



Ing. Vladimír ZMRHAL, Ph.D.,
 Prof. Ing. František DRKAL, CSc.,
 Ing. Miloš LAIN, Ph.D.,
 Ing. Luděk Mareš
 ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
 Ústav techniky prostředí

Stanovení vnitřní tepelné zátěže průmyslových hal

Determination of Internal Cooling Load at Industrial Halls

Recenzent
 Ing. Marcel Kadlec

V našich podmínkách bylo zvykem, že většina průmyslových hal bez technologických nároků na dodržení teploty byla v letním období pouze větrána venkovním vzduchem. Pro nově budované haly, kde je kladen větší důraz na tepelnou pohodu zaměstnanců při práci a pro haly s technologickými požadavky na teplotu vzduchu, je nutná instalace klimatizačního zařízení. Pro správný návrh klimatizačního zařízení je nutné co možná nejpřesněji zjistit skutečné tepelné zisky během provozu. V průmyslových halách s vysokým jmenovitým příkonem instalovaných zařízení má často vnitřní tepelná zátěž dominantní podíl na celkovém tepelném zisku.

Na příkladech je ukázán postup při stanovení tepelné zátěže od vnitřních zdrojů tepla. Jako případové studie byly vybrány tři typové průmyslové haly: hala s malým počtem velkých zdrojů tepla, hala se strojní výrobou s požadavkem na dodržení teploty a hala s velkým počtem malých zdrojů tepla.

Klíčová slova: větrání, průmyslové haly, technologická zátěž

According to a common practice in our republic, the majority of industrial halls without specific technology-related temperature demands were ventilated only with outdoor air during the summer period. At newly constructed halls, with specific requirements for thermal comfort of employees and with technology-related requirements for the air temperature, utilization of air conditioning is necessary. A correct design of an air conditioning device requires knowledge of real cooling loads during the building operation, determination of their value should be as accurate as possible. At industrial halls with a large nominal power input of installed equipment, the internal cooling load is often a major part of the overall space cooling load. A calculation procedure of cooling load from internal heat sources is explained using examples. Three typical industrial halls were chosen as case studies: a hall with a small number of large heat sources, then a hall with machinery with a specified temperature demand and finally a hall with a large number of small heat sources.

Key words: ventilation, industrial halls, heat gain from power appliances

METODIKA VÝPOČTU

U většiny technologických zařízení lze vycházet z faktu, že se příkon stroje přemění na teplo, které pak tvoří tepelnou zátěž prostoru. Nominální příkon uváděný na štítcích strojů ve většině případů není roven tepelnému zisku od zařízení a je nutné tento údaj korigovat. Metodika stanovení vnitřní tepelné zátěže, která je rovněž součástí ČSN 73 0548 [1], vychází ze stanovení tří opravných součinitelů, které jsou následně použity pro určení vnitřní zátěže z jmenovitého příkonu

$$Q = c_1 c_2 c_3 \sum P \quad (1)$$

kde

Q tepelná zátěž [W]
 P elektrický příkon [W]

Součinitele c_1 , c_2 , c_3 jsou určeny pro každý typ stroje nebo zařízení samostatně:

- c_1 je součinitel současnosti – zohledňuje současnost provozu jednotlivých zařízení,
- c_2 je zbytkový součinitel – používá se v případě, že se část tepelného výkonu nedostává do prostoru ale je odvedena přímo, například odsávacím zákrytem nebo vodním chlazením (tímto součinitelem je možné postihnout i odvod tepla materiálem nebo mechanickou prací),
- c_3 je součinitel zatížení (využití) stroje – respektuje skutečnou provozní spotřebu, která se může od štítkové maximální hodnoty výrazně lišit.

Tyto opravné součinitele je možné stanovit následujícími postupy:

- údajem od výrobce – kromě nominálního příkonu někteří výrobci udávají účinnost zařízení nebo spotřebu energie při běžném provozu,
- měřením skutečné spotřeby – spotřebu lze měřit buď pro jednotlivé stroje samostatně nebo pro celý objekt,
- nepřímým stanovením např. z bilance větracího vzduchu,
- bilancí vzduchu nebo plynů využívaných danou technologií,

- analýzou provozu – do celkové bilance lze započítat i odstávky provozu z důvodu údržby strojů a zařízení, logistiky nebo dávkování zboží či materiálu.

Do výpočtu tepelné zátěže lze navíc zahrnout i odvod tepla způsobený např. navážkou, či vyvážkou zboží, nebo materiálu.

PŘÍKLADY ŘEŠENÍ

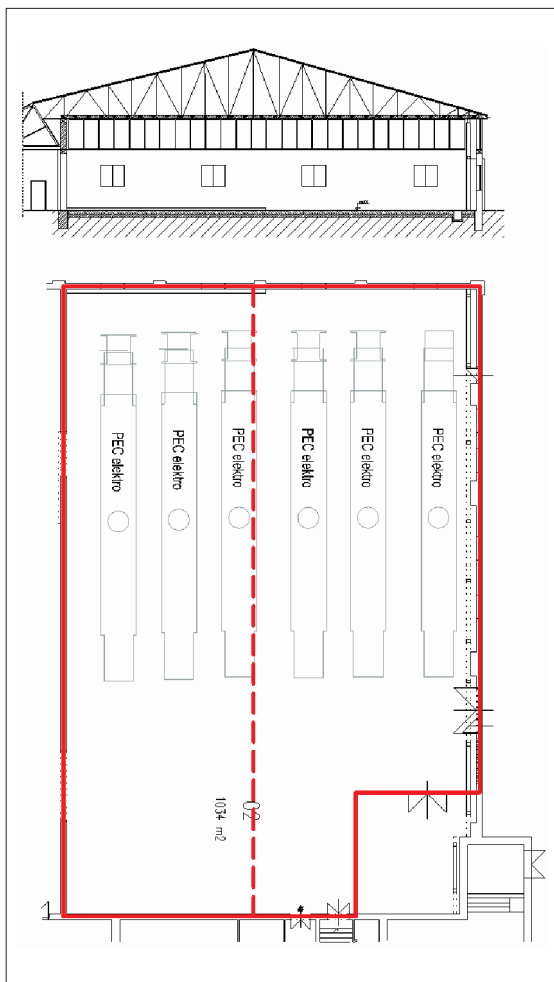
Na příkladu tří průmyslových hal je ukázán postup při stanovení vnitřní tepelné zátěže. Jedná se o stávající výrobní haly, kde bylo možno používat závěry z provedených měření.

Příklad 1 – Hala s malým počtem velkých zdrojů tepla

Jedná se o jednopodlažní průmyslovou halu o ploše 1061 m² a výšce v nejvyšším místě sedlové střechy 10,6 m (obr. 1). V hale je umístěno celkem 6 elektrických vypalovacích pecí, sloužících k výrobě a dekoraci skleněných výrobků. Hodnoty vnitřních tepelných zisků pro reálný provoz haly jsou shrnuty v tab. 1.

Tab. 1 Vnitřní zdroje tepla (Příklad 1)

Zdroj tepla	P	c_1	c_2	c_3	Q
	[kW]	[-]			[kW]
Technologie (vypalovací pece)	6x 360	1	0,32	0,3	208,1
Technologie (odvod spalin)		–	–	–	9,2
Osvětlení	10,37	1	1	1	10,37
Osoby		–	–	–	1,8
Celkem	2170				229,5



Obr. 1 Hala s malým počtem velkých zdrojů tepla (Příklad 1)

Původní nezávislá studie vycházela ze zcela mylného předpokladu, že nominální (štitkový) příkon všech zařízení odpovídá tepelné zátěži. Autor studie tak dochází k závěru, že pro chlazení je nutné přivádět 2 206 500 m³/h vzduchu při pracovním rozdílu 4 až 8 K. To však představuje násobnost výměny vzduchu v hale asi 350 h⁻¹, z čehož je na první pohled zřejmé, že takto provedený hrubý výpočet je naprosto nesmyslný.

Elektrické vypalovací pece

Celkem je ve výrobní hale umístěno 6 elektrických pecí o příkonu 3x 340 a 3x 380 kW. Provoz elektrických pecí je prakticky nepřetržitý (bez odstávek) v třisměnném provozu, kromě víkendů. Působení vnitřní tepelné zátěže je nepřetržitě od neděle 22:00 do soboty 14:00 h a součinitel provozu $c_1 = 1$.

Z měření zatížení vybrané elektrické pece (plný výkon 610 °C) ve výrobní hale, byl zjištěn skutečný provozní příkon pece a ten odpovídá součiniteli průměrného zatížení $c_2 = 0,3$.

Elektrické vypalovací pece jsou napojeny na odvod spalin, a odvod tepla spaliny zohledňuje zbytkový součinitel. Od jedné pece je odsáváno 2000 m³/h vzduchu o průměrné teplotě 140 °C (změřeno). Při teplotě vzduchu v hale 30 °C je od jedné pece odváděno 74,1 kW, což odpovídá zbytkovému součiniteli $c_3 = 0,34$.

Další tepelné zátěže

V horní části haly je vedeno izolované potrubí pro odvod spalin. Část tepla odváděného od vypalovacích pecí se tak dostává do haly prostupem tepla potrubím. Průměrná teplota spalin je 140 °C, teplota v horní části haly se předpokládá 30 °C.

Tab. 2 Vnitřní zdroje tepla (Příklad 2)

Zdroj tepla		P	n	c ₁	c ₂	c ₃	Q	
		[kW]	[-]				[kW]	
Technologie	Balicí linka	Balicí stroj	23	10	0,92	1	0,3	64,4
		Smršťovací tunel	33	10	0,4	1	0,64	84,0
		Zásuvky	8	10	0,5	1	0,7	28,0
	Vázací linka	Zásuvky	20	6	0,95	1	0,25	28,5
		Jeřáb	4,5	1	0,5	1	1	2,25
	Střihací a skládací linka	Falcovačka	7	8	0,7	1	0,7	27,44
		Zásuvky	8	8	0,05	1	0,7	2,24
Vario	Zásuvky	8	2	0,3	1	0,7	3,36	
Aut. ovijáč palet	Zásuvky	12	2	0,8	1	0,6	11,52	
Ruční ovijáč palet	Zásuvky	5	4	0,1	1	0,6	1,2	
Vybavení	Vrata	-	15	0,1	1	1	1,5	
	Zásuvky ve výrobní hale	8	36	0,2	1	0,7	40,32	
	Vysokozdvížeň vozíky	33,5	6	0,4	1	1	80,4	
	Elektrické vozíky	Vozíky	1,5	40	0,5	1	1	30
	Nabíjení vozíků	73	1	0,75	1	0,28	15,2	
Osvětlení výrobní haly - hlavní		6	14	1	1	1	84,0	
Osvětlení výrobní haly - pochůzkové		2,5	6	1	1	1	15,0	
Výroba (130 osob na směnu)		-	-	-	-	-	6,9	
Navezení papíru do výrobní haly		-	-	-	-	-	-19,1	
Odvoz zabaleného papíru z haly do skladu		-	-	-	-	-	-19,1	
Celkem		1 680 kW					488	

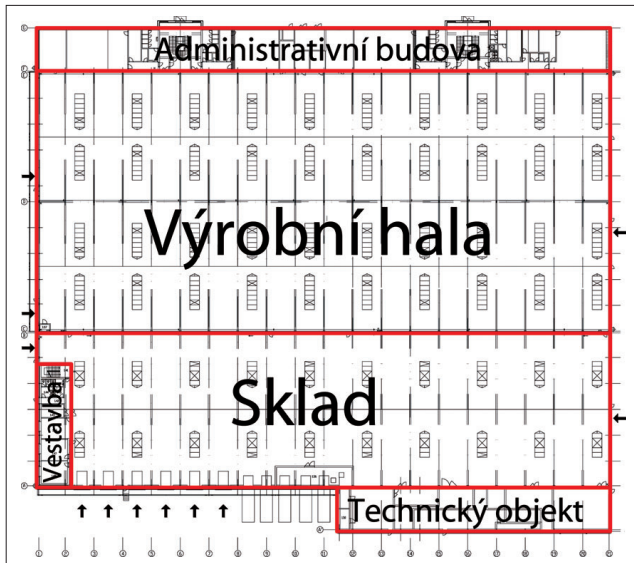
Součástí haly je i osvětlení, které se z požadavku dostatečného osvětlení jednotlivých pracovních míst předpokládá nepřetržitě. Během jedné směny je v prostoru výrobní haly přítomno 30 pracovníků (dle údajů objednatele).

Výsledkem analýzy je důležitý podklad pro dimenzování klimatizačního zařízení. Vnitřní tepelná zátěž výrobní haly je ve skutečnosti asi 10x nižší než štitkový příkon instalovaných zařízení (tab. 1).

Příklad 2 – Hala s velkým počtem menších zdrojů tepla

Druhým příkladem je hala s odlišným charakterem provozu než hala předchozí. V této hale je umístěno velké množství různých zdrojů tepla. Jedná se o rozlehlý (6 547 m²) jednopodlažní objekt (výška haly 7,1 m), který je rozdělen na několik funkčních celků. Hlavní částí objektu je výrobní hala kde jsou balicí linky a příslušenství pro balení zásilek reklamních letáků a katalogů do fóliových balíků. Předpokládá se nepřetržitý třisměnný provoz po sedm dní v týdnu. S výrobní halou bezprostředně sousedí přilehlý sklad odkud je materiál zavážen do výroby a zároveň expedován ke koncovému zákazníkovi. Sklad rovněž sousedí s administrativní budovou, jejíž provoz je nezávislý na výrobě.

Jak je patrné z tab. 2, v prostoru výrobní haly se nachází celá řada technologických zařízení. Největším z nich je balicí linka sloužící k balení zásilky do celofánového obalu. Na základě měření zatížení stroje, byl celkový příkon korigován součinitelem průměrného využití 0,3. Součinitel současnosti pak zohledňuje servisní práce, které probíhají pravidelně na balicím stroji přibližně jednou za rok. Součástí balicí linky je i smršťovací tunel, ve kterém se celofán zataví. Opět z měření zatížení stroje ve stávajícím výrobním objektu, byl celkový příkon korigován součinitelem průměrného zatížení 0,64 pro obě varianty. Obdobným způsobem jsou řešeny i ostatní spotřebiče v hale.



Obr. 2 Hala s velkým počtem zdrojů tepla (Příklad 2)

V prostoru haly je k dispozici celkem 40 elektrických a 6 vysokozdvizných vozíků. Na rozdíl od strojů, u kterých byly výkony změřeny, u vozíků se vycházelo z analýzy spotřeby paliva a provozu. Nabíjený bateriový vozík vydrží zhruba 1 směnu a pak se 6 hodin nabíjí. Nabíjecích míst je celkem 24 (73 kVA). Současnost provozu vozíků je 50 % (20 v provozu a 20 se nabíjí). Nabíjení vozíků tedy netrvá celou směnu, ale pouze 75 % času. Součinitel zatížení stroje 0,28 zohledňuje účinnost nabíjení a využití nabíjecích míst. Výkon plynového vysokozdvizného vozíku, byl určen z výhřevnosti a spotřeby paliva (PB). 10 litrová bomba se mění 2x za směnu, výhřevnost paliva je cca 48 MJ/kg. Vysokozdvizné vozíky jsou určeny k dopravě materiálu mezi skladem a výrobní halou. Ve výrobní hale stráví méně než polovinu času – současnost 40 %.

V celém prostoru haly je umístěna celá řada zásuvkových okruhů. Současnost využití zásuvek byla pro jednotlivé případy konfrontována s objednatel. Vždy však byla zohledněna korekce zatížení stroje, kdy se předpokládá, že nikdy nedojde k zapojení spotřebičů, jejichž výkon by odpovídal maximálnímu instalovanému příkonu.

Součástí haly je i osvětlení, které se předpokládá nepřetržitě, z důvodu dostatečného osvětlení jednotlivých pracovních míst. Během jedné směny je pak v prostoru výrobní haly přítomno 130 pracovníků.

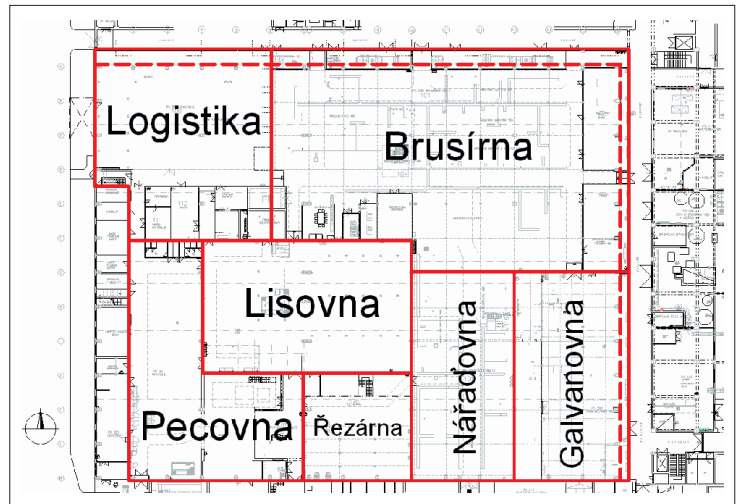
Ve skutečném provozu bude i pohyb materiálu ze skladu do výrobní haly a zpět. Během jednoho pracovního dne je vyexpedováno cca 37 kamiónů papíru denně s průměrnou naloženou hmotností zásilky 15 až 20 tun. Předpokládáme-li, že v přilehlém skladu je teplota vzduchu o něco nižší (cca o 1,5 K), než ve výrobní hale, odvede zavezený papír určité množství tepla. V průběhu operace balení a vázání papíru je papír naopak zahříván, což vede k dalšímu odvodu tepla (pokud je paleta po zabalení vyvezena do prostoru skladu), bylo uvažováno s teplotním rozdílem 1,5 K.

Hodnoty vnitřních tepelných zisků shrnuté v tab. 2, byly nakonec porovnány s celkovou elektrickou spotřebou objektu měřenou energetickými závody.

Při řešení obdobné haly se dále jeví jako účelné zohlednit předpokládaný růst výroby.

Příklad 3 – Hala se strojní výrobou s požadavkem na dodržení teploty

Posledním příkladem je průmyslová hala s technologickými procesy pro výrobu nástrojů (logistika, lisovna, brusírna, galvanovna, nářadovna, pecovna, řezárna) navzájem oddělenými příčkami. Půdorys haly je patrný z obr. 3. Výška haly je 7,9 m. Provoz celé technologie je nepřetržitý 24 ho-



Obr. 3 Hala s velkým počtem zdrojů tepla (Příklad 3)

din denně kromě řezárny, kde je provoz od 6 do 22 hodin. V uvedené hale byl řešen tepelný stav prostředí simulačním výpočtem, pro nějž je nutné stanovit nejen velikost vnitřních tepelných zisků, ale i strukturu zátěže, tzn. její časové a místní rozložení. Protože však v daném případě nebyly projektované údaje dostatečně podrobné, bylo nutné stanovit tepelnou zátěž experimentálně.

Tab. 3 Vnitřní zdroje tepla (Příklad 3)

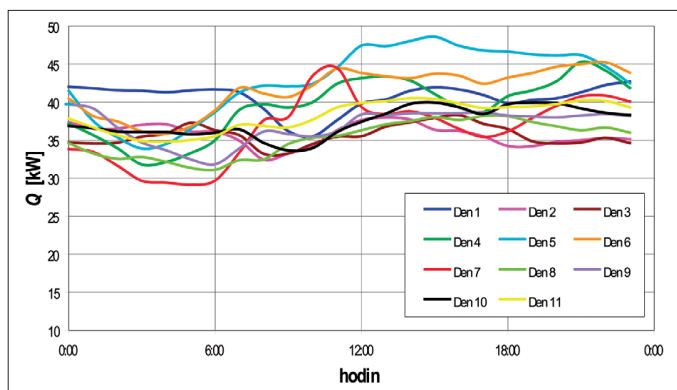
Technologický provoz	Logistika	Lisovna	Brusírna	Galvanovna	Nářadovna	Řezárna	Pecovna
Q [kW]	22	122	175	60	56	22	7,5

Data získaná z provozního měření vzduchotechniky

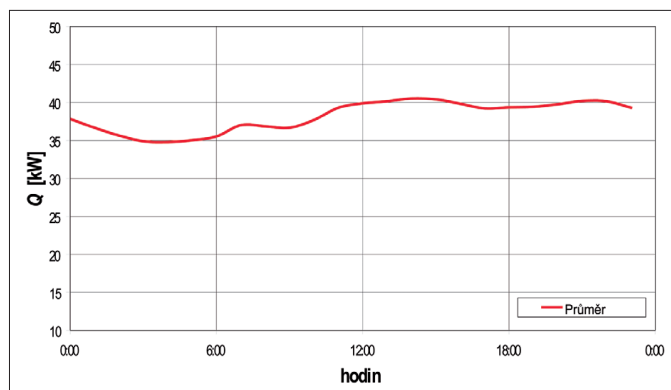
Pro získání potřebných dat byly využity záznamy profese MaR nainstalovaných vzduchotechnických systémů sloužících k větrání jednotlivých provozů. Záznamy, archivované pro jednotlivé systémy, obsahují teplotu přiváděného vzduchu, venkovní teplotu a hmotnostní průtok vzduchu ze kterých je možno vypočítat citelný chladicí výkon, který vzduchotechnika dodává do příslušného prostoru. U čidla venkovní teploty je v takovém případě nutné, aby nebylo ovlivněno osluněním (umístění na severní fasádě).

Protože chladicí výkon kryje nejen vnitřní, ale i vnější tepelné zisky a zátěž větráním, bylo nutné vnější zisky výpočtově eliminovat. Okolnost, že vnitřní zátěž lze považovat za časově rovnoměrnou, umožnila vyhodnocení v rámci denních průměrů. Byla provedena regresní analýza závislosti dodávaného chladicího výkonu Q na rozdílu vnitřní a vnější teploty (denní průměry) $t_e - t_i$, a to pro letní měsíce (květen až září). Analýza ukázala dobrou spolehlivost této závislosti, rozdíly mezi závislostmi pro dny se slunečním svitem a dny bez slunečního svitu byly jen v rámci statistického rozptylu hodnot. Z toho vyplývá závěr, že pro daný případ tepelné zisky osluněním nehrají výraznou roli.

Pro případy kdy $t_e - t_i = 0$ se dá předpokládat, že vnější tepelné zisky a tepelná zátěž větráním jsou nulové. Neplatí to zcela přesně, zisky osluněním nejsou závislé na rozdílu teplot $t_e - t_i$. Byla však provedena analýza rozdílu mezi dny se slunečním svitem a dny bez slunečního svitu se závěrem, že vliv oslunění je skryt v rámci statistického rozptylu. Průběh chladicího výkonu pro tyto dny bez zisků je zobrazen v grafu na obr. 4a (platí pro jeden konkrétní systém VZT – brusírna). Zprůměrováním křivek vyjde výsledný průběh, který je zobrazen na obr. 4b. Z grafu je patrná mírná závislost chladicího výkonu na denní době. Tato závislost je způsobena denním kolísáním venkovní teploty, jak se ukázalo i počítačovou simulací. Proto není potřeba kolísání uvažovat a pro další výpočty lze použít denní průměr.



Obr. 4a Denní průběhy chladicího výkonu pro 11 dnů bez vnějších tepelných zisků, vybraných ze sledovaného období



Obr. 4b Denní průběh chladicího výkonu pro dny bez vnějších tepelných zisků – průměr stanovený pro 11 dnů, pro něž jsou průběhy uvedeny na obr. 4a.

Uvedený příklad popisuje jednu z metodik stanovení tepelné zátěže v průmyslové hale pro případ, kdy nejsou k dispozici konkrétní projektované údaje.

ZÁVĚR

Na příkladech tří různých typů průmyslových hal je naznačen postup při stanovení vnitřní tepelné zátěže. Bylo ukázáno, že v žádném případě nelze dimenzovat klimatizační zařízení v průmyslových halách na nominální příkon zařízení, ale je potřeba důsledně používat zmíněné korekční součinitele. Jak ukazují příklady uvedené v článku, skutečná tepelná zátěž bývá výrazně nižší než nominální (štítkový) příkon zařízení. Prezentované příklady slouží pro ilustraci metodiky. Konkrétní hodnoty opravných součinitelů nebo příkonů zařízení je třeba pro každý řešený případ stanovit individuálně a v článku uvedené hodnoty nelze zobecňovat.

Některé výsledky simulačních výpočtů (zde nepublikovány) dokonce naznačují, že pokud připustíme kolísání teplot a využijeme akumulární hmotu podlahy, citelný chladicí výkon instalovaného zařízení, potřebný k vytvoření optimálních mikroklimatických podmínek, může být i nižší než vnitřní zisky. To je dáno především dynamikou stavby (využití hmoty podlahy) a kombinací strojního chlazení s odvodem tepla větráním.

Seznam označení

Q	tepelná zátěž	[W]
P	elektrický příkon	[W]
c_1	součinitel současnosti	[-]
c_2	zbytkový součinitel	[-]
c_3	součinitel využití	[-]

Příspěvek byl napsán s podporou výzkumného záměru MSM 6840770011 Technika životního prostředí. – Kontakt na autora: Vladimír.Zmrhal@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- ČSN 73 0548: 1985 Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů, Úřad pro normalizaci a měření, Praha 1985
- Lain, M., Zmrhal, V., Drkal F., Mareš L. Technická pomoc při realizaci zlepšení vnitřního prostředí ve výrobní hale č. 1, Výzkumná zpráva, ČVUT, Praha 2006.
- Lain, M., Zmrhal, V., Drkal, F. Studie energetické simulace haly vypalovacích pecí Heinz glass decor, Výzkumná zpráva, ČVUT, Praha 2007.
- Zmrhal V., Lain M., Drkal F. Studie energetické simulace objektu KS katalog servis Štáhlavy, Výzkumná zpráva, ČVUT, Praha 2006.
- Zmrhal, V. – Drkal, F. – Lain, M. – Mareš, L. Stanovení vnitřní tepelné zátěže průmyslových hal, In: 18. Konference Klimatizace a větrání 2008. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2008, s. 285-290. ISBN 978-80-02-01978-7. ■

Ze zahraniční literatury

- Jan Sundell: **After thirty years of Indoor Air Conferences, from 1978 Copenhagen to 2008 Copenhagen, where do we stand?** (Po třiceti letech konání konferencí Indoor Air od Kodaně 1978 po Kodaň 2008 – kde stojíme?) Indoor Air, 18, 2008, č. 6, s. 439 – Editorial.

Šéfredaktor časopisu Indoor Air Jan Sundell se zamýšlí nad uplynulými lety: na počátku byly hlavními tématy na konferencích tepelná pohoda a vnitřní ovzduší. Postupně se zájem obracel ke kvalitě vnitřního prostředí. Na prvních několika konferencích se mnoho sdělení týkalo formaldehydu. Také se mluvilo o vlhkosti vzduchu a radonu, o těkavých organických látkách (VOC), o energiích, o plísniích, o čištění vzduchu, o větrání, o ozónu, o chemii vnitřního prostředí... Během uplynulých třiceti let se hlavní zájem přesouval od Syndromu nemocných budov (SBS) k astmatu, od chemikálií k bioaerosolům – a naopak. Ale stále se diskutuje o tomtéž.

A kde jsme dnes?

- Daleko nejdůležitější je znečištění vnitřního prostředí!
- Neznáme faktory vnitřního prostředí, zodpovědné za zdravotní problémy, jako je SBS, astma a alergie.
- Kvalita vnitřního prostředí! To množství literatury, prokazující vliv polutantů na zdraví!

- Větrání! Je dostatek literatury prokazující, že větrání, tj. přívod čerstvého vzduchu, je důležité, včetně podílu čerstvého vzduchu. Čím více větrání, tím lépe (vždyť venku se cítíme nejlépe!)
- Organické látky, zvláště ty těkavé, kolik jen bylo uděláno měření! Měříme ale stabilní látky, ačkoliv ty nestabilní, reaktivní, jsou mnohem zajímavější z hlediska vlivu na zdraví.
- Pára v ovzduší – stále mnoho nejasností! Zde může být vztah ke zdraví.
- Je vztah mezi obsahem vodní páry ve vzduchu a růstem plísní a následnými zdravotními potížemi?
- Čistící technologie jsou potřebné. Ty existující jsou samy často zdrojem polutantů!
- Důležitá je chemie vnitřního prostředí. Co víme o reakcích mezi ozónem a terpeny? Detailní informace zanikají v sumách měření těkavých látek.
- Moderní chemikálie jako změkčovadla, retardéry hoření, pesticidy aj. vyvolávají nové diagnózy jako jsou astma, alergie, obezita, nervové poruchy, poruchy chování, poruchy produkce spermií, atd.
- Je tolik přednášek a článků na podobná témata, přesto se nenabízí praktické aplikace poznatků.

Jan Sundell uzavírá své osobní zamyšlení, které je spíš povzdechutím, nadějí v budoucnost. Konstatuje, že navzdory třicetiletému snažení je věda o vnitřním prostředí stále věda mladá.

(Laj)