

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní

Czech Technical University in Pratur, Fakulty of Machanical Engineering

Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

Tepelná pohoda prostředí ve vztahu k návrhu otopných ploch

Environmental Thermal Comfort in relation to heating surfaces

Summary

The heating surface task rests in supplying the heated space with enough heat in a way which will create thermal comfort. Variables with the primary impact on thermal comfort could be influenced by the type and size of the heating surface, including the way it is installed.

The way of sharing heat generated by the heating surface on the air side is also very significant for the heated room. The mutual ratio between convection and heat radiation is primarily affected by the type of the heating surface since it affects air flow around the heating surface, and therefore, a component of its natural convection.

The speed and direction of air flow inside the heated space depend primarily on locations of cooled surfaces (walls of the peripheral casing, windows), and on locations and sizes of heating surfaces. If we have, for example, a heating body placed under a window on a cooled wall, it will prevent cool falling currents from reaching the floor and by doing so create a relatively large area of local thermal discomfort. Warm convection currents climb up from the heating body, collide with cold falling currents, turn them around, and blend with them. Those blended currents then “rinse” the whole heated space with a suitable air flow speed and temperature.

It is necessary to meet the condition that the heating body's height together with its temperature is related to the window's height and surface temperature (when the window's length equals the heating body's length).

As a result of that, the importance of the influence of adjacent surfaces' temperatures in buildings with insufficient thermal insulation and an improperly placed heating body increases. If the efficient temperature of adjacent surfaces decreases by 1 K, a resting person will perceive it as if the air temperature has decreased by 1 K. From the standpoint of securing thermal comfort, the temperature of the air and the temperature of the surrounding surfaces have at least the same importance.

Basic pre-requisites, such as, for example, the required use of condensation equipment, the heat pump, reaching thermal comfort, and including the optimum thermal and air speed field in the heated space, affect orientation of the temperature level design or thermal parameters of heating bodies.

Souhrn

Úkolem otopné plochy je dodat do vytápěného prostoru takové množství tepla a takovým způsobem, aby v něm byla vytvořena tepelná pohoda. Veličiny, které mají hlavní vliv na tepelnou pohodu lze ovlivnit druhem, velikostí a způsobem instalace otopné plochy.

Pro vytápěnou místnost je rovněž podstatný způsob sdílení tepla u otopné plochy na straně vzduchu. Vzájemný poměr mezi konvekcí a sáláním ovlivňují především druh a typ otopné plochy, neboť ovlivňují způsob proudění vzduchu okolo otopné plochy a tak složku přirozené konvekce.

Rychlost a směr proudění ve vytápěném prostoru jsou závislé především na umístění ochlazovaných ploch (stěny obvodového pláště, okna) a na umístění a velikosti otopných ploch. Pokud máme např. těleso umístěno pod oknem u ochlazované stěny, zabrání chladným padajícím proudům dostat se až k podlaze a vytvořit tak poměrně velkou oblast lokální tepelné nepohody. Teplé konvekční proudy od tělesa stoupají vzhůru, narážejí na chladné padající proudy, obracejí se a směřují se s nimi. Tyto smíšené proudy pak s vhodnou rychlostí proudění i teplotou „proplachují“ celý vytápěný prostor.

Je tak třeba splnit podmínku, aby výška otopného tělesa spolu s jeho teplotou byla v relaci k výšce a povrchové teplotě okna (při rovnosti délky okna a otopného tělesa).

Značného významu tak nabývá vliv teploty okolních ploch u budov s nedostatečným zateplením a chybně umístěným otopným tělesem. Poklesne – li účinná teplota okolních ploch o 1 K, hodnotí to člověk sedící v klidu stejně, jako když poklesne o 1 K teplota vzduchu. Teplota vzduchu a teplota okolních ploch mají tedy z hlediska zajištění tepelné pohody přinejmenším stejnou důležitost.

Základní předpoklady, jako je např. požadované použití kondenzační techniky, tepelného čerpadla, dosažení tepelné pohody včetně optimálního teplotního a rychlostního pole ve vytápěném prostoru dávají určující orientaci stran návrhu teplotní úrovně, resp. teplotních parametrů u otopných těles.

Klíčová slova:

vytápění, otopná plocha, tepelná pohoda, návrh otopných těles, teplotní spád

Keywords:

heating, heating surface, thermal comfort, project of radiators, temperature gradient

Obsah

Teplotechnické chování otopné plochy		6
Ovlivnění pohody prostředí		8
Optimální návrh otopných těles		15
Volba teplotního spádu		19
Vztah mezi ochlazením a průtokem		20
Vliv teploty přívodní vody na změnu výkonu		23
Vliv teplotního spádu na změnu výkonu		23

Teplotechnické chování otopné plochy

Úkolem otopné plochy je dodat do vytápěného prostoru takové množství tepla a takovým způsobem, aby v něm byla vytvořena tepelná pohoda. Veličiny, které mají hlavní vliv na tepelnou pohodu lze ovlivnit druhem, velikostí a způsobem instalace otopné plochy. Hlavním je pak ovlivnění:

- směru a rychlosti proudění vzduchu ve vytápěném prostoru
- rozložení teplot (teplotní profil) ve vytápěném prostoru
- povrchových teplot okolních ploch vzhledem k jejich sálavému účinku.

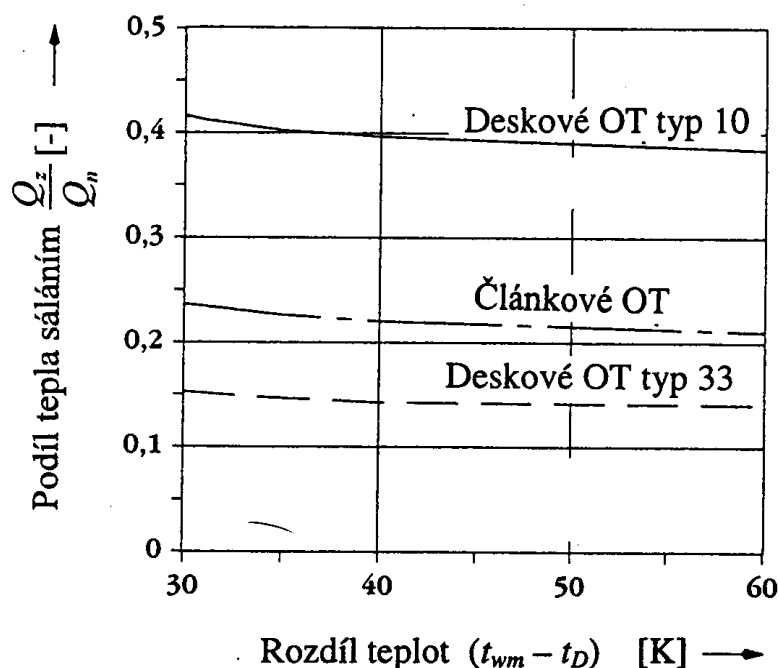
Otopná tělesa se odlišují od integrovaných otopných ploch, jako je podlahová, stropní či stěnová otopná plocha, které jsou přímo včleněny ve vytápěném prostoru.

Pro vytápěnou místnost je rovněž podstatný způsob sdílení tepla u otopné plochy na straně vzduchu. Vzájemný poměr mezi konvekcí a sáláním ovlivňují především druh a typ otopné plochy, neboť ovlivňují způsob proudění vzduchu okolo otopné plochy a tak složku přirozené konvekce.

Celkovým tepelným výkonem otopné plochy rozumíme součet tepelného toku sdíleného do okolního prostoru sáláním a konvekcí.

$$Q_c = Q_z + Q_k$$

Tepelný výkon otopných těles je především závislý na uspořádání teplosměnné plochy na straně vzduchu. Je zřejmé, že celkový tepelný výkon není závislý na průmětné ploše tělesa do prostoru, ale je na ní převážně závislá část tepelného výkonu sdílená sáláním. Podíl tepla sdílený sáláním je závislý na poměru průmětné čelní plochy a konvekčních ploch.

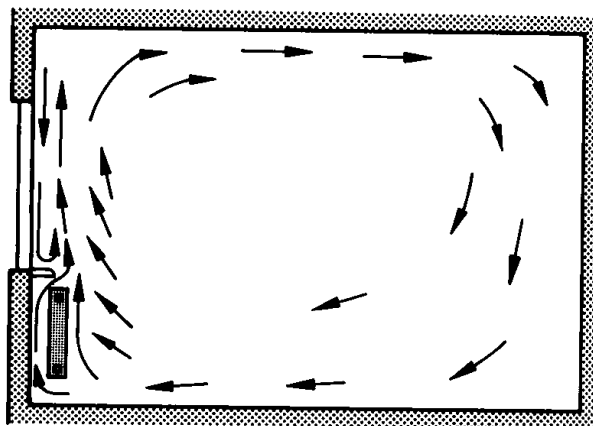


Obr. 1 Podíl tepla sdíleného sáláním Q_z v závislosti na rozdílu teplot $(t_{wm} - t_D)$

Např. u ztrojeného deskového otopného tělesa s třemi konvekčními plechy a o relativně malé průmětné ploše, je podíl sdílený sáláním do vytápěného prostoru pouze 14 %. Zvýší se, pokud použijeme jednoduché deskové otopné těleso stejné průmětné plochy a za stejných teplotních podmínek na 40 %. Tab. 1 a obr. 1 ukazují podíl tepla sdíleného u těles sáláním. Z obr. 1 je rovněž patrné, že procentuální podíl tepelného výkonu tělesa sdíleného sáláním je víceméně nezávislý na rozdílu teplot a zůstává v rozsahu provozních teplot téměř konstantní.

Tab. 1 Relativní podíl tepla sdíleného sáláním pro některá otopná tělesa

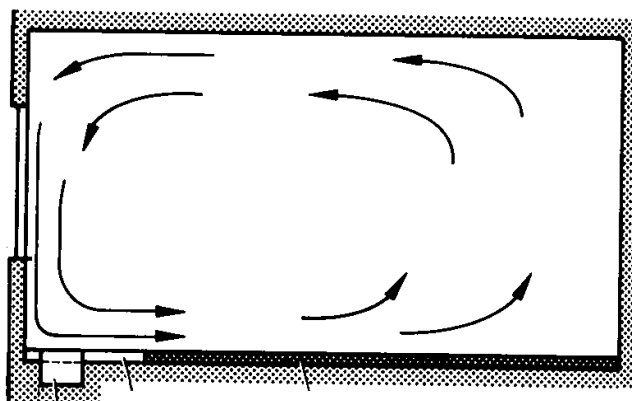
Otopné těleso		Podíl tepla sdílený sáláním		
		Do místnosti	Na zadní stěnu	Celkový
Deskové otopné těleso – typ První číslo – počet desek Druhé číslo – počet konvekčních plechů	10	0,38	0,18	0,56
	11	0,25	0,11	0,36
	20	0,23	0,10	0,33
	21	0,20	0,08	0,28
	22	0,17	0,07	0,24
	33	0,14	0,04	0,18
Otopné těleso článkové se sloupky	2 sloupkové	0,27	0,12	0,39
	3 sloupkové	0,20	0,07	0,27
	4 sloupkové	0,17	0,05	0,22
Člámkové těleso s úzkými sloupky		0,26	0,11	0,37



Obr. 2 Proudění vzduchu v uzavřeném vytápěném prostoru s otopným tělesem pod ochlazovanou plochou

Ovlivnění pohody prostředí

Rychlost a směr proudění ve vytápěném prostoru jsou závislé především na umístění ochlazovaných ploch (stěny obvodového pláště, okna) a na umístění a velikosti otopných ploch. Pokud máme např. těleso umístěno pod oknem u ochlazované stěny, zabrání chladným padajícím proudům dostat se až k podlaze a vytvořit tak poměrně velkou oblast lokální tepelné nepohody. Teplé konvekční proudy od tělesa stoupají vzhůru, narážejí na chladné padající proudy, obrací se a směšují se s nimi. Tyto smíšené proudy pak s vhodnou rychlostí proudění i teplotou „proplachují“ celý vytápěný prostor. Principiální zobrazení tohoto děje vidíme na obr. 2. Takto zobrazené proudění je pouze v oblasti délky otopného tělesa a tak je třeba navrhovat délku otopných těles pokud možno v délce okna.



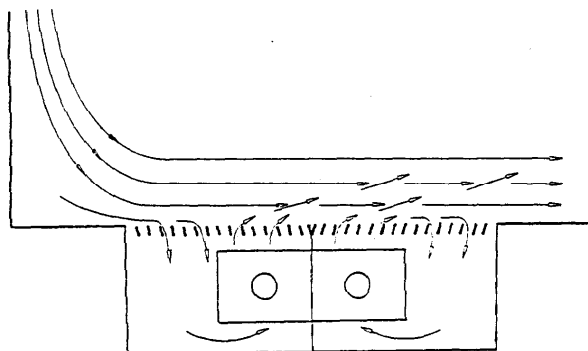
Obr. 3 Proudění vzduchu ve vytápěném prostoru s podlahovou otopnou plochou

A – podlahový konvektor

B – intenzivní okrajová zóna

C – podlahová otopná plocha

Máme – li však otopnou plochu integrovanou do nějaké z vnitřních stěn (např. podlahové vytápění) vypadají obrazy proudění přibližně tak, jak ukazuje obr. 3. Chladný proud vzduchu padá bez překážek dolů a „proplachuje“ oblast podlahy s rychlostí od 0,3 do 0,5 m/s. Až hlouběji v místnosti se ohřívá a obrací se vzhůru. Proudí okolo vnitřních stěn ke stropu a zpět k ochlazované stěně. Okrajová intenzivní plocha u podlahového vytápění či podlahový konvektor s přirozeným vybíjením tepla nemohou tento proud zcela obrátit, ale pouze zmírnit a částečně odklonit směrem vzhůru.



Obr. 5 Proudění nad podlahovým konvektorem

Podlahové konvektory s ventilátorem mají výhodu, že jsou dobře regulovatelné a rychle se přizpůsobí požadované změně výkonu. Možností je tak využít konvektorů s nuceným vybíjením tepla (s ventilátorem), které se po rychlém natopení místnosti vypínají.

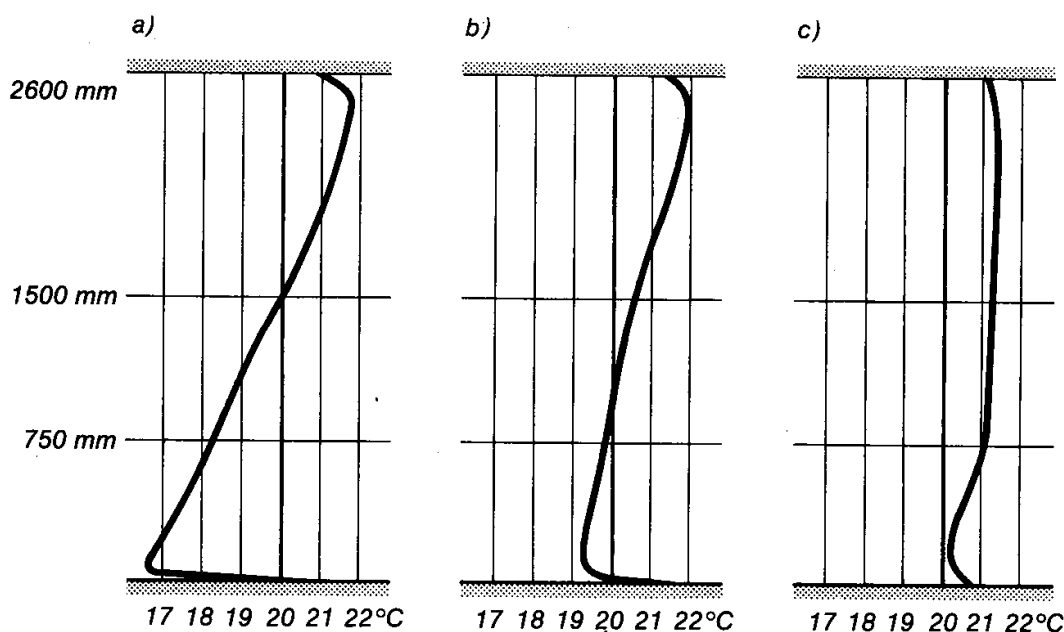
Z obr. 5 ukazujícího obrazy proudění nad podlahovým konvektorem bez ventilátoru je zřejmé, že chladný proud vzduchu proudící od stěny pouze nepreteče nad konvektorem, ale dochází zde i ke směšování s teplým vzduchem od konvektoru. Přesto i když podlahový konvektor s přirozeným vybíjením tepla pokrývá více jak polovinu jmenovité potřeby tepla není schopen zvrátit chladné proudy.

Kombinace podlahové otopné plochy s podlahovými konvektory především s nuceným vybíjením tepla má výhodu v tom, že můžeme pomalu regulovatelnou podlahovou otopnou plochu provozovat s příslušným výkonem a poměrně nízkou povrchovou teplotou celé otopné období. Pak je dimenzována na 30 až 50 % jmenovité potřeby tepelného výkonu. Rychle reagující podlahové konvektory pokrývají špičky v průběhu otopného období v rámci požadavku na tepelný výkon otopných ploch v místnosti.

Intenzivní okrajová zóna podlahového vytápění nemůže chladné padající proudy vzniklé na ochlazované konstrukci obrátit, neboť dosažená konvekce nestačí. Instalací intenzivní okrajové zóny též dochází ke zvětšení tepelné ztráty, neboť

se zvětší sálavý tepelný tok na venkovní stěnu a rovněž tepelný tok vedený podlahou do této stěny. Stejně tak dojde ke zvětšení tepelného toku sdíleného podlahou, resp. stropem do nevytápěných sklepů.

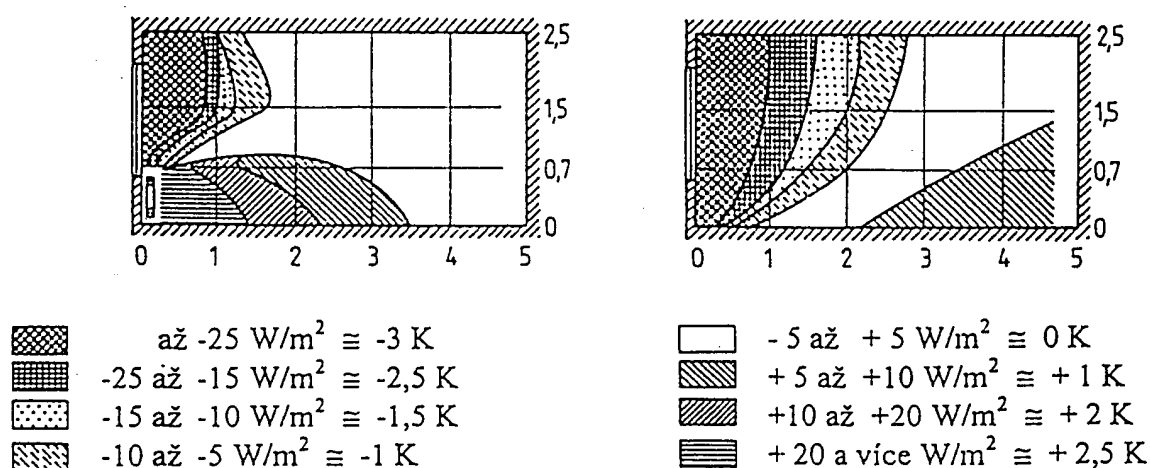
Důsledkem různého proudění vzduchu ve vytápěném prostoru jsou odlišné teplotní profily. V případě volně instalovaného tělesa pod oknem u obvodové konstrukce dostaneme pro různé střední teploty a typy těles teplotní profily prezentované na obr. 6. Z obrázku je patrné, že pokud chceme dostat co nejvíce vyrovnaný (optimální) teplotní profil, je třeba volit těleso co nejdelší a se správně určeným teplotním spádem na soustavě resp. střední teplotou otopného tělesa.



Obr. 6 Vertikální teplotní profil při vytápění deskovým otopným tělesem při $t_e = -15\text{ °C}$, $L_{OK} = 2400\text{ mm}$

a) $H = 920\text{ mm}$	$L = 1500\text{ mm}$	$t_m = 82,0\text{ °C}$	$t_{okna} = 5,9\text{ °C}$
b) $H = 920\text{ mm}$	$L = 1500\text{ mm}$	$t_m = 53,9\text{ °C}$	$t_{okna} = 12,9\text{ °C}$
c) $H = 495\text{ mm}$	$L = 2500\text{ mm}$	$t_m = 57,5\text{ °C}$	$t_{okna} = 11,5\text{ °C}$

Nemalý vliv má na tepelnou pohodu složka sálavá. Jaký měrný tepelný tok, ať už kladný či záporný (= „chladné“ sálání), je v oblasti otopného tělesa či v celém vytápěném prostoru vyslán, ukazuje obr. 7. K měrnému sálavému tepelnému toku (intenzitě sálání) je rovněž přiřazen odpovídající pokles či nárůst teploty. Jak je patrné z obrázku, je u podlahového vytápění oblast s teplotou o -3 K a o $+1\text{ K}$ oproti teplotě v oblasti tepelné pohody (v obr. 7 značeno 0 K odpovídá $-5\text{ až }5\text{ W/m}^2$) podstatně větší. Oblast s účinkem sálání větším jak -25 W/m^2 , což odpovídá odchylce teploty o více jak -3 K , už považujeme za oblast výrazné tepelné nepohody.



vytápění otopným tělesem

podlahové vytápění

Obr. 7 Oblasti různé intenzity sálání ve vytápěné místnosti (hodnoty po obvodu obrázku jsou v metrech)

Nelze říci, že je člověk v tepelné pohodě při určité teplotě vzduchu, např. 22°C . Tepelná pohoda závisí na mnoha faktorech a ve vztahu k teplotě pak rovnou měrou i na teplotě okolních ploch.

Při biochemických oxidačních procesech se v lidském těle uvolňuje metabolický tepelný tok Q_m , který tvoří podstatnou část energetického výdaje organismu. Rozdíly mezi produkovaným tepelným tokem a tepelným tokem odnímáním či dodáváním okolím tělu do určité míry vyrovnávají termoregulační mechanismy těla. Subjektivní pocit tepelné pohody (tepelného komfortu) je stav, při němž je zachována rovnováha metabolického tepelného toku a toku tepla přiváděného resp. odváděného z těla při optimálních hodnotách fyziologických parametrů což lze je vyjádřit rovnicí tepelné rovnováhy člověka a okolí.

$$Q_m \mp Q_k \mp Q_z - Q_w - Q_d \mp Q_v = 0$$

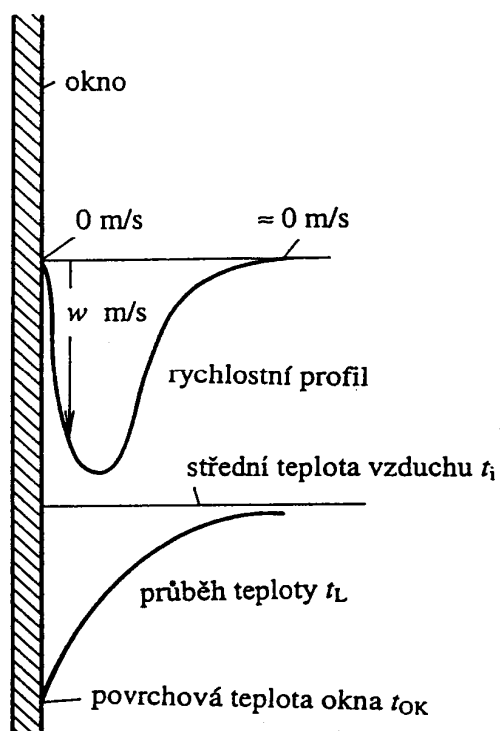
Metabolický tepelný tok Q_m se odvádí z povrchu těla konvekcí Q_k , sáláním Q_z , vypařováním Q_w , dýcháním Q_d a vedením Q_v . Tepelný tok sdílený vedením je ve většině případů zanedbatelný (u obutého stojícího člověka $Q_v = 5 \text{ W}$). Záporná znaménka na levé straně rovnice znamenají, že tepelný tok se sdílí z těla do prostředí. Jestliže se jedná o opačný tok tepla je na levé straně rovnice znaménko kladné.

Značného významu tak nabývá vliv teploty okolních ploch u budov s nedostatečným zateplením a chybně umístěným otopným tělesem. Pokud je těleso umístěno u vnitřní stěny není schopno kompenzovat chladné proudění u okna a ani „chladné“ sálání okna (tepelný tok se záporným znaménkem). Naproti tomu správně navržené a umístěné otopné těleso je schopno oba tyto

vlivy vykompenzovat tak, že se oblast přechodného pobytu výrazně zmenší. Opačným extrémem by byl návrh tělesa s vysokou povrchovou teplotou, kde oblast přechodného pobytu rozšiřujeme vlivem neúnosně velkého kladného sálavého toku.

Poklesne – li účinná teplota okolních ploch o 1 K, hodnotí to člověk sedící v klidu stejně, jako když poklesne o 1 K teplota vzduchu. Teplota vzduchu a teplota okolních ploch mají tedy z hlediska zajištění tepelné pohody přinejmenším stejnou důležitost.

Čím menší rozdíl tyto dvě teploty vykazují, tím je vliv na pohodu prostředí příznivější. Rozdíl obou teplot by neměl být, při zajištění optimálního stavu, větší jak 3 K. Takového stavu se dosahuje nelehko. Podle Fangera jsou chladné stropy či teplé stěny vždy příznivěji hodnoceny než teplé stropy a chladné stěny. Tento poznatek nás vede k současnému směru vývoje, kdy se objekty zateplují a tak se nejen snižují tepelné ztráty prostupem, ale zvyšuje se i povrchová teplota obvodových stěn.

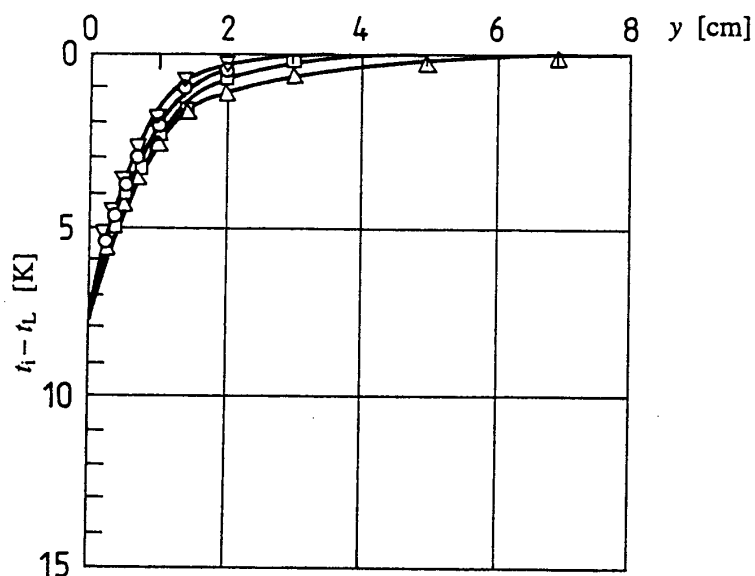


Obr. 8 Tvar teplotního a rychlostního profilu u okna

Proudění vzduchu je úzce svázáno s jeho teplotou a vliv rychlosti proudění vzduchu je opět, jako tomu bylo u teploty, posuzován individuálně v závislosti na fyzickém a duševním zdraví člověka či jeho stáří.

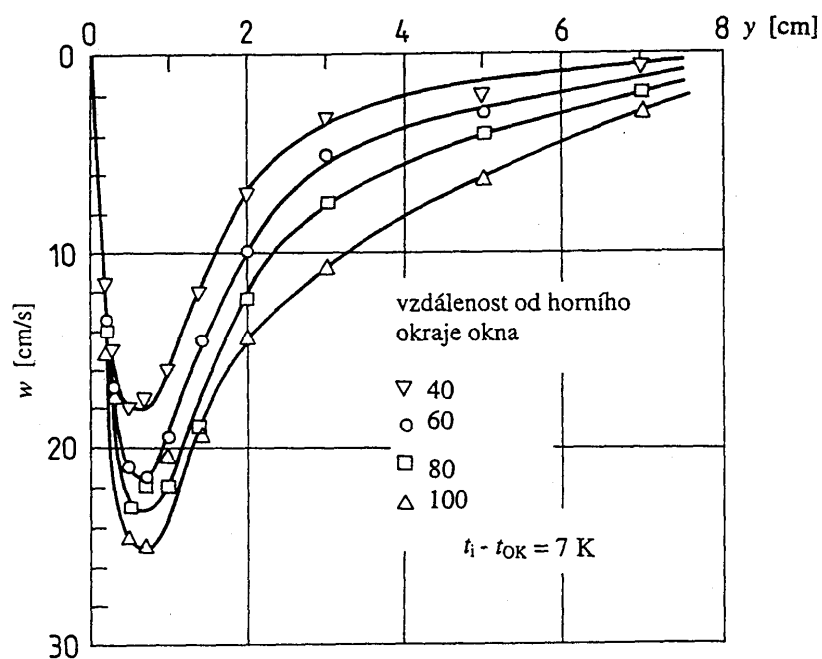
Volné (resp. přirozené) konvekční proudy vznikají různými způsoby. Např. tím, že jakýkoli předmět s teplotou vyšší než je teplota okolí je umístěn v plynu,

jehož hustota se mění s teplotou. Teplo se sdílí z povrchu předmětu vrstvám okolního plynu. Zmenšení hustoty, které v běžném plynu souvisí se zvýšením teploty, donutí tyto vrstvy, aby se pohybovaly a tímto způsobem vznikne proud volné konvekce umožňující přenos tepla.

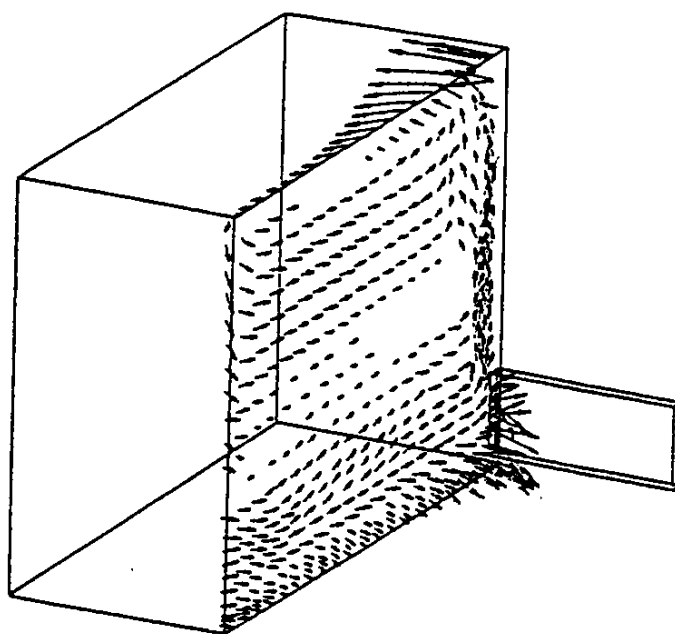


Obr. 9 Teplotní profil získaný na základě měření u okenní plochy.

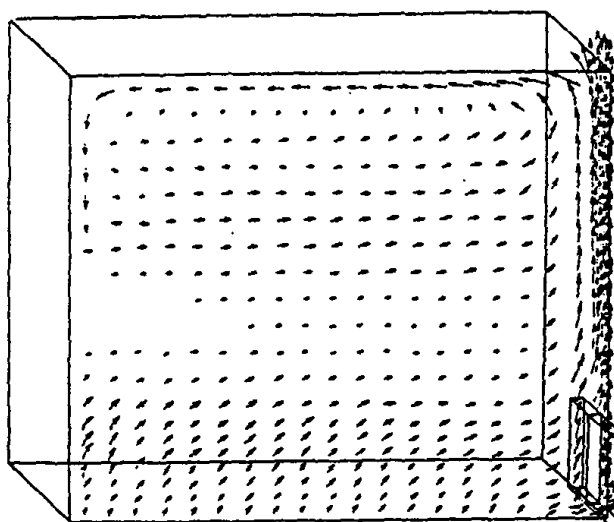
Důsledkem různého proudění vzduchu ve vytápěném prostoru jsou odlišné teplotní profily. Prouděním v blízkosti okna vidíme na obr. 8 až 10.



Obr. 10 Rychlostní profil získaný na základě měření u okenní plochy.



Obr. 11 Zobrazení vektorů rychlostí proudění vzduchu ve vertikálním řezu místností na počátku otopného tělesa. $w_{min} = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$, $w_{max} = 0,2 \text{ m/s}$

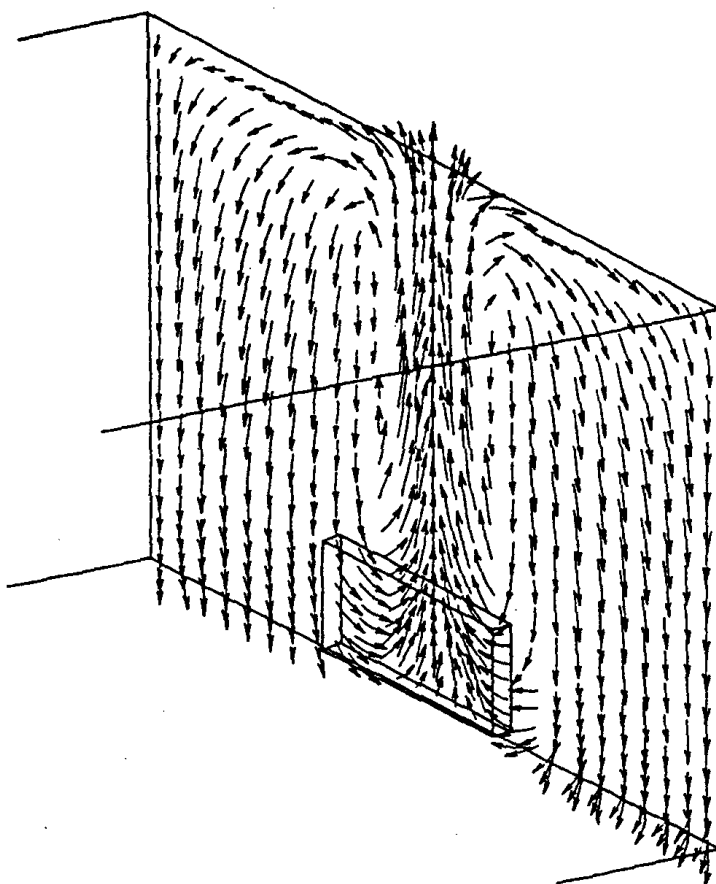


Obr. 12 Zobrazení vektorů rychlostí proudění vzduchu ve vertikálním řezu místností uprostřed délky otopného tělesa.

$w_{min} = 0,041 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$, $w_{max} = 0,54 \text{ m/s}$

Vhodné umístění otopného tělesa ukazují obrázky 11 až 13. Na obr. 11 je průběh rychlostí ve vertikální rovině vytápěné místnosti vedené na začátku otopného tělesa, které je umístěno pod oknem (v obr. okno není zakresleno, přestože je jeho vliv v simulaci postižen). Vektory rychlostí ukazují, jak se chladný padající proud mísí s teplým konvekčním proudem stoupajícím vzhůru

od tělesa a je jím strháván vzhůru a zároveň do stran od roviny řezu. Obr. 12 zobrazuje ideální kompenzaci chladných proudů ve vertikální rovině řezu vedené v poloviční délce otopného tělesa. Je patrné, že veškeré chladné proudy se obrací vzhůru, mísí se s teplým proudem vzduchu a proplachují s vhodnou rychlostí proudění vytápěný prostor. Obr. 13 ukazuje rozložení vektorů rychlostí v bezprostřední blízkosti obvodové stěny s oknem, pod kterým je instalováno otopné těleso. Padající chladné proudy od obvodové zdi na stranách otopného tělesa jsou částečně strhávány nad těleso a zbylé, které proudí na podlahu vytápěné místnosti mají vzhledem k dostatečnému R ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) stěny podstatně nižší rychlosti, než jsou přípustné hodnoty vzhledem k dodržení pohody prostředí.

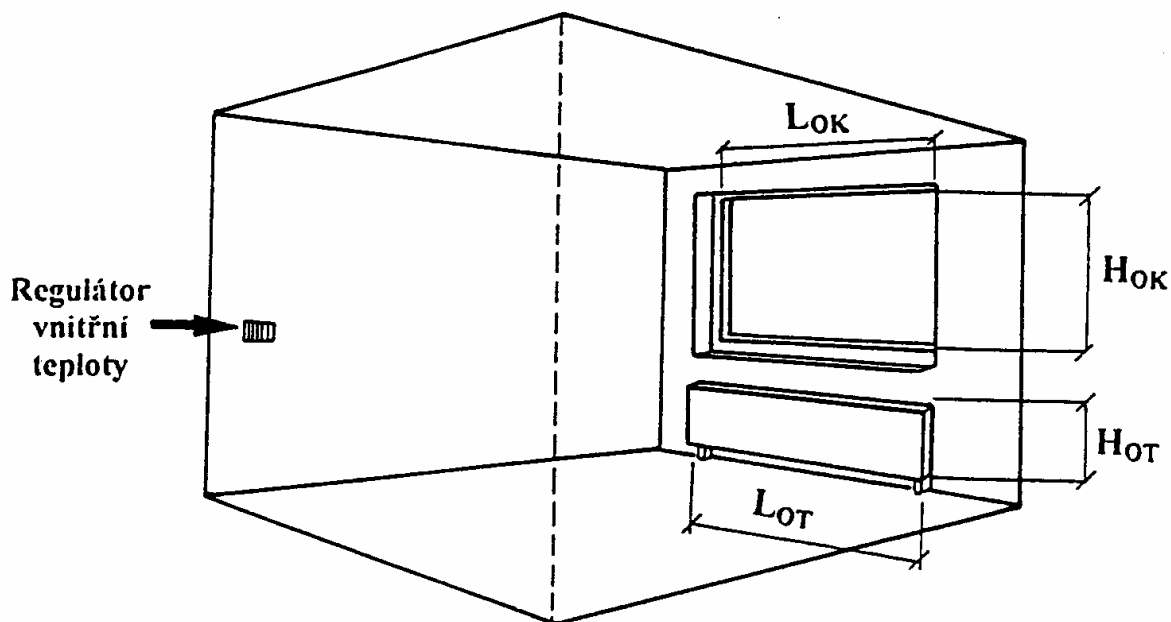


Obr. 13 Zobrazení vektorů rychlostí proudění vzduchu ve vertikálním řezu místností bezprostředně před oknem. $w_{min} = 0,94 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$, $w_{max} = 0,44 \text{ m/s}$

Optimální návrh otopných těles

Pro zjištění chladných proudů a chladného sálání je důležitou hodnotou povrchová teplota. Povrchová teplota okna se součinitelem prostupu tepla $k = 1,5 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$ (při vnější výpočtové teplotě $-12 \text{ }^\circ\text{C}$) bude pouze $14 \text{ }^\circ\text{C}$. Vzhledem k této nízké teplotě, o 6 K nižší než je vnitřní výpočtová teplota

vzduchu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, vzniknou na okenní ploše $2 \times 1,5\text{ m}$ chladné padající proudy ($60\text{ m}^3/\text{h}$ s rychlostí $0,3\text{ m/s}$) působící v oblasti podlahy. Rychlost proudění $0,3\text{ m/s}$ působí velmi nepříznivě. Nejvýše přípustná hodnota rychlosti proudění v pásmu pobytu lidí je pro sedící osoby $0,25\text{ m/s}$ (Německo - $0,2\text{ m/s}$). Také teplota $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ chladné okenní plochy bude z hlediska tepelného sálání působit značně nepříznivě („chladné“ sálání). Většinou existuje u využívaných prostor vždy oblast z hlediska tepelné pohody nevyhovující. Tato oblast je označována oblastí přechodného pobytu.



Obr. 14 Umístění otopného tělesa ve vytápěném prostoru

U vytápěných budov, které jsou tepelně-technicky provedeny podle nové normy (ČSN 73 0540 - 1 až 4) se dosahuje nižšího rozdílu teplot vnitřního vzduchu a okna. Přesto je i zde úkolem projektanta kompenzovat chladné sálání okna do vytápěného prostoru, stejně jako proudění chladného vzduchu.

Pro omezení padajících chladných proudů od okenní plochy je nutné umístit otopné těleso vždy pod okno a délku otopného tělesa volit přinejmenším stejnou jako délku okna.

Dále je třeba splnit podmínku, aby výška otopného tělesa spolu s jeho teplotou byla v relaci k výšce a povrchové teplotě okna (při rovnosti délky okna a otopného tělesa). Je-li okno např. $1,2\text{ m}$ vysoké a odpovídá-li mu rozdíl teplot 7 K (obr. 14), musí být u otopného tělesa o výšce $0,4\text{ m}$ dosaženo rozdílu teplot 21 K (tj. povrchová teplota otopného tělesa je $41\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Shrňme-li podmínky nového přístupu dimenzování otopných těles, postačí nám pouhé tři body:

- délka otopného tělesa musí být alespoň stejná jako je délka okna

$$L_{OT} \geq L_{OK}$$

- součin průmětné čelní plochy (výšky) tělesa a rozdílu mezi střední teplotou otopného tělesa a vnitřního vzduchu se musí nejméně rovnat součinu plochy (výšky) okna s rozdílem teploty vnitřního vzduchu a teploty povrchu okna

$$L_{OT} \cdot H_{OT} \cdot (t_{OT} - t_i) \geq L_{OK} \cdot H_{OK} \cdot (t_i - t_{OK})$$

Poznámka: Ve výše uvedeném vztahu se úmyslně dopouštíme nepřesnosti v podobě $\alpha_{OT} \approx \alpha_{OK}$. Tato nepřesnost je korigována konečným návrhem teplotního spádu na otopném tělese a umožňuje tak zjednodušit návrhovou metodiku pro potřeby běžné projekční praxe.

Použité kritériální rovnice pro určení součinitele přestupu tepla konvekci jsou:

• u otopného tělesa

• u okna

$$\alpha_K = 1,6 \cdot (t_{OT} - t_i)^{0,3}$$

$$\alpha_K = 1,59 \cdot (t_{OT} - t_i)^{0,33}$$

Součinitel přestupu tepla sáláním pro otopné těleso je dán vztahem

$$\alpha_S = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \frac{\left(\frac{T_{OT}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{ST}}{100}\right)^4}{(t_{OT} - t_{ST})}$$

a obdobně je určen i součinitel přestupu tepla sáláním pro okno. Pro jmenovité teplotní podmínky by součinitelé přestupu tepla okna a otopného tělesa nabývaly následujících hodnot.

$$\alpha_{OK} = \alpha_K + \alpha_S = 2,8 + 5,2 = 8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\alpha_{OT} = \alpha_K + \alpha_S = 5,1 + 6,3 = 11,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

V případě, že platí rovnost délky okna a otopného tělesa se vztah zjednoduší na

$$H_{OT} \cdot (t_{OT} - t_i) \geq H_{OK} \cdot (t_i - t_{OK})$$

Z této rovnice vyjádříme střední teplotu otopného tělesa

$$t_{OT} \geq t_i \cdot \left(1 + \frac{H_{OK}}{H_{OT}} \right) - t_{OK} \cdot \frac{H_{OK}}{H_{OT}}$$

kde t_i vnitřní výpočtová teplota [°C]
 t_{OK} povrchová teplota okna na vnitřní straně [°C]
 H_{OK} výška okna (otvoru ve zdi) [m]
 H_{OT} výška otopného tělesa [m]

Jedinou neznámou je povrchová teplota okna. Tu určíme z rovnosti prostupu a přestupu tepla na vnitřní straně okna

$$k_{OK} \cdot (t_i - t_e) = \alpha_{i,OK} \cdot (t_i - t_{OK})$$

úpravou

$$t_{OK} = t_i \cdot \left(1 - \frac{k_{OK}}{\alpha_{i,OK}} \right) + t_e \cdot \frac{k_{OK}}{\alpha_{i,OK}}$$

kde k_{OK} součinitel prostupu tepla okna udávaný výrobcem [W/m²K]
 $\alpha_{i,OK}$ součinitel přestupu tepla na vnitřní straně okna [W/m²K], jeho velikost uvažujeme stejnou jako při výpočtu tepelných ztrát podle ČSN 06 0210 [$\alpha_{i,OK} = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$]
 t_e venkovní oblastní výpočtová teplota [°C]

Takto určenou povrchovou teplotu t_{OK} dosadíme do předchozího vztahu a určíme střední teplotu otopného tělesa t_{OT} . Podle této teploty volíme příslušný teplotní spád na tělese (u dvoutrubkových otopných soustav je shodný s teplotním spádem na soustavě), tak aby střední teplota byla i průměrnou teplotou teplotního spádu nebo lépe, jak ukázala měření na realizovaných projektech, aby byla teplotou vratné vody ($t_{OT} \approx t_{w2}$).

- tepelný výkon otopného tělesa je přinejmenším roven tepelné ztrátě místnosti

$$Q_{OT} \geq Q_C$$

Jelikož máme již určenu výšku tělesa H_{OT} i jeho délku L_{OT} , dosahujeme příslušného tepelného výkonu tělesa volbou jeho hloubky, tj. typu. U deskových otopných těles pak počtem otopných desek a konvekčních plechů, tj. volbou jednotlivých typů (10, 11, 21, 22, 32, 33) při zachování stejné výšky a délky tělesa.

Volba teplotního spádu

V souvislosti se stále klesající potřebou tepla pro vytápěné objekty a s využíváním kondenzační techniky, inteligentně řízených oběhových čerpadel s proměnnými otáčkami, vyššími nároky na zajištění tepelné pohody ve vytápěném prostoru atd. stále výrazněji zaznívá otázka ohledně správného návrhu velikosti průtoku teplonosné látky, resp. návrhu potrubní sítě a s ním související návrh optimálního ochlazení (teplotního spádu) na otopných tělesech. Oba parametry, tj. jak průtok, tak ochlazení vody v otopném tělese, jsou spolu neoddelitelně svázány a jednoznačně určují podmínky sdílení tepla u otopných těles instalovaných ve vytápěném prostoru.

Oba parametry lze stanovit z provozního diagramu otopného tělesa. Provozní diagram prezentuje vztah mezi tepelným výkonem tělesa Q , průtokem vody tělesem m , teplotou přívodní vody t_{w1} a ochlazením vody v tělese Δt . Lze tak z diagramu určit pro různé provozní podmínky (částečný výkon - přechodné období) a při relativní změně tepelného výkonu otopného tělesa a průtoku vody tělesem ostatní určující parametry. Prezentovaný diagram (obr. 15) vychází z jmenovitých teplotních podmínek daných ČSN EN 442, tj. 75/65/20°C. Na základě znalosti údajů od výrobce pro jmenovitý stav lze z diagramu určit pro zvolené návrhové parametry dosažitelný tepelný výkon a potřebný průtok vody tělesem.

Na dvou jednoduchých příkladech si ukažme, které informace lze z provozního diagramu získat:

Příklad 1:

Projektované teplotní parametry 70/55/20 °C

Tepelný výkon otopného tělesa 80 % jmenovitého výkonu (pro $n = 1,3$)

Průtok vody tělesem 52 % jmenovitého průtoku

Příklad 2:

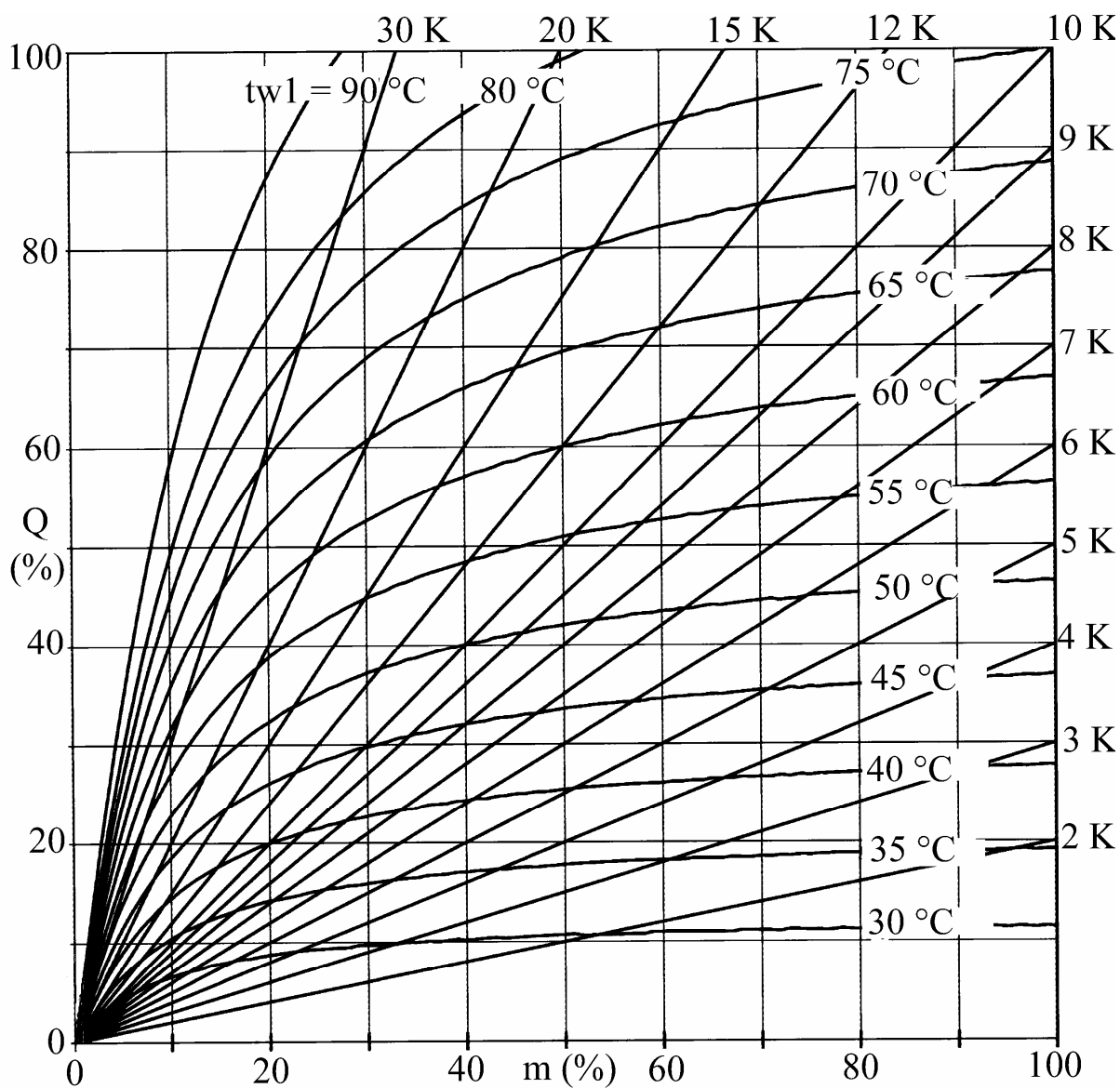
Projektované teplotní parametry 55/40/20 °C

Tepelný výkon otopného tělesa 45 % jmenovitého výkonu (pro $n = 1,3$)

Průtok vody tělesem 30 % jmenovitého průtoku

Vyvstává otázka: jaké teploty, ochlazení a průtok se máme snažit dosáhnout? Základní předpoklady, jako je např. požadované použití kondenzační techniky, tepelného čerpadla, dosažení tepelné pohody včetně optimálního teplotního a rychlostního pole ve vytápěném prostoru dávají určující orientaci stran návrhu teplotní úrovně, resp. teplotních parametrů u otopných těles. Otázka ohledně správné velikosti ochlazení a optimálního průtoku tak nemůže být zcela obecně, jednoznačně a univerzálně zodpovězena, neboť každá otopná soustava vzhledem ke svému zdroji tepla a druhu potrubní sítě a každá otopná plocha vzhledem ke

způsobu sdílení tepla do vytápěného prostoru a k požadavku vytvoření tepelného komfortu požaduje individuální přístup a zvážení hodnot jednotlivých parametrů.



Obr. 15 Provozní diagram otopného tělesa vztažený k jmenovitým podmínkám podle ČSN EN 442 a pro $n = 1,3$

Vztah mezi ochlazením a průtokem

Cílem je zařízení, které funguje pokud možno efektivně. To znamená, že z primární vložené energie chceme získat maximální užitek. Efektivitu zařízení zajišťuje nejen správný návrh, ale v průběhu otopného období především regulace. Zatím co regulace zdroje tepla a otopné soustavy probíhá většinou kvalitativně změnou teploty teplosnosné látky, místní regulace otopného tělesa je

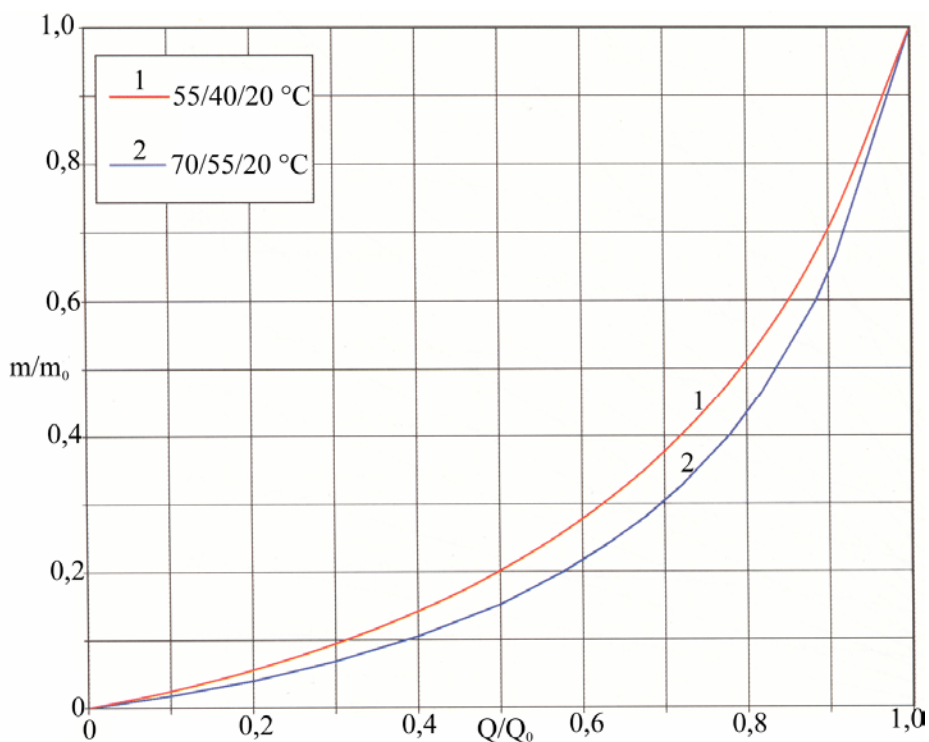
zajišťována kvantitativně změnou průtoku a následně tedy změnou ochlazení vody v tělese (změna střední teploty otopného tělesa).

Při návrhu máme na zřeteli jak teplotu přívodní vody, ochlazení v tělese, tak průtok vody tělesem. Tyto parametry by měly být voleny tak, aby i v přechodném období probíhalo efektivní sdílení tepla z otopné plochy. Většinou se však volí pevně teplotní spád a jemu a tepelnému výkonu příslušný průtok se dopočítá.

Pracovní diagram je konstruován pro jmenovité teplotní parametry podle EN 442 (75/65/20 °C). V průběhu otopného období se však tyto parametry mění a teplota přívodní a zpětné vody je tak odlišná od 75/65 °C.

Obvyklé je značit jmenovité (normované) parametry indexem „N“. Protože však projektant může v projektu za své jmenovité parametry volit odlišné hodnoty od EN 442 je v pracovních diagramech pro volenou jmenovitou hodnotu použito indexu „0“. Pro představu vztahu mezi průtokem a teplotním spádem budou v dalších úvahách však ještě figurovat jmenovité hodnoty.

Hmotnostní průtok vody tělesem je měněn místním regulátorem, tj. termostatickým regulačním ventilem. Vztah mezi tepelným výkonem otopného tělesa a průtokem lze přímo vysledovat z diagramu na obr. 16.



Obr. 16 Vzájemný vztah mezi průtokem a tepelným výkonem pro parametry 70/55/20 a 55/40/20 °C

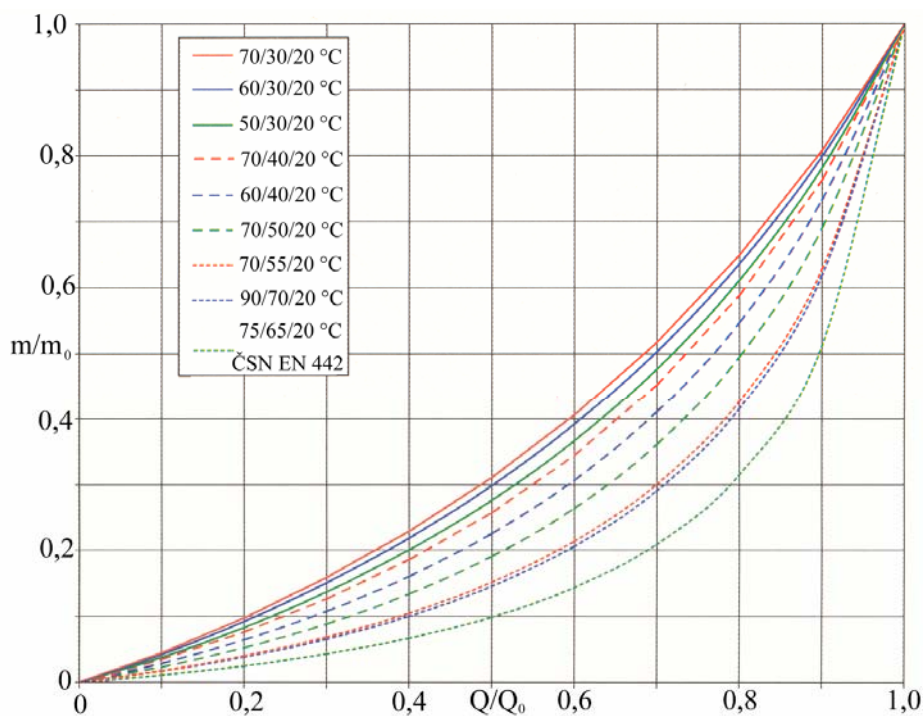
Podle parametrů z příkladu 1 (70/55/20 °C) snižme průtok o 50 %, tím se sníží tepelný výkon přibližně o 17 %. Při pouhých 20 % jmenovitého průtoku je tepelný výkon ještě 58 % výkonu jmenovitého. U druhého příkladu jsme uvažovali nižší teplotu přívodní vody, ale stejné ochlazení (teplotní spád na tělese). Zde je při snížení průtoku o 50 % tepelný výkon ještě 78 % a při 20 % jmenovitého průtoku je tepelný výkon 50 % jmenovitého výkonu.

Ve smyslu efektivní regulace tepelného výkonu je uvedená skutečnost nepříznivá. Výrobci termostatických regulačních ventilů mohou tento efekt charakteristikou ventilu kompenzovat pouze částečně. Který průtok a jaké ochlazení jsou tedy pro efektivní regulaci a optimální sdílení tepla otopnou plochou žádoucí?

Principiálně bychom měli volit takové parametry, které zajistí, že určitá změna průtoku vyvolá stejnou změnu tepelného výkonu. Soustředme se v diagramu (obr. 17) na možný vliv dvou parametrů:

- a) teplota přívodní vody
- b) teplotní spád (ochlazení na tělese).

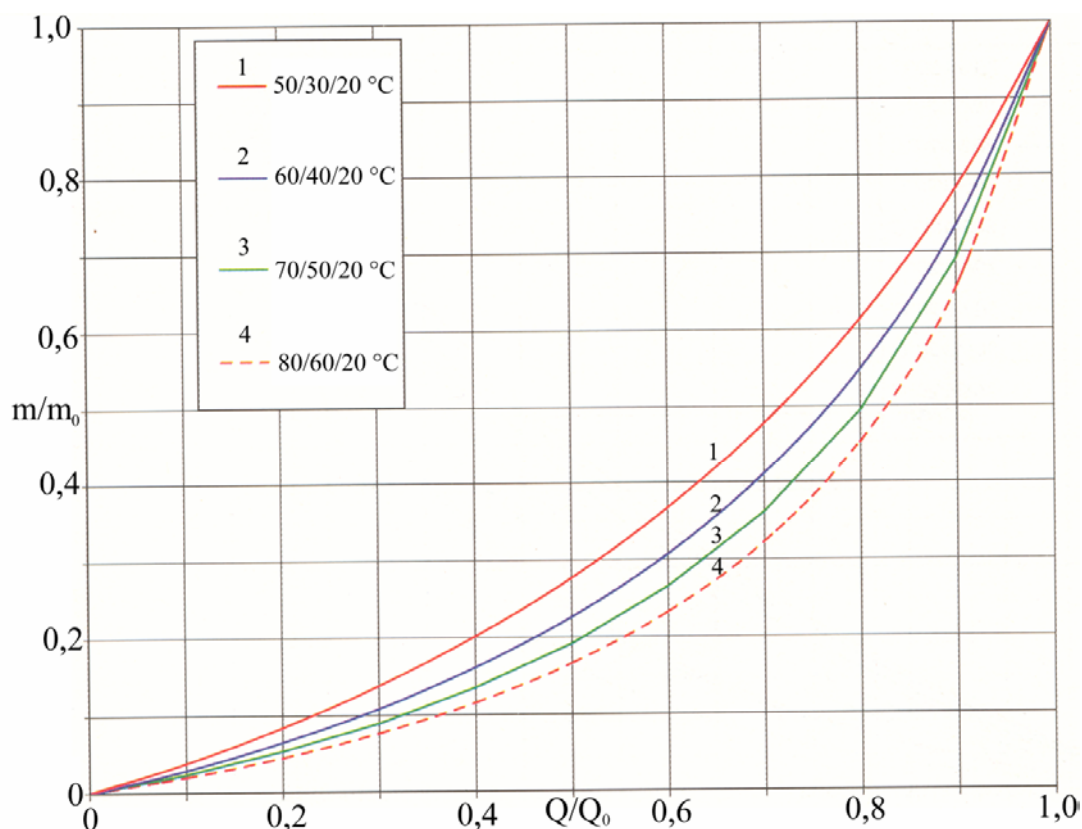
Přesto, že jsou obě veličiny spolu přímo vzájemně svázány, zkusme jejich vliv nejdříve posoudit odděleně.



Obr. 17 Vzájemný vztah mezi průtokem a tepelným výkonem při různých teplotních spádech a teplotě přívodní vody (pro $n = 1,3$)

Ad a) Vliv teploty přívodní vody na změnu výkonu

Abychom zjistili vliv teploty přívodní vody do otopného tělesa na jeho tepelný výkon budeme ji měnit s tím, že teplotní spád zůstane konstantní o hodnotě 20 K. Diagram na obr. 18 ukazuje průběhy získaných charakteristik.



Obr. 18 Vliv teploty přívodní vody na změnu tepelného výkonu při konstantním teplotním spádu 20 K (pro $n = 1,3$)

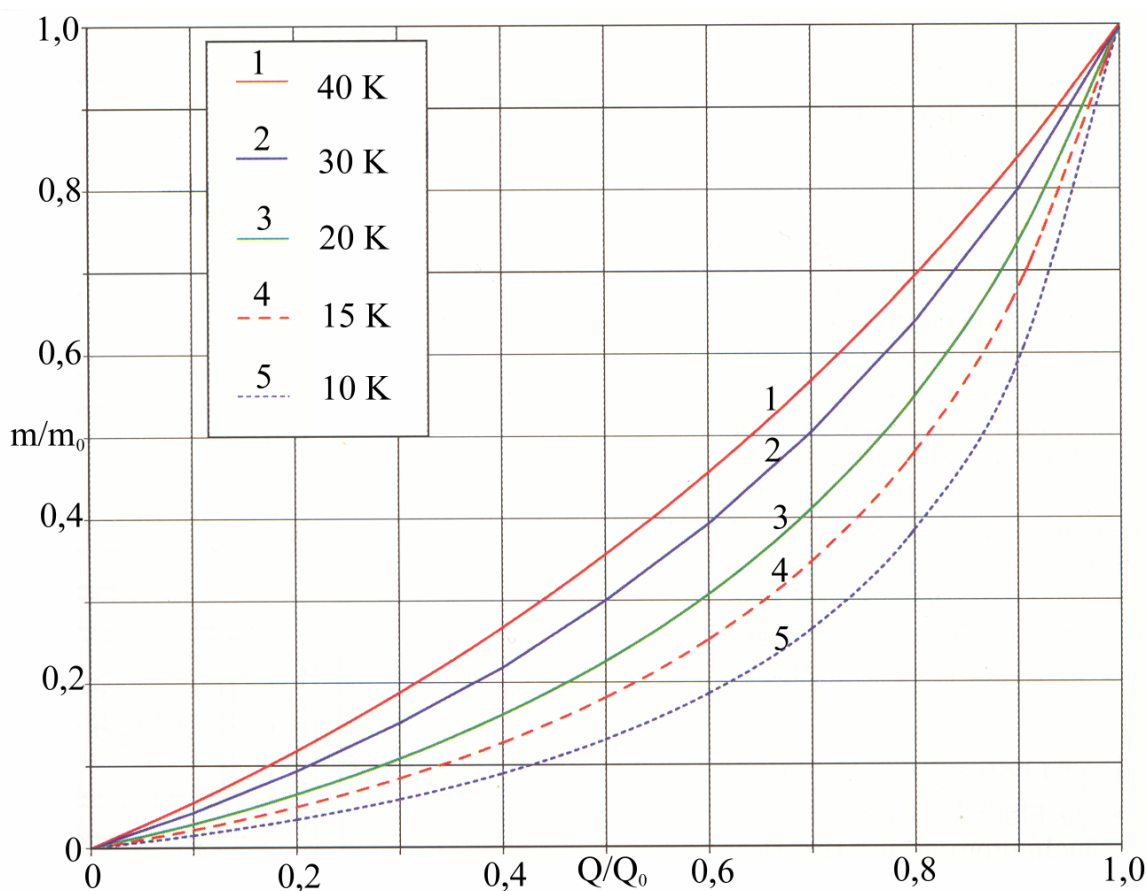
Efekt je téměř zarážející. Můžeme konstatovat, že pokud je naším cílem linearita mezi průtokem a tepelným výkonem je výhodnější co nejnižší teplota přívodní vody do tělesa. Neboli, čím více se teplota přívodní vody do tělesa blíží teplotě vnitřního vzduchu tím je závislost mezi průtokem a tepelným výkonem lineárnější.

Nízká projektovaná teplota přívodní vody je tak z hlediska optimalizace provozu příznivější. K nižší projektované teplotě přívodní vody nás však vedou i jiné požadavky, které kladou většinou zdroje tepla, jako jsou kondenzační kotle, tepelná čerpadla, solární okruhy, ale rovněž i zajištění tepelné pohody v celém vytápěném prostoru a s ním související nová metodika návrhu otopných těles.

Ad b) Vliv teplotního spádu na změnu výkonu

V projektu se vzhledem k otopné soustavě teplotní spád většinou volí a to s ohledem na hydrauliku, resp. na velikost tlakových ztrát a s nimi souvisejícím výkonem oběhového čerpadla. Teplotní spád je však třeba zvážit i s ohledem na regulační chování otopných těles.

Pro následující diagram (obr. 19) je za konstantní považována teplota přívodní vody. V diagramu je uvažována hodnota $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ již s ohledem na předchozí zjištění a teplotní spád se mění.



Obr. 19 Vliv teplotního spádu na změnu výkonu při konstantní teplotě přívodní vody (teplota přívodní vody = $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota okolí = $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 1,3$)

Obr. 19 ukazuje, že čím větší je teplotní spád, tím více se přibližujeme k lineární závislosti mezi průtokem a tepelným výkonem. Mezní hranice ochlazení je určena teplotou vnitřního vzduchu, neboť teplota zpětné vody může být minimálně rovna teplotě vzduchu vytápěného prostoru. Ovšem pak jde velikost otopného tělesa k nesmyslně velikým hodnotám, neboť musí platit:

$$Q = k \cdot S_L \cdot \left(\frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} - t_D \right).$$

Pokud si prohlédneme obr. 18 a 19, zjistíme, že oba sledované parametry významně ovlivňují kvalitu regulačního pochodu u otopných těles. Přitom se zdá nepodstatné zda měníme teplotní spád či teplotu přívodní vody.

Přirozeně jsou jak pro teplotní spád, tak pro teplotu vstupní vody dány určité hranice. Termostatické regulační ventily musí být schopny při velkém teplotním spádu regulovat malé průtoky. Jsme rovněž omezeni velikostí otopných těles, která musí pokrýt tepelnou ztrátu a jejichž střední teplota by měla odpovídat bilančním požadavkům vytápěného prostoru.

Na základě rozboru dříve uvedeného ve smyslu efektivního provozování otopné plochy a optimálního příkonu oběhového čerpadla se teplota přívodní vody pohybuje od 50 do 65 °C a teplotní spád do 20 K jako doporučené hodnoty. Tyto hodnoty odpovídají i bilančním požadavkům vytápěného prostoru při dnes uznávaných teplo-technických parametrech objektů. Závěry nás tak přímo vybízejí k využívání kondenzační techniky, obnovitelných zdrojů tepla a tepelných čerpadel. Je omylem se domnívat, že do nízkoteplotních otopných soustav patří pouze podlahové a stěnové vytápění. Otopné soustavy s otopnými tělesy lze při dnešních teplo-technických vlastnostech obvodových konstrukcí bez problémů navrhovat jako nízkoteplotní aniž bychom měli problémy s velikostí otopných těles.

Literatura

Bašta, J.: Otopná tělesa – sešit projektanta č. 5. STP 2000, ISBN 80-02-01351-4, 211 s.

Bašta, J.: Otopné plochy. Praha: Ediční středisko ČVUT, 2001. – 328 s. – ISBN 80-01-02365-6.

Bašta, J., Kabele, K.: Otopné soustavy teplovodní – sešit projektanta. Druhé přepracované vydání. STP 2001, ISBN 80-02-01426-X, 77 s.

Bašta, J.: Hydraulika a řízení otopných soustav. Praha: Ediční středisko ČVUT, 2003. – 252 s., 209 obr., ISBN 80-01-02808-9.

Bašta, J.: Návrh otopných těles a tepelná pohoda. In: Vytápění rodinných domů. STP Praha 2001. s. 41 – 50. ISBN 80-02-01457-X

Bašta, J.: CFD und neue Auffassung des Heizkörperentwurfs. In: Heizung Lüftung/Klima Haustechnik, Bd. 54, 3/2003. s. 36-41. ISSN 1436-5103.

Bašta, J.: Einfluss von Abdeckungen auf die Wärmeleistung des Heizkörpers. In: Heizung Lüftung/Klima Haustechnik, Bd. 54, 7/2003. s. 43-46. ISSN 1436-5103

Bašta, J.: Projektujeme otopná tělesa správně? In: CTI – INFO. – Roč. 98, č. 4 (1998), s. 14-17.

Bašta, J.: Zákryty otopných těles a jejich vliv na tepelný výkon. In: Vytápění, větrání, instalace. 8, č.3 (1999), s. 114 – 118

Bašta, J.: Kombinované otopné soustavy aneb soustavy s otopnými tělesy a podlahovou otopnou plochou. VVI, 2000, roč. 9, č. 2, s. 63 - 66.

Bašta, J.: Návrh otopných těles a tepelná pohoda. In: Korado speciál. č. 2, 3 – 20000

Bašta, J.: Návrh otopných těles a tepelná pohoda. In: <http://www.topinfo.cz>, 1.8.2000

Bašta, J.: Přepočet výkonu otopných těles optimálně a podle EN. In: <http://www.topinfo.cz>, Rubrika podklady pro projektanty. 29.8.2000

Bašta, J.: Tepelný modul otopného tělesa. In: <http://www.topinfo.cz>, Rubrika podklady pro projektanty. 29.8.2000

Bašta, J.: Problematika otopných těles ze slitin hliníku instalovaných v otopných soustavách. In: <http://www.topinfo.cz>, Rubrika: „Podklady pro projektanty“. 2.2.2001

Bašta, J.: Volba teplotního spádu. In: <http://www.topinfo.cz>, Rubrika: „Projektování“. 13.4.2001

Bašta, J., Huml, J.: Nové poznatky o zákrytech deskových otopných těles. In: VVI, 2001, roč.10, č.3, s. 110 – 113.

Bašta, J., Dvořák, P.: Vliv velikosti výdechového otvoru zákrytu na tepelný výkon deskových otopných těles. In: VVI, 2002, roč. 11, č. 3, s. 90-92.

Bašta, J.: Otopná plocha a ovlivnění parametrů vnitřního prostředí. In: <http://www.tzb-info.cz>, 1.11.2002

Bašta, J.: Připojení otopných těles a změna tepelného výkonu. In: Topenářství-Instalace, roč. 37, č. 196, 5/2003, s. 44-45. ISSN 1211-0906.

Bašta, J., Vavříčka, R.: Tepelná izolace na obvodové konstrukci za otopným tělesem. In: VVI, 2004, roč. 13, č. 1, s. 25-26. ISSN 1210-1389.

Bašta, J.: Další nové poznatky o zákrytech otopných těles. In: Vytápějme levně a bezpečně VIII. – Pardubice: O.z. Ivana Hovorková, 2002. – s. 41-45.

Bašta, J., Šourek, B.: Starting up of Radiators in By-pass. In: Workshop 2003 Part B. Prague: Czech Technical University. s.1212 p. 640-641. ISBN 80-01-02708-2.