FORUM / 2020 / ROČ. X / Č. 2

PRO KONZERVÁTORY-RESTAURÁTORY
FORUM FOR CONSERVATORS-RESTORERS

2020 / Vol. X / No. 2
Peer-reviewed open access journal

Chief editor: Ing. Alena Selucká
Editors: Mgr. Pavla Stöhrová, Mgr. Jana Fricová

Editorial Board:
Ing. Ivo Štěpánek (Head of Editorial Board)
doc. Dr. Ing. Michal Ďurovič
akad. mal. Igor Fogaš
Ing. Pavel Jirásek
Ing. Jan Josef
doc. akad. soch. Petr Kuthan
prof. RNDr. Jiří Příhoda, CSc.
Ing. Radka Šefců
Mgr. Pavla Stöhrová (Secretary)

Open acces since 2020 available for free
on https://mck.technicalmuseum.cz/casopis-fkr/
The journal is indexed and abstracted in EBSCO.

Published by:
Technické muzeum v Brně
Purkyňova 105, 612 00 Brno, Czech Republic

Contact for communication:
fricova@tmbrno.cz / stohrova@tmbrno.cz / selucka@tmbrno.cz

© Technické muzeum v Brně, 2020
ISSN (Online) 2571-4384
ISBN (Print) 1805-0050

TECHNICKÉ MUZEUM V BRNĚ

METODICKÉ CENTRUM KONZERVACE

ZHODNOCENÍ TĚSNOSTI MUZEJNÍCH VITRÍN NA PRINCIPU MĚŘENÍ KONCENTRACE CO_2

Lukáš Foret • Alena Selucká

Metodické centrum Technického muzea v Brně

Mgr. Lukáš Foret, Dis., absolvoval obor Chemie konzervování-restaurování na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně, kde se v rámci studentské práce zaměřil na hodnocení a regulaci mikroklimatických podmínek při vystavování artefaktů. V současné době působí na oddělení vědy a výzkumu Metodického centra konzervace Technického muzea v Brně. (foret@tmbrno.cz)

Z hlediska zajištění stabilního mikroklimatu je kvalita muzejních vitrín a úložných boxů dána zejména jejich dobrou těsností, která je kvantifikována intenzitou výměny vzduchu. Umožňuje zhodnotit použitelnost vitrín pro vystavení předmětů, které jsou náročné na klimatické podmínky. V tomto článku je zkoumáno měření těsnosti na základě poklesu koncentrace oxidu uhličitého. Cílem je zhodnotit použitelnost této metody v běžné konzervátorské praxi a porovnat těsnost různých muzejních vitrín v Technickém muzeu v Brně. V návaznosti na různé hodnoty intenzity výměny vzduchu se okrajově také zabývá výpočtem množství silikagelu, potřebného ke stabilizaci relativní vlhkosti vzduchu uvnitř sledovaných úložných systémů.
Klíčová slova: těsnost; oxid uhličitý; muzejní vitrína; silikagel; mikroklima

TIGHTNESS OF MUSEUM SHOWCASES ASSESSMENT BASED ON MEASURING OF CO_2 CONCENTRATION To ensure a stable microclimate, the quality of museum showcases, and storage boxes is given mainly by their good tightness, which is quantified by the intensity of air exchange. It makes it possible to evaluate the usability of showcases for displaying of objects that are dependent on special climatic conditions. This paper examines the measurement of tightness based on the decrease in carbon dioxide concentration. The aim is to evaluate the applicability of this method in common conservation practice and to compare the tightness of various museum showcases in the Technical Museum in Brno. Following the various values of the air exchange intensity, it also marginally deals with the calculation of silica gel amount needed to stabilize the relative humidity of the air inside the monitored storage systems.
Keywords: tightness; carbon dioxide; museum showcase; silica gel; microclimate

Zásadním požadavkem při vystavování a uložení muzejních exponátů a sbírkových předmětů je schopnost kontrolovat klimatické podmínky. Ve většině muzeí mají předměty různou materiálovou povahu, jež vyžaduje různé podmínky. Obecně lze říci, že pro kovy je vhodnější nízká relativní vlhkost vzduchu, oproti tomu organické materiály, jako textil, dřevo a useň, vyžadují vlhkost vyšší, okolo 50 % při běžné teplotě. Pro mnohé materiály mohou být však doporučeny i odlišné hodnoty relativní vlhkosti a teploty vzduchu, se kterými jsou tyto materiály ve vzájemné rovnováze. Zajištění dlouhodobě stabilních klimatických podmínek se většinou neobejde bez pokročilých klimatizačních systémů, které jsou náročnější na instalaci i finanční náklady. V muzejní praxi se setkáváme s různými typy budov s odlišnými možnostmi regulace vnitřních podmínek, kde je dosažení přísně stanovených klimatických parametrů pro vystavování či uchovávání historických materiálů často nereálné. Řešením je proto využívat při vystavování vhodné vitríny a při uložení uzavřené boxy, doplněné o sorpční materiály na bázi silikagelu, které jsou schopny zmenšovat výkyvy relativní vlhkosti okolního vzduchu. Těsnost vitríny má zásadní vliv na regulovatelnost mikroklimatu a celkově tedy i na kvalitu ochrany exponátů. Vyšší těsnost zmenšuje výměnu vzduchu a umožňuje udržovat požadovanou vlhkost, stejně tak zabraňuje pronikání polutantů z vnějšího prostředí. Tento faktor však klade vysoké nároky na konstrukci vitríny. Materiály používané ke zhotovení vitrín musí zajistit bezpečné prostředí a ochranu proti fyzickému poškození, splňovat vysoké nároky na těsnost a nesmí samy uvolňovat nežádoucí polutanty, jež by se ve vitríně koncentrovaly. Na druhou stranu by měly umožnit přístup pro manipulaci a instalaci exponátů.

KONTROLA VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

Těsnost vitrín se měří intenzitou výměny vzduchu za den N (v anglické literatuře AER – Air Exchange Rate) nejčastěji měřením poklesu koncentrace sledovacího plynu nebo relativní vlhkosti v čase. Změna relativní vlhkosti se na první pohled jeví jako nejjednodušší metoda a v prvotních studiích byla často využívána [PADFIELD, 1966; THOMSON, 1977], ale má několik nevýhod. Zásadně ji ovlivňuje kolísání teploty, navíc některé materiály, zejména organické, vlhkost pohlcují a uvolňují. Tato skutečnost je nevýhodou při měření těsnosti, ale dá se využít ke snížení výkyvů relativní vlhkosti. Pozdější studie využívají sledovací plyny – nejčastěji oxid uhličitý, oxid dusný, kyslík a fluorid sírový. Brimblecombe a Ramer [1983] měřili úbytek oxidu uhličitého a pronikání kyslíku plynovou chromatografií ve vitríně vyčištěné dusíkem. Cass et al. [1989] použil na měření úbytku fluoridu sírového plynovou chromatografií s detekcí elektronovým záchytem. Daniel a Maekawa [1992] měřili pronikání atmosférického kyslíku za použití kyslíkového detektoru. Cassar and Martin [1994] a Potter [1998] použili jako sledovací plyn oxid dusný. Weintraub [2002] uvádí, že neexistuje

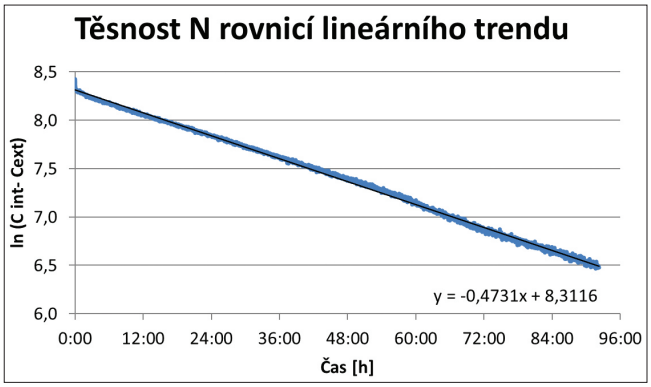
jednoduchý, levný standardní způsob měření těsnosti vitrín. Calver et al. [2005] srovnává použití oxidu dusného a oxidu uhličitého za použití ručních přenosných detektorů. Stejně jako se vyvíjela metodika měření těsnosti, měnila se i doporučená těsnost. Thomson v roce 1977 udává jako dostačující těsnost 1 den^{-1}, současný požadavek na dobře těsnící vitrínu je 0,1 den^{-1}.

Pokud do uzavřeného prostoru zavedeme sledovací plyn, bude jeho koncentrace v čase klesat v závislosti na tom, jak uniká ven a dovnitř se dostává vzduch z okolí. Pokud se vnější podmínky nemění, klesá koncentrace sledovacího plynu v čase exponenciálně. Přirozeným logaritmem exponenciální křivky koncentrace dostaneme přímku, jejíž sklon vyjadřuje počet výměn vzduchu za den. Četnost výměny u plynů je závislá na rozdílu koncentrací venku a vně uzavřeného prostoru, a proto je nezbytné znát i venkovní koncentraci a při výpočtu ji odečíst. Vzorec pro výpočet četnosti výměny vzduchu N je následující:

$$N = \frac{[ln(c_{int}^{t_0} - c_{ext}) - ln(c_{int}^{t_1} - c_{ext})]}{t_1 - t_0}$$

N je těsnost vnitřního prostředí vyjádřená počtem výměn vzduchu za den,
c_{int}^{t0} je počáteční koncentrace sledovacího plynu ve vnitřním prostředí,
c_{int}^{t1} je konečná koncentrace sledovacího plynu ve vnitřním prostředí,
c_{ext} je koncentrace sledovacího plynu ve vnějším prostředí,
t_0 je počáteční čas ve dnech,
t_1 je koncový čas ve dnech,
ln je přirozený logaritmus.

Druhý způsob, kterým se dá vypočítat těsnost N, je proložení spojnice trendu grafem logaritmického poklesu koncentrace oxidu uhličitého v čase. Na ose Y je přirozený logaritmus rozdílu vnitřní a vnější koncentrace. Na ose X je čas v hodinách. Při konstantní těsnosti tvoří hodnoty klesající přímku a její sklon odpovídá těsnosti N. Tento způsob je znázorněn v grafu 1, hodnota N je 0,47 den^{-1}.



Graf 1 Grafické vyjádření těsnosti / Graphical display of tightness

Thomson zavedl do praxe pojem hygrometrický poločas $t_{1/2}$ jakožto čas, za který relativní vlhkost vnitřního prostředí klesne z požadované hodnoty na polovinu vůči vnějšímu prostředí. Poločas je možné používat i pro koncentraci sledovacího plynu. Je vhodným parametrem pro určení množství sorbentu k udržení určité relativní vlhkosti po danou dobu nebo pronikání kyslíku do prostor, kde je kyslík nežádoucí. Obecná rovnice pro výpočet poločasu je následující:

$$t_{1/2} = \frac{0{,}693}{N}$$

K výpočtu množství sorbentu slouží následující rovnice:

$$t_{1/2} = \frac{4\,M\,B}{N}$$

$t_{1/2}$ je hygrometrický poločas,
M je specifická vlhkostní kapacita, definovaná jako množství vody pohlcené nebo uvolněné 1 kilogramem sorbentu na zvýšení relativní vlhkosti o 1 %,
B je rozměrový faktor sorbentu, množství suchého sorbentu v kilogramech na metr krychlový vnitřního prostředí,
N je těsnost vnitřního prostředí vyjádřená počtem výměn vzduchu za den.

Na základě této rovnice Thomson stanovil množství sorbentu pro teoretickou vitrínu, která sama udržuje klima. Vychází z předpokladu, že při poločase 150 dní se střídá suché zimní a vlhké letní klima. V zimním období sorbent vlhkost uvolňuje a v létě pohlcuje nadbytečnou vlhkost. Množství sorbentu pro takovou vitrínu je 18,75 kg m^{-3} pro silikagel s vlhkostní kapacitou M = 2 g kg^{-1} a těsnost vitríny N = 1 den^{-1}. Použití klasického silikagelu by bylo vhodné pro udržení nízké relativní vlhkosti, cca do 30 %. Pokud by měla vitrína udržovat relativní vlhkost v rozmezí 40–60 %, bylo by vhodné použít Prosorb. Množství sorbentu by se snížilo na 7 kg m^{-3}, jelikož Prosorb má vyšší specifickou vlhkostní kapacitu M = 5,3 g kg^{-1}.

$$B = \frac{t\,.\,N}{4\,.\,M}$$

$$18{,}75\ kg\ m^{-3} = \frac{150\,.\,1}{4\,.\,2}$$

Modernější rovnici pro výpočet množství sorbentu s větším množstvím parametrů uvádí Weintraub [2002]:

$$Q = \frac{(C_{eq}D)V(Nt)}{(M_H F)}$$

Q je množství sorbentu v kilogramech,
C_{eq} je koncentrace vodní páry při nasycení při danou teplotou (20 g m^{-3} při 22,7 °C),
D je maximální rozdíl relativních vlhkostí uvnitř a vně (například pokud má vitrína udržet relativní vlhkost 45–55 % v místnosti s vlhkostí 35–65 % bude D = 10 % tedy 0,1),
V je objem vitríny v m^3,
N je těsnost, jednotkou je počet výměn vzduchu za den,
t je maximální počet dní, po které se mají udržet dané podmínky,
M_H je kapacita sorbentu při daném rozmezí relativní vlhkosti v závislosti na hysterezi,
F je rozdíl maximální a minimální požadované relativní vlhkosti ve vitríně.

Účelem této studie je vypracovat metodiku vhodnou pro měření těsnosti vitrín a úložných boxů v muzejních podmínkách s důrazem na jednoduchost a dostupnost. Dalším cílem je porovnání těsnosti různých vitrín používaných v Technickém muzeu v Brně a využití získaných výsledků k výpočtu požadovaného objemu silikagelu a režimu jeho výměny.

OXID UHLIČITÝ

K experimentům bylo použito měření úbytku oxidu uhličitého. Oxid uhličitý je bezbarvý plyn těžší než vzduch, jenž je přirozenou součástí atmosféry, v níž se vyskytuje v obsahu cca 400 ppm. Vzniká přirozenými i umělými procesy, jako například hořením, dýcháním a kvašením. Chemicky se připravuje reakcí kyselin s uhličitany nebo žíháním vápence. Průmyslově se využívá jako inertní plyn, hasivo, chladivo nebo superkritické rozpouštědlo v potravinářském průmyslu. Kromě měření těsnosti vitrín může být v muzejních podmínkách využito sledování koncentrace oxidu uhličitého i při hodnocení hygienických limitů větrání v místech s předpokládanou vyšší návštěvností. Účinky oxidu uhličitého na lidský organismus jsou závislé na koncentraci a expoziční době, což shrnuje tab. 1.

Tabulka 1 Účinky oxidu uhličitého / Effects of carbon dioxide

Koncentrace CO_2	Účinky, komentář
< 400 ppm	Koncentrace v ovzduší
< 1 000 ppm	Doporučená koncentrace CO_2 ve vnitřním prostředí
< 1 500 ppm	Maximální doporučená koncentrace CO_2 ve vnitřním prostředí
> 1 500 ppm	Příznaky únavy, snižování koncentrace, letargie, ospalost
< 5 000 ppm	Maximální bezpečná koncentrace CO_2 bez zdravotních rizik
> 5 000 ppm	Příznaky nevolnosti, bolesti hlavy, zvýšený tep
> 10 000 ppm	Při dlouhodobém působení prokázané zdravotní problémy
> 40 000 ppm	Zdraví a životu nebezpečná koncentrace

Koncentraci CO_2 lze sledovat senzory na principu NDIR, elektrochemické a elektroakustické.
NDIR (NonDispersive Infrared sensor) pracuje na principu měření poklesu intenzity infračerveného záření o určité vlnové délce. Senzor se skládá ze zdroje infračerveného záření, měřicí komory a detektoru. K měření koncentrace CO_2 se používá infračervené záření o vlnové délce 4,26 µm, 7,2 µm a 14,99 µm. Výhodou je selektivita, dlouhodobá stabilita a životnost. Nevýhodou je „oslepnutí" senzoru při vyšších koncentracích, kdy je veškeré infračervené záření pohlceno molekulami oxidu uhličitého.
Elektrochemický senzor obsahuje systém elektrod a elektrolytu, který reaguje s oxidem uhličitým za vzniku volných elektronů. Vznikající proudový signál je zesílen a změřen a odpovídá koncentraci oxidu uhličitého v okolí. Elektrochemické senzory mají krátkou životnost, cca 2 roky, a jelikož se měřením spotřebovává elektrolyt, je nutné je často kalibrovat. Používají se výhradně v přenosných přístrojích.
Elektroakustické senzory pracují na principu měření změny kmitočtu ultrazvuku v akustickém rezonátoru. Jsou dlouhodobě stabilní a není nutné je rekalibrovat.

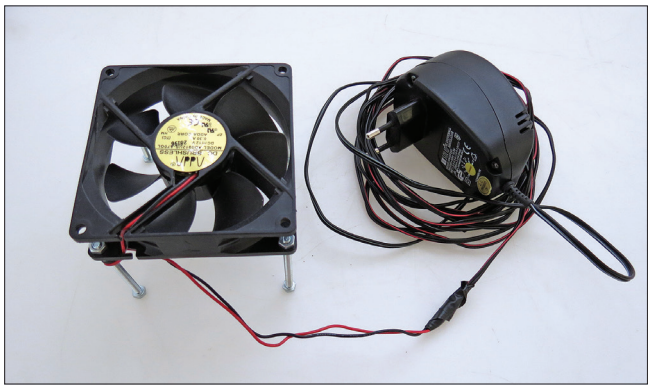
POUŽITÉ PŘÍSTROJE A POSTUPY

Při experimentech byly použity přístroje Comet U3430 a Testo 480 se sondou IAQ. Oba přístroje pracují na principu NDIR.
Comet U3430 je kombinovaný přístroj určený k měření teploty, relativní vlhkosti, teploty rosného bodu a koncentrace CO_2. Měření koncentrace CO_2 probíhá na principu NDIR s duální vlnovou délkou. Rozsah měření koncentrace je 0 až 5 000 ppm, přesnost udávaná výrobcem je ±50 ppm + 3 % z MH (měřené hodnoty). Interval měření koncentrace oxidu uhličitého lze nastavit od 2 minut. Výhodou je dlouhá výdrž baterie v řádu měsíců.

Obr. 1 Comet U3430 / Combined measuring device Comet U3430

Testo 480 je univerzální měřicí přístroj, ke kterému je možné připojit různé sondy. Sonda IAQ umožňuje měření teploty, relativní vlhkosti, atmosférického tlaku a koncentrace CO_2. Rozsah měření je 0 až 15 000 ppm, přesnost ±75 ppm CO_2 + 3 % MH v rozsahu 0 až +5 000 ppm CO_2 a ±150 ppm CO_2 +5 % MH v rozsahu 5001 až +10 000 ppm CO_2. Přesnost pro rozsah 10 001 až 15 000 ppm CO_2 výrobce neudává. Výrobcem udávaná životnost baterie je 17 hodin bez připojených sond. Měření byla prováděna s připojeným zdrojovým kabelem o průměru 3,5 mm vedeným mimo vitrínu, což ovlivňuje výsledky měření.
V rámci některých měření byl do vitríny umístěn ventilátor za účelem homogenizace vnitřní atmosféry. Jde o běžný ventilátor používaný kvůli chlazení výpočetní techniky o průměru cca 80 mm, napájený 12 V zdrojem mimo vitrínu. Rozměr napájecího kabelu je 1,7 x 3,1 mm. Připojení zdrojovým kabelem mimo vitrínu ovlivňuje těsnost, a tím výsledky měření.

Obr. 2 Testo 480 se sondou IAQ / Universal measuring device Testo 480 with IAQ probe



Obr. 3 Počítačový ventilátor se zdrojem / Computer ventilator with power supply

Do vitrín byl umístěn datalogger a zavedeno přibližně 5 000 ppm oxidu uhličitého z tlakové lahve. Alternativně se dají využít například sifonové bombičky. Ty běžně obsahují 8 g oxidu uhličitého, toto množství odpovídá 5 000 ppm v objemu 800 l. Po dosažení požadované koncentrace byla vitrína uzavřena a koncentrace měřena každé 2 minuty. Měření bylo ukončeno po dosažení koncentrace cca 500 ppm nebo uplynutí cca 3 dní. Venkovní koncentrace oxidu uhličitého byla pro nedostatek měřicích přístrojů vypočtena jako průměr týden trvajícího měření, jejíž hodnota je 438 ppm.

MĚŘENÉ VITRÍNY

Těsnost byla měřena v různých vitrínách, které jsou popsány v tab. 2. Pro zjednodušení budou označeny čísly I.–V.

Tabulka 2: Přehled testovaných vitrín / Overview of tested showcases

Označ. vitríny	Popis	Objem [l]	Umístění
I.	Experimentální vitrína	72,6	Laboratoř
II.	Plastový box	10	Laboratoř
III.	Vitrína Octanorm	414	Výstava *V těžkých dobách*, 3. patro, budova TMB
IV.	Vitrína vestavěná	2304	Výstava *Železná opona*, 2. patro, budova TMB
V.	Vitrína MZM	1822	Výstava *Jako růže. Móda zrcadlem doby*, budova MZM

Obr. 4 *Experimentální vitrína / Experimental showcase*

Obr. 5 *Box Lock and Lock / Box Lock and Lock*

Obr. 6 *Vitrína Octanorm / Showcase Octanorm*

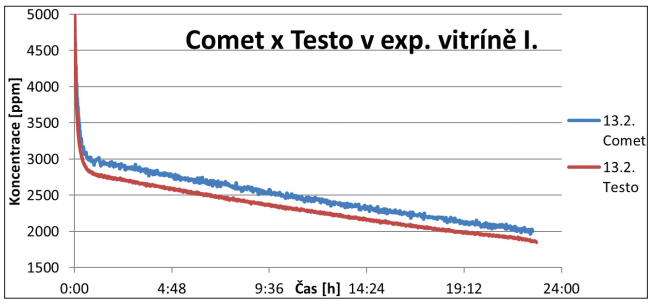
Obr. 7 *Vestavěná vitrína / Built-in showcase*

Experimentální vitrína I. o rozměrech 39 × 39 × 49 cm je vyrobená z lepeného skla, jako podstavec byla využita deska Mirelonu s výřezem cca 1 cm hlubokým. Objem vitríny je 72,6 l.
Komerční box II. Lock & Lock je vyroben z polyetylenu s odnímatelným víkem opatřeným silikonovým těsněním, je určen zejména na potraviny. Jeho rozměry jsou 28 × 21 × 17 cm a objem cca 10 l.
Volně stojící výstavní vitrína III. – Octanorm – ve výstavě *V těžkých dobách: Boje o hranice 1918–1919* má vnitřní rozměry 60 × 60 × 115 cm a objem 414 l. Octanorm je modulární výstavní systém hliníkových profilů, jako výplně konstrukce se používají MDF desky a sklo. Dvířka jsou utěsněna silikonovým těsněním, v některých místech k němu však nedoléhají spolehlivě, navíc těsnění není vhodně napojeno a v rozích jsou mezery cca 5 mm velké.
Vestavěná vitrína IV. ve výstavě *Železná opona* má vnitřní rozměry 180 × 160 × 80 cm a objem 2 304 l. Je vyrobená z hliníkových okenních profilů osazených sklem a sádrokartonových desek. Těsnění ve dvířkách je gumové, na některých místech stářím popraskané.
Volně stojící vitrína V. MZM ve výstavě *Jako růže. Móda zrcadlem doby* má rozměry 90 × 90 × 225 cm a objem 1 822 l. Je vyrobena z bezpečnostního skla a hliníkových profilů. Dvířka jsou osazena silikonovým těsněním.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Měření koncentrace oxidu uhličitého bylo prováděno s různými parametry, abychom mohli posoudit nejvhodnější metodiky. Nejprve bylo provedeno srovnání výsledků měření zařízení Comet a Testo. Měřené hodnoty se od sebe lišily při měření atmosférické koncentrace oxidu uhličitého průměrně o 66 ppm, což je v rámci chyby měření hodnota udávaná výrobcem (Testo ±88,5 ppm, Comet ±63,5 ppm při koncentraci CO_2 450 ppm, viz Graf 2).
Vzhledem k vyšší hustotě oxidu uhličitého se dala předpokládat jeho vyšší koncentrace na dně vitríny, kde byly umístěny dataloggery. Proto byla provedena série měření s ventilátorem uvnitř vitríny s cílem dosáhnout homogenní atmosféry. Měření s ventilátorem byla provedena v experimentální vitríně I., volně stojící vitríně III. – Octanorm a vestavěné vitríně IV. Na měření byly použity dataloggery Comet a Testo. Datalogger Testo byl připojen kabelem ke zdroji mimo vitrínu. V experimentální vitríně I. se použitím ventilátoru snížila těsnost N na třetinu, z průměrné hodnoty 0,5 den^{-1} na 1,7 den^{-1}. Ve volně stojící vitríně III. – Octanorm se snížila přibližně na polovinu z hodnoty 4,3 den^{-1} na 7,6 den^{-1}. Ve vestavěné vitríně IV. se těsnost snížila z 12,1 den^{-1} na 15,6 den^{-1}. Na vině bylo zejména přivření napájecích kabelů do těsnicích prvků a vznik netěsnosti. O vlivu netěsností způsobených kabely svědčil fakt, že nejvyšší hodnotou ve vitríně III. – Octanorm s ventilátorem byla „těsnost“ cca 70 den^{-1}.

Obr. 8 *Vitrína MZM / Moravian museum case*



Graf 2 Koncentrace CO_2 / CO_2 concentration

Při pozdějších měřeních bylo upuštěno od použití dataloggeru Testo. Zdrojový kabel protažený těsnícími prvky způsoboval netěsnost, která významně zkreslovala výsledky. Při měření ve volně stojící vitríně III. byla těsnost bez zdrojového kabelu průměrně 2,1 den^{-1}, oproti hodnotě 3,9 den^{-1} s kabelem protaženým dvířky vitríny.

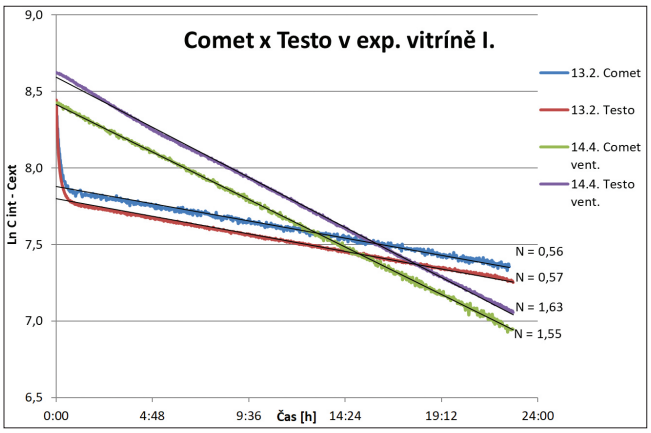
Tabulka 2 Vliv ventilátoru / Effect of ventilator

Těsnost exp. vitrína I. N [den^{-1}]					
Bez ventilátoru			S ventilátorem		
Datum	Comet	Testo	Datum	Comet	Testo
25. 2.	0,48	0,53	8. 4.	1,68	1,77
2. 3.	0,49	0,53	14. 4.	1,58	1,69
6. 3.	0,45	0,47	16. 4.	1,81	1,88
10. 3.	0,5	0,53	21. 4.	1,45	1,63
13. 3.	0,46	0,48	24. 4.	1,72	1,84
Prům.	0,48	0,51	Prům.	1,65	1,76

Na základě přístrojového vybavení a dostupnosti možných sledovacích plynů bylo rozhodnuto pro studii využít měření poklesu koncentrace oxidu uhličitého. K měření byl použit datalogger Comet, který pracuje na principu nedisperzní infračervené spektroskopie. Jako zdroj oxidu uhličitého byla použita malá tlaková lahev s redukčním ventilem. Po sérii prvotních měření, která odhalila různé problémy, byla ustanovena následující metodika měření těsnosti:

1. Měření koncentrace oxidu uhličitého v okolním prostředí vitríny.
2. Zavedení oxidu uhličitého do vitríny a dosažení koncentrace cca 5 000 ppm a její uzavření.
3. Měření po dobu minimálně 12 hod. nebo po dobu nutnou k vyrovnání vnitřní a vnější koncentrace u málo těsnících vitrín. Ideální doba měření je 24 až 48 hod.
4. Export dat z dataloggeru a vyhodnocení výsledku metodou proložení spojnice trendu grafem logaritmického poklesu koncentrace oxidu uhličitého v čase.

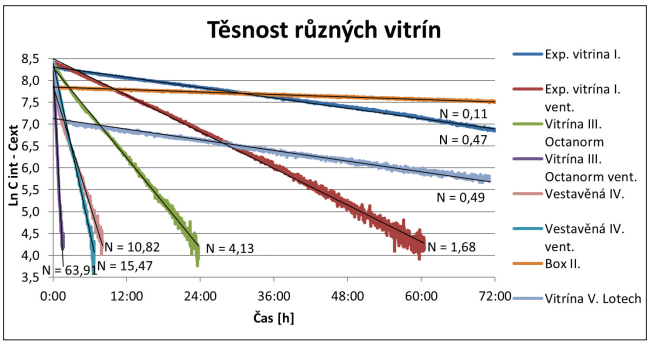
Vyhodnocení výsledku z grafu je vhodnější než rovnicí, protože poskytuje srovnatelné výsledky nezávislé na době měření. Při vyhodnocení rovnic je nutné srovnávat výsledky po stejné době, například po 12 hod., což je problém u málo těsných vitrín, u nichž se vnitřní a vnější koncentrace vyrovná dříve. K měření je vhodné použít datalogger napájený baterií, jelikož pokud je nutné připojení zdroje mimo vitrínu, dojde ke zkreslení výsledků. Použití ventilátoru uvnitř vitríny se neosvědčilo ze stejného důvodu. Při použití ventilátoru napájeného bateriemi se dá očekávat mírný pokles těsnosti z důvodu zvýšení difuze, ale tato varianta nebyla testována.



Graf 3 Vliv ventilátoru na těsnost / Effect of ventilator on the tightness

Tabulka 3 Vliv zdrojového kabelu Testo / Effect of power cable Testo

Volně stojící vitrína III. Octanorm			
S kabelem		Bez kabelu	
Datum	N [den^{-1}]	Datum	N [den^{-1}]
31. 3.	4,13	9. 6.	2,19
1. 4.	4,12	10. 6.	1,98
2. 4.	3,81	11. 6.	2,35
3. 4.	3,76	12. 6.	1,85
Prům.	3,9	Prům.	2,1



Graf 4 Porovnání těsnosti vitrín / Comparison of the showcases' tightness

Hlavním cílem výzkumu bylo porovnat jednotlivé výstavní vitríny a získat informace o jejich těsnosti. Nejlepší těsnost byla zjištěna u polyetylenového boxu II. Lock & Lock, který je vhodný pro uložení předmětů například v depozitářích. Průměrná těsnost byla 0,13 den^{-1}. U komerční vitríny V. MZM byla naměřena těsnost 0,49 den^{-1}, podobná jako u experimentální vitríny I. Vitrína III. – Octanorm ve výstavě *V těžkých dobách: Boje o hranice 1918–1919* měla těsnost průměrně 2,10 den^{-1}. Nejnižší těsnost měla vestavěná vitrína IV. ve výstavě *Železná opona*, průměrně 12,12 den^{-1}.

Z těchto parametrů je možné vypočítat množství sorbentu, které by vitríny musely teoreticky obsahovat, pokud bychom chtěli, aby měřené vitríny fungovaly podle Thomsonova modelu bezúdržbově. Na výpočet je použita upravená Thomsonova rovnice, cílová relativní vlhkost je 40–60 %, použitý sorbent Prosorb s hodnotou M je 5,3 g kg^{-1}, poločas je 150 dní, výsledek je hmotnost silikagelu přepočítaná na objem dané vitríny.

Tabulka 4 Těsnost a množství silikagelu / Tightness and the amount of silica gel

Vitrína	Objem [m³]	N [den⁻¹]	B [kg m⁻³]	Q [kg]
Experimentální I.	0,0726	0,48	3,4	0,25
Box II.	0,01	0,13	0,9	0,009
Octanorm III.	0,414	2,10	14,9	6,17
Vestavěná IV.	2,304	12,12	85,8	197,7
MZM V.	1,822	0,49	3,5	6,4

DISKUZE

Vysokou těsnost vykazoval polyetylenový box II. Lock & Lock, jenž je vhodný k uložení předmětů například v depozitářích a který se těsností 0,13 den^{-1} nejvíce přiblížil současnému požadavku na těsnost 0,1 den^{-1}. Překvapivě dobrou těsnost 0,48 den^{-1} vykazovala experimentální vitrína I., obdobnou hodnotu těsnosti měla i komerční vitrína V. MZM. Vitrína III. Octanorm měla těsnost 2,1 den^{-1} a dobře se na ní ukázalo, jakou roli hraje výška vitríny a netěsnosti. Při použití ventilátoru způsobil zdrojový kabel netěsnost a vznikl komínový efekt s následnou těsností cca 70 den^{-1}. Nejnižší těsnost z měřených vitrín měla vestavěná vitrína IV., a to 12,12 den^{-1}. Nízká těsnost byla způsobena zejména kvůli špatnému stavu těsnění dvířek.

V rámci interpretace porovnání výsledků těsnosti testovaných vitrín a boxu je nutné zohlednit rovněž další aspekty, a to zejména umístění úložných systémů v odlišném prostředí budov, tedy i s různou cirkulací vzduchu a stabilitou okolního klimatu. Nelze tedy jednoznačně srovnávat měření kvality těsnosti, které by vyžadovalo stejné laboratorní podmínky. Dále by bylo vhodné měřit paralelně i vnější koncentraci oxidu uhličitého, vnitřní a vnější teplotu a atmosférický tlak, jelikož tyto parametry výsledky měření určitě ovlivňují.

Bylo vypočteno teoretické množství silikagelu, potřebného k tomu, aby se mikroklima ve vitrínách udržovalo v rozmezí 40–60 % po dobu 150 dní sorbentem Prosorb. Tyto hodnoty jsou pouze teoreticky vypočtené a nebyly experimentálně ověřeny. Nicméně výsledky názorně ilustrují vliv těsnosti. Například u vestavěné vitríny IV. by bylo nutné použít téměř 200 kg, toto množství by mělo objem téměř 250 l, tedy cca 1/10 objemu vitríny.

ZÁVĚR

Měření těsnosti úložných systémů je cenný nástroj pro konzervátory, kteří chtějí kvalifikovaně odhadovat stabilitu mikroklimatu v muzejních vitrínách a řídit ji pomocí sorbentů. Měření byla prováděna sledováním poklesu koncentrace oxidu uhličitého dataloggerem s NDIR senzorem, a odhalila tak velké rozdíly v těsnosti mezi jednotlivými vitrínami. Bylo provedeno více než 40 měření těsnosti ve třech různých vitrínách umístěných přímo v expozicích Technického muzea v Brně a Moravského zemského muzea, jedné experimentální vitríně a plastovém boxu v laboratoři Metodického centra konzervace v Technickém muzeu v Brně. V rámci prvotní studie byla ověřena metodika detekce intenzity výměny vzduchu, využitelná v konzervátorské praxi. Pozornost bude dále zaměřena na hodnocení různých těsnicích materiálů, které zvýší standard používaných systémů. Stejně tak bude probíhat praktické ověření predikce objemu sorbentů vzhledem k parametru těsnosti.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři článku děkují Libuši Dufkové, restaurátorce Moravského zemského muzea, za umožnění měření těsnosti vybrané vitríny Moravského zemského muzea.

Recenzovaný odborný článek vznikl na základě institucionální podpory dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumné organizace Technické muzeum v Brně poskytované Ministerstvem kultury ČR.

LITERATURA

- BÁRTA, Aleš. Řízení kvality vzduchu v budovách (koncentrace CO_2). 2018. BRIMBLECOMBE – Peter; RAMER, Brian. Museum display cases and the exchange of water vapour. *Studies in Conservation*, 1983, 28.4: 179–188.
- CALVER, Andrew, et al. Simple methods to measure air exchange rates and detect leaks in display and storage enclosures. In: *ICOM Committee for Conservation: 14th Triennial Meeting, The Hague*. 2005. p. 12–16.
- CASS, Glen R., et al. *Protection of works of art from atmospheric ozone*. 1989.
- CASSAR, May – MARTIN, Graham. The environmental performance of museum display cases. *Studies in Conservation*, 1994, 39.sup2: 171–173.
- DANIEL, Vinod – MAEKAWA, Shin. The moisture buffering capability of museum cases. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 1992, 267.
- PADFIELD, Tim. The control of relative humidity and air pollution in show-cases and picture frames. *Studies in Conservation*, 1966, 11.1: 8–30.
- PERINO, Marco. Air tightness and RH control in museum showcases: Concepts and testing procedures. *Journal of Cultural Heritage*, 2018, 34: 277–290.
- POTTER, I. N., et al. *Air tightness specifications-BSRIA specification 10/98*. 1998. POTTER, I. N., et al. *Air tightness specifications-BSRIA specification 10/98*. 1998.
- SAMADELLI, Marco, et al. Development of passive controlled atmosphere display cases for the conservation of cultural assets. *Journal of Cultural Heritage*, 2019, 35: 145–153.
- STRECHA, Johannes – STEINRÜCK, Herbert. Gas exchange of almost leak-tight display cases. *PAMM*, 2012, 12.1: 485–486.
- THICKETT, David – DAVID, Frances – LUXFORD, Naomi. Air exchange rate-the dominant parameter for preventive conservation?. *The Conservator*, 2005, 29.1: 19–34.
- THOMSON, Garry. Stabilization of RH in exhibition cases: Hygrometric half-time. *Studies in Conservation*, 1977, 22.2: 85–102.
- THOMSON, Garry. *The museum environment*. Elsevier, 2013.
- WATTS, Siobhan, et al. Museum showcases: specification and reality, costs and benefits. In: *Museum microclimates: contributions to the Copenhagen conference, 19–23 November 2007*. 2007. p. 253–260.
- WEINTRAUB, Steven. Demystifying silica gel. *Object Specialty Group*, 2002.