

doc. Ing. Vladimír ZMRHAL, Ph.D.
 ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
 Ústav techniky prostředí

Navlhčení vzduchu v obytném prostředí

Air Humidification in the Residential Environment

Recenzent
 Ing. Petra Štávová, Ph.D.

Článek se zabývá problematikou doporučené relativní vlhkosti v obytném prostředí, která souvisí s produkcí vodní páry od lidské činnosti. Produkce vodní páry byla monitorována v reálném rodinném domě během zimního období a porovnána s normovými hodnotami a údaji uváděnými v odborné literatuře. V rámci monitorování RD byly ve vybraných místnostech zaznamenávány rovněž parametry vnitřního vzduchu (IAQ). Z výsledků případové studie je zřejmé, že navlhčení vnitřního vzduchu od lidské činnosti v obytném prostředí je během dne stabilní, do jisté míry závislé na chování uživatelů, a nejsou patrné výrazné rozdíly mezi produkcí o víkendů a během pracovních dnů. Jako zásadní se jeví chování uživatele v závislosti na venkovních klimatických podmínkách, především na teplotě venkovního vzduchu. Článek diskutuje rozdílnost klimatických podmínek v různých lokalitách ČR během roku.

Klíčová slova: větrání, vodní pára, navlhčení vzduchu, činnost člověka, monitoring

The article deals with the issue of the recommended relative humidity in the residential environment, which is related to the production of water vapour from human activity. Water vapour production was monitored in a real family house during the winter season and compared with standard values and data reported in the literature. As part of the monitoring, indoor air quality (IAQ) parameters were also recorded in selected rooms. From the results of the case study performed, it is clear that the indoor air humidification in the residential environment due to human activity is stable during the day. It depends, to some extent, on the behaviour of the occupants, and no significant differences are evident between weekend and weekday water vapour production. A major factor appears to be the dependence of the occupant's behaviour on outdoor climatic conditions, especially the temperature of the outdoor air. The paper discusses the differences in climatic conditions in different locations of the Czech Republic during the year.

Keywords: ventilation, water vapour, air humidification, human activity, monitoring

ÚVOD

Obytné prostředí má svá specifika, neboť je plně v kompetenci jeho majitelů (obyvatel). Vlhkost vzduchu ve vnitřním prostředí obytných budov je tak spojena s přítomností a činností člověka. Vodní páru produkují přítomné osoby dýcháním či vypařováním, výrazné množství se tvoří rovněž při vaření, mytí nádobí, sprchování, sušení prádla apod. Úkolem větrání je zajistit přívod čerstvého vzduchu pro vytvoření odpovídající kvality ovzduší a odvod znečišťujících látek včetně vlhkosti.

Kompletní vliv relativní vlhkosti vzduchu na všechny aspekty ovlivňující tepelný komfort a zdraví člověka není doposud přesně známý [10]. Jisté je, že člověk špatně snáší extrémní stavy vzduchu, tj. příliš nízkou nebo příliš vysokou vlhkost. Nízká relativní vlhkost zvyšuje odpařování z nosních membrán a krku, vysoušení sliznic v dýchacím systému a vysoušení pokožky. Zvýšený výskyt dýchacích potíží (uvnitř budov) během zimy bývá často spojován s nízkou relativní vlhkostí [1]. Epidemiologické studie potvrzují vyšší míru výskytu respiračních onemocnění u pacientů v budovách s nízkou vlhkostí vzduchu (< 30 %) [1], [10].

Podle ASHRAE [1] má relativní vlhkost významný vliv na množství patogenních mikroorganismů ve vzduchu. Při 50% relativní vlhkosti je četnost výskytu většiny sledovaných mikroorganismů nejnižší. Vysoká vlhkost může podporovat růst choroboplodných nebo alergenních organismů. Z těchto důvodů by relativní vlhkost v obytných a pobytových prostorách měla být udržována mezi 30 až 60 % při pokojové teplotě (Sterlingův graf viz [1]).

V souvislosti s pandemií COVID-19 se často hovoří o minimální relativní vlhkosti ve veřejných budovách 30 % [2]. Uvádí se, že v suchém vnitřním prostředí ($\varphi_r < 30 \%$) je možnost přenosu COVID-19 vzduchem vyšší [5]. I když byla zpracována celá řada studií, neexistuje jednoznač-

ná odpověď na reakci viru při konkrétní relativní vlhkosti, nicméně na základě dřívějších studií se jako optimální rozmezí relativní vlhkosti ve vnitřním prostředí budov z hlediska lidského zdraví uvádí 40 až 60 % [2]. Problémem většiny obytných budov v ČR bývá spíše vysoká vlhkost vzduchu ve vnitřním prostředí, kvůli nedostatečnému větrání. Naopak v novostavbách vybavených nuceným větráním se často hovoří o „vysoušení“ vzduchu (tj. o poklesu relativní vlhkosti pod 30 %), což ale souvisí i s produkcí vodní páry, průtokem větracího vzduchu a rovněž s teplotou vzduchu (viz dále).

Přehled o studiích vlivu vlhkosti vnitřního vzduchu a vnímané kvalitě vnitřního vzduchu (IAQ) při dlouhodobém účinku nízké relativní vlhkosti dobře shrnul ve své práci Wolkoff (2018 [10]). Podle něj by obytné prostředí a veřejné (pracovní) prostředí měly být hodnoceny samostatně, jako samostatné entity s různými požadavky na vlhkost. Ve svém příznačně nazvaném příspěvku „Mystery of dry indoor air ...“ se Wolkoff (2018 [11]) zamýšlí nad pojmem „dry air“. Vnímání „suchého“ anebo „vlhkého“ vzduchu je stále považováno za individuální záležitost, protože senzorický orgán pro vlhkost u lidí neexistuje. Přestože jsou v kancelářích i v obytných budovách EU vedeny v patrnosti stížnosti na nízkou nebo vysokou vlhkost vzduchu, považuje Wolkoff pojmy „suchý vzduch“ nebo „vlhký vzduch“ za významově zavádějící. Hlavním důvodem stížností byla teplota vzduchu a nedostatečné větrání [12].

Wolkoff (2018 [11]) dále ve své obšírné studii týkající se vlivu relativní vlhkosti na IAQ zmiňuje složitost problematiky. Nízká i vysoká relativní vlhkost umožňuje snadnější přenos a přežití viru chřipky, což bylo dokumentováno v mnoha studiích. Nicméně dodává, že každý virus se chová odlišně a vztah mezi teplotou, vlhkostí a dynamikou aerosolů je velmi složitý a nakonec závisí na konkrétním typu viru a jeho fyzikálních/chemických vlastnostech.

Produkce vodní páry v obytném prostředí

V obytném prostředí dochází k přirozenému zvlhčování vzduchu běžnou lidskou činností. Podklady o produkci vodní páry v domácnosti však nejsou běžně k dispozici a mohou být značně rozdílné. Významným zdrojem jsou samotní obyvatelé – při celodenní přítomnosti většího počtu osob jde o základní položku ve vlhkovostní bilanci. Co se týče činností uživatelů bytu, významná je zejména produkce vodní páry při praní a sušení prádla ve vnitřních obytných prostorách. Dále pak sprchování a příprava pokrmů (vaření), které provází odpar z vodní hladiny a v některých případech produkce vodní páry při spalování plynu (vaření na plynovém sporáku). Zdrojem vodní páry jsou i činnosti spojené s úklidem.

Podklady o produkci vodní páry od osob se různí (Zemitis et al. 2016 [13]), neboť závisí na stupni fyzické aktivity, tepelném odporu oděvu, teplotě vzduchu, dalších parametrech vnitřního prostředí atd. Produkci vodní páry lze pro různé okrajové podmínky stanovit na základě tepelné bilance člověka [15]. V uvedené studii lze nalézt produkci citelného tepla a vodní páry od dětí i dospělých pro různé okrajové podmínky.

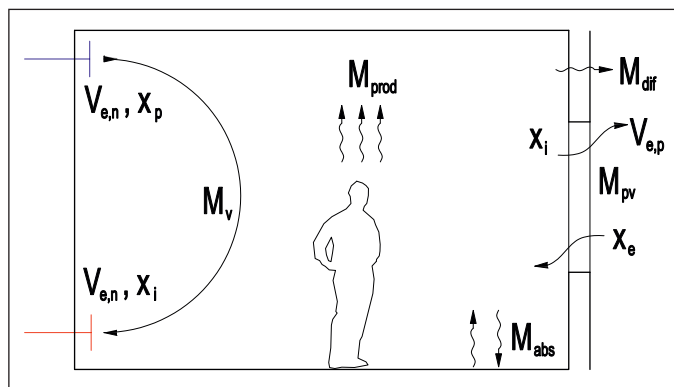
Základní údaje o produkci vodní páry uvádějí Angell and Olson (1988 [3]), ovšem údaje zde uvedené odpovídají době svého vzniku. Navíc práce pojednává o možném riziku poškození budovy v souvislosti se zvýšenou vlhkovostí vnitřního vzduchu v zimním období roku. TenWolde (2001 [6]) uvádí, s použitím vlastních údajů a údajů IEA z roku 1991, celkovou průměrnou produkci vodní páry v domácnosti v rozmezí 7,2 až 14,4 kg/den (tab. 1). Nižší hodnota platí pro domácnost obývanou 2 dospělými osobami, vyšší z obou hodnot odpovídá rodině se 3 dětmi. Nutno uvést, že od té doby se některé technické vybavení domácnosti poněkud změnilo, typickým příkladem jsou např. pračky s vysokými otáčkami pro odstředění prádla a častější používání myček nádobí nebo sušiček prádla. V další studii (TenWolde 2007 [7]) uvádí, že většinu zdrojů vlhkosti v domácnosti lze považovat za nezávislou na vlhkovosti vnitřního vzduchu s výjimkou produkce vlhkosti od květin a uvolňování vlhkosti ze základů budov, což lze ovšem obecně považovat za vadu budovy. Celková denní produkce vodní páry např. v čínské domácnosti činí až 12 kg a největším zdrojem jsou činnosti jako vaření, následované osobní hygienou a sušením prádla (Yik et al. 2004 [8]).

Autoři (Zemitis et al. 2016 [13]) se ve své studii zabývali produkcí vodní páry při praní a sušení různých druhů prádla. Zjistili, že pro jednu osobu

Tab. 1 Denní produkce vodní páry v obytném prostředí [7]

Tab. 1 Daily water vapour production in a residential environment [7]

Domácnost	1-2 dospělí	+1 dítě	+2 děti	+3 děti
Průměrná denní produkce (kg/den)	7,2	11,9	13,3	14,4



Obr. 1 Toky vlhkosti v obytném prostředí

Fig. 1 Moisture fluxes in the residential environment

Tab. 2 Produkce vodní páry dle ČSN EN 15665

Tab. 2 Water vapour production according to EN 15665

Činnost	Produkce vodní páry	
Vodní pára – bdělé osoby	55	g/h na osobu
Vodní pára – spící osoby	40	g/h na osobu
Snídaně	50	g/osoba
Svačina	75	g/osoba
Oběd	300	g/osoba
Vaření na plynovém sporáku	350	g/den
Sprcha	300	g/sprcha
Praní/sušení ve vnitřním prostředí	1200	g/praní
Četnosti jednotlivých činností		
Četnost sprchování	1	sprcha/osobu a den
Četnost praní	1	praní/osobu a týden

Tab. 3 Produkce vodní páry v obytném prostředí podle [4] a [7]

Tab. 3 Water vapour production according to [4] and [7]

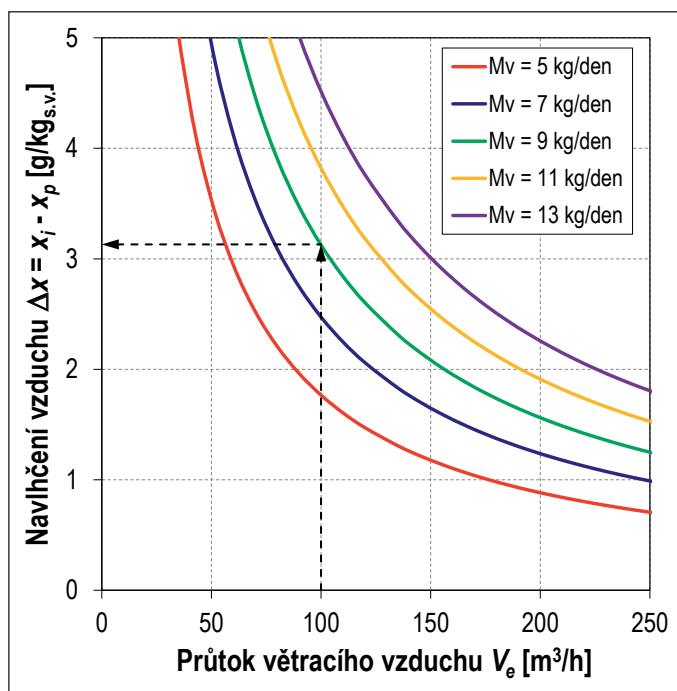
Zdroj		Produkce vodní páry	
Člověk	lehká činnost	30 – 60	g/h na osobu
	středně těžké práce	120 – 200	g/h na osobu
	těžká práce	200 – 300	g/h na osobu
Koupelna	s vanou	cca 700	g/h
	se sprchou	cca 2600	g/h
Kuchyně	při vaření	600 – 1500	g/h
	průměrně denně	100	g/h
Sušení prádla	odstředěné prádlo	50 – 200	g/h
	mokrě prádlo	100 – 500	g/h
Rostliny	pokojevé květiny	5 – 10	g/h
	rostliny v květináči	7 – 15	g/h
	rostliny střední velikosti	10 – 20	g/h

činí produkce vodní páry při sušení prádla ve vnitřním prostoru budov v průměru 1220 g/den oproti hodnotě 2000 g/den uváděné ve starší literatuře. Ve stejné studii je uvedena i produkce vodní páry od květin, která se pohybuje od 2 do 20 g/h podle druhu květiny.

Produkci vodní páry pro různé druhy lidské činnosti uvádí souhrnně norma EN 15665 (tab. 2). V tab. 3 jsou uvedeny publikované údaje (Jokl 2001 [4] a TenWolde [7]), které jsou poněkud odlišné od údajů uvedených v normě ČSN EN 15665 [16], nicméně mohou být využity při analýzách a v bilančních výpočtech. Na základě údajů uvedených v normě EN 15665 byly sestaveny modelové produkce vodní páry, viz [14]. Produkce vodní páry pro čtyřčlennou rodinu o víkendů (na základě tab. 2), kdy se předpokládá, že 16 h jsou přítomné osoby v bdělém stavu, činí 9 kg/den [14].

Navlhčení vzduchu v obytném prostředí

V obytném prostředí dochází vlivem činnosti člověka k produkci vodní páry \dot{M}_{prod} (obr. 1). Část vodní páry se sdílí do venkovního prostředí difúzí \dot{M}_{dif} , část je odváděna přirozeným větráním \dot{M}_{pv} (infiltrací a provětrávan-



Obr. 2 Navlhčení vzduchu v místnosti $\Delta x = x_i - x_p$ v obytném prostředí
Fig. 2 Room air humidification $\Delta x = x_i - x_p$ in a residential environment

ním) a část se pohlcuje/uvolňuje do/ze stavebních materiálů, nábytku apod. (\dot{M}_{abs}). Na navlhčení vnitřního vzduchu v obytném prostředí se tak podílí vlhkostní tok \dot{M}_v . V moderních obytných budovách je tento tok vodní páry odváděn trvalým nuceným větráním a lze ho stanovit jako:

$$\dot{M}_v = \dot{V}_{e,n} \rho (x_i - x_p) \quad [\text{kg/s}] \quad (1)$$

Jak bylo uvedeno výše, produkce vodní páry v obytném prostředí podílející se na navlhčení vzduchu závisí na chování člověka a jeho činnosti. Např. v zimním období lze předpokládat, že přirozené větrání bude potlačeno z důvodů energetických úspor.

Při znalosti produkce vodní páry, resp. množství vodní páry, která se podílí na navlhčení vzduchu \dot{M}_v [g/h] pro daný objemový průtok větracího vzduchu $\dot{V}_{e,n}$, lze z rovnice (1) stanovit navlhčení vnitřního vzduchu Δx . Na obr. 2 je znázorněna závislost navlhčení vzduchu na průtoku větracího vzduchu pro zadaný hmotnostní tok vodní páry \dot{M}_v . V případě použití větrací jednotky bez zpětného zisku vlhkosti je $x_p = x_e$.

MONITOROVÁNÍ RODINNÉHO DOMU

Pro sledování produkce vodní páry, resp. navlhčení vnitřního vzduchu od lidské činnosti, byl vybrán rodinný dům umístěný nedaleko od Prahy, postavený v nízkoenergetickém standardu. Jedná se o dvoupodlažní dům s obytným podkrovím o celkové podlahové ploše 175 m². Dům byl během měření obýván pětičlennou rodinou (2 dospělí a 3 děti ve věku 7, 12 a 15 let). Rodinný dům je vybaven trvalým rovnotlakým větráním, které obstarává větrací jednotka se zpětným získáváním tepla. Vytápění zajišťuje vodní otopná soustava s podlahovým vytápěním v 1. NP a otopnými deskovými tělesy v obytném podkroví. V době monitorování RD byl průtok vzduchu nastaven na trvale konstantní hodnotu 137 m³/h.

Měření probíhalo v zimním období v době od 24. 11. 2020 do 30. 3. 2021 za účelem stanovení produkce vodní páry od lidské činnosti, resp. produkce vodní páry, která se podílí na navlhčení vnitřního vzduchu. Větrání rodinného domu během zimního období bylo zajišťováno trvalým nuce-

ným větráním. Nárazovému přirozenému větrání se nelze zcela vyhnout, neboť souvisí zejména s otevíráním komunikačních otvorů (dveří) během pohybu osob z/do venkovního prostředí. Pro účely monitoringu byl větrací systém vybaven senzory pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu na sání venkovního vzduchu a odvodu vzduchu. Pro sledování kvality vnitřního vzduchu byla ve vybraných místnostech RD umístěna kombinovaná čidla CO₂, teploty a relativní vlhkosti. Zaznamenávání hodnot probíhalo v pětiminutových intervalech. Obsazenost rodinného domu byla sledována v hodinových intervalech. Přestože měření probíhalo v jednom rodinném domě, lze konstatovat, že každý den byl z hlediska přítomnosti osob, chování uživatelů a venkovních podmínek odlišný.

Tab. 4 Tabulka místností a průtoky vzduchu ve zkoumaném RD

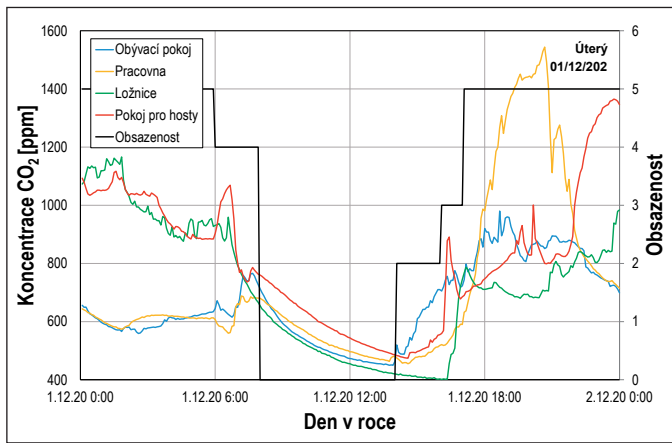
Tab. 4 List of rooms and air flows in the investigated family house

Místnost	Velikost		Trvalé nucené větrání		
	Plocha místnosti	Vnitřní objem místnosti	Přívod vzduchu	Odvod vzduchu	Intenzita větrání
	m ²	m ³	m ³ /h	m ³ /h	h ⁻¹
Obývací pokoj a kuchyně	43,7	113,6	52	-	0,45
Pracovna	12,3	32,1	14	-	0,44
Chodba	8,63	22,4	-	-	-
Hala a šatna	8,6	22,4	-	-	-
WC a sprcha	3,9	10,0	-	28	-
Technická místnost	6,3	16,3	-	25	-
Pokoj 1	21,3	46,9	22	-	0,47
Pokoj 2	20,9	51,1	25	-	0,48
Pokoj 3	20,9	51,1	25	-	0,49
Místnost pro hosty	8,8	14,9	-	-	-
WC	2,4	4,0	-	22	-
Koupelna	8,5	14,5	-	62	-
Chodba	8,63	21,1	-	-	-
CELKEM	175	420	137	137	

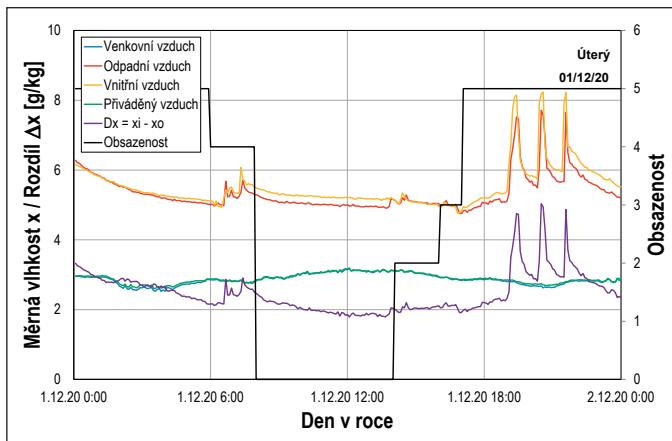
Souvislost mezi obsazeností prostoru a produkcí vodní páry

Na obr. 3a je znázorněn průběh koncentrace CO₂ v obytných místnostech během typického všedního dne. Záměrně byl vybrán den v týdnu, kdy všichni obyvatelé domu odcházejí ráno do práce nebo do školy. Z průběhu koncentrace CO₂ je dobře patrný pokles mezi 8.00 až 14.00 hodinou, kdy se v domě nikdo nenachází. Zhruba po 14.00 hodině dochází k návratu obyvatelů domu, což koresponduje s opětovným nárůstem koncentrace CO₂. Patrný je rovněž pokles koncentrace během noci v obývacím pokoji a pracovně, kdy se obyvatelé domu přesouvají do ložnic. Uvedený profil by se dal považovat za typický během všedního dne.

I když je vodní pára metabolit, stejně tak jako CO₂, průběh měrné vlhkosti v domě je zcela odlišný. Z průběhu měrné vlhkosti je patrný poměrně vyrovnaný průběh. Zdroje vodní páry (vlhkosti) totiž nesouvisí pouze s přítomností člověka, ale hlavně s jeho činností, vodními plochami apod. Na obr. 3b jsou znázorněny průběhy měrné vlhkosti naměřené ve větracím systému během jednoho dne. Vlhkosti vzduchu monitorované na sání venkovního vzduchu a na přívodní výusti v technické místnosti jsou shodné. Vlhkost odváděného vzduchu byla monitorována ve dvou



a)



b)

Obr. 3 Průběh CO₂ ve vybraných místnostech (a) a měrné vlhkosti ve větracím systému (b)

Fig. 3 Time course of CO₂ in selected rooms (a) and specific humidity in the ventilation system (b)

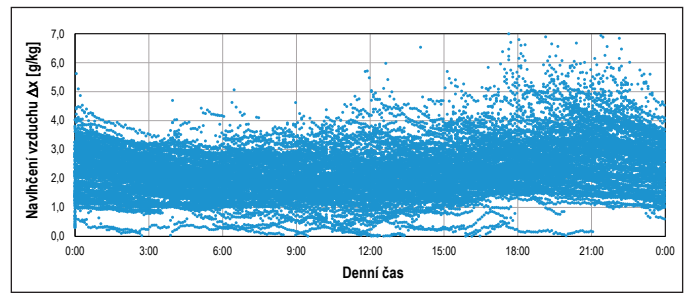
místech potrubního systému v technické místnosti. Odpadní vzduch představuje vzduch, který opouští budovu, naproti tomu vnitřní vzduch je vzduch odváděný z obytného prostoru. V technické místnosti dochází k praní a sušení prádla a odvod vzduchu z místnosti způsobuje odlišnost obou hodnot v závislosti na produkci vodní páry v technické místnosti. Z obr. 3b jsou zřejmé zejména výkyvy průběhu měrné vlhkosti v době osobní hygieny, tj. mezi 7.00 a 8.00 hodinou ránní a 20.00 až 22.00 hodinou večerní, kdy měrná vlhkost odváděného vzduchu dosahuje maximálních hodnot.

Navlhčení vzduchu

Na základě naměřených údajů měrné vlhkosti byla vyhodnocena produkce vodní páry \dot{M}_v , která se podílí na navlhčení vzduchu. Na obr. 4 je znázorněn průběh navlhčení vzduchu Δx během všech zkoumaných dnů v pětiminutových intervalech (jedná se o průběhy Δx z obr 3b během všech dní monitoringu v jednom grafu). Z výsledků je zřejmý stabilní trend produkce vodní páry prakticky během každého dne. Viditelná je oblast produkce vodní páry v době večerní hygieny cca od 19.00 do 22.00 hodin.

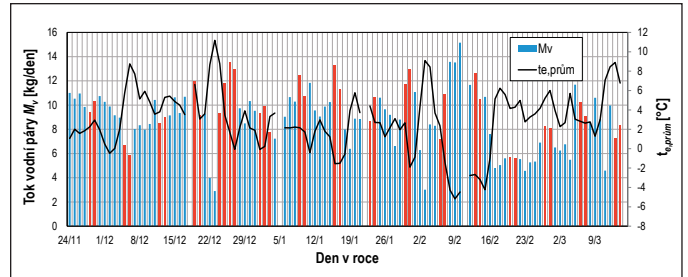
Produkce vodní páry, která se podílí na navlhčení vzduchu v daném čase τ , se stanoví podle rovnice:

$$\dot{M}_{v,\tau} = \dot{V}_{e,n} \rho (x_{i,\tau} - x_{e,\tau}) \quad [\text{kg/h}] \quad (2)$$



Obr. 4 Navlhčení vnitřního vzduchu Δx během monitoringu RD

Fig. 4 Indoor air humidification Δx during monitoring of the family house



Obr. 5 Denní produkce vodní páry podílející se na navlhčení vnitřního vzduchu M_v (červeně: víkendy a svátky)

Fig. 5 Daily water vapour production contributing to indoor air humidification M_v (red: weekends and holidays)

kde je:

τ čas,
 $\dot{V}_{e,n}$ průtok vzduchu [m^3/h].

Průměrný hmotnostní tok vodní páry pak bude:

$$\dot{M}_{v,\text{prům}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \dot{M}_{v,\tau} d\tau \quad [\text{kg/h}] \quad (3)$$

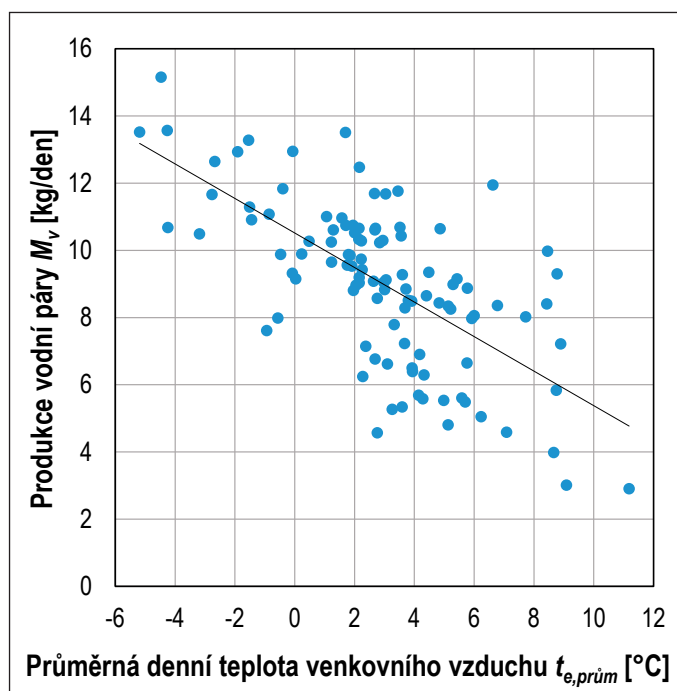
a výsledný tok vodní páry za den:

$$\dot{M}_v = 24 \dot{M}_{v,\text{prům}} \quad [\text{kg/den}] \quad (4)$$

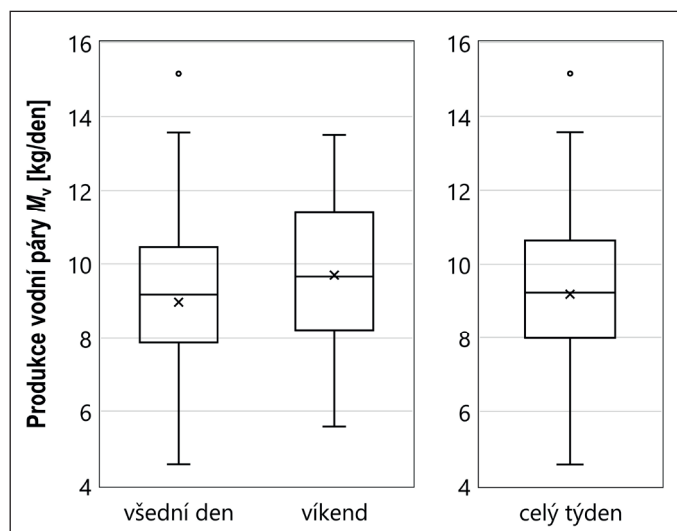
Výsledky v podobě celkového denního toku vodní páry M_v [kg/den] jsou znázorněny na obr. 5. V grafu je rovněž zobrazena průměrná denní teplota venkovního vzduchu. Jak bude uvedeno dále, chování uživatelů v rodinném domě ovlivňují podstatně venkovní klimatické podmínky. Z výsledků na obr. 5 je patrná nízká produkce vodní páry ve dnech s vyšší průměrnou teplotou venkovního vzduchu, tj. ve dnech 5., 6., 22. a 23. prosince a dalších. Tento pokles je patrně zapříčiněn odlišným přístupem uživatelů domu v době, kdy teplota venkovního vzduchu během dne vzrostla nad 8 °C. V těchto dnech se na větrání domu včetně odvodu vlhkostní zátěže významnou měrou podílelo přirozené větrání díky častějšímu otevření komunikačních otvorů, např. dveří na terasu. Pro celkové vyhodnocení produkce \dot{M}_v nejsou dny, kdy je $t_e > 8$ °C, uvažovány.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Na obr. 6a je znázorněna produkce vodní páry \dot{M}_v v závislosti na průměrné teplotě venkovního vzduchu. Z grafu je možné sledovat určitý trend, kdy s klesající teplotou venkovního vzduchu roste navlhčení



a)



b)

Obr. 6 Produkce vodní páry podílející se na navlhčení vnitřního vzduchu M_v v monitorovaném RD

Fig. 6 Water vapour production contributing to indoor air humidification M_v in the monitored family house

vzduchu v obytném prostředí. Uvedený trend nelze zobecnit, nicméně je zjevné, že souvisí s chováním obyvatel rodinného domu. S rostoucí teplotou venkovního vzduchu se člověk chová jinak, přirozené větrání je častější, komunikační otvory jsou častěji otevřeny. Naopak při nízkých teplotách venkovního vzduchu obyvatelé domu šetří energii, přirozené větrání je potlačeno a většina vodní páry zůstává v obytném prostředí. Zobrazený trend by bylo vhodné ověřit měření na více RD vybavených nuceným větráním.

Statistické vyhodnocení výsledků produkce vodní páry M_v , která se podílí na navlhčení vnitřního vzduchu, je znázorněno na obr. 6b. Z výsledků je zřejmé, že rozdíl mezi produkcí vodní páry během všedního dne a víkendového dne je minimální (i když do měření zasáhl nestandardní stav v době pandemie). K odvodu vodní páry z prostoru zkoumaného

rodinného domu dochází prakticky nepřetržitě, bez ohledu na obsazenost prostoru. Důvodem je neustálá přítomnost vodních ploch, květin a dalších zdrojů vlhkosti a rovněž povrchů, které pohlcují a uvolňují vlhkost. Na navlhčení vnitřního vzduchu ve zkoumaném rodinném domě se podílí tok vodní páry běžně v rozmezí 8 až 11 kg/den, což poměrně dobře koresponduje s tabelárními údaji z normy EN 15 665. Je zajímavé, že produkce vodní páry v obytném prostředí je poměrně stabilní – k výrazným výkyvům dochází pouze v době osobní hygieny obyvatel domu (ráno mezi 6.00 až 8.00 hodinou a večer mezi 20.00 až 22.00 hodinou). Z uvedeného je zřejmé, že vlhkostní tok podílející se na navlhčení vnitřního vzduchu M_v je během dne prakticky trvalý. Svou roli zde hraje adsorpce/desorpce vodní páry z/do stavebních materiálů, nábytku apod. Z hlediska obsazenosti prostoru byly vyšší hodnoty produkce vodní páry zaznamenány během svátečního (vánočního) období v době návštěv.

Kvalita vnitřního vzduchu v době monitorování RD

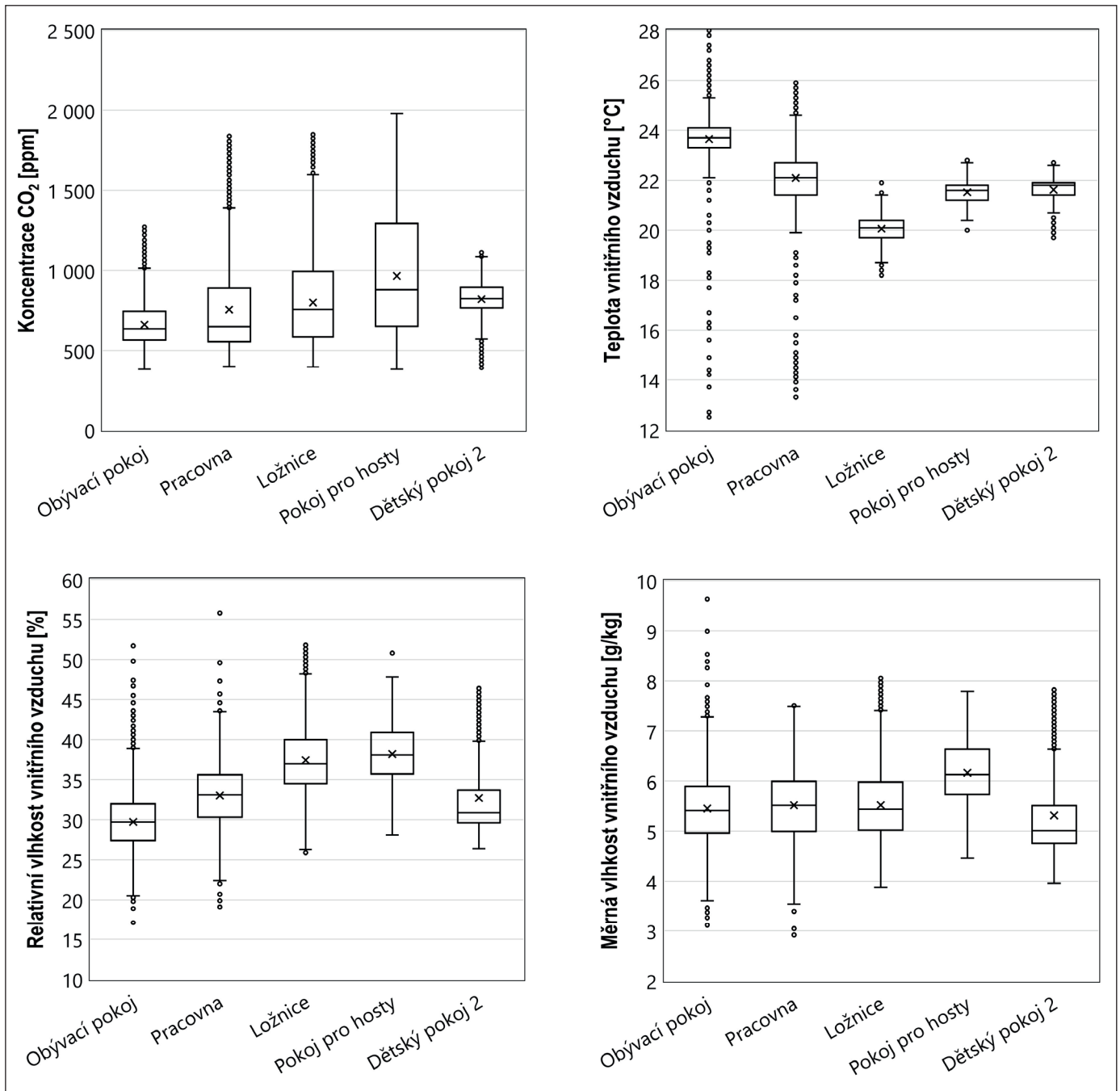
Během monitorování větracího systému za účelem zjištění produkce vodní páry od lidské činnosti v obytném prostředí byly zároveň ve vybraných místnostech monitorovány parametry vnitřního vzduchu (IAQ). Výsledky měření teploty vzduchu, relativní vlhkosti vzduchu a koncentrace CO_2 jsou znázorněny na obr. 7.

Je zřejmé, že koncentrace CO_2 ve vybraných prostorách zřídka překračuje hodnotu 1500 ppm, s výjimkou pokoje pro hosty, který není vybaven nuceným přívodem vzduchu. V době monitorování RD zde pobývalo jedno dítě (12 let). Z uvedeného lze konstatovat, že větrání rodinného domu je postačující pro zajištění požadované kvality vzduchu. Teplota vnitřního vzduchu se pohybovala nejčastěji v rozmezí 20 až 24 °C. Výrazně proměnná byla teplota vzduchu v pracovně, jejíž užívání je nahodilé. Nejnižší teploty byly zaznamenány v ložnici 1. Teplota vzduchu v obývacím pokoji byla poměrně vysoká, jedná se tradičně centrum rodinného domu, které je navíc zatížené vnitřními tepelnými zisky od zdrojů tepla (kuchyňské spotřebiče, TV, osvětlení, krb). Vysoká teplota vzduchu v obývacím pokoji společně s poměrně

Tab. 5 Výskyt měrné vlhkosti během roku ve vybraných lokalitách

Tab. 5 Occurrence of specific humidity during the year in the selected locations

Lokalita	Výskyt měrné vlhkosti x_e během roku v hodinách			
	≤ 1 g/kg	1 až 2 g/kg	2 až 3 g/kg	≥ 3 g/kg
Plzeň Mikulka	2	178	777	957
Hradec Králové	60	274	695	1029
Cheb	0	236	849	1085
Prostějov	4	222	890	1116
Praha Ruzyně	11	360	758	1129
Mariánské Lázně	66	348	734	1148
Čáslav	1	278	873	1152
České Budějovice	3	300	857	1160
Karlovy Vary	0	208	976	1184
Dukovany	0	188	1049	1237
Ústí nad Orlicí	24	416	800	1240
Kunovice	0	188	1054	1242
Brno Tuřany	0	287	965	1252
Ústí nad Labem	0	253	1006	1259
Liberec	67	335	869	1271

Obr. 7 Teplota, vlhkost a koncentrace CO₂ ve zkoumaných místnostechFig. 7 Temperature, humidity and CO₂ concentration in the studied rooms

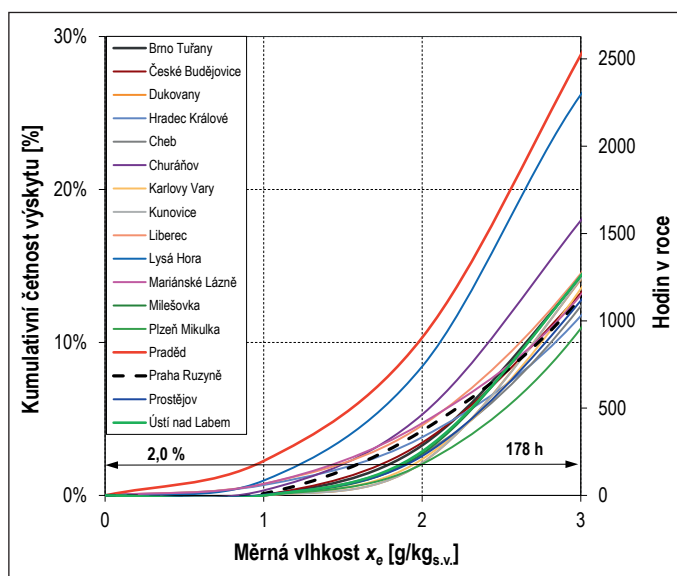
vysokým průtokem větracího vzduchu (tab. 4) má spojitost s nízkou relativní vlhkostí vzduchu (běžně 27 až 32 %). V ostatních místnostech byla měřena relativní vlhkost většinu času nad hodnotou 30 %. Z grafu na obr. 7 je patrná stálost měrné vlhkosti, která se ve zkoumaném obytném domě pohybuje nejčastěji v rozmezí 5 až 6 g/kg. Výjimkou je opět místnost pro hosty, která není vybavená trvalým nuceným větráním.

Klimatické podmínky ČR

Na obr. 8 je znázorněna kumulativní četnost výskytu měrné vlhkosti ve vybraných lokalitách ČR v letech 2004 až 2018 (hodinové údaje). V grafu jsou zobrazeny pouze měrné vlhkosti do 5 g/kg_{s.v.}. Je zřejmé, že většina vybraných lokalit v ČR se chová víceméně obdobně, s výjimkou horských lokalit (Praděd, Lysá Hora, Churáňov). Například pro Prahu Ruzyni lze z grafu vyčíst, že měrná vlhkost venkovního vzduchu:

- $x_e \leq 1 \text{ g/kg}_{s.v.}$ nastává v 0,13 % případů (100 % = 8760 hodin), tj. 11 hodin v roce,
- $x_e \leq 2 \text{ g/kg}_{s.v.}$ nastává v 4,1 % případů, tj. 371 hodin, resp. 15 dní v roce,
- $x_e \leq 3 \text{ g/kg}_{s.v.}$ nastává v 12,9 % případů, tj. 1129 hodin, resp. 47 dní v roce,
- atd.

Pro vybrané lokality je tento výběr uveden v tab. 5. Je zřejmé, že měrná vlhkost venkovního vzduchu obecně neklesá pod 1 g/kg a „suchý“ venkovní vzduch lze v městských oblastech očekávat po velmi omezenou část roku, zpravidla je to nejchladnější období roku. Často se argumentuje tím, že v době, kdy je venkovní vzduch suchý, dochází k vysoušení vnitřního prostoru. Jak ukazuje tato studie, nejchladnější část roku je z pohledu chování obyvatel rodinného domu spojena s významným nahřčením vzduchu od lidské činnosti.



Obr. 8 Kumulativní četnost výskytu měrné vlhkosti pro různé lokality v ČR
 Fig. 8 Cumulative frequency of specific humidity for different locations in the Czech Republic

ZÁVĚR

Produkce vodní páry v obytném prostředí závisí na druhu lidské činnosti, její četnosti apod. Část této produkce se podílí na navlhčení vnitřního vzduchu Δx , které je v průběhu dne poměrně stabilní. Navlhčení vzduchu se v čase významně nemění, s výjimkou nárazových činností spojených s hygienou člověka. I proto se pro obytné prostředí obecně doporučuje trvalé větrání. Na základě prezentovaných výsledků měření v konkrétním RD byla zjištěna produkce vodní páry v rodinném domě obývaném pětičlennou rodinou v průměru 10 kg/den během zimních měsíců roku 2019/2020. Tato hodnota odpovídá přibližně tabelárním údajům uvedeným v normě EN 15 665 pro čtyřčlennou rodinu a víkendový den. Monitorování rodinného domu však neprokázalo významné rozdíly v produkci vodní páry mezi všedním a víkendovým dnem.

Z předložené analýzy zejména vyplývá, že navlhčení vnitřního vzduchu ve zkoumaném rodinném domě závisí nejen na druhu činnosti, její četnosti apod., ale zřejmě i na odlišném chování člověka při rozdílných venkovních klimatických podmínkách. V době, kdy je venku chladno, omezuje obyvatel RD přirozené větrání, které je mj. způsobeno i pohybem člověka z venkovního do vnitřního prostoru. K vysoušení vnitřního prostředí (poklesu relativní vlhkosti pod 30 %) dochází ve zkoumaném RD po velmi omezenou část roku a hlavním důvodem je zejména „přetápění“ místností.

Vodní pára je z obytného prostoru odváděna větracím vzduchem. Nadměrné zvlhčování ve spojitosti s nedostatečným větráním vede ke zvýšené vlhkosti vnitřního vzduchu a hrozí riziko kondenzace vodní páry na chladných částech obvodového pláště budovy a následná tvorba plísní. Vysoušení vzduchu, tj. pokles relativní vlhkosti pod stanovenou minimální hodnotu ($\varphi_r < 30\%$) může způsobovat buď vysoký průtok větracího vzduchu, nebo přetápění místností ($t_i > 22\text{ °C}$), což je dokumentováno na zkoumaném rodinném domě. Na druhou stranu s umělým zvlhčováním vzduchu v obytném prostředí (včetně použití výměníků pro zpětné získávání vlhkosti) je potřeba pracovat opatrně. K navlhčení vnitřního vzduchu v obytných budovách v našich klimatických podmínkách většinou postačí přirozená lidská činnost. Navlhčení vnitřního vzduchu v obytném prostředí s trvalým nuceným větráním lze regulovat průtokem venkovního vzduchu.

Prezentovaná studie byla realizována na příkladu konkrétního rodinného domu a chodu domácnosti. I když výsledky produkce vodní páry nejsou v rozporu s publikovanými údaji, nelze je zcela zobecnit. Řada rodinných domů není vybavena nuceným větráním a chování uživatelů tak bude poněkud odlišné. Stejně tak je zcela odlišné chování uživatelů v bytech, včetně zajištění větrání. Výsledky však naznačují, že produkce vodní páry v obytném prostředí je značná, a pokud není účinně odváděna větráním, může to způsobovat problémy. Vysoušení vzduchu nemůže být argumentem proti použití nuceného větrání v obytných budovách.

Kontakt na autora: Vladimír.Zmrhal@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment. 2021.
- [2] AHLAWAT, A., WIEDENSOHLER, A., MISHRA, S. K. An Overview on the Role of Relative Humidity in Airborne Transmission of SARS-CoV-2 in Indoor Environments. *Aerosol Air Qual. Res.* 2022, 20, 1856–1861.
- [3] ANGELL, W. J., OLSON, W. W. *Moisture Sources Associated with Potential Damage in Cold Climate Housing*. CD-F00-3405-1988. University of Minnesota, St. Paul, MN: Cold Climate Housing Information Center, Minnesota Extension Service, 1988.
- [4] JOKL, M. *Teorie vnitřního prostředí budov*. Učební texty. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2011.
- [5] NOORIMOTLAGH, Z., JAAFARZADEH, N., MARTÍNEZ, S. S., MIRZAEI, S. A. A systematic review of possible airborne transmission of the COVID-19 virus (SARS-CoV-2) in the indoor air environment. *Environmental Research*. 2021, 193, 110612.
- [6] TENWOLDE, A., WALKER, I. Interior moisture design loads for residences. In: *Proc. of Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes*. 001, December 2001, Atlanta, USA, pp 6.
- [7] TENWOLDE, A., PILON, C. L. The effect of indoor humidity on water vapor release in homes. In: *Proc. of 30 Years of Research, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings*. X, 2–7 December 2007. Atlanta, GA, ASHREA, 1–9.
- [8] YIK, F. W. H., SAT, P. S. K., NIU, J. L., Moisture generation through chinese household activities. *Indoor Built Environ.* 2004, 13(2), 115–131.
- [9] WOLKOFF, P., KJÆRGAARD, S. K. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environment International*. 2007. vol. 33, p. 850–857.
- [10] WOLKOFF, P. Indoor air humidity, air quality, and health – An overview. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2018, Vol. 221, 376–390.
- [11] WOLKOFF, P. The mystery of dry indoor air – An overview. *Environment International*. 2018, 121, 1058–1065.
- [12] WYON, D., FANG, L., LAGERCRANTZ, L., FANGER, P. O. Experimental Determination of the Limiting Criteria for Human Exposure to Low Winter Humidity Indoors. *HVAC&R Research*. 2006. vol. 12, no. 2, p. 201–213, ASHRAE.
- [13] ZEMITIS, J., BORODINECS, A., FROLOVA, M. Measurements of moisture production caused by various sources. *Energy and Buildings*. 2016, 127, 884–891.
- [14] ZMRHAL, V., ŠTÁVOVÁ, P. Bilance vlhkosti v obytném prostředí. *Vytápění, větrání, instalace*. 2011, 20(3), 104–107. ISSN 1210-1389.
- [15] ZMRHAL, V. Produkce tepla osob jako podklad pro energetické simulační výpočty. *Vytápění, větrání, instalace*. 2017, 26(4), 234–239.
- [16] ČSN EN 15665:2009. Větrání budov – Stanovení výkonových kritérií pro větrací systémy obytných budov.

Seznam označení:

- c měrná tepelná kapacita [J/(kgK)]
- \dot{M} hmotnostní tok [kg/s]
- t teplota [°C]
- \dot{V} objemový průtok [m³/s]
- x měrná vlhkost [g/kg_{s.v.}]
- ρ hustota vzduchu [kg/m³]
- τ čas [h]