi jednotlivými zónami uvnitř budovy.



Obr. 1 Porovnání dvou regresních modelů pro analýzu dat radonové BD charakteristiky

Fig. 1 Comparison of two regression models for data analysis of the radon BD characteristic

Stanovení intenzity větrání

Klíčovými vlastnostmi chemických látek vhodných pro potřeby stanovení výměny vzduchu ve vnitřním prostředí budov je jejich netěsnost k běžným fyzikálně chemickým procesům interakcí s molekulami vzduchu a s materiály přítomnými v interiéru budov. Dalším důležitým faktorem je nízká úroveň přírodního pozadí stopovací látky a v případě aplikace v prostředí s pobytem osob také její zdravotní nezávadnost. Pro účely stanovení výměny vzduchu v budovách obecně nejlépe vyhovují inertní a nereaktivní plyny (např. oxid uhelnatý CO, oxid dusný N₂O, helium He, fluorid sírový SF₆ apod.). Pokud je možné předpokládat, že uvedené plyny nejsou absorbovány ve stavebních materiálech nebo adsorbovány na površích stavebních konstrukcí či vybavení místností, lze tyto plyny dobře použít jako stopovací látku ke stanovení intenzity větrání.

V rámci uskutečnění sady testovacích měření v podmínkách reálných budov byly použity následující dvě experimentální metody injektáže stopovacího plynu do měřené místnosti:

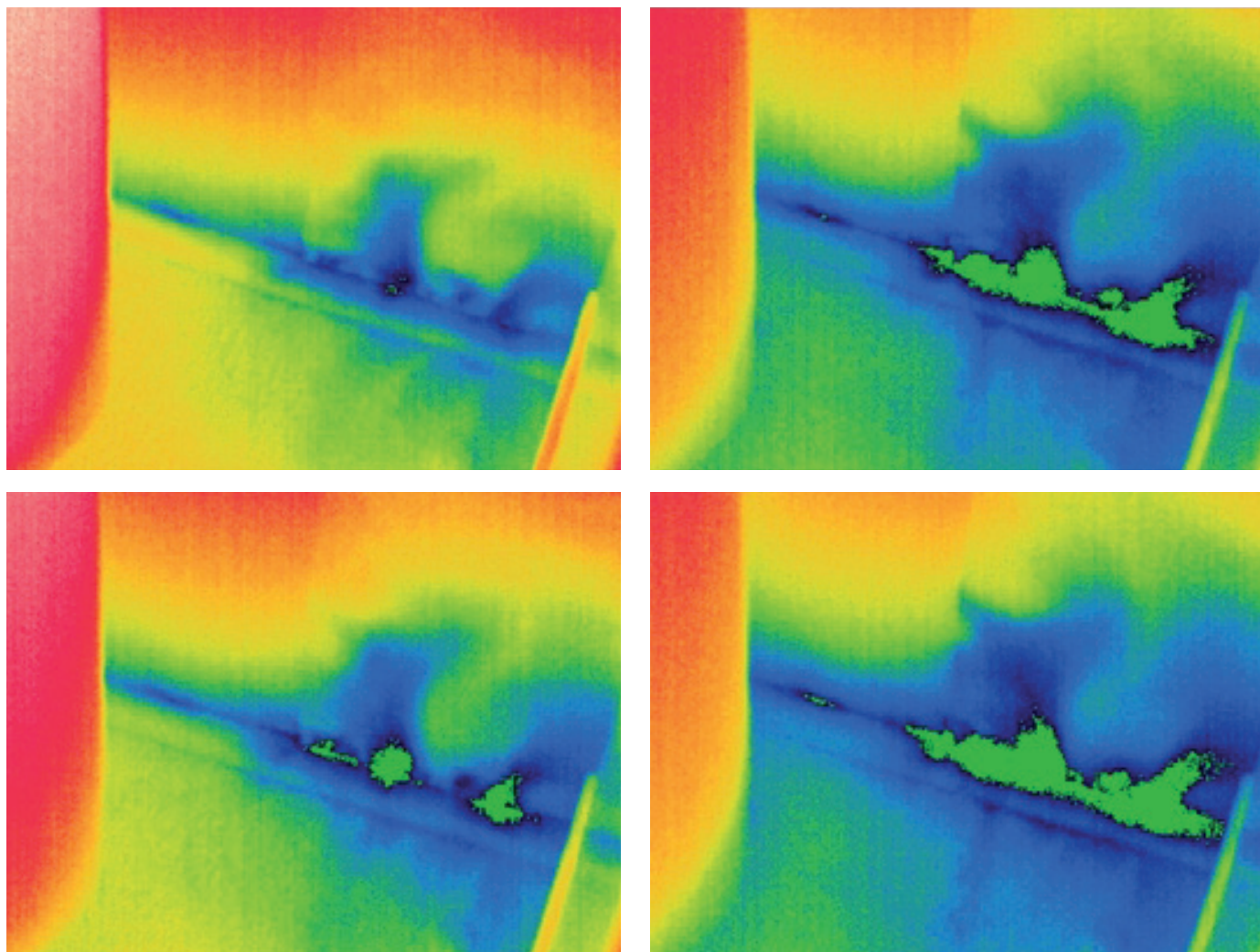
- ☐ metoda jednorázové injekce stopovacího plynu do měřené místnosti (budovy),
- ☐ metoda konstantního přísunu stopovacího plynu do měřené místnosti (budovy).

Jako stopovací plyn byl nejčastěji použit oxid dusný a oxid uhelnatý. Přehled všech základních způsobů injektáže stopovacího plynu je možné nalézt v publikaci [21].

Využití infračervené termografie v radonové diagnostice

Princip tohoto nového postupu radonové diagnostiky je založen na termografickém snímání (nekontaktním stanovení teploty snímaných povrchů) vybrané netěsnosti v kontaktních konstrukcích stavby za podmínek přesně definovaného tlakového pole vytvořeného při BD testu budovy. V našem případě byla použita termovizní technika firmy FLIR (ThermaCAM P25) pro spektrální rozsah 7,5 až 13 μm a s přesností měření 2 % z absolutní hodnoty teploty a s možností automatického ukládání snímaného pole na paměťovou kartu. Nkontaktní termografie se standardně využívá ve stavebně tepelné technice budov pro analýzu těsností obvodových plášťů [22, 23].

Využití infračervené techniky pro účely radonové diagnostiky spočívá především ve vyhledávání netěsností v kontaktních konstrukcích budovy, jinými slovy k identifikaci přísunových cest chladnějšího vzduchu z podloží objektu do jeho vnitřního ovzduší. Pro účely kvantitativní analýzy přísunových cest radonu do interiéru stavby byl navržen a použit nový postup zpracování termogramů. Zmíněný přístup je založen na kontinuálním snímání vybrané netěsnosti v kontaktní konstrukci pomocí infrakamery při přesně definovaném podtlaku v místnosti. Následně se provede integrace plochy termogramu vymezené přesně definovanou izotermou. Výsledkem zpracování je závislost velikosti integrované plochy (počet pixelů vymezené části snímku) na tlakovém rozdílu. Sada normalizovaných termogramů pro výše popsany typ BD testu je pro ukázkou znázorněna na obr. 2.

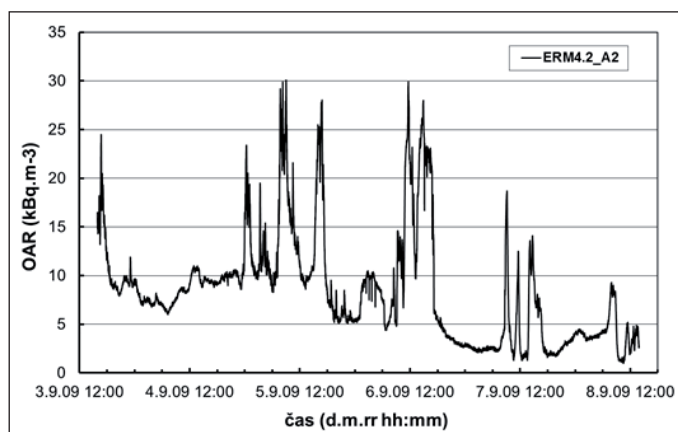


Obr. 2 Sada normalizovaných termogramů pro různé tlakové režimy experimentu blower door pro srovnání s přirozeným stavem měřené místnosti (přirozený stav, podtlak -17 Pa, -32 Pa a -50 Pa)

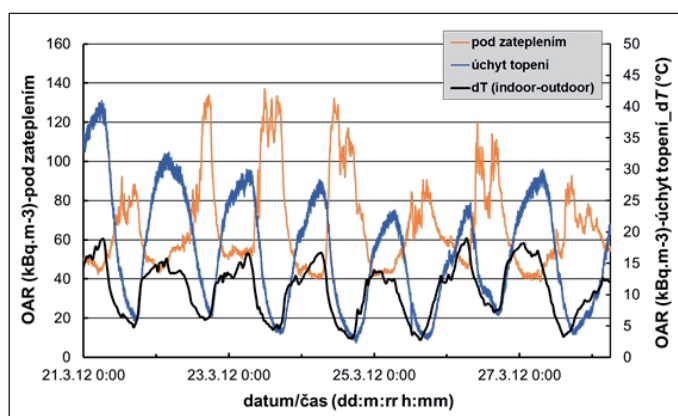
Fig. 2 Set of normalized thermal images for different pressure regimes of the blower door experiment, for comparison with normal state of the measured room (normal state, under-pressure -17 Pa, -32 Pa and -50 Pa)

Objevení radonových mostů

V souvislosti s radonovou diagnostikou prováděnou v novostavbě rodinného domu s vysokými hodnotami OAR ve vnitřním ovzduší, zjištěnými při krátkodobém měření pro účely stavebního řízení, byla uskutečněna sada diagnostických měření za účelem identifikace zdrojů radonu a nalezení optimálního řešení ozdravných protiradonových opatření. Součástí radonových diagnostik bylo dlouhodobé monitorování objemové aktivity radonu v podloží budovy, ve vertikálních stavebních konstrukcích a ve vybraných místnostech domu, které jsou v přímém kontaktu s podložím. Současně s monitorováním OAR na určených odběrových místech uvnitř a vně budovy byly zaznamenávány klíčové meteorologické veličiny (vnitřní a vnější teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, rychlost a směr větru, atmosférický tlak, celkový úhrn srážek). Unikátní jsou především záznamy časových změn OAR ve vertikálních stavebních konstrukcích a pod tepelnou izolaci obvodového pláště stavby, které umožnily lokalizovat dominantní přísunové cesty radonu [25]. Na základě vyhodnocení diagnostických měření byl nalezen **nový transportní mechanismus radonu** z podloží objektu pod zateplením obvodového pláště do vnitřního ovzduší domu. Tento typ transportu se může vyskytnout zejména v případě nových budov s obvodovými stěnami z tvarovek se svisle orientovanými dutinami kladenými na sraz bez promaltování a provedením tepelné izolace soklu ukončené pod úrovní terénu. Možné způsoby eliminace radonových mostů, včetně návrhů řešení kritických stavebních detailů jsou uvedeny v práci [7]. Na obr. 3 je pro ilustraci uveden časový záznam OAR ve vzduchové mezeře mezi tepelnou izolací a obvodovou stěnou domu.



Obr. 3 Časový záznam OAR pod tepelnou izolací obvodového pláště budovy
Fig. 3 Time recording OAR under the thermal insulation of the building envelope



Obr. 4 Časový záznam OAR v obvodové stěně (úchyt topení) a pod tepelnou izolací obvodového pláště budovy

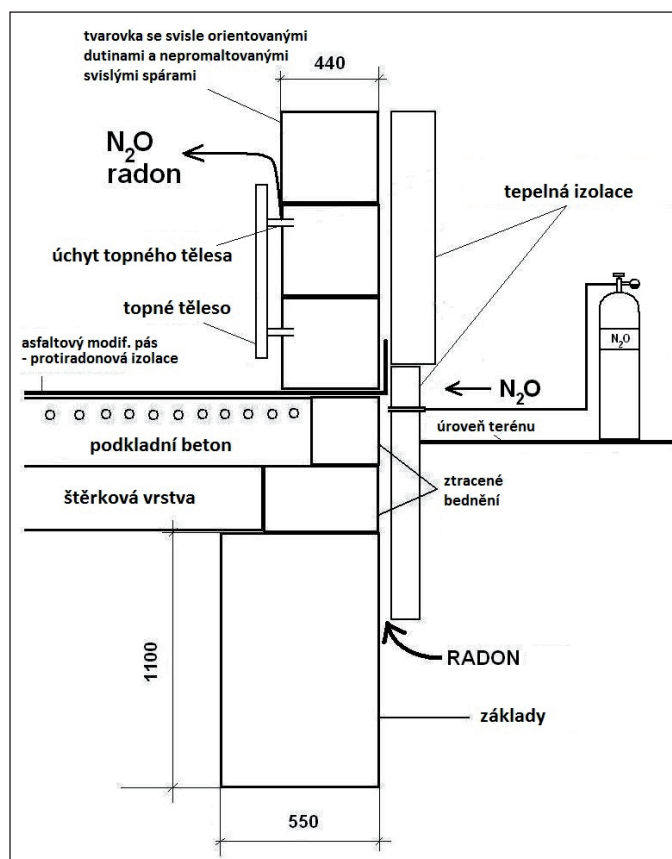
Fig. 4 Time recording OAR in the peripheral wall (heater holder) and under the thermal insulation of the building envelope

Graf na obr. 4 zachycuje časový záznam OAR pod zateplením obvodového pláště a v místě úchyty otopného tělesa v obvodovém zdivu uvnitř budovy společně se záznamem rozdílu mezi teplotou vzduchu uvnitř a vně budovy. Z grafu je zřejmý charakteristický posun časových řad OAR pod tepelnou izolací a v obvodovém zdivu, který zachycuje dynamiku transportu radonu a její charakteristické časy. Vzhledem k tomu, že je zdroj radonu přímo pod tepelnou izolací snadno vyčerpatelný, projeví se zvýšení přísunu radonu do dutin zdiva poklesem OAR v prostoru pod izolací pláště budovy.

Na obr. 5 je schematicky znázorněn detail stavební konstrukce s kritickým prostorem pod tepelnou izolací obvodového pláště ukončené pod úrovní okolního terénu. Na obrázku je zároveň zvýrazněna jednak samotná přísunová cesta radonu, ale také uspořádání infiltračního experimentu s využitím N_2O jako stopovacího plynu. Stopovací plyn byl v době konstantního tlakového rozdílu mezi vnitřním a vnějším prostředím budovy vytvořen pomocí BD měřicí techniky z tlakové láhve konstantně injektován do prostoru mezi tepelnou izolací soklové části a obvodovým zdivem.

ZÁVĚR

V článku byly představeny pokročilé metody radonové diagnostiky budov, které se používají při vyhledávání zdrojů radonu a jeho přísunových cest do vnitřního prostředí budov a některé významné výstupy a výsledky měření radonu v posledních letech. Nejčastější příčinou vysokých hodnot OAR v interiéru nových budov jsou nekvalitně provedená protiradonová opatření, ať už ve fázi návrhu, nebo při samotné realizaci. Na základě analýzy velkého souboru dat získaných při provádění radonových diagnostik rodinných domů bylo zjištěno, že velmi častým



Obr. 5 Detail kritické stavební konstrukce a uspořádání infiltračního experimentu

Fig. 5 Detail of the building structure and arrangement of the infiltration experiment

zdrojem přísunu radonu do budovy jsou neošetřené prostupy instalací v technických místnostech domů, které obvykle vykazují i výrazně odlišný teplotní režim od zbytku budovy.

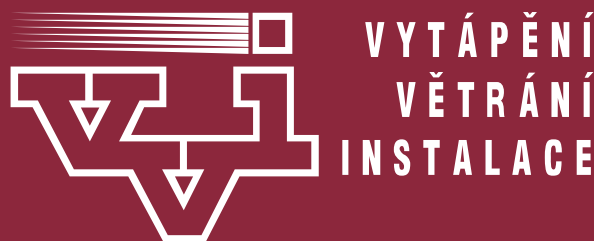
Vliv stavebních úprav zaměřených na snižování energetické náročnosti budov na celkovou úroveň OAR v jejich vnitřním ovzduší byl dobře zdokumentován a popsán. Na základě měření výměny vzduchu v nových a rekonstruovaných budovách bylo zjištěno, že průměrné intenzity větrání se pohybují v rozsahu od 0,05 do 0,18 h⁻¹, ve většině případů pod úrovní 0,1 h⁻¹ doporučenou jako minimální násobnost výměny vzduchu v neužívaných místnostech [8]. Tato zjištění jsou alarmující nejen v souvislosti s ozáření od radonu a jeho krátkodobých produktů přeměny, ale obecně se týkají zvýšené akumulace škodlivin produkovaných nebo přisunovaných do vnitřního ovzduší budov. Principiální nedostatky zmíněných úprav lze spatřovat především v aplikaci postupů a technologií snižování energetické náročnosti budov, které vyhovují požadavkům na nízkoenergetické a pasivní domy s centrálními systémy nuceného větrání, na staré rekonstruované budovy. Dalším problémem je podceňování komplexního řešení modernizace budov se zahrnutím požadavků na kvalitu vnitřního prostředí [3, 26]. Požadavky na tepelnou ochranu budov a kvalitu jejich vnitřního prostředí musí být harmonizovány a optimalizovány.

V několika případech použití pokročilých metod radonové diagnostiky budov byl opakovaně identifikován nový typ přisunové cesty radonu z podloží objektu pod zateplením obvodového pláště budovy do jejího interiéru [24, 25]. Určité typy instalací zateplovacích systémů nových budov je tak možné považovat za kritické z hlediska účinnosti protiradonových opatření.

Kontakt na autora: ales.fronka@suro.cz

Použité zdroje:

- [1] UNSCEAR 2010, UNSCEAR 2008. *Report to the General Assembly with Scientific Annexes*. ISBN 9789211422740.
- [2] EC 2010/31/EU (EPBD II). European Commission Council Directive 2010/31/EU (Energy Performance of Buildings Directive II). 2010.
- [3] CAUTLEY, D., VINER, J., LORD, M., PEARCE, M. *Test Methods and Protocols for Environmental and Safety Hazards Associated With Home Energy Retrofits*. Oak Ridge [online]. 2012. Dostupné z: <http://www.osti.gov/bridge>
- [4] FRONKA, A., MOUČKA, L., JÍLEK, K. Radonová diagnostika a význam měření radonu v budovách. *Bezpečnost jaderné energie*. 2007, 5(53), 94–102.
- [5] HINTENLANG, D. E., AL-AHMADY, K. K. Pressure differentials for radon entry coupled periodic atmospheric pressure variation. *Indoor Air*. 1992, 2, 208–215.
- [6] ČSN 730601. *Ochrana staveb proti radonu z podloží*. SÚJB, 2006.
- [7] JIRÁNEK, M., HONZÍKOVÁ, M. *RADON, Stavební souvislosti I a II* (p. 29/81). Praha, 2014: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, ČVUT v Praze.
- [8] ČSN 730540-2:2011. *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. 2011.
- [9] ČSN EN13829. *Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan Pressurization method*. 2001.
- [10] NOVÁK, J. *Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2008, s. 204.
- [11] ČSN EN ISO 12569 (73 0311). *Tepelné vlastnosti budov a materiálů – Stanovení výměny vzduchu v budovách – Metoda poklesu koncentrace značkovacího plynu*. 2013.
- [12] RINGER, W., KAINEDER, H., MARINGER, F. J., KINDL, P. Determination of the radon potential of a building by a controlled depressurisation technique (RACODE). *Radioactivity in the Environment*. 2005, 7, 221–231. doi:10.1016/S1569-4860(04)07025-1
- [13] COLLIGNAN, B., LORKOWSKI, C., AMÉON, R. Development of a methodology to characterize radon entry in dwellings. *Building and Environment*. 2012, 57, 176–183. doi:10.1016/j.buildenv.2012.05.002
- [14] FRONKA, A., MOUČKA, L. Blower door method and measurement technology in radon diagnosis. *International Congress Series, HLNRR: Radiation Dose and Health Effects, 6-10 September 2004, Elsevier, B.V., 1276*. 2005, s. 377–378.
- [15] FRONKA, A., MOUČKA, L., ČECHÁK, T. Application of the advanced radon diagnosis methods in the indoor building environment. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008, 130(1), 72–75.
- [16] DIETZ, R. N., COTE, E. A. Air infiltration measurements in a home using a convenient perfluorocarbon tracer technique. *Environment International*. 1982, 8, 419–433.
- [17] FERBER, G. J., K., T., HEFFER, J. L. *Demonstrations of a long-range atmospheric trace system using perfluorocarbons*. 1983.
- [18] BRABEC, M., JÍLEK, K. State/space dynamic model for estimation of radon entry rate, based on Kalman filtering. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2007, 98(3), 285–297.
- [19] BRABEC, M., JÍLEK, K. Simplified radon entry rate estimation methodology from tracer and radon concentrations based on functional data analysis approach. In A. Reimer (Ed.), *Horizons in World Physics*. 2010, Vol. 270, pp. 1–19. Nova Science Publishers, Inc.
- [20] FRONKA, A., JÍLEK, K., MOUČKA, L., BRABEC, M. 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*. 2011, 145, 133–137. doi:10.1093/rpd/ncr051
- [21] LAGUS, P., PERSILY, A. K. A Review of Tracer Gas Techniques for Measuring Airflows in Buildings. *ASHRAE Transaction* 91 (II B), p.1075-1087, 1985.
- [22] ČSN 73 0560 EN 13187. *Tepelné chování budov – Kvalitativní určení tepelných nepravidlostí v pláštích budov – Infračervená metoda*. Český normalizační institut, 1999.
- [23] PAŠEK, J., SVOBODA, J. Fyzikální aspekty použití nekontaktní termografie při analýze obvodových plášťů budov. *Stavební obzor*. 2004, 13(3), 82–91.
- [24] FRONKA, A., JÍLEK, K. Radon entry rate analyses using in situ tracer gas method application. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014, 160(1-3), 143–148. doi:10.1093/rpd/ncu074
- [25] FRONKA, A., MOUČKA, L. Analýza netěsností obvodového pláště budov v rámci realizace komplexní radonové diagnostiky staveb Analysis of air leakages in the building envelope within the framework of complex radon diagnosis application. *Tepelná ochrana budov*. 2010, 6, 31–37.
- [26] FOJTÍKOVÁ, I., NAVRÁTILOVÁ ROVENSKÁ, K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014, 160(1-3), 149–153.



Webová prezentace časopisu VVI
www.stpcr.cz/vvi

Na těchto stránkách najdete:

- úplné texty článků vydaných v letech 1958 až 1991 v časopise Zdravotní technika a vzduchotechnika (předchůdce VVI),
- vyhledávací databázi článků od roku 1958,
- vybrané články VVI,
- informace pro autory a recenzenty,
- informace o předplatném a inzerci.