

POMOCNÝ UČEBNÍ TEXT K PŘEDMĚTU APLIKOVANÁ FYZIKA

SÁLAVÉ OTOPNÉ SYSTÉMY

(Vlastnosti, projekční zásady a numerické výpočty)

Prof. RNDr. Tomáš Ficker, DrSc.

Brno, 2019

OBSAH

1. Důležité informace úvodem	3
1.1 Proč by se měli studenti stavebních oborů obeznámit se sálavým vytápěním?	3
1.2 Proč neexistuje česká stavení norma pro maloplošné sálavé vytápění?	3
1.3 Příprava ke zkoušce z předmětu CB001	4
2. Úvod do sálavého vytápění [1-4]	4
2.1 Rozdělení sálavých otopných soustav	6
3. Rozdíl mezi sálavým a konvekčním vytápěním	10
4. Celková pohoda prostředí [2]	12
4.1 Hygienická pohoda	12
4.2 Tepelná pohoda	12
5. Sálavé vytápění průmyslových prostor [1 - 8]	13
5.1 Výkonové plynové sálavé zářiče	14
5.1.1 Tmavé plynové zářiče [5]	14
5.1.2 Světlé plynové zářiče [6 - 8]	16
5.1.3 Zásady projekce plynových zářičů do velkých prostor [4 - 5]	19
5.1.4 Ukázková projekce TMAVÝCH sálavých panelů do velké haly	24
5.1.5 Ukázková projekce SVĚTLÝCH sálavých panelů do velké haly	27
5.2 Výkonové teplovodní sálavé panely [4 -5]	31
5.2.1 Zásady projekce teplovodních panelů do velkých prostor [4 - 5]	36
5.2.2 První ukázková projekce TEPLOVODNÍCH sálavých panelů (90/70 °C) do velké haly	41
5.2.3 Druhá ukázková projekce TEPLOVODNÍCH sálavých panelů (80/60 °C) do velké haly	50
5.2.4 Přirozená cirkulace u teplovodního vytápění	58
5.3 Elektrické sálavé panely do bytových prostor	58
5.3.1 Obecný postup projekce elektrických sálavých panelů do bytového prostoru	61
5.3.2 Ukázková projekce ELEKTRICKÝCH sálavých panelů do bytových prostor	62
6. Výpočty tepelných výkonů sálavých panelů	67
6.1 Sálavý výkon panelů	68
6.1.1 Pohledový faktor uzavřených obálek (místností)	68
6.1.2 Přenos tepla zářením mezi povrchy v místnosti	72
6.1.3 Ukázkový příklad přenosu zářivého tepla ve dvou-plošné místnosti	74
6.1.4 Ukázkový příklad přenosu zářivého tepla ve tří-plošné místnosti	76
6.1.5 Příklad k samostatnému řešení	79
6.1.6 Příklad k samostatnému řešení	79
6.2 Konvektivní výkon panelů	80
Konvektivní přenos tepla vzniká všude tam, kde fluidum (kapalina nebo plyn) dané teploty obtéká povrch látky s teplotou odlišnou od fluida. Přenos tepla se děje vždy ve směru od vyšší teploty k nižší teplotě, takže pokud je fluidum teplejší, pak teplo předává látce, je-li látka teplejší, pak fluidum odebírá teplo z povrchu látky a tím, že proudí, odnáší přijaté teplo na další místa prostoru. Takto např. funguje konvekce u radiátorů ústředního topení - vzduch přijímá teplo od radiátoru a prouděním roznáší teplo po místnosti	80
6.2.1 Nucená konvekce	81
6.2.2 Přirozená konvekce	84
7. Literatura	92
8. Pomocné internetové adresy a tabulky	93
9. Tabulky pro vodu, ocelové trubky, součinitelé místních odporů a tepelné vlastnosti vzduchu	93

1. Důležité informace úvodem

Tento výukový text se týká moderního, vysoce úsporného způsobu vytápění pomocí **maloplošných sálavých panelů**. Rozvoj tohoto způsobu vytápění zaznamenal zejména v posledních dekádách značný technický rozvoj a na vývoji dalších, vylepšených generací sálavých panelů se stále pracuje. Byly vyvinuty různé systémy sálavých panelů podle toho, do jakých prostor jsou určeny. Existují systémy vhodné jak pro velké výrobní nebo komerční haly, velká kulturní zařízení (koncertní, divadelní, přednáškové, sportovní prostory), tak i pro malé prostory (malé kanceláře, malé obchody, bytové prostory ap.). Tento učební text seznámí čtenáře se všemi hlavními modifikacemi sálavých panelů a naučí je **základním zásadám projekční činnosti**, které se vztahují jak k průmyslovému, tak k bytovému sálavému vytápění.

1.1 Proč by se měli studenti stavebních oborů obeznámit se sálavým vytápěním?

Přednášková skupina CB001 sestává ze studentů z oboru pozemního stavitelství (projektantů a staticků) a ze studentů oboru TZB. ***Na celé Stavební fakultě VUT není jediný předmět, který by se zabýval sálavým vytápěním pomocí maloplošných panelů, ačkoliv jde o velmi moderní, perspektivní a rychle se rozvíjející obor vytápění, se kterým se absolventi dříve či později ve své praxi setkají.*** Je tedy namístě, aby se frekventanti jak z pozemního stavitelství, tak z oboru TZB s tímto oborem seznámili. Dokonce i pro staticky bude velmi užitečné, aby získali povědomost o této disciplíně, protože např. robustní průmyslové systémy panelů zavěšené u stropu hal mohou dosahovat délky i několika stovek metrů a hmotnosti i několika tun, což vyžaduje statické posouzení únosnosti stropu - nedávná havárie (r. 2019) dřevěného stropu ve sportovní hale v České Třebové během sportovního zápasu je varovným příkladem, který ukazuje na nutnost statického posouzení. Pokud by se do takové haly s nespolehlivým stropem měly zavěšovat sálavé panely, pak by s největší pravděpodobností došlo ke zřícení stropu již v průběhu instalace. Jak čtenáři uvidí později, existují modifikace panelů určené přímo pro sportovní haly. Průběh havárie zmíněného stropu je možno sledovat na následujícím videu (video je optimalizováno pro prohlížeč Google Chrome):

<https://video.aktualne.cz/kamera-zachytila-pad-strechy-nove-sportovni-haly-v-ceske-trebove/r~2d614972dbec11e6be7d002590604f2e/r~ce300978dc9c11e694810025900fea04/>

1.2 Proč neexistuje česká stavební norma pro maloplošné sálavé vytápění?

Po přechodu na tržní ekonomiku po roce 1989, se na trh v České republice dostala řada zahraničních výrobků sálavých panelů a původní česká stavební norma (ČSN 06 0215), určená pro projekci těchto panelů do vnitřních prostor, musela být zrušena, protože neodpovídala zahraničním výrobkům. ***V současné době (r. 2019) není v České republice žádná stavební norma pro maloplošné sálavé panely, kterou by projektanti mohli využívat.*** V praxi se nejdříve musí projektant domluvit s investorem na konkrétním výrobcu, od kterého budou panely kupovat, a pak při jejich projekci do daných prostor ***postupovat podle firemní dokumentace.*** Výrobců je větší množství, takže bylo nutné některé z nich vybrat, aby tento učební text mohl poskytnout ukázky a prezentovat konkrétní zásady projekce. V České republice existují dva kvalitní výrobci sálavých panelů.

BYTOVÉ SYSTÉMY sálavých panelů vyrábí a dodává firma Fenix (sídlo v Jeseníku a Praze):
<https://www.fenixgroup.cz/cs/salave-topne-panely>

PRŮMYSLOVÉ SYSTÉMY vyrábí a montuje firma Kotrbatý s.r.o. (výrobna v Pelhřimově, sídlo v Praze): <http://www.kotrbaty.cz>

Tento text čerpá z projekčních zásad uvedených dvou firem, protože - jak bylo již řečeno - v České republice momentálně (r. 2019) neexistuje závazná stavební norma pro projekci maloplošných sálavých panelů do vnitřních prostor budov. *Není ovšem nutné studovat výrobní dokumenty těchto firem na jejich webových stránkách - potřebné vědomosti jsou dostatečně shrnuty v tomto učebním textu.*

1.3 Příprava ke zkoušce z předmětu CB001

Tato brožura obsahuje vše, co bude vyžadováno u zkoušky. Je sestavena na *minimalistické bázi* tak, aby zahrnovala jen podstatné instrukce umožňující projekci sálavých panelů. Díky tomuto minimálnímu uspořádání se doba potřebná k přípravě na zkoušku redukuje přibližně na **4 dny**. V přednáškách je sice o tomto tématu pojednáno poněkud širěji s ohledem na eventuelní zájemce o hlubší porozumění předmětu, ale **u zkoušky bude vyžadováno pouze to, co je uvedeno v této minimalistické brožuře.** *Zkouška může mít 3 varianty: (1)pouze testové otázky, (2)kombinace testových otázek a jednoho rozsáhlejšího numerického příkladu, (3)pouze dva rozsáhlejší numerické příklady. Během semestru se studenti na základě ankety rozhodnou, kterou variantu si zvolí. Bližší informace na přednášce.*

Za některými kapitolami této brožury jsou uvedeny otázky se čtyřmi odpověďmi. Je třeba všechny projít a vyzkoušet si nabyté vědomosti, protože pokud by zkouška sestávala z otázkového testu, pak by test byl sestaven především z poskytnutých otázek a odpovědí (viz samostatný soubor). Během zkoušky by se na plátno postupně ve dvouminutových intervalech promítaly některé z otázek včetně čtyř nabídnutých odpovědí. Studenti by odpovídali písemně číslem otázky a písmenem vybrané odpovědi. Během zkoušky není dovoleno používat poskytnutou literaturu.

Podrobnější instrukce ke zkoušce naleznete v samostatných dvou přídatných souborech otázek a příkladů.

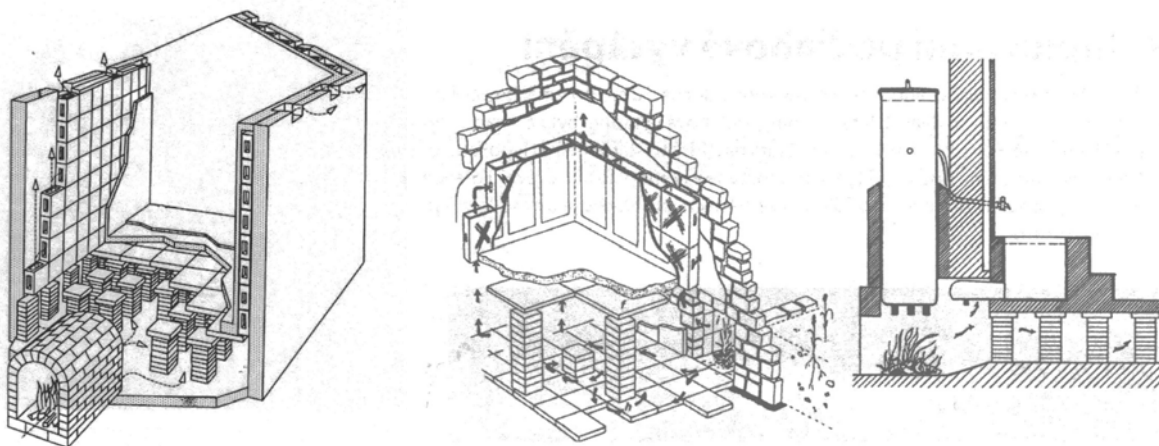
2. Úvod do sálavého vytápění [1-4]

Vytápění dělíme podle způsobu přenosu tepla od zdroje do okolí na:

- a) **Konvekční vytápění** (tepelné proudění)
- b) **Sálavé vytápění** (elektromagnetický zářivý přenos tepla)

V podstatě nelze obě složky přenosu tepla od sebe zcela oddělit, a proto u každého zdroje tepla jsou přítomny. Nejsou však přítomny rovnocenně. Zdroj tepla, u kterého převládá přenos tepla konvekcí (prouděním) se považuje za konvekční zdroj a naopak, převládá-li sálavý elektromagnetický přenos tepla, mluvíme o sálavém zdroji tepla.

Prvními uměle vytvořenými sálavými soustavami byla již ohniště pravěkých lidí nebo krby ve středověkých sídlech. Velmi dokonalého sálavého vytápění se stěnami zahřívánými vzduchem užívali ve svých lázních již staří Římané. Šlo o tzv. *hypokaustum* (viz obr. 1) a představovalo vlastně první systém podlahového vytápění. Navrhl jej Sergius Orata 80 let před naším letopočtem. Spaliny venkovního ohniště byly vedeny tunelem pod dutou podlahou, která spočívala na sloupcích, mezi kterými byly dutiny. Horké spaliny procházely dutinami pod podlahou a ústily do dutých svislých stěn, odkud se komínovým efektem dostávaly ven. Podlaha a dokonce i stěny byly tím pádem vyhřívány. Nad ohništěm byl umístěn také bojler s vodou, odkud se horká voda vedla potrubím do vnitřku lázní (viz obr. 1 a 2).



Obr. 1 Schéma starořímského hypokausta.



Starořímské Hypokaustum – použití kruhových cihel pro tvorbu spalinových dutin



Obr. 2 Starořímské Hypokaustum – použití čtvercových cihel pro tvorbu spalinových dutin

K sálavým otopným plochám je možné také počítat starodávná kachlová kamna minulých století. Historie sálavého vytápění je tedy velmi stará.

Koncem 19. století vzešly do obecného povědomí soustavy teplovodního vytápění. Za vynálezce teplovodního vytápění je považován francouzský architekt Jean Simon Bonnemain (1743 - 1830), který instaloval zařízení v Vchâteau du Pecq nedaleko Paříže, které již obsahovalo kotel, rozvodné potrubí, expanzní nádobu a otopná tělesa. Nicméně, teplé vody v otopné soustavě bylo použito již v roce 1710 až 1714 v Rusku pro ústřední vytápění letního paláce Petra Velikého v Petrohradu. O něco později, v roce 1716, byla teplovodní otopná soustava použita ve Švédsku pro vytápění obytných budov. Švédský inženýr

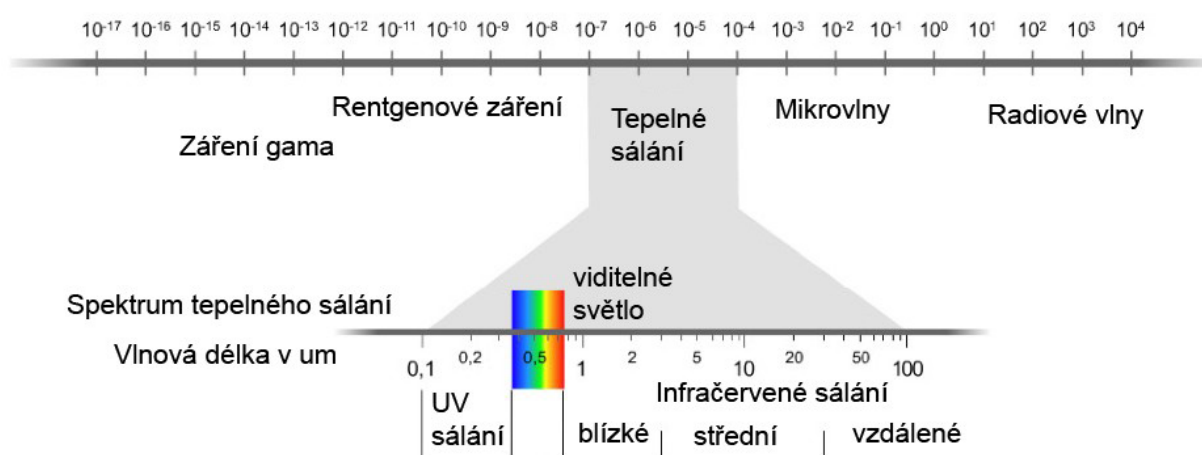
Mårten Triewald použil, pøibližnø v tØze dobØ, teplovodni soustavu k vytpØni sklenk u Newcastle. Otopn tØlesa se dve vyrbØla pøevžnØ z litiny, pozdØji z ocelovØho plechu. PokusnØ se vyrbØl i z mØdi.

Vvoj modernho slavØho vytpØn se vřak obvykle pot ař od roku 1906, kdy Anglian A.H.Barker poprvØ použil k vytpØn plochch nstØnnch panel s otopnmi trubkami zaltmi v sdrovØ omtce. Z tØchto slavch panel se pak brzy vyvinuly stropn a pozdØji i podlahovØ otopn plochy se zabudovanmi trubkami. Ve 30. letech 20. stolet se zaalo s ukldnm trubek do strop a podlah, mř se vytvøely *velkoplořn otopn plochy* a v zsadØ tak dořlo k obnovØn starØho řmskØho podlahovØho vytpØn.

TØsnØ pøed druhou svØtovou vlkou byly vyvinuty kovovØ slavØ panely, kterch se pouřv zejména pro vytpØn vysokch prostor pømyslovch provozoven. Zatm poslednm vvojovm stupnØm slavØho vytpØn jsou infraervenØ zøe (plynovØ nebo elektrckØ), kterch se ve vØtřm mØřtku zaalo pouřvat ař po roce 1950.

V naři zemi v r. 1955 vyvinul I. ernck z Kovotechny Praha *infraervenØ svØtlØ plynovØ zøe*, kde jako innou otopnou plochu pouřl *keramckØ perforovanØ destky*. Princip je založen na *bezplamennØm povrchovØm hoøen*. Povrchov teplota destek je 850 ař 900 °C. Destky pøi provozu svt - odtud nzev "svØtlØ plynovØ zøe". Vroby se ujal zvod Moravia MarinskØ dol u Olomouce. Prvni soustava se svØtlmi zøi byla instalovna v eskch lodØnicch v Praze. Nsledovalo nØkolik realizac soustav se svØtlmi zøi, avřak bØhem doby se pouřvn zø omezilo pouze na vytpØn loklnch pracoviřt, nebo menřch prostor. Po roce 1989 pøiřly na trh zahranin vroby a vroby se ujaly i eskØ firmy. Zaaly se prosazovat i *zøe tmavØ*, kde otopnou plochu tvoø trubice, uvntø kterch dochzi ke spalovn zemnho plynu se vzduchem. Povrchov teplota trub je 180 ař 500 °C.

Rozsah vlnovch dØlek tepelnØho sln v rmci elektromagnetckØho spektra - viz nsledujc obrzek:



2.1 RozdØlen slavch otopnch soustav

Způsoby sálavého vytápění lze rozdělit na:

- A) Velkoplošné vytápění (stropní, podlahové a nástěnné otopné plochy)
- B) Individuální (lokální) vytápění blízkými panely.
- C) Celkové vytápění zavěšenými sálavými panely
- D) Vytápění infračervenými zářiči

A) Velkoplošné vytápění (stropní, podlahové a nástěnné otopné plochy): Otopnou plochou při *velkoplošném* vytápění je obvykle některý povrch ohraničující vytápěný prostor. Nejčastěji to je strop, méně často podlaha a jen zřídka některá ze svislých stěn. Povrchová teplota otopné plochy je poměrně nízká: 40 až 45 °C u stropního vytápění, 25 až 30 °C u podlahového vytápění a 55 až 60 °C u svislých otopných ploch. Otopná plocha je zahřívána teplou vodou, teplým vzduchem nebo elektricky (odporově). Konstrukční provedení otopné plochy může být velmi rozmanité. V zásadě rozeznáváme dva způsoby:

- (i) Otopná plocha je nedílnou součástí konstrukce (zabudované topné prvky uvnitř stavební konstrukce).
- (ii) Otopná plocha je samostatná (zahřívána deska upevněná nebo zavěšená na povrchu stavební konstrukce).

V prvním případě (i) je otopnou plochou povrch konstrukce, který je zahříván teplou vodou proudící trubkovými hady (registry). Trubky jsou zabudovány (zabetonovány nebo zazděny) pod povrchem stavební konstrukce. Jestliže je sálavé vytápění zřizováno dodatečně v hotové stavbě, mohou se trubkové hady zavěsit pod nosný strop a v podhledu se zakryjí vhodným způsobem (např. přidavnou vrstvou omítky). Při elektrickém vytápění jsou v povrchové vrstvě stavební konstrukce zabudovány místo trubkových hadů odporové kabely. Elektricky zahřívání plochy mohou být řešeny opět velmi rozmanitě.

Předností stavební konstrukce se zabudovanými trubkovými hady je jednoduchost, poměrně snadná montáž a dále velká odolnost zařízení. Nevýhodou je velká tepelná setrvačnost těchto systémů.

Ve druhém případě (ii) se používají samostatné **otopné panely** (otopné desky), které se zavěšují na stěny místnosti nebo umísťují volně v prostoru (rozmístění pomocí stojanů). Otopné plochy panelů jsou nejčastěji kovové, mohou však být i z jiného materiálu, např. z keramiky, ze skla, z mramoru nebo dokonce i ze dřeva, pokud to vyžaduje architektonické řešení interiéru. Tyto otopné desky se zahřívají obvykle elektricky. Pouze kovové desky zavěšené na stěně místnosti bývají obvykle napájeny teplou vodou, ale nemusí to být pravidlem. Elektrické napájení je možné i tam.

U soustav s otopnými deskami připevněnými na povrchu stěn lze vhodnou tepelnou izolací zadní strany desek snížit tepelnou absorpci stěn, čímž dojde k "pružnějšímu" (pohotovějšímu) vytápění. Zejména elektricky zahřívání desky je nutno řešit tak, aby se plně využilo pružnosti elektrického vytápění.

Klady a zápory stropního a podlahového velkoplošného vytápění:

- **Stropní vytápění.** K vytvoření otopné plochy je k dispozici celý strop (nutno pamatovat i na rozmístění osvětlovacích prvků). Povrchová teplota může být větší než u podlahového vytápění. Poměr mezi sáláním a konvekcí je u stropu velmi příznivý - přibližně 2,5:1.

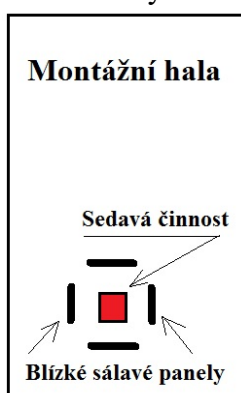
Nevýhoda stropního vytápění je v tom, že největší sálavý účinek otopné plochy je v místě hlavy člověka ať již sedícího nebo stojícího. Lidská hlava je velmi citlivá na

přehřívání.

- **Podlahové vytápění.** U tohoto typu vytápění je nevýhodou omezená povrchová teplota, která nesmí být z fyziologických důvodů vyšší než 25 až 35 °C. Další nevýhodou je skutečnost, že efektivně vytápí pouze podlahová plocha nezastavěná nábytkem, takže se tímto efektivní otopná plocha podlahy částečně redukuje. Může se stát, že přílišné zastavění podlahy nábytkem, pokud není zohledněno v návrhu, způsobí nedostatečnost vytápění místnosti a pak je nutno doplňovat absenci tepla jiným způsobem (např. otopnou plochou ve svislých stěnách). Další nevýhoda podlahového vytápění, která se projeví zejména ve vysokých místnostech, je v tom, že poměr mezi sáláním a konvekcí je jen asi 1:1 (tj. podlahová otopná plocha je intenzivně ochlazována konvekcí).

Výhodou podlahového vytápění je rovnoměrnější osálení lidského těla ve srovnání se stropním sáláním.

B) Lokální vytápění osamělých pracovišť blízkými panely: Blízkými sálavými deskami lze dosáhnout podmínek tepelné pohody jen na omezeném místě, např. na osamělém malém pracovišti uvnitř velké haly. Poměr mezi teplotou vzduchu a teplotou okolních ploch může být téměř libovolný. Je možno snížit teplotu vzduchu v prostoru až na venkovní teplotu. Tento způsob vytápění je proto velmi hospodárný, avšak je možno jej užít jen v případech ojedinělých lokálních pracovišť umístěných velkých prostorech (např. ve výrobních halách), nebo pokud jde o lokální pracoviště, na nichž se vyžaduje vyšší výsledná teplota než v ostatním prostoru (např. při kontrole chlazených výrobků ap.). Blízkými sálavými deskami je možno také vytápět i v otevřeném prostoru - v takovém případě je však vhodnější použít infračervených zářičů.

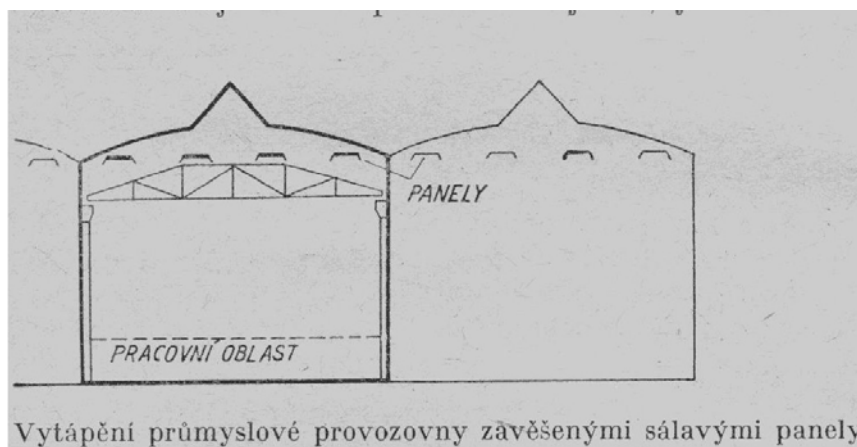


Sálavé desky jsou umístěny buď svisle kolem pracovního místa (viz nákres na obr. 3) nebo vodorovně nad pracovním místem. Desky jsou zahřívány teplou vodou (zřídka párou) nebo elektricky odporovým teplem. Povrchová teplota svislých desek umístěných těsně kolem pracovního místa má být nejvýše 60 až 70 °C. Vodorovné panely zavěšené nad pracovním místem mohou mít vyšší povrchovou teplotu (podle výšky zavěšení panelů).

Jako blízké sálavé desky mohou sloužit také infračervené keramické panely zahřívané elektricky na teplotu až 200 °C. Tyto panely se zavěšují nad pracovní místo.

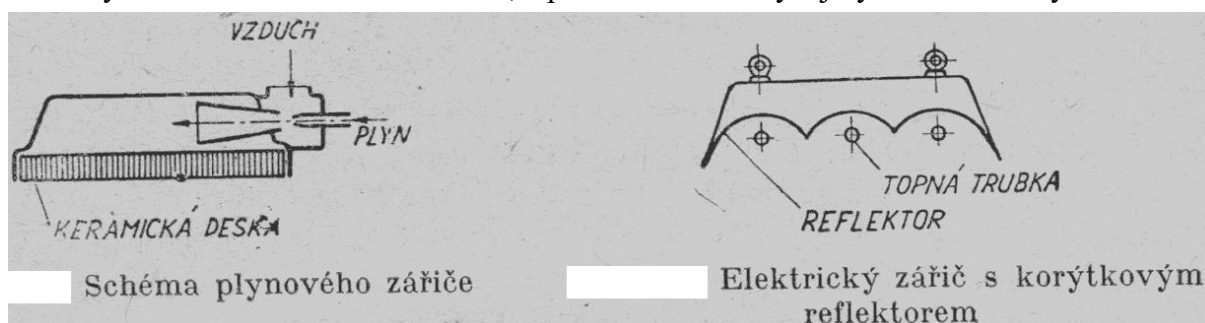
Obr. 3 Blízké panely.

C) Celkové vytápění zavěšenými sálavými panely: Pro celkové vytápění *vysokých prostorů* (např. průmyslových provozoven a hal) se používají *zavěšené sálavé panely*. Panely jsou úzké kovové desky, volně zavěšené podél celé haly v jisté výšce nad podlahou. Pojíždí-li v provozovně stropní jeřáb, je nutno umístit panely nad jeřábovou dráhu. Panely jsou zahřívány horkou vodou nebo párou. Teplota účinného (spodního) povrchu panelů je nejvýše 120 až 140°C. Horní strana panelů musí být dobře izolována. Sálavým teplem usměrněným dolů se zvýší účinná teplota ploch v pracovní oblasti, takže tepelná pohody lze dosáhnout při teplotě vzduchu jen 8 až 10 °C. Snížením teploty vzduch se pak velmi podstatně zmenší tepelná ztráta větráním. Spotřeba paliva při vytápění zavěšenými panely je o 20 až 30 % nižší než spotřeba paliva při teplovzdušném vytápění.



Obr. 4 Zavěšené sálavé panely průmyslových hal.

D) Vytápění infračervenými zářiči: Místnosti lze také vytápět *plynovými nebo elektrickými infračervenými zářiči* (viz obr. 5). U plynových zářičů je zdrojem sálání **keramická deska**, která se **bezplamenným povrchovým spalováním plynu** zahřívá na teplotu 800 až 900 °C. Deska vydává červeně zabarvené světlo, a proto se často nazývají tyto zářiče světlymi zářiči.



Obr. 5 Plynový a elektrický infrazářič.

U elektrických zářičů je zdrojem sálání keramické tělísko nebo kovová trubka s keramickou náplní. Zdroj je odporově zahříván na teplotu 400 až 800 °C (u keramických tělísek může být povrchová teplota ještě vyšší). Tepelné paprsky vysílané zdrojem jsou usměrněny pohyblivým nebo pevným korýtkovým reflektorem z lesklého kovu k vytápěné oblasti.

Infračervenými zářiči se s úspěchem vytápějí zejména půdorysně rozlehlé a vysoké místnosti (např. průmyslové provozovny, shromažďovací sály, restaurační místnosti, nádražní dvorany atd.). Při *permanentním vytápění* velkých a vysokých místností (např. průmyslové haly) se uplatňuje, podobně jako při vytápění zavěšenými panely, velká hospodárnost tohoto způsobu vytápění, která je umožněna tím, že se nevytápí celý prostor, ale jen ta místa v pracovní oblasti, kde pobývají lidé. Při *krátkodobém vytápění* se uplatní další přednost zářičů, tj. jejich nepatrná tepelná setrvačnost. Teplo je k dispozici takřka ihned (za 1 až 2 minuty) po spuštění zářičů a naopak ihned po zastavení přestávají zářiče vysílat tepelné paprsky.

Infračervených zářičů lze také použít - jako jediného možného způsobu vytápění - k vytvoření tepelné pohody ve volném prostoru, např. na tribunách sportovních stadionů, nádražních nástupištích, chodnicích frekventovaných ulic ap.

Otázky ke kapitole 2

2.1 Co je hypokaustum

- starořímský chrám vytápěný konvektivně
- starořímský chrám vytápěný sálavým způsobem
- starořímské lázně vytápěné podlahou a stěnami
- starořímské lázně vytápěné krbovým způsobem

- 2.2 Vývoj moderního sálavého vytápění se obvykle počítá od počátku
18. století
 19. století
 20. století
 21. století
- 2.3 Celoplošně sálavě vytápěné stropy, na rozdíl od podlahových sálavých ploch, mohou dosahovat
- vyšších teplot
 - vyšších konvektivních výkonů
 - horšího prostorového využití ozařované plochy místnosti
 - menší setrvačnosti při chladnutí
- 2.4 Co se rozumí individuálním lokálním vytápěním blízkými panely ve velkých průmyslových objektech
- rozmístění lokálních panelů po obvodových stěnách průmyslového objektu
 - rozmístění lokálních panelů na stropě průmyslového objektu
 - rozmístění lokálních panelů v blízkosti často otevíraných vrat do velkého průmyslového objektu
 - rozmístění lokálních panelů v blízkosti osamělého malého pracoviště uvnitř velkého průmyslového objektu

3. Rozdíl mezi sálavým a konvekčním vytápěním

Otopná tělesa dodávají do místnosti teplo třemi způsoby: sáláním (pomocí tepelných elektromagnetických vln), konvekcí (pomocí cirkulace teplého vzduchu) a vedením. *V místnostech se uplatňují dva hlavní tepelné transporty, a to sálání a konvekce. Jestliže výkon otopného tělesa je z více jak padesáti procent tvořen sálavým teplem, pak jde o sálavý zdroj tepla. V opačném případě jde o konvekční zdroj tepla.*

U konvekčního vytápění ohřívají otopná tělesa nejprve *vnitřní vzduch* a ten potom předává teplo stěnám a ostatním předmětům v místnosti. Teplota vzduchu je tedy u konvekčního vytápění vyšší než povrchová teplota stěn.

U sálavého vytápění se v místnosti přednostně ohřívají *stěny a zařízení* a od nich následně se zahřívá vzduch. Proto mají stěny a zařízení vyšší teplotu než vzduch v místnosti.

Pozitiva sálavého vytápění:

Největší předností sálavého vytápění je možnost *usměrnit proud tepla (sáláním)* jen k těm místům, kde je třeba vytápět a dále to, že není třeba zahřívát vzduch ve vytápěném prostoru. Využitím těchto vlastností sálavého vytápění se velmi podstatně zmenší spotřeba tepla. Dále se umožní *vytápět i venku*, mimo uzavřený prostor, kde jiných (konvekčních) způsobů vytápění by vůbec nebylo možno použít.

Velmi výhodná je také *nepatrná setrvačnost* některých způsobů sálavého vytápění, zejména infračervených zářičů a v menší míře i kovových panelů. Nepatrná setrvačnost dovoluje

používat zářičů pro *krátkodobé vytápění*. Zářivé teplo je pohotově k dispozici podobně jako světlo buzené elektricky.

Velmi důležité jsou také *fyziologické a hygienické přednosti* sálavého vytápění. Všeobecně je známo, že příjemnější tepelné pocity máme *při chladném vzduchu a teplých stěnách*, než při opačných teplotních poměrech. Také dýchání chladnějšího vzduchu je příjemnější a výkonnost stoupá, pokud ovšem je zachována tepelná rovnováha člověka. *Nižší teplota vzduchu také potlačuje vegetaci bakterií ve vzduchu.*

Další předností sálavých způsobů vytápění také je, že na rozdíl od konvekčních způsobů *nezpůsobují víření prachu nadměrnou cirkulací vzduchu*. Zavěšené sálavé panely a plynové zářiče jsou tedy vhodné pro prašné provozy.

Následující video ilustruje graficky rozdíly obou způsobů vytápění:

<https://youtu.be/vU9y2kv0H2Y>

Otázky ke kapitole 3

3.1 Otopné těleso je považováno za sálavé, jestliže jeho výkon je tvořen

- a) z více jak padesáti procent konvektivním teplem
- b) z méně jak padesáti procent sálavým teplem
- c) z více jak padesáti procent tepelným vedením
- d) z více jak padesáti procent sálavým teplem

3.2 U konvektivního vytápění se nejdříve ohřívají

- a) stěny místnosti
- b) vzduch v místnosti
- c) stěny i vzduch se ohřívají současně
- d) rozhoduje typ konvektivního zdroje

3.3 U sálavého vytápění se nejdříve ohřívá

- a) vzduch v místnosti
- b) stěny i vzduch se ohřívají současně
- c) stěny místnosti
- d) rozhoduje typ sálavého zdroje

3.4 Příjemnější tepelné pocity máme při

- a) chladných stěnách a teplém vzduchu
- b) chladné podlaze a teplém stropě
- c) chladném stropě a teplé podlaze
- d) při chladném vzduchu a teplých površích místnosti

4. Celková pohoda prostředí [2]

Celková pohoda prostředí je souhrnem tepelné a hygienické pohody.

4.1 Hygienická pohoda

Hygienická pohoda prostředí se dosahuje, je-li optimální osvětlení, nulový hluk, nulová koncentrace škodlivin, zabráněno zápachu a znečištění vzduchu jinými plyny, bezprašný vzduch, minimální výskyt bakterií a alergenů, potlačen výskyt elektrických nábojů ap.

4.2 Tepelná pohoda

Podrobné podmínky pro tepelnou pohodu prostředí je obtížné určit, neboť ji ovlivňuje celá řada faktorů. Mezi ně např. patří teplota a vlhkost vzduchu, střední radiální teplota povrchů místnosti, rychlost proudění vzduchu, druh vykonávané činnosti, tepelný odpor oděvu, pohlaví, tělesná konstituce, zdravotní stav, příjem potravy, věk, roční období ap.

Mezi čtyři nejdůležitější faktory patří:

- *Teplota vzduchu*
- *Vlhkost vzduchu*
- *Rychlost proudění vzduchu*
- *Střední radiální teplota všech povrchů v místnosti*

Střední radiální teplotou se rozumí jednotná teplota všech povrchů v místnosti, při které by sálavý tepelný tok mezi člověkem a okolními povrchy byl stejný, jako je ve skutečnosti při rozdílných teplotách povrchů.

Pro tepelnou pohodu v místnosti je velmi důležitá kombinace teploty vzduchu t_v a střední radiální teploty t_r . Příjemnější pocit má člověk, je-li teplota vzduchu nižší oproti radiální teplotě. Naopak méně příjemně se člověk cítí, je-li teplota vzduchu vyšší než je radiální teplota. **Rozdíly mezi těmito teplotami ale nesmí být větší než 3 °C**, jinak jsou vyvolány velmi nelibé pocity. Optimální stav tedy nastává, jsou-li obě teploty souměřitelné, tj.

$$t_v \approx t_r$$

Pocitová (výsledná) teplota člověka t_g v místnosti je výslednicí působení teploty vzduchu a radiální teploty povrchů. Ideální teplotní stav je tedy následující:

$$t_g = t_v = t_r$$

V zimním období v našem středoevropském klimatu se předpokládá pro normálně oblečeného, sedícího člověka, který vykonává *jen velmi lehkou manuální práci*, teplotu vzduchu v místnosti $t_v = 22^\circ\text{C}$.

Pro zachování tepelné pohody v prostorách, kde se vykonává různá fyzická práce, se vyžadují teploty vzduchu podle náročnosti práce v rozsahu od 10 °C do 18 °C. Čím je fyzická práce intenzivnější, tím může být v místnosti nižší teplota vzduchu.

Proudění vzduchu má ve vytápěném prostoru rovněž značný vliv na tepelnou pohodu. Při tzv. normální teplotě vzduchu 20 °C - 22 °C by se měla rychlost proudění vzduchu pohybovat od 0,15 m/s do 0,2 m/s.

Otázky ke kapitole 4

4.1 Celková pohoda lidí v místnosti je podmíněna

- a) pouze tepelnou pohodou
- b) pouze hygienickou pohodou
- c) tepelnou a hygienickou pohodou
- d) tepelnou, hygienickou a neutralitou elektrických nábojů

4.2 Čtyři nejvlivnější faktory pro dosažení tepelné pohody jsou

- a) teplota vzduchu, radiační teplota, typ oděvu, druh pohlaví
- b) tělesná kondice, věk, druh činnosti, vlhkost vzduchu
- c) zdravotní stav, příjem potravy, radiační teplota, roční období
- d) teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, radiační teplota, rychlost proudění vzduchu

4.3 Pro dosažení tepelné pohody člověka, který vykonává jen velmi lehkou manuální práci, je důležité, aby se teplota vzduchu nelišila od radiační teploty o více jak

- a) 1 °C
- b) 2 °C
- c) 3 °C
- d) 4 °C

5. Sálavé vytápění průmyslových prostor [1 - 8]

Vzhledem k tomu, že se jedná o *vytápění velkokapacitních prostor* - na příklad to mohou být výrobní a skladovací haly, komerční předváděcí haly, sportovní haly, zemědělské velko-stáje, velké shromažďovací prostory kulturní povahy (koncertní sály, přednáškové sály, divadelní sály) ap. - je třeba se zabývat nejvýkonnějšími sálavými zdroji tepla, jako jsou výkonové teplovodní sálavé panely, výkonové plynové zářiče nebo výkonové elektrické sálavé panely. ***Ve velkokapacitních prostorách jsou nejpoužívanější první dva typy topidel, tj. plynové zářiče a teplovodní panely.*** Užití elektrických sálavých panelů je doménou spíše menších prostor, jako jsou např. bytové prostory nebo malé kanceláře. ***V této kapitole se proto zaměříme na plynové zářiče a na teplovodní panely.***

Pokud se projektant s investorem rozhodují, který typ výkonných sálavých topidel ve velkokapacitním objektu použijí, musí nutně ***přihlédnout k dostupnosti energetického zdroje,*** tj. zda v blízkosti objektu vede parovod nebo teplovod městského rozvodu nebo jestli je možno objekt napojit na blízký rozvod plynu městské plynárny. Pro použití plynu je nutné ověřit, jestli tlak plynu v rozvodné síti neklesá pod hranici ***nutného tlaku*** pro napájení daného typu plynových zářičů (1.8 kPa - pro zářiče firmy Kotrbatý s.r.o.). Pokud takový pokles tlaku existuje, nelze napojení na plyn doporučit, protože by to v rozvodných špičkách vedlo k ***provozním výpadkům topení.*** Dostupnost plynu ještě nemusí automaticky znamenat výběr plynových zářičů, protože je možno zřídit vlastní ***plynovou kotelnu,*** která vyrobí horkou vodu a tou je možno napájet teplovodní sálavé panely. Pokud ale ani jeden z těchto zdrojů energie není k dispozici, pak lze v krajním případě uvažovat o použití fosilních paliv, které ve vlastní kotelně vyprodukují horkou vodu pro sálavé teplovodní panely. Tato poslední možnost ale není ekologická a projektant s investorem by se měli snažit takovému řešení vyhnout.

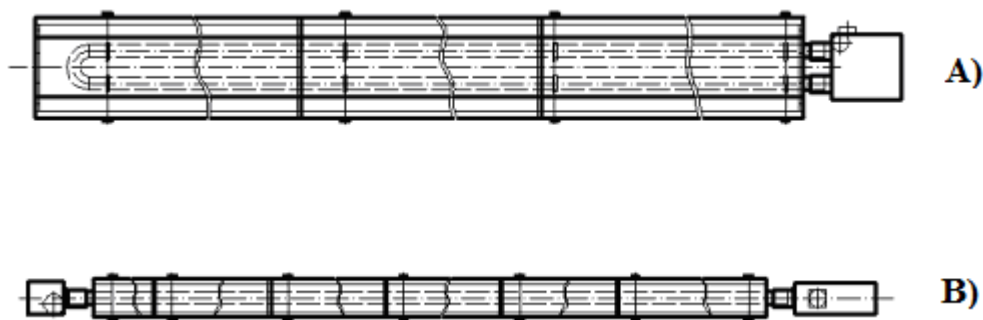
5.1 Výkonové plynové sálavé zářiče

Existují dva hlavní typy výkonných plynových zářičů - **tmavé a světlé plynové zářiče**. Tmavé zářiče barvu nemění, jejich trubice jsou stále tmavé, zatímco světlé zářiče, díky spalování plynu na povrchu keramických destiček a vysoké teplotě, svítí narůžovělým světlem. V obou typech zářičů je nejčastějším zdrojem energie **zemní plyn**, ale je možné použít také propan-butan. Oba typy zařízení mají **elektronickou tlakovou pojistku**, která hlídá poklesy tlaku, a při snížení pod kritickou tlakovou hodnotu tato pojistka zařízení automaticky vypíná. **Tmavé zářiče vyžadují, aby každý zářič byl napojen na samostatný odtah zplodin hoření, kdežto světlé zářiče samostatné odtahy nevyžadují, protože lépe spalují a zbylé zplodiny jsou odvětrávány hromadně ve střešním (stropním) prostoru.** Pokud jde o **rychlost náběhu** do plného výkonu po zapnutí zářičů, pak tmavé zářiče jsou méně flexibilní, náběh jim trvá kolem 15 minut, zatímco světlé zářiče jsou podstatně flexibilnější, jejich náběh trvá jen asi kolem 1 minuty. Nyní probereme další vlastnosti plynových zářičů a také zásady pro jejich projekci do velkoprostorových objektů.

5.1.1 Tmavé plynové zářiče [5]

Plynový hořák tmavého zářiče je umístěn spolu s automatikou pro regulaci tlaku plynu před otopnou trubicí. Plamen vstupující do trubice zahřívá její povrch zhruba na **500 °C**. Po průchodu zářičem klesne teplota spalin zhruba na hodnotu **160 ÷ 250 °C**. Trubice jsou buď **tvaru U** (Obr. 6 A) nebo **tvaru I** (Obr. 6 B). V teplotách spalin lze hledat první negativní vliv na hospodárny provoz zářiče. Uváděné rozmezí teplot spalin je dáno délkou otopné trubice. Jestliže budeme mít konstantní délku a konstantní průměr trubice a tato trubice předá jednou výkon 20 kW při teplotě 160 °C a podruhé výkon 30 kW při teplotě 250 °C, pak při větší teplotě bude méně **hospodárná** (nevyužije se rozdíl teplot 250 - 160 = 90°C).

Tmavé zářiče se umísťují pod střešní plášť do výšek 4,5 až 8 metrů. Do větších výšek ($h > 8$ m) se přednostně osazují světlé plynové zářiče.



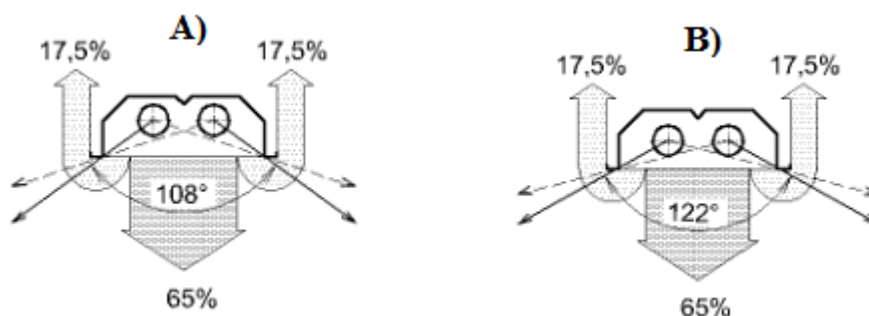
Obr. 6 Tmavé zářiče: A) KM - U; B) KM - I. [5]

Podstatnou roli pro hospodárnost infra-vytápění tmavými zářiči hraje **konstrukce reflexního zákrytu** a následné umístění zářiče do vytápěného prostoru. Zářič s **mělkým** jednoduchým zákrytem a **bez koncových čel** lze označit jako naprosto **nevhodné** konstrukční řešení. Jeho sálavá účinnost se pohybuje kolem 50 %, což je na rozhraní mezi sálavým a konvekčním tělesem. Jeho umístění v horní části vytápěného prostoru pak bezpečně zajistí zařadit polovinu dodaného výkonu do ztrát (konvekční transport tepla ke chladné střeše). Negativní vliv na poměr sálavé a konvekční složky má i kvalita reflexního zákrytu - **lesklý hliník** má větší odrazivost, avšak menší životnost proti **nerozovému plechu**. Na obrázku 7 je zachycen jeden z reálných tmavých zářičů instalovaných ve velké výrobní hale.



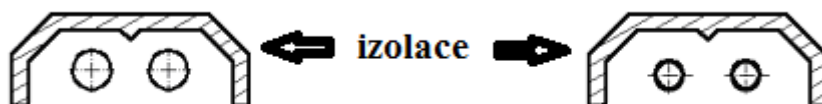
Obr. 7 Tmavý plynový zářič se samostatným spalínovým odtahem vedený přes strop do exteriéru [5].

Důležité pojmy u plynových zářičů jsou: **úhel celkového sálání** a **úhel jádrového sálání**. Konkrétní hodnoty těchto úhlů je třeba hledat ve **výrobní dokumentaci** zářičů. Důležitější z hlediska projekce (rozmístění zářičů) je úhel jádrového sálání. Oba úhly jsou znázorněny na obrázku číslo 8. Jsou na něm dva příčné řezy dvěma tmavými zářiči. Silně vytažené úhly jsou úhly jádrového sálání a úhly kreslené slabými čárkovanými čarami jsou úhly celkového sálání. Z obrázku 8 je zřejmé, že u obou typů jde do sálavého výkonu 65% tepelné energie, zatímco do konvektivního výkonu pouze 35% tepelné energie. Celých 65% sálavé energie jde do úhlu celkového sálání (kreslen čárkovaně) a z těchto 65% jde **90% do úhlu jádrového sálání**. Má-li např. zářič A) z obrázku 8 celkový výkon 25 kW, pak 16,25 kW jde do jeho úhlu celkového sálání, z toho 14,625 kW do úhlu jádrového sálání. Do chladného střešního prostoru uniká a ztrácí se v něm 8,75 kW konvektivního výkonu.



Obr. 8 Dva příčné řezy dvěma tmavými zářiči: A) **Alfa zářič** s menším úhlem jádrového sálání; B) **Beta zářič** s větším úhlem jádrového sálání. [5]

Konstrukčním vylepšením je **izolace reflexního zákrytu** (Obr. 9), která ovlivňuje využití přivedené tepelné energie o cca 3 ÷ 5 %. Tloušťka **nehořlavé izolace** na horní straně plechového zákrytu je **20 mm** a na povrchu této izolace je **hliníková fólie**. Účelné je použití izolace u zářičů s nerezovým zákrytem, neboť teplota povrchu nerezového plechu je vyšší oproti zákrytu hliníkovým plechem (nerezový plech má větší pohltivost).

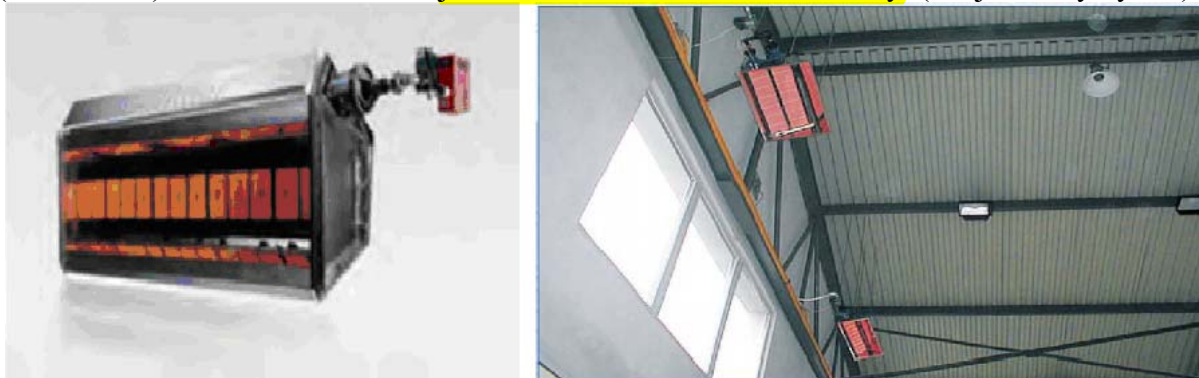


Obr. 9 Tepelná izolace tmavých zářičů.

Výkony tmavých zářičů popisovaných konstrukcí se pohybují v rozmezí 6 ÷ 50 kW. U-trubice bývají v délkách 3 m až 12 m, I-trubice mívají délky 5 m až 22 m.

5.1.2 Světlé plynové zářiče [6 - 8]

Světlé zářiče dodávají sálavé teplo z otopné plochy tvořené keramickými destičkami, které mají teplotu kolem 900 °C. Tyto destičky při provozu jasně svítí (odsud název světlé zářiče). Jde o katalytické spalování směsi většinou zemního plynu se vzduchem. Tato směs prochází jemnými kanálky keramických destiček a uvnitř kanálků hoří, takže vlastní plaménky vidět nejsou (odtud název "bezplamenné" hoření), ale jejich jasné červeno-růžové světlo vidět lze (viz obr. 10). Zářiče mohou mít jednu řadu destiček nebo dvě řady (dvojnásobný výkon).

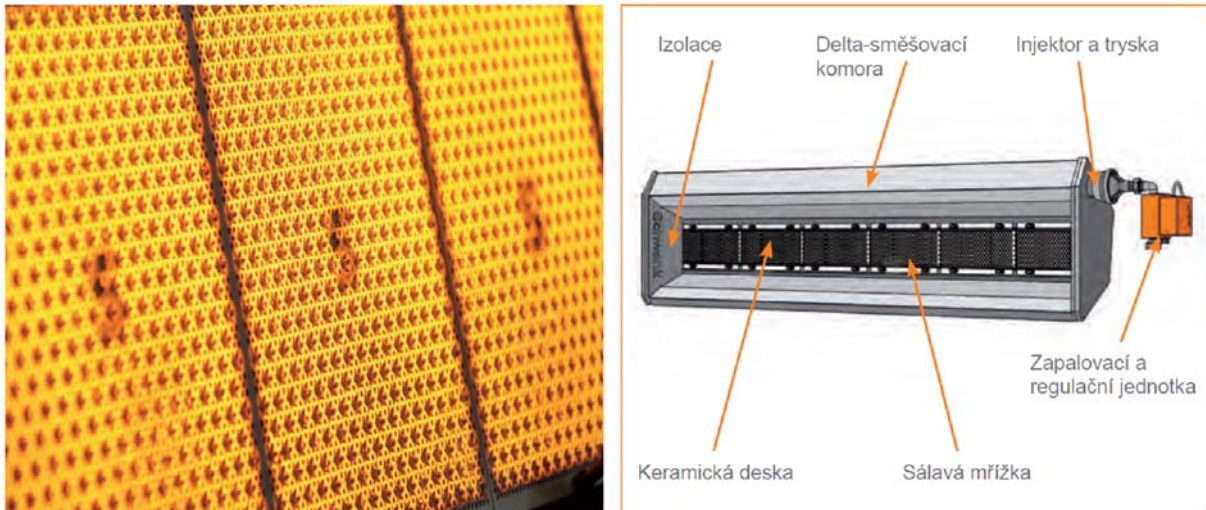


Obr. 10 Světlé plynové zářiče a jejich použití ve velké hale.

Přívod spalovacího vzduchu do haly je zajištěn infiltrací nebo přívodními otvory a průduchy. Odvod spalin ze zářičů se provádí hromadně, tj. nepřímou, odsávacími ventilátory v nejvyšších bodech objektu (světlé zářiče nemají samostatné odtahy, protože dobře spalují, a proto zanechávají minimum zplodin). Výkon zářičů lze do jisté malé míry regulovat přivíráním přívodu plynu. Vzhledem k vysokým povrchovým teplotám lze tyto zářiče využívat pro vytápění zejména velkoprostorových objektů s vysokým stropem, a to přibližně v rozmezí výšek od 8 m až do 20 m podle tepelného výkonu zářičů. Značnou výhodou oproti tmavým infrazářičům je jejich značná rychlost náběhu do plného výkonu. Zatímco tmavé zářiče dosahují plného výkonu po 15 minutách (i déle), světlé zářiče jsou schopny dosáhnout 80 % výkonu už po 30 vteřinách a plného výkonu většinou během 1 minuty. Světlé zářiče mohou sloužit nejen pro celoplošné vytápění, ale i pro vytápění osamělých pracovišť (stropní zavěšení nad osamělým pracovištěm - vysvětlení osamělého pracoviště viz kapitola 2.1 B). Dle konstrukčního řešení dělíme světlé zářiče na několik typů:

- zářiče s otevřenou komorou,
- zářiče se sálavou mřížkou,

- zářiče se sálavou mřížkou a předeřevem spalovací směsi,
- kombinovaný zářič s uzavřenou komorou,
- kombinovaný zářič s uzavřenou komorou plně izolovaný.



Obr. 11 Detail děrovaných keramických destiček a konstrukční popis plynového zářiče.

Při rozmístování světlých zářičů platí zásady jako pro zářiče tmavé. Úhel jádrového sálání u světlých zářičů činí 60° , úhel celkového (všeobecného) sálání je 90° . V některých případech, kdy je v objektu zvoleno vytápění tmavými zářiči, avšak zároveň dochází k častému otevírání vstupních vrat, je vhodné využít kombinace tmavých a světlých zářičů. Světle zářiče se pak umístí do okolí vrat a zapojí se do samostatného regulačního okruhu. Díky rychlému náběhu do plného výkonu umožňují v zimním období zajistit **tepelnou clonu prakticky okamžitě po každém otevření vrat.**

Otázky ke kapitolám 5.1.1 a 5.1.2

5.1 Tmavé plynové zářiče jako topidla používají

- kovové trubice, ve kterých hoří plyn
- otevřený plamen z plynových trysek
- keramické destičky, ve kterých hoří plyn
- plynové trubice v kombinaci s keramickými destičkami

5.2 Světle plynové zářiče jako topidla používají

- kovové trubice, ve kterých hoří plyn
- otevřený plamen z plynových trysek
- keramické destičky, ve kterých hoří plyn
- plynové trubice v kombinaci s keramickými destičkami

5.3 Tmavé plynové zářiče

- nepotřebují samostatný odtah, dobře spalují
- potřebují samostatný odtah, dobře nespalují
- mají samostatnou sběrnou komoru na zplodiny
- zplodiny se neodvádí, nejsou škodlivé

5.4 Světelné plynové zářiče

- a) nepotřebují samostatný odtah, dobře spalují
- b) potřebují samostatný odtah, dobře nespalují
- c) mají samostatnou sběrnou komoru na zplodiny
- d) zplodiny se neodvádí, nejsou škodlivé

5.5 Provozní teplota tmavých plynových zářičů je

- a) 300 °C
- b) 400 °C
- c) 500 °C
- d) 600 °C

5.6 Provozní teplota světlých plynových zářičů je

- a) 800 °C
- b) 900 °C
- c) 1000 °C
- d) 1100 °C

5.7 Tmavé plynové zářiče po zapnutí nabíhají na plný výkon za

- a) 1 minutu
- b) 5 minut
- c) 10 minut
- d) 15 minut

5.8 Světelné plynové zářiče po zapnutí nabíhají na plný výkon za

- a) půl minuty
- b) 1 minutu
- c) 5 minut
- d) 15 minut

5.9 Úhel jádrového sálání u plynových zářičů je úhel, do kterého vstupuje

- a) 40% sálavého výkonu
- b) 50% sálavého výkonu
- c) 75% sálavého výkonu
- d) 90% sálavého výkonu

5.10 Topidlo se považuje za sálavé, jestliže v jeho celkovém tepelném výkonu je obsaženo alespoň

- a) 25% sálavého výkonu
- b) 50% sálavého výkonu
- c) 75% sálavého výkonu
- d) 90% sálavého výkonu

5.11 Topidlo se považuje za konvekční, jestliže je v jeho celkovém tepelném výkonu obsaženo alespoň

- a) 25% konvekčního výkonu

- b) 50% konvekčního výkonu
- c) 75% konvekčního výkonu
- d) 90% konvekčního výkonu

5.1.3 Zásady projekce plynových zářičů do velkých prostor [4 - 5]

Kvalitní projekt otopné soustavy v průmyslových a komerčních prostorách by měl zajistit všem pracovníkům tepelnou pohodu a optimální mikroklima pro jejich pracovní činnost. Projekt by měl být navržen tak, aby rovněž zajistil minimální energetickou náročnost vytápění. Ve velkých halových objektech dochází při nevhodném návrhu otopné soustavy k nežádoucímu vertikálnímu rozložení teplot. Tyto rozdíly teplot ve svislém směru mohou činit i několik stupňů, což narušuje pocit tepelné pohody. Je známo, že právě topení pomocí stropních sálavých těles je příznivé pro udržení malých rozdílů teplot ve svislém směru. Vzhledem k tomu, že vertikální rozvrstvení teplot hraje nezanedbatelnou roli pro udržení tepelné pohody (viz kapitola 4.2), rozdělujeme velkoprostorové objekty ve vertikálním směru na dva prostory, a to na dolní vertikální prostor a horní vertikální prostor. Dolní vertikální prostor se často nazývá prostorem pobytu lidí, zatímco horní vertikální prostor se někdy označuje jako neutrální prostor.

Spodní prostor pobytu lidí je prostorem do výšky 2 m nad podlahou, což koreluje s výškou člověka. V tomto prostoru zejména by měly být vytvořeny podmínky pro tepelnou pohodu lidí, což je nutný předpoklad pro dosažení dobrého pracovního výkonu, pokud jde o výrobní objekty.

Horní neutrální prostor je prostorem od 2 metrů výšky nad podlahou po střešní plášť. Teploty v tomto prostoru přímo neovlivňují mikroklima v dolním prostoru pobytu lidí. Teplotní rozdíly v horním neutrálním prostoru mají vliv na tepelnou bilanci celého vytápěného prostoru.

Při stropním zavěšení plynových zářičů je pro dosažení rovnoměrného vytápění spodních prostor pobytu lidí nutné dodržet určitá pravidla. Probereme nyní jednotlivé kroky projektové činnosti.

KROK Č. 1:

Pro výšky zavěšení h větší jak 8 m dáváme přednost světlým zářičům před tmavými. Pouze v odůvodněných případech lze do výšky 10 m použít tmavé zářiče.

KROK Č. 2:

Výpočet tepelných ztrát v kilo-wattech pro jednotlivá oddělení, tj. pro jednotlivé plošné zóny průmyslové haly, pokud existují tyto zóny s odlišnými tepelnými ztrátami ($Q_{zóna}$):

$$Q_{zóna} = Prostup \cdot f_1 \cdot f_2 + Infiltrace + Větrání \quad (\text{kW})$$

kde f_1 je oprava na výšku zavěšení, f_2 je oprava na zátop. Výpočet ztrát prostupem, infiltrací a větráním není třeba počítat, tyto ztráty budou zadány učitelem. Opravy f_1 a f_2 je třeba zohlednit - jsou uvedeny v následujících dvou tabulkách:

h (m)	6	8	10	12	15
f_1	1,00	1,08	1,12	1,18	1,30

Směnnost provozu	f_2
Jednosměnný provoz	1,2
Dvosměnný provoz	1,1

Zbývající potřebné opravy jsou f_3 (činitel typu) a f_4 (činitel osazení)

$$f_3 = \eta_s \cdot \Phi \cdot A_s \cdot K \quad f_4 = \eta_s \cdot \Phi \cdot A_s$$

Vypočtené hodnoty činitelů f_3 a f_4 lze nalézt v následující tabulce:

Záříč		-	T-N	T-I	S-O	S-DN	S-DI
Sálavá účinnost	η_s	Vodorovně	0,630	0,720	0,580	0,670	0,820
		Šikmo 30°	0,580	0,670	0,550	0,620	0,780
Činitel typu	f_3	Vodorovně	0,190	0,217	0,174	0,193	0,195
		Šikmo 30°	0,307	0,355	0,277	0,313	0,325
Činitel osazení	f_4	Vodorovně	0,214	0,245	0,197	0,228	0,279
		Šikmo 30°	0,345	0,398	0,327	0,369	0,464
Konstanta	K	-	0,890	0,890	0,880	0,850	0,700
Absorbce stěn	A_s	-	0,850				

T-N tmavý neizolovaný, T-I tmavý izolovaný, S-O světlý otevřená komora, S-DN světlý komora delta neizolovaný, S-DI světlý komora delta izolovaný.

Střední sálavý účinek $\Phi = 0,4$ při vodorovném osazení, $\Phi = 0,7$ při šikmém osazení.

KROK Č. 3:

Výpočet teploty vzduchu t_i ze zadané výsledné (pocitové) teploty t_g , vypočtené celkové ztráty v dané zóně $Q_{zóna}$ (v kilo-wattech) a plochy podlahy $S_{zóna}$ (v metrech čtverečních) dané zóny

$$t_i = t_g - 0,072 \cdot I_s \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad I_s = \frac{Q_{zóna} \cdot f_4 \cdot 1000}{S_{zóna}} \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Pokud $I_s < 200 \text{ W/m}^2$, pak je splněn hygienický požadavek pro osálení podlahy. Je nutno ověřit!!!

V opačném případě, tj. $I_s > 200 \text{ W/m}^2$, není možné použít v dané zóně plynové záříče, a proto ani nemá smysl pokračovat v projekci plynových záříčů do dané zóny!!!

KROK Č. 4:

Určení celkového potřebného výkonu záříčů v každé zóně Q_i pomocí vypočítané ztráty dané zóny $Q_{zóna}$, teploty exteriéru t_e , plochy interiéru zóny $S_{zóna}$ a vypočítané teploty vzduchu t_i . K tomu účelu jsou pro každý typ záříče určeny speciální vzorce, ve kterých jsou použity součinitelé využití spalin ϵ_k :

$\epsilon_k = 0,95$ – světlé záříče, nepřímý odvod spalin z vytápěného prostoru

$\epsilon_k = 0,8$ – tmavé záříče, přímý odvod spalin mimo vytápěný prostor kouřovody s teplotou spalin do 180 °C

$\epsilon_k = 0,7$ – tmavé záříče, přímý odvod spalin mimo vytápěný prostor kouřovody s teplotou spalin nad 180 °C

Tmavý zářič neizolovaný T-N – hluboký zákryt

$$Q_i = \frac{0,0122 \cdot (t_i - t_e) S_{zóna} \cdot Q_{zóna}}{0,014\epsilon_k \cdot (t_i - t_e) S_{zóna} + f_3 \cdot Q_{zóna}} \quad (\text{kW})$$

Tmavý zářič izolovaný T-I – hluboký zákryt

$$Q_i = \frac{0,0120 \cdot (t_i - t_e) S_{zóna} \cdot Q_{zóna}}{0,014\epsilon_k \cdot (t_i - t_e) S_{zóna} + f_3 \cdot Q_{zóna}} \quad (\text{kW})$$

Světlý zářič s otevřenou komorou S-O

$$Q_i = \frac{0,0125 \cdot (t_i - t_e) S_{zóna} \cdot Q_{zóna}}{0,014\epsilon_k \cdot (t_i - t_e) S_{zóna} + f_3 \cdot Q_{zóna}} \quad (\text{kW})$$

Světlý zářič, komora delta, neizolovaný S-DN

$$Q_i = \frac{0,0119 \cdot (t_i - t_e) S_{zóna} \cdot Q_{zóna}}{0,014\epsilon_k \cdot (t_i - t_e) S_{zóna} + f_3 \cdot Q_{zóna}} \quad (\text{kW})$$

Světlý zářič, komora delta, izolovaný s mřížkou S-DI

$$Q_i = \frac{0,0098 \cdot (t_i - t_e) S_{zóna} \cdot Q_{zóna}}{0,014\epsilon_k \cdot (t_i - t_e) S_{zóna} + f_3 \cdot Q_{zóna}} \quad (\text{kW})$$

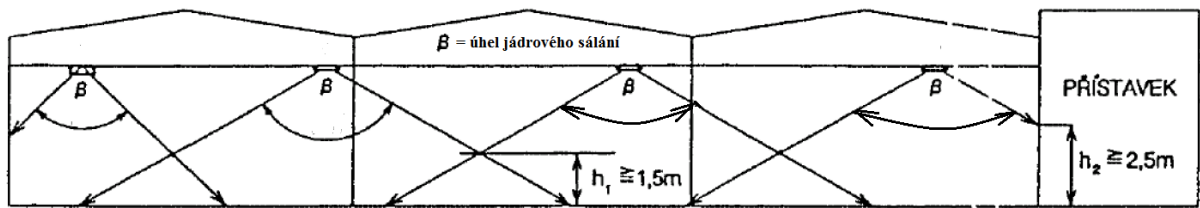
KROK Č. 5:

Předběžné rozmístění zářičů v obou směrech x a y haly pomocí **minimálních rozměrů a úhlů vyzářování zářičů** (hodnoty zjistíme z firemní produktové nabídky - u zkoušky určí učitel). Tím se zjistí **přibližný počet zářičů n** .

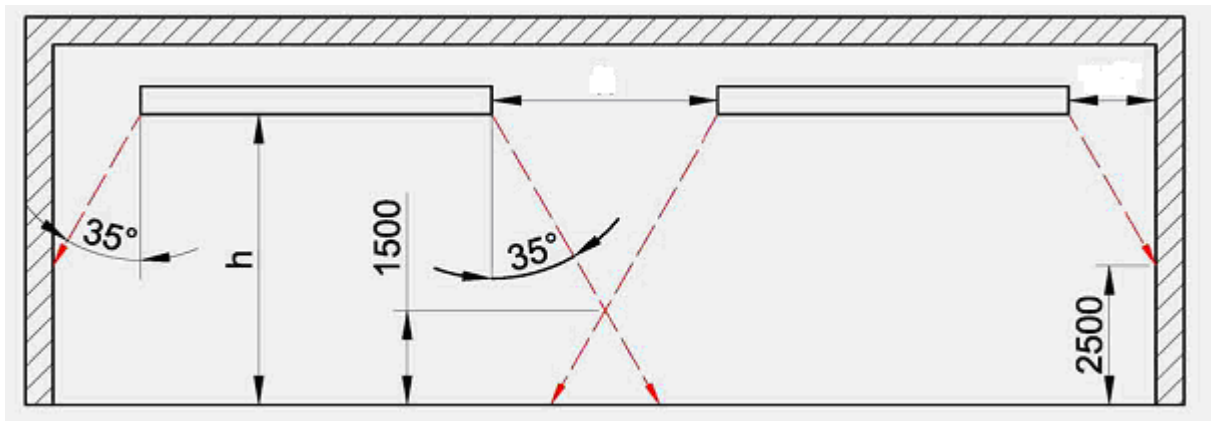
Pravidla, která se použijí pro rozmístění zářičů, jsou tato:

- **Příčné rozmístění (viz obrázek 12):**
Krajní paprsky jádrového sálaní ze sousedních zářičů se musí protínat ve výšce 1,5 m nad podlahou a u krajních zářičů musí být tento průsečík s obvodovou stěnou minimálně 2,5 m nad podlahou.
- **Podélné rozmístění (viz obrázek 13):**
Krajní paprsky čelního sálaní ze sousedních zářičů se musí protínat ve výšce 1,5 m nad podlahou a u krajních zářičů musí být tento průsečík s obvodovou stěnou minimálně 2,5 m nad podlahou.

Pravidla pro příčné a podélné rozmístění zářičů jsou tedy velmi podobná a liší se jen užitím krajních paprsků jádrového úhlu (u příčného rozmístění) a čelního úhlu (u podélného rozmístění) - viz obrázky 12 a 13 níže uvedené.



Obr. 12 Příčné rozmístění sálových panelů.



Obr. 13 Podélné rozmístění sálových panelů (čelní úhel = 35°).

Zkusmé nákresové rozmístění panelů je problematické, protože neznáme předem typ panelu, který budeme používat, a různě výkonné panely se obvykle od sebe liší také svými rozměry. Lze vyhledat typ panelu s nejmenšími rozměry a příslušnými úhly vyzařování a pokusit se je rozmístit dle vzorů na obr. 12 a 13. To by mohlo být pracné. Existuje však i jiná možnost založená na zkusmém numerickém výpočtu, do kterého vstupují vybrané minimální rozměry zářiče a jeho úhly vyzařování (jádrový a čelní). Výpočetní procedura je založena na jednoduchých geometrických úvahách plynoucích z předešlých dvou obrázků 12 a 13:

Přibližný počet zářičů n umísťovaných ve vybraném směru haly s rozměrem haly L :

Úhel α je buď jádrový nebo čelní dle orientace zářiče, minimální délka nebo šířka zářiče (podle jeho orientace) je d , výška zavěšení měřená od podlahy je h

$$2(h-2,5) \operatorname{tg} \alpha + (n-1) \times 2 \times (h-1,5) \operatorname{tg} \alpha + n \times d = L \quad (L \text{ je vybraný rozměr haly})$$

Odvození použité rovnice bude vysvětleno na přednášce. Z této rovnice vyjde pravděpodobně necelé číslo n , takže zaokrouhlíme na nejbližší vyšší celé číslo. Tím obdržíme předpokládaný počet zářičů n na celý rozměr haly. Rozdělíme zářiče do jednotlivých zón a obdržíme počet zářičů v každé zóně n_i .

KROK Č. 6:

Výpočet výkonu jednoho zářiče v zóně:

$$P_i = Q_i / n_i \quad (\text{kW})$$

Podle zjištěného výkonu P_i dohledáme z firemní nabídky konkrétní typ zářiče (nejbližší vyšší výkon) v kilo-wattech $P_i^{(\text{výrobek})}$ a ověříme, jestli vybrané zářiče kryjí ztráty v zónách tak, že přebytek výkonu ($n_i \cdot P_i^{(\text{výrobek})}$) nepřesahuje ztráty v zóně o více jak 10%:

$$\frac{n_i \cdot P_i^{(\text{výrobek})} - Q_i}{Q_i} \cdot 100\% \leq 10\%$$

Provedeme také kontrolu hygienického osálení podlahy v dané zóně

$$I_{s(\text{zóna})} = \frac{n_i \times P_i^{(\text{výrobek})} \times f_4 \times 1000}{S_{\text{zóna}}} < 200 \text{ W/m}^2$$

KROK Č. 7:

Provedeme kontrolu rozmístění vybraných zářičů podle rovnice z KROKU č. 5 - vybrané zářiče budou mít jiné rozměry, než jsme předpokládali v kroce č. 5, a proto znovu ověřujeme rozmístění.

KROK Č. 8:

Provedeme předběžný náčrtek půdorysu, umístíme do něj zářiče a okótujeme jejich rozmístění v obou směrech haly.

KROK Č. 9:

Pokud součet osálení podlah v jednotlivých zónách bude menší nebo roven 200 W/m^2 , tj.

$$\sum_{(\text{přes všechny zóny})} I_{s(\text{zóna})} \leq 200 \text{ W/m}^2$$

pak není třeba dělat kontrolu osálení celé podlahy v hale. V opačném případě je nutné tuto kontrolu provést, tj.

$$I_{s(\text{celá podlaha})} = \frac{(\text{Výkon všech zářičů}) \times f_4 \times 1000}{S_{\text{celá podlaha}}} < 200 \text{ W/m}^2$$

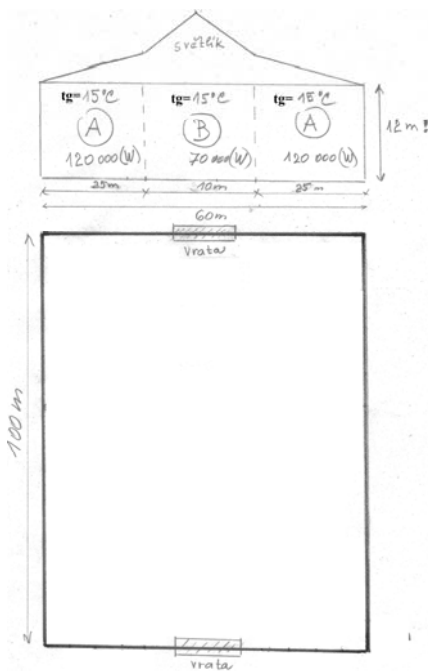
KROK Č. 10:

Předběžné zkusmé posouzení únosnosti, resp. užitého rovnoměrného zatížení stropní konstrukce souborem panelů. Pokud je k dispozici údaj o užitém zatížení stropní konstrukce z projektové dokumentace haly např. formou dovolené působící síly na metr čtvereční, např. $U_{\text{strop}} = 2 \text{ kN/m}^2$, využijeme tento údaj a porovnáme s vypočtenou hodnotou: tíha panelu $G = m \cdot g$ děleno jeho plochou S , tj.

$$U_{\text{panel}} = 10^{-3} \cdot m \cdot g / S \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

Pokud $U_{\text{panel}} \geq 0,75 \cdot U_{\text{strop}}$, necháme vypracovat u odborné statické kanceláře posudek na zatížení stropu panelů. Tato situace může nastat zejména u lehkých dřevěných konstrukcí - viz havárie stropu sportovní haly v kapitole 1.1.

5.1.4 Ukázková projekce TMAVÝCH sálavých panelů do velké haly



Průmyslová hala sestává ze 3 zón A, B, C. Rozměry haly jsou 60m x 100m x 12m. Venkovní teplota $t_e = -16\text{ °C}$, výsledná pocitová teplota v hale $t_g = 15\text{ °C}$, $t_{ia} = t_{ic}$, t_{ib} jsou teploty vzduchu v zónách A, B, C. Projektujte tmavé plynové zářiče firmy Kotrbatý s.r.o. s výškou zavěšení $h = 9$ metrů nad podlahou, tj. 3 metry pod stropem.

Ztráty v jednotlivých zónách:

$Q_{zóna} = (Prostup \cdot f_1 \cdot f_2) + (Infiltrace) + (Větrání)$ kde f_1 je oprava na výšku zavěšení, f_2 je oprava na zátop (číselně viz tabulka v kapitole 5.1.3).

Bylo zjištěno ztráty: $Q_A = 120\text{ kW}$, $Q_B = 70\text{ kW}$.

Výpočet potřebného výkonu v zóně A na pokrytí ztrát $Q_A = 120\text{ kW}$:

$$f_4 = \eta \cdot \Phi \cdot A_s = 0,72 \cdot 0,4 \cdot 0,85 = 0,245 \text{ (dle osazení)}$$

$$f_3 = f_4 \cdot K = 0,245 \cdot 0,89 = 0,218 \text{ (dle typu)}$$

$$\text{Osálení podlahy: } I_{sa} = \frac{120000 \cdot 0,245}{25 \cdot 100} = 11,76 \text{ Wm}^{-2} < 200 \text{ Wm}^{-2} \dots\dots \text{vyhovuje hygieně}$$

$$\text{Teplota vzduchu v zóně A: } t_{ia} = t_g - 0,0716 \cdot I_{sa} = 15 - 0,0716 \cdot 11,76 = 14,157 \approx 14,2\text{ °C}$$

Požadovaný výkon pro zónu A: ($\varepsilon = 0,8$ přímý odvod spalin)

$$Q_a = \frac{0,012 \cdot (14,2 + 16) \cdot 2500 \cdot 120}{0,014 \cdot 0,8 \cdot (14,2 + 16) \cdot 2500 + 0,218 \cdot 120} = 124,71 \approx 125\text{ kW}$$

Pro zónu A je požadováno 125 kW (dvě A zóny 250 kW).

Výpočet potřebného výkonu v zóně B na pokrytí ztrát $Q_B = 70\text{ kW}$:

$$f_3 = 0,218, f_4 = 0,245, I_{sb} = \frac{70000 \cdot 0,245}{1000} = 17,15 \text{ Wm}^{-2} < 200 \text{ Wm}^{-2} \dots\dots \text{vyhovuje}$$

$$t_{ib} = t_g - 0,0716 \cdot I_{sb} = 15 - 0,0716 \cdot 17,15 = 13,77 \approx 13,8\text{ °C}$$

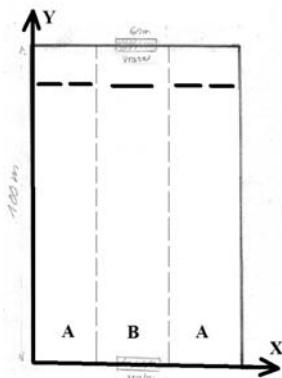
Požadovaný výkon pro zónu B: ($\varepsilon = 0,8$ přímý odvod spalin)

$$Q_b = \frac{0,012 \cdot (13,8 + 16) \cdot 1000 \cdot 70}{0,014 \cdot 0,8 \cdot (13,8 + 16) \cdot 1000 + 0,218 \cdot 70} = 71,72 \approx 72\text{ kW}$$

Pro zónu B je požadováno 72 kW.

Rozmístění zářičů v hale (A + B + C):

- Je nutné respektovat zásady **překryvu úhlů jádrového sálání**.
- Pokud bychom umístili zářiče podélně ve směru Y, vyšel by různý počet v zónách A a B, což by nezaručovalo optimální překryv.
- Volíme proto umístění zářičů **podélně ve směru X**, jak je naznačeno pěti tlustými krátkými čarami na vedlejším obrázku.



Přibližný počet zářičů n podélně ve směru X:

$\alpha = 35^\circ$, $d = 3$ m (nejkratší zářič), $h = 9$ m

$$2(h - 2,5) \operatorname{tg} \alpha + (n - 1) \cdot 2 \cdot (h - 1,5) \operatorname{tg} \alpha + n \cdot d = L$$

(šířka haly)

$$2(9 - 2,5) \operatorname{tg} 35 + (n - 1) \cdot 2 \cdot (9 - 1,5) \operatorname{tg} 35 + n \cdot 3 = 60$$

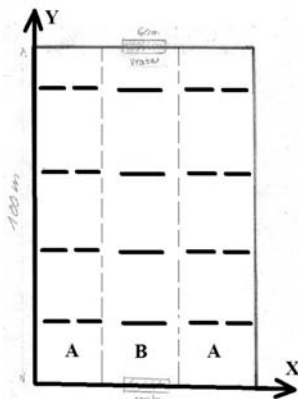
$$n = 4,54 \approx 5 \quad (\text{zkusíme umístit 5 zářičů na šířku}$$

haly, tj ve směru X)

Přibližný počet zářičů n příčně ve směru Y:

Pro celoplošné vytápění volíme typ β (velký úhel jádrového sálání). Jsou dva možné úhly: 130° a 124° (dle firemní dokumentace) - u zkoušky dodá učitel. Pro přibližné rozmístění volíme menší úhel 124° , polovina je 62° (zářiče s větším úhlem pak budou vypočítanému rozmístění vyhovovat také):

$\alpha = 62^\circ$, $d = 0,59$ m (tato šířka zářiče je společná pro všechny typy tmavých zářičů u firmy Kotrbatý s.r.o.)



$$2(h - 2,5) \operatorname{tg} \alpha + (n - 1) \cdot 2 \cdot (h - 1,5) \operatorname{tg} \alpha + n \cdot d = L \quad (\text{délka haly})$$

$$2(9 - 2,5) \operatorname{tg} 62 + (n - 1) \cdot 2 \cdot (9 - 1,5) \operatorname{tg} 62 + n \cdot 0,59 = 100$$

$$n = 3,6 \approx 4 \quad (\text{zkusíme umístit 4 zářiče na délku haly, tj ve směru Y})$$

Výkony jednotlivých zářičů v zónách:

Výpočet výkonu jednoho zářiče v zóně A (8 zářičů):

$n_A = \frac{125}{8} = 15,625 \approx 16$ kW podle tohoto výkonu vybereme vhodný typ z firemní nabídky,

a to typ KM 15-U (17 kW), $\alpha = 65^\circ$, $d = 6$ m

Kontrola vhodnosti: $\frac{8 \cdot 17 - 125}{125} \cdot 100\% = 8,8\% < 10\%$

Vyhovuje.

Kontrola **hygienického osálení podlahy v zóně A:**

$$I_{sA} = \frac{8 \cdot 17000 \cdot 0,245}{25 \cdot 100} = 13,328 < 200 \text{ W/m}^2 \quad \dots\dots \text{ O.K.}$$

Výpočet výkonu jednoho zářiče v zóně B (4 zářiče):

$$n_B = \frac{72}{4} = 18 \text{ kW} \quad \text{podle tohoto výkonu vybereme vhodný typ z firemní nabídky, a to typ KM 22,5-U (18 kW), } < 2\alpha = 124^\circ, \quad d = 6 \text{ m}$$

Kontrola vhodnosti:

$$\frac{4 \cdot 18 - 72}{72} \cdot 100\% = 0\% < 10\% \quad \text{vyhovuje}$$

Kontrola **hygienického osálení podlahy v zóně B:**

$$I_{sB} = \frac{4 \cdot 18000 \cdot 0,245}{10 \cdot 100} = 17,64 < 200 \text{ W/m}^2 \quad \dots\dots \text{ O.K.}$$

Kontrola rozmístění vybraných zářičů:

1) Podél **směru X** - **krajní zářiče u zdi:** $(9-2,5) \cdot \text{tg}35^\circ = 4,55 \text{ m}$. Stačilo by 4,55 m ode zdi, ale vzhledem ke **chladné venkovní zdi zmenšíme vzdálenost např. na 3 m.**

Ostatní rozteče mezi zářiči: $(60 - 2 \cdot 3 - 5 \cdot 6) / 4 = 6 \text{ m}$.

$$6/2 = 3 \text{ m}, \quad 9 \text{ m} - 3/\text{tg}35^\circ = 4,71 \text{ m} > 1,5 \text{ m} \quad \dots\dots \text{ O.K.}$$

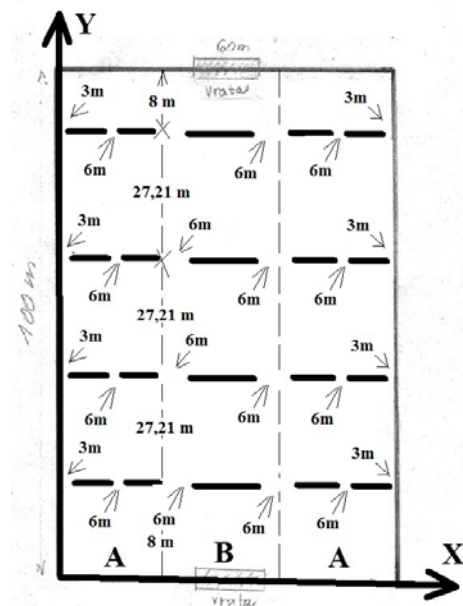
2) Podél **směru Y** - v tomto směru máme dva typy zářičů s úhly 130° a 124° , volíme menší z nich 124° a jeho polovina je 62° . Typ s větším rozptylovým úhlem bude automaticky rozmístění s menším úhlem vyhovovat:

$$\text{Krajní zářiče u zdi: } (9-2,5) \cdot \text{tg}62^\circ = 12,22 \text{ m}$$

Kvůli chladné venkovní zdi **zmenšíme vzdálenost zářičů od stěny z 12,22 m např. na 8 m.**

$$\text{Ostatní rozteče mezi zářiči: } \frac{100 - 2 \cdot 8 - 4 \cdot 0,59}{3} = 27,21 \text{ m}$$

$$27,21/2 = 13,605 \text{ m}, \quad 9 \text{ m} - 13,605/\text{tg}62^\circ = 1,766 \text{ m} > 1,5 \text{ m} \quad \dots\dots \text{ O.K.}$$



Okótužeme rozmístění panelů v půdorysu.

Výsledná situace je na vedlejším obrázku vlevo:

Závěrečná kontrola hygienického požadavku v celé hale:

Součet osálení ve všech třech zónách:

$$2 \times 13,328 + 17,64 = 44,296 < 200 \text{ W/m}^2 \quad \dots\dots \text{ O.K.}$$

Součet je menší než kritická hranice, takže bychom nemuseli kontrolovat osálení celé podlahy v celé hale, ale **pro názornost to provedeme:**

$$I_s = \frac{(16 \cdot 17\,000 + 4 \cdot 18\,000) \cdot 0,245}{6000} = 14,05 \text{ Wm}^{-2} < 200 \text{ Wm}^{-2} \dots\dots \text{Vyhovuje.}$$

Pozn.: Znovu můžeme zkontrolovat překryvy mezi úhly záření tak, aby průsečík krajních paprsků jádrových úhlů byl ve výšce 1,5m (nebo výše), což je v tomto případě splněno. Ozáření stěn by mělo být ve výšce 2,5m nebo výše, což je také splněno.

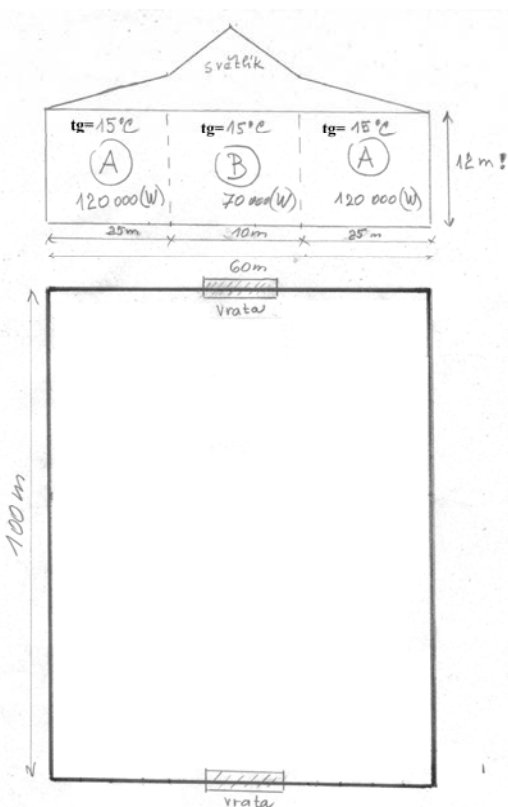
Zkumné statické posouzení stropu: užité zatížení stropu je např. 2,5 kN/m².

Panelové plošné zatížení: 1) KM 15-U (17kW) 1370 N/(6,53x0,59) ~ 0,36 kN/m²

2) KM 22.5-U (18kW) 1500 N/(6,53x0,59) ~ 0,39 kN/m²

Oba typy panelů nezatíží strop kritickým způsobem. Pokud by ale strop měl užité zatížení např. jen 0,5 kN/m², stropní sestava by vyžadovala podrobné statické posouzení.

5.1.5 Ukázková projekce SVĚTLÝCH sálavých panelů do velké haly



Světlé zářiče budeme umísťovat do stejné haly, jako tomu bylo při umísťování tmavých zářičů v kapitole 5.1.4. Tím pádem budeme moci podle výsledků porovnat energetickou výhodnost topení oběma typy zářičů.

Průmyslová hala sestává ze 3 zón A, B, C. Rozměry haly jsou 60m x 100m x 12m. Venkovní teplota $t_e = -16 \text{ }^\circ\text{C}$, výsledná pocitová teplota v hale $t_g = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{ia} = t_{ic}$, t_{ib} jsou teploty vzduchu v zónách A, B, C. Projektujte světlé plynové zářiče firmy Kotrbatý s.r.o. s výškou zavěšení $h = 9$ metrů nad podlahou, tj. 3 metry pod stropem.

Ztráty v jednotlivých zónách:

$$Q_{zóna} = (\text{Pr ostup} \cdot f_1 \cdot f_2) + (\text{Infiltrace}) + (\text{Vetrání})$$

kde f_1 je oprava na výšku zavěšení, f_2 je oprava na zátap (číselně viz firemní dokument).

Bylo zjištěno: $Q_A = 120 \text{ kW}$, $Q_B = 70 \text{ kW}$.

Budeme používat světlé zářiče **izolované s delta komorou a mřížkou (S-DI)** zavěšené ve výšce $h = 9$ metrů.

Výpočet opravných součinitelů:

$$f_4 = \eta \cdot \Phi \cdot A_s = 0,82 \cdot 0,4 \cdot 0,85 = \mathbf{0,2788} \text{ (dle typu zářiče)}$$

$$f_3 = f_4 \cdot K = 0,2788 \cdot 0,7 = \mathbf{0,1952} \text{ (dle polohy)}$$

Výpočet osálení podlahy a teploty vzduchu v zóně A na pokrytí ztrát $Q_A = 120 \text{ kW}$

Osálení podlahy : $I_{sa} = \frac{120000 \cdot 0,2788}{25 \cdot 100} = 13,382 \approx \mathbf{13,4 \text{ Wm}^{-2}} < 200 \text{ Wm}^{-2} \dots\dots \text{vyhovuje}$

Teplota vzduchu v zóně A: $t_{ia} = t_g - 0,0716 \cdot I_{sa} = 15 - 0,0716 \cdot 13,4 = 14,0406 \approx \mathbf{14,0 \text{ }^\circ\text{C}}$

Požadovaný výkon pro zónu A: ($\varepsilon = 0,95$ nepřímý odvod spalin)

$$Q_a = \frac{0,0098 \cdot (14,0 + 16) \cdot 2500 \cdot 120}{0,014 \cdot 0,95 \cdot (14,0 + 16) \cdot 2500 + 0,1952 \cdot 120} = 86,392 \approx \mathbf{86,4 \text{ kW}}$$

Pro zónu A je požadováno 86,4 kW (dvě A zóny 172,78 kW).

Výpočet osálení podlahy a teploty vzduchu v zóně B na pokrytí ztrát $Q_B = 70 \text{ kW}$:

$f_3 = 0,1952$, $f_4 = 0,2788$, $I_{sb} = \frac{70000 \cdot 0,2788}{1000} = \mathbf{19,516 \text{ Wm}^{-2}} < 200 \text{ Wm}^{-2} \dots\dots \text{vyhovuje}$

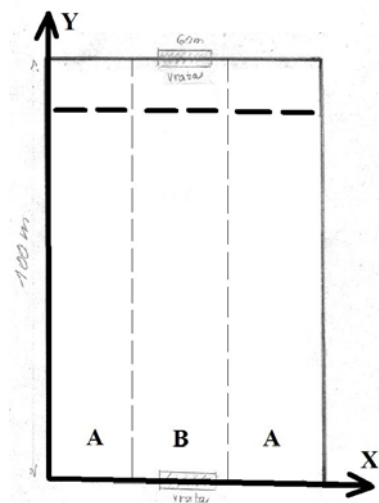
$t_{ib} = t_g - 0,0716 \cdot I_{sb} = 15 - 0,0716 \cdot 19,516 \approx \mathbf{13,6 \text{ }^\circ\text{C}}$

Požadovaný výkon pro zónu B:

$$Q_b = \frac{0,0098 \cdot (13,6 + 16) \cdot 1000 \cdot 70}{0,014 \cdot 0,95 \cdot (13,6 + 16) \cdot 1000 + 0,1952 \cdot 70} \approx \mathbf{49,85 \text{ kW}}$$

Pro zónu B je požadováno 50 kW.

Předběžné rozmístění zářičů v hale (A + B + C):



- Je nutné respektovat zásady překryvu úhlů jádrového sálení.
 - Pokud bychom umístili zářiče podélně ve směru Y, vyšel by různý počet v zónách A a B, což by nezaručovalo optimální překryv.
 - Volíme proto umístění zářičů podélně ve směru X, jak je naznačeno pěti tlustými krátkými čarami na vedlejším obrázku.
-

Přibližný počet zářičů n podélně ve směru X:

$\alpha = 35^\circ$, $d = 0,46 \text{ m}$ (nejkratší zářič), $h = 9 \text{ m}$

$2(h - 2,5) \text{tg } \alpha + (n - 1) \cdot 2 \cdot (h - 1,5) \text{tg } \alpha + n \cdot d = L$ (šířka haly)

$$2(9 - 2,5) \operatorname{tg} 35 + (n - 1) \cdot 2 \cdot (9 - 1,5) \operatorname{tg} 35 + n \cdot 0,46 = 60$$

$n = 5,6 \approx 6$ (zkusíme umístit 6 zářičů na šířku haly, tj ve směru X - viz vedlejší obrázek)

Přibližný počet zářičů n příčně ve směru Y:

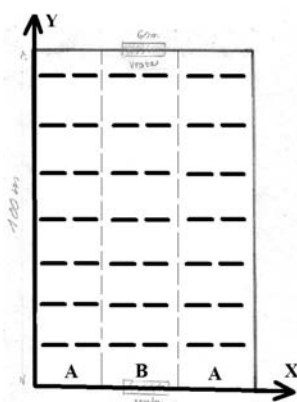
$\alpha = 45^\circ$, $d = 0,124$ m (předpokládáme jednostupňový typ, který je nejužší, ostatní budou vyhovovat, viz nabídka firmy Kotrbatý s.r.o.)

$$2(h - 2,5) \operatorname{tg} \alpha + (n - 1) \cdot 2 \cdot (h - 1,5) \operatorname{tg} \alpha + n \cdot d = L \text{ (délka haly)}$$

$$2(h - 2,5) \operatorname{tg} 45 + (n - 1) \cdot 2 \cdot (h - 1,5) \operatorname{tg} 45 + n \cdot 0,124 = 100$$

$n = 6,74 \approx 7$ (zkusíme umístit 7 zářičů na délku haly, tj ve směru Y)

Situace rozmístění:



Výpočet výkonu jednoho zářiče v zóně A (14 zářičů):

$$n_A = \frac{86,4}{14} = 6,17 \approx 6,2 \text{ kW} \text{ podle tohoto výkonu vybereme vhodný typ z firemní nabídky, a to}$$

typ MK 7.1 (**6,7 kW**), jádrový $\alpha = 90^\circ$, délka $d = 0,46$ m

Celkem v zóně A: $14 \times 6,7 = 93,8$ kW

Kontrola vhodnosti:

$$\frac{93,8 - 86,4}{86,4} \cdot 100\% = 8,6\% < 10\% \text{ vyhovuje}$$

Kontrola hygienického osálení podlahy v zóně A:

$$I_{sA} = \frac{93800 \cdot 0,2788}{25 \cdot 100} = 10,46 \approx \mathbf{10,5} \text{ Wm}^{-2} < 200 \text{ Wm}^{-2} \text{ O.K.}$$

Výpočet výkonu jednoho zářiče v zóně B (14 zářičů):

$$n_B = \frac{73,4}{14} = 5,24 \approx 5,3 \text{ kW} \text{ podle tohoto výkonu vybereme vhodný typ z firemní nabídky, a to}$$

typ MK 11.2 (zapnuta pouze jedna řada destiček dává **6,5 kW**) jádrový $\alpha = 90^\circ$, délka $d = 0,65$ m

Celkem v zóně B: $14 \times 6,5 = 91,0$ kW

Kontrola vhodnosti:

$$\frac{91 - 73,4}{73,4} \cdot 100\% = 23,97\% > 10\% \dots \text{přetopeno, nevyhovuje, ale není k dispozici jiný typ s}$$

menším výkonem, takže se budeme snažit pomoci hlídacím termostatu v zóně B nepřetápnět.

Kontrola hygienického osálení podlahy v zóně A:

$$I_{sB} = \frac{91000 \cdot 0,2788}{10 \cdot 100} = 25,37 \approx \mathbf{25,4 \text{ Wm}^{-2}} < 200 \text{ Wm}^{-2} \dots\dots \text{O.K.}$$

Zóny A budou mít také samostatné termostaty (všechny zóny budou regulovány nezávisle na sobě). Lepší řešení by v tomto případě bylo volit kombinaci tmavých zářičů se světlými nebo jen tmavé zářiče, se kterými tato hala vychází bez problémů s přetápněním (viz návrh s tmavými zářiči v kap. 5.1.4).

Kontrola rozmístění s vybranými zářiči:

1) Podél směru X máme osazeny 4 zářiče délky 0,46m a dva zářiče délky 0,65m. Krajní zářiče budou ode zdi: $(9-2,5) \cdot \text{tg}35 = 4,55 \text{ m}$. Stačilo by 4,55 m ode zdi, ale vzhledem ke chladné venkovní zdi zmenšíme vzdálenost na **3 m**.

Ostatní rozteče mezi zářiči: $[60 - 2 \times 3 - (4 \times 0,46 + 2 \times 0,65)] / 5 = \mathbf{10,17 \text{ m}}$.

Kontrola překryvu bočních úhlů mezi zářiči: $9 - \frac{10,17}{2} \cdot \frac{1}{\text{tg}35} = \mathbf{1,7 \text{ m}} \geq 1,5 \text{ m} \dots \text{O.K.}$

2) Podél směru Y máme opět dva typy zářičů, které ale mají společnou hodnotu jádrového úhlu $2\alpha = 90^\circ$ ($\alpha = 45^\circ$) a jako jejich šířku bereme hodnotu nejužšího z nich, tj. 0,124, což odpovídá šířce jedné řady keramických destiček :

Krajní zářiče u zdi: $(9-2,5) \cdot \text{tg}45 = 6,5 \text{ m}$.

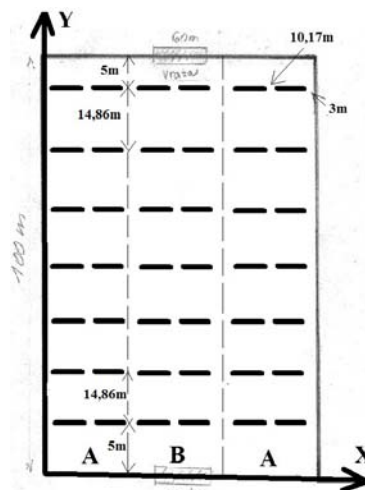
Kvůli chladné venkovní zdi zmenšíme vzdálenost zářičů od stěny z hodnoty 6,5 m na **5 m**.

Ostatní rozteče mezi zářiči budou následující: $\frac{100 - 2 \cdot 5 - 7 \cdot 0,124}{6} = \mathbf{14,86 \text{ m}}$.

Kontrola překryvu jádrových úhlů mezi zářiči: $9 - \frac{14,86}{2} \cdot \frac{1}{\text{tg}45} = \mathbf{1,57 \text{ m}} \geq 1,5 \text{ m} \dots \text{O.K.}$

Kóty rozmístění zářičů v náčrtku půdorysu:

Výsledná situace je na následujícím obrázku:



Kontrola hygienického požadavku pro celou halu:

Součet osálení jednotlivých zón $10,5 + 25,4 = 35,9 \approx 36 \text{ W/m}^2 < 200 \text{ W/m}^2$ O.K.

Protože součet osálení jednotlivých zón je menší než kritická hodnoty, nemuseli bychom dělat separátní kontrolu osálení pro celou halu, ale pro názornost ji provedeme:

$$I_s = \frac{(28 \cdot 6700 + 14 \cdot 6500) \cdot 0,2788}{6000} = 12,95 \text{ Wm}^{-2} \approx 13 \text{ Wm}^{-2} < 200 \text{ Wm}^{-2} \dots\dots \text{vyhovuje.}$$

Zkusmé statické posouzení stropu: užité zatížení stropu je např. $0,5 \text{ kN/m}^2$.
Panelové plošné zatížení: 1) MK 7.1 (6,7kW) $66 \text{ N}/(0,46 \times 0,36) \sim 0,40 \text{ kN/m}^2$
2) MK 11.2 -zapnuta jedna řada destiček (6,5kW) $76 \text{ N}/(0,63 \times 0,36) \sim 0,34 \text{ kg/m}^2$.
Oba typy panelů nezatíží strop kritickým způsobem. Pokud by ale strop měl únosnost např. jen $0,45 \text{ kN/m}^2$, stropní sestava by vyžadovala podrobné statické posouzení.

Závěrečná poznámka:

Provedli jsme projekci plynového otopného systému do jedné a téže průmyslové haly pomocí tmavých a světlých zářičů. Nyní můžeme srovnat ekonomickou výhodnost obou typů zářičů:

Světlé zářiče: požadovaný výkon **246,2 kW**, skutečně instalovaný výkon **278,6 kW**.

Tmavé zářiče: požadovaný výkon **322 kW**, skutečně instalovaný výkon **344 kW**.

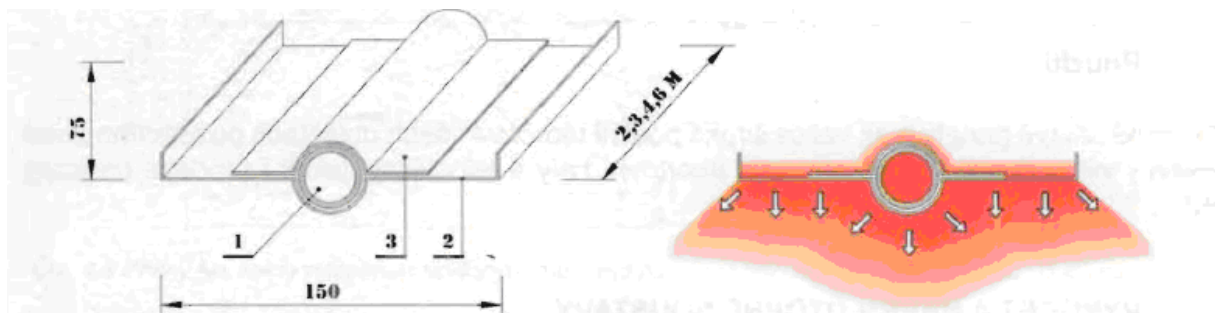
V dané hale se zdá být **ekonomičtější systém se světlými zářiči**, přestože jsme byli nuceni vybrat do zóny B nadbytečně výkonný typ zářiče. Úspora výkonu by ovšem neměla být jediným kritériem výběru. **Záleží také na dalších položkách, jako je pořizovací cena obou systémů, jejich životnost, náročnost údržby, spotřeba zemního plynu atd.....**

5.2 Výkonové teplovodní sálavé panely [4 -5]

Jak již bylo řečeno v kapitole 1.2, v České republice není v současné době **žádná stavební norma**, podle které by se projektanti mohli řídit při projekci sálavých otopných systémů. Je proto jediná možnost, a to vybrat výrobní firmu, od které budou zakoupeny otopné sálavé panely, a řídit se při projekci její **firemní dokumentací**. V České republice je předním výrobcem výkonových teplovodních sálavých panelů určených **do velkých objektů** průmyslového nebo komerčního charakteru **firma Kotrbatý s.r.o.** Budeme proto vycházet při projekci těchto systémů do velkých prostor z jejich firemních dokumentů. Z těchto dokumentů bylo vše potřebné shrnuto a uloženo **do této brožury**, takže při přípravě na zkoušku není nutné vyhledávat firemní literaturu, ale stačí se omezit pouze na tento výukový text.

Stropní sálavé otopné panely firmy Kotrbatý, s.r.o. jsou v principu tvořeny soustavou ocelových trubek, které jsou zasazeny do roznášecí sálavé kovové plochy (hliníkového nebo ocelového nerezového plechu). Trubkami protéká pára nebo horká voda a ta se průtokem v panelu ochlazuje a předává teplo vedením do roznášecího plechu, který sáláním

(elektromagnetickým tepelným zářením) **vyzařuje teplo do okolí**. Základní stavební jednotkou těchto panelů je tzv. **modul (segment)** široký 150mm, do kterého je zapuštěná jedna trubka (viz obrázek 14). Moduly jsou vyráběny v různých délkách 2, 3, 4, 5 a 6 metrů.



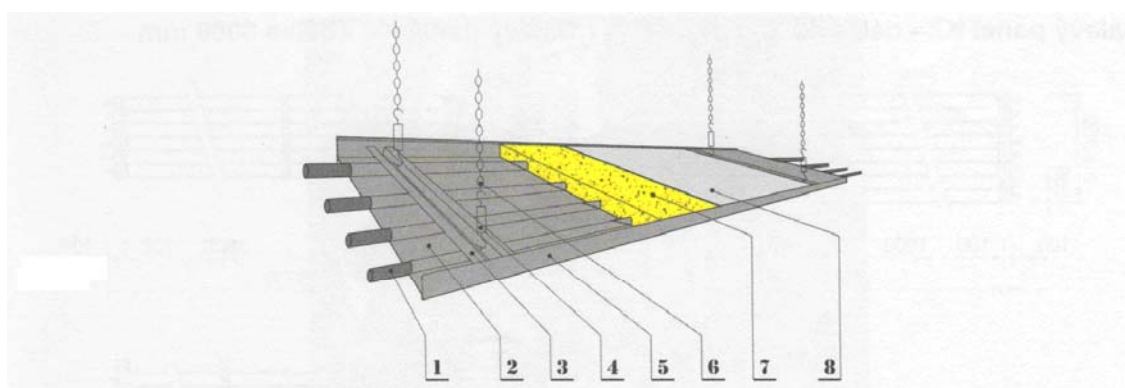
Obr. 14 Přenos tepla z otopného média na povrch modulu závěsného sálavého panelu

1 – otopná trubka ocelová $\varnothing 28 \times 1,5$ mm (voda), $\varnothing 28 \times 2,6$ mm (pára), 2 – roznášecí plech – otopná lamela šířky 150 mm – hliníkový plech tl. 0,8 mm, 3 – hliníkový pás

Moduly jsou spojovány vzájemně **do šířky**, čímž vytvářejí panelové jednotky - jejich šířky jsou tím pádem násobky šířky jednoho modulu (segmentu) - na obrázku 15 je znázorněna jedna panelová jednotka o šířce $4 \times 150\text{mm} = 600\text{mm}$ (obsahuje tedy 4 otopné trubky).



Obr. 15 Panelová jednotka složená ze 4 segmentů délky 3m. Šířka panelové jednotky je $4 \times 150\text{cm} = 60\text{cm}$ (obsahuje 4 otopné trubky).

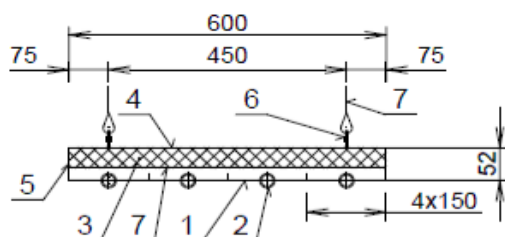


Obr. 16 Závěšený sálavý panel KZ

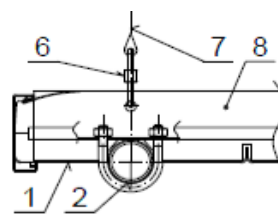
1 – vytápěcí rourka ocelová $\varnothing 28 \times 1,5$ mm (voda), $\varnothing 28 \times 2,6$ mm (pára), 2 – vytápěcí lamela š. 150 mm – hliníkový plech tl. 0,8 mm, 3 – příčný nosník, 4 – napínací šroub M6 x 60/110, 5 – bočnice z hliníkového plechu, 6 – uzlový řetizek K32/3,1/12, 7 – tepelná izolace ORSIL tl. 40 mm, 8 – hliníková fólie.

Konstrukční detaily panelové jednotky je vidět na obrázcích 16 a 17. Vrchní plocha roznášecího plechu je potažena nehořlavou izolací s hliníkovou fólií, aby se potlačil nežádoucí

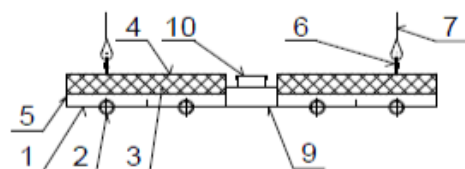
konvektivní přenos tepla směrem ke chladnému stropu. Neizolovaná spodní plocha roznášecího plechu tepelně sálá do spodního prostoru, kde se nachází zóna pobytu lidí.



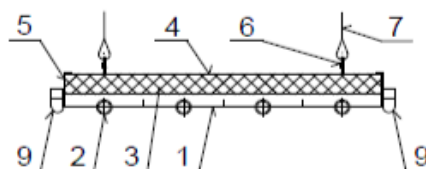
Obr.č. 4 Příčný řez panelem



Obr.č. 5 Detail zavěšení panelu



Obr.č. 6 Kombinace sálavého panelu s integrovaným osvětlením



Obr.č. 7 Kombinace sálavého panelu s osvětlením - LED trubice
-Evropský patent-

Legenda:

- | | |
|--|--|
| <p>1 - otopná plocha - hliníkový plech tl.0,8 mm
povrchová úprava - práškové lakování,
emisivita povrchu 0,93
barva RAL 9016 (bílá) - standard</p> <p>2 - otopná trubka - ocelová Ø 28x1,5
trubka s plechem spojená prolisováním plechu</p> <p>3 - tepelná izolace - minerální, tloušťka 40 mm
tepelný odpor 1 m²K / W
hustota 45 kg / m³
vrchní polep - hliníková fólie</p> | <p>4 - polep izolace hliníkovou fólií</p> <p>5 - bočnice - hliníkový plech
povrchová úprava - práškové lakování</p> <p>6 - řetězová rychlospojka (součástí dodávky)</p> <p>7 - zavěšení - např.uzlový řetězec K 32/3,1/12
s napínacím šroubem nebo lankový
systém GRIPPLE s napínacím šroubem</p> <p>8 - příčný nosník - pozinkovaný plech</p> <p>9 - osvětlovací těleso LED (na dotaz)</p> <p>10 - kabelový žlab (na dotaz)</p> |
|--|--|

Třída hořlavosti - panel A1; izolace A2

Teplonosná látka: teplá, horká voda (pára na dotaz)
maximální provozní přetlak - 1,6 MPa (PN16)
maximální provozní teplota - 140 °C

2.2 Konstrukční varianty

KSP

Jedná se o standardní provedení s ocelovými trubkami v bílé barvě RAL 9016.

KSP COLOR

Sálavé panely lze za příplatek dodat v libovolné RAL barvě. Konstrukce panelu dokonce umožňuje i různé barevné kombinace. Navýšení ceny se pohybuje průměrně kolem 10 %.

KSP COOL

V zimě vytápí, v létě chladí se stejnou činnou plochou. Speciální úprava panelu základní varianty spočívá v nerezovém provedení rozvodného potrubí a v regulaci, která zabraňuje kondenzaci. Alternativně je možná i levnější varianta, která zachovává materiál potrubí standardní ocel. Potom je regulace zabraňující kondenzaci nezbytná.

KSP SPORT

Sálavé panely KOTRBATÝ prošly zátěžovým testem bezpečnosti pro sportovní objekty a jsou certifikované dle: DIN 18032-3:1997-04 a EN 13 964, příloha D. Navíc je možno doobjednat vrchní drátěný kryt, aby nahoře na panelu nezůstávaly míče. Velikost oka je menší než tenisový míč.

KSP LIGHT

Vzhledem ke své modulové konstrukci lze do sálavých panelů KOTRBATÝ lehce integrovat různé druhy osvětlení od jednoduchých liniových zářivek, přes kompaktní osvětlovací tělesa až po provozně nejúspornější LED panely a trubice. Nabídka včetně osvětlení na dotaz.

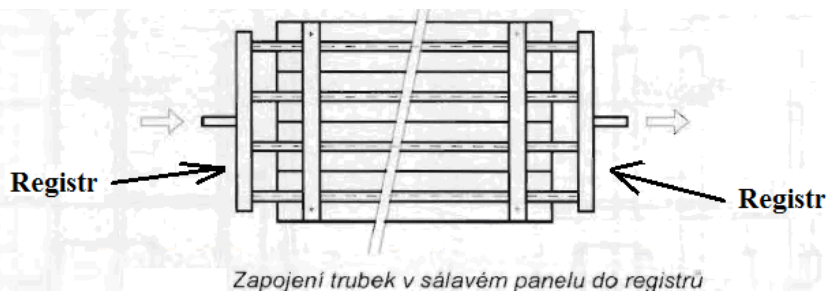
KSP FARM

Speciální úprava pro agresivní prostředí výkrmů drůbeže s možností sklopení a čištění vysokotlakým čistícím strojem. Nerezové provedení potrubí, bez vrchní izolace a bočních křídélek, vyztužená závěsná konstrukce.

OBR. 17 Konstrukční detaily panelových jednotek a typy vyráběných panelů.

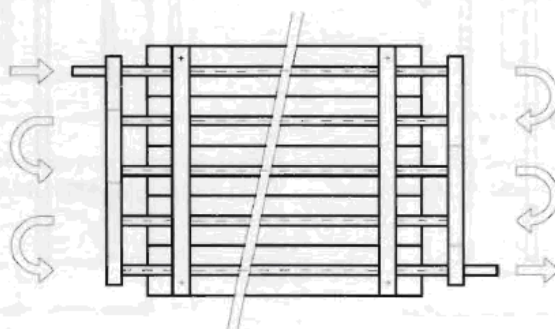
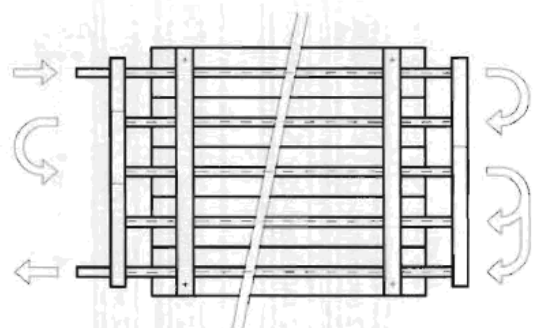
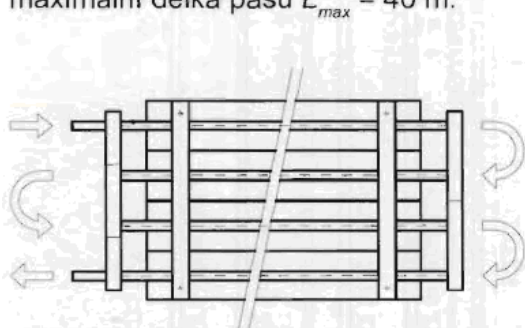
Na obou koncích panelové jednotky jsou nasazeny tzv. registry (viz obrázek 18), které rozvádí teplonosné medium do všech trubek panelové jednotky. Registry současně dovolují vzájemné

spojování panelových jednotek do různě dlouhých pásů. Výsledné délky pásů si určuje projektant podle požadovaného výkonu (pásy mohou dosahovat délky i 200 m, pokud to dovoluje délka haly, do které jsou pásové panely projektovány).



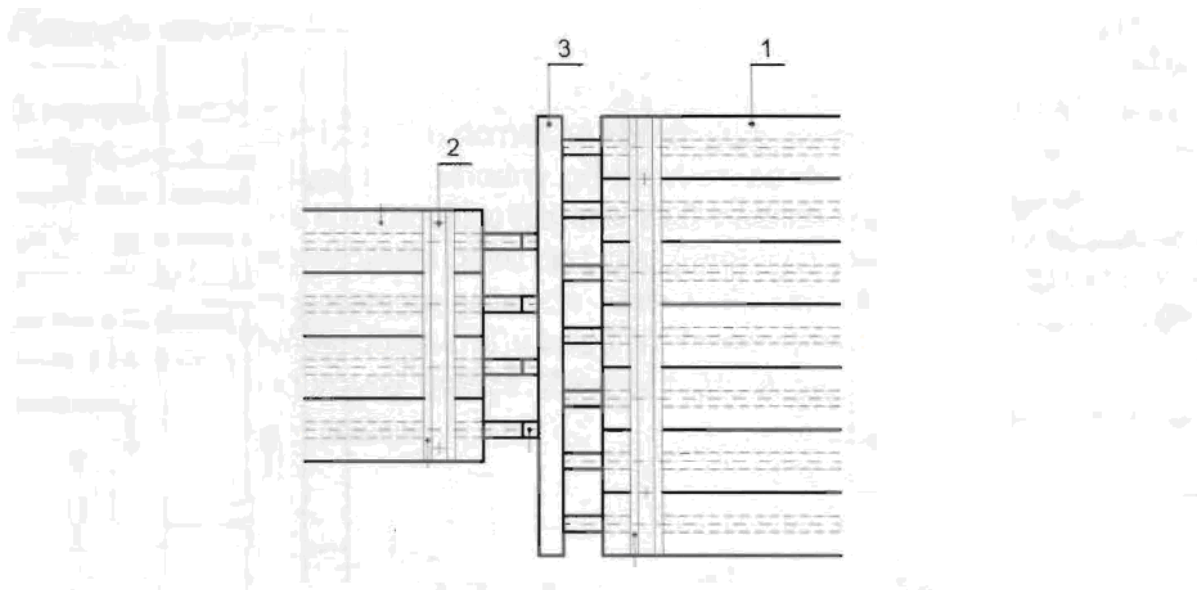
Zapojení sériově (do hadů)

je možné provádět při malém teplotním rozdíle přívodu a zpátečky topného média $\Delta\theta \leq 20$ K; maximální délka pasu $L_{max} = 40$ m.



Obr. 18 Panelové jednotky s registry na obou stranách. Registry dovolují různý rozvod teplotního média a současně i spojování panelových jednotek do dlouhých pásů dle požadavku projektanta.

Do pásů se mohou **spojovat** nejen jednotky stejné šířky, ale také jednotky **rozdílných šířek** díky univerzální konstrukci registrů - viz obrázek 19. Praktická ukázka nainstalovaných dlouhých teplovodních panelových pásů je na obr. 20.



Obr. 19 Oboustranný registr pro napojení sálových panelů různých šířek
 1 - sálový panel o sedmi modulech , 2 - sálový panel o čtyřech modulech , 3 – oboustranný registr



Obr. 20 Instalace sálových teplovodních panelových pásů do zkušební haly stanice technické kontroly.

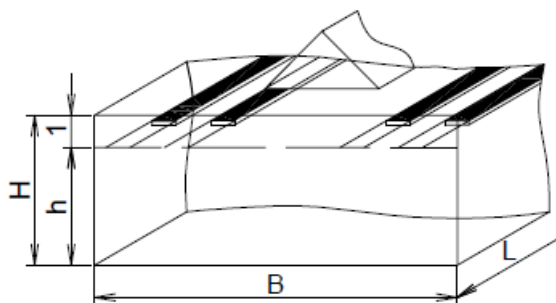
5.2.1 Zásady projekce teplovodních panelů do velkých prostor [4 - 5]

1. Stanovit **tepelné ztráty v zónách** průmyslové haly a **optimalizovat tepelné ztráty** vzhledem k **výšce h zavěšení panelů (oprava f_1)** a vzhledem ke sníženému **zavěšení** $\frac{h}{H-1}$ oproti výšce stropu H (**oprava f_2**). Panely nesmí být přimontovány přímo na povrchu stropu, ale ve vzdálenosti alespoň 1-3 metry nebo i více od povrchu stropu.

Vypočteme základní tepelnou ztrátu zóny Q_z v kilo-wattech (kW). **Stanovíme opravy** na výšce zavěšení panelů f_1 , na snížení v zavěšení panelů oproti stropu f_2 a event. na šikmé zavěšení f_3 . Korekce f_1 a f_2 se stanoví dle následujících tabulek:

h [m]	f_1
6	1,00
8	1,08
10	1,12
12	1,18
15	1,25
20	1,30

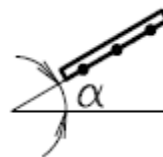
$\frac{h}{H-1}$	L/B		
	2	2-5	5
1,0	f_2	f_2	f_2
	0,904	0,944	0,969
0,95	0,874	0,927	0,959
0,90	0,845	0,910	0,949
0,85	0,904	0,944	0,969
0,80	0,874	0,927	0,959
0,75	0,845	0,910	0,949
0,70	0,817	0,839	0,939
0,65	0,790	0,877	0,930
0,60	0,764	0,861	0,920
0,55	0,739	0,845	0,911
0,50	0,715	0,830	0,902
0,45	0,692	0,816	0,893
0,40	0,670	0,802	0,884



Šikmé zavěšení (ve výjimečných případech):

$$\alpha = 30^\circ \quad f_3 = 1,10$$

$$\alpha = 45^\circ \quad f_3 = 1,15$$



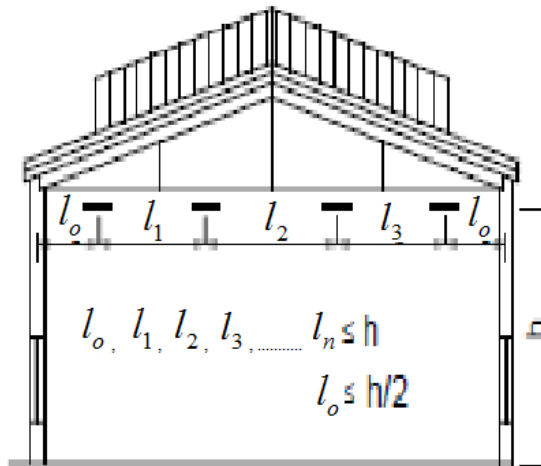
Pomocí oprav f_1 , f_2 a event. f_3 se optimalizují ztráty v zóně takto:

$$Q_p = Q_z \times f_1 \times f_2 \times f_3 \quad (\text{kW})$$

2. Určit teplotní spád dle možností kotleny nebo teplovodu např. tepelné čerpadlo 50/30 °C, pára z teplárny 130 °C (na vstupu do otopného systému), horká voda z teplárny 90 °C (na vstupu do otopného systému), kotel na biomasu 85 °C (voda na vstupu do otopného systému), kondenzační plynový kotel 70 °C (voda na vstupu do otopného systému). Teplota zpátečního toku (zpátečky) má některá omezení, např. **teplárna požaduje co nejnižší teplotu**, ale pro výkon sálavých panelů je naopak **potřebnější co nejvyšší teplota**. **Teplotní spád je plně v rukou projektanta**.

3. Určit požadovanou výslednou (pocitovou) teplotu Θ_g v zóně nebo celé hale dle typu pracovní činnosti.

4. **Délka pásových panelů** se určuje podle délky nebo šířky zóny dle rozhodnutí projektanta. Je-li např. vybrán rozměr L , pak délka panelových pásů bude přibližně o 2 až 3 metry kratší na každé straně u zdi, tj. $L - 4$ (nebo $L - 6$) kvůli montážnímu prostoru. Rozteče pásových panelů v druhém směru zóny se volí podle výšky zavěšení h tak, že rozteč středů panelů l mezi sebou bude $l \leq h$ a od stěn $l_o \leq \frac{h}{2}$. Z rozmístění vyplyne počet panelů N v zóně (zónách) a potažmo pak v celé hale:



Celková délka panelových pásů: $D = N \times (L - 6)$

5. Určení **šířky** pásových teplovodních panelů pomocí **dvou parametrů**:
- Teplotní rozdíl $\Delta\Theta$ mezi průměrnou teplotou pásové sestavy a teplotou výslednou (pocitovou) Θ_g v hale, tj.

$$\Delta\Theta = \frac{(\Theta_{vstup} + \Theta_{výstup})}{2} - \Theta_g$$

- Výkon na metr délky:

$$w = \frac{\text{optimalizované ztráty}}{\text{celková délka panelů}} \quad (\text{W/m})$$

Na základě dvojice číselných hodnot $(\Delta\Theta, w)$ vybíráme vhodný panel z následující tabulky firmy Kotrbatý s.r.o., a to panel s nejbližším vyšším výkonem $w_{výrobek}$ (W/m). U každého panelu je uvedena také jeho šířka. Hodnoty výkonů vyráběných panelů číselně uvedené v následující tabulce mohou být aproximovány cejchovním vztahem

$$w_{výrobek} \approx K \times \Delta\Theta^n \quad (\text{W/m})$$

Hodnoty K, n jsou uvedeny v záhlaví následující tabulky:

Tepelné výkony panelů - dle EN 14037: 2004

Δθ	Tepelný výkon panelu [W/m]								
	Šířka panelu [mm]								
	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
K	1,5516	2,1608	2,7501	3,3624	3,9704	4,5743	5,1741	5,7979	6,4457
n	1,1931	1,1972	1,2012	1,2021	1,2029	1,2038	1,2046	1,1994	1,1942
[K]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]
20	55	78	100	123	146	168	191	211	231
22	62	87	113	138	163	189	214	236	258
25	72	102	131	161	191	220	250	275	301
27	79	112	144	177	209	242	274	302	330
30	90	127	164	201	237	274	311	343	374
32	97	137	177	217	257	297	336	370	404
35	108	152	197	241	286	330	375	412	450
37	115	163	210	258	306	353	401	471	481
40	127	179	231	283	336	388	440	484	528
42	134	189	245	300	364	411	467	513	559
45	146	206	266	327	387	447	507	557	607
47	153	217	280	344	408	471	534	587	640
50	165	234	302	371	439	508	576	632	689
52	173	245	317	388	460	532	604	663	722
55	185	262	339	416	492	569	646	709	772
57	193	273	353	434	514	594	674	740	805
60	205	291	376	461	547	632	717	787	857
62	213	302	391	480	568	658	746	818	891
65	226	320	414	508	602	696	790	866	942
67	234	332	429	527	624	722	819	898	977
70	247	350	453	555	658	761	864	947	1030
75	268	380	492	603	715	827	939	1029	1118
80	289	410	531	652	773	894	1015	1111	1208
85	311	441	571	701	831	961	1091	1195	1298
90	333	472	612	751	890	1030	1169	1280	1390
95	355	504	653	798	950	1099	1248	1366	1483
100	377	536	694	853	1011	1169	1327	1452	1576
105	400	568	736	904	1073	1240	1408	1540	1671
110	423	600	779	956	1133	1311	1489	1628	1766

6. Z bodu č. 5 a výše uvedené tabulky dostaneme šířku vyráběného pásu a spolu s ní také délkový výkon výrobku $w_{výrobek}$. Následně vypočítáme celkový skutečný výkon ve *wattech* P vybraného panelového pásu v dané zóně a tento výkon porovnáme s optimalizovanými ztrátami v této zóně (viz bod 1.):

$$P = w_{výrobek} (W / m) \times \text{délka panelu } D (m) = \dots (W)$$

Výkon zvoleného panelového pásu by neměl přesahovat ztráty v zóně o více jak 10% ~~20%~~. V opačném případě hledáme jiné řešení.

7. Určíme hmotnostní průtok, objemový průtok a rychlost proudění (rychlost by měla být alespoň 0,15 m/s nebo větší, aby se uvnitř vodorovně zavěšených panelů u stropu haly nezavzdušňovala teplotná voda.

Hmotnostní průtok \dot{M} je odvozen na základě odebraného tepelného výkonu uvnitř panelů. Odvození vzorce vychází z kalorimetrické rovnice:

$$m \cdot c \cdot \Delta T = E \text{ (Joul)}$$

m je hmotnost vody protékající panelem, c tepelná kapacita, ΔT teplotní rozdíl vody vstupující do panelu a vystupující z panelu. Jestliže za čas Δt proteče panelem voda o hmotnosti Δm , pak hmotnostní průtok $\dot{M} = \Delta m / \Delta t$ (kg/sec.) odevdá výkon $\Delta E / \Delta t = P$ (joul/sec=watt):

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot c \cdot \Delta T = \frac{\Delta E}{\Delta t} \text{ (watt)}$$

$$\dot{M} \cdot c \cdot \Delta T = P \text{ (watt)}$$

Hmotnostní průtok: $\dot{M} = \frac{P}{c \cdot \Delta T}$ (kg/sec.) (P je předaný výkon ve wattch)

Objemový průtok: $\dot{V} = \frac{\dot{M}}{\rho}$ (m^3 /sec.), ρ je hustota vody

Rychlostní průtok: $v = \frac{\dot{V}}{n \cdot \pi \cdot r^2}$ (m/sec.), r je vnitřní poloměr trubek v panelu, n je počet trubek v panelu.

Kontrola rychlostního průtoku vody:

Je-li $v \geq 0,15$ (m/s), pak rychlost vyhovuje, protože je potlačeno zavzdušňování vodorovně zavěšených panelů panelového systému. V opačném případě se panelový otopný systém vodorovných panelů bude zavzdušňovat, což pro běžné topení nebude vyhovovat, a pak je třeba hledat jiné řešení.

8. Určíme ztrátový tlak vody v celém otopném systému (kotel, rozvody, armatury, panely). Ztrátový tlak Δp se skládá ze ztráty tlaku třením vody o stěny celého trubkového vedení Δp_1 , a ze ztráty tlaku místními odpory v armaturách Δp_2 :

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = R \cdot l + Z$$

$$\Delta p_1 = \left[\sum_{(i)} k_i \frac{\rho v_i^2}{2} \cdot \frac{l_i}{d_i} \right], \quad \Delta p_2 = \sum_{(i)} \xi_i \frac{\rho v_i^2}{2}$$

R je tlaková ztráta třením proudící vody o stěny trubek (Pa/m)

l resp. l_i je délka trubek určitého úseku otopného systému (m)

Z je tlaková ztráta vlivem místních odporů (Pa)

k_i součinitel tření [-] - pro ocelové bezešvé trubky $k_i \approx 0,1$

ρ hustota vody při dané teplotě (kg/m^3) - viz tabulky na konci brožury

v_i rychlosti vody v různých místech i otopného systému (m/s)

d_i průměr trubek (m) - ocelové bezešvé trubky viz tabulky na konci brožury

ξ_i součinitel místních odporů [-] - viz tabulky na konci brožury

Ztrátový tlak u písemky - pokud bude zadán - můžete počítat buď pomocí výše uvedených vzorců a tabulek na konci brožury, což je pomalejší způsob, nebo pomocí internetových

kalkulaček a internetových tabulek a svého notebooku připojeného na školní wifi síť EDUROAM, což je rychlejší a pohodlnější způsob (je věcí svobodné volby každého, co si vybere).

Internetové adresy kalkulaček tlaků a tabulek:

Kalkulačka ztrátových tlaků vyvolaných třením:

<https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/87-vypocet-tlakove-ztraty-trenim-v-potrubi>

Kalkulačka ztrátových tlaků vyvolaných místními odpory:

<https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/46-tlakova-ztrata-mistnimi-odpory>

Tabulka pro vodu v závislosti na teplotě

<https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/7-tepelne-vlastnosti-vody-pri-tlaku-nasyceni>

Tabulka pro trubky ocelové bezešvé:

<https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/16-ocelove-trubky-zavitove-bezne-a-bezesve>

Tabulky v tištěné formě jsou na konci brožury.

-
9. Vybrat **vhodné oběhové čerpadlo** dle ztrátového tlaku a objemového průtoku - **tento bod nebude vyžadován u zkoušky**, ale pro zájemce o hlubší pochopení látky je výběr čerpadla vysvětlen:

Pro vyhledání oběhového čerpadla potřebujeme znát minimálně dva údaje:

Objemový průtok a ztrátový tlak (\dot{V} , Δp)

Tyto údaje byly určeny v bodech č. 7 a 8. K dispozici je internetový vyhledávač firmy Grundfos:

<https://product-selection.grundfos.com/catalogue.product%20families.q%26h%20cr.html?custid=GMA1&familycode=CRFAM&flow=0&head=0&lang=ENU&qcid=444467637&time=1539764628760>

Pro výběr vhodného čerpadla je nutno dodržet následující požadavky:

Pracovní bod čerpadla necht' leží co **nejblíže středu** charakteristické křivky čerpadla a pracovní bod otopného systému necht' leží **pod pracovním bodem čerpadla** s rezervou kolem 5 – 10 %, aby byla k dispozici výkonostní rezerva čerpadla kvůli regulaci průtoku vody v otopném systému a tím pádem k regulaci tepelného výkonu.

Praktická ukázka vyhledání vhodného čerpadla bude provedena na přednášce.

-
10. Ověření hygienického hlediska - **osálání podlahy:**

$$I_s = \frac{P_{\text{celkový}} \times \eta}{S_{\text{celková}}} \leq 200 \text{ W} / \text{m}^2 ,$$

kde $P_{celkový}$ je celkový výkon všech panelů, $S_{celková}$ je celková plocha podlahy haly, η je sálavá účinnost:

$\eta = 0,69 - 0,71$ pro střední teplotu panelů menší jak $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

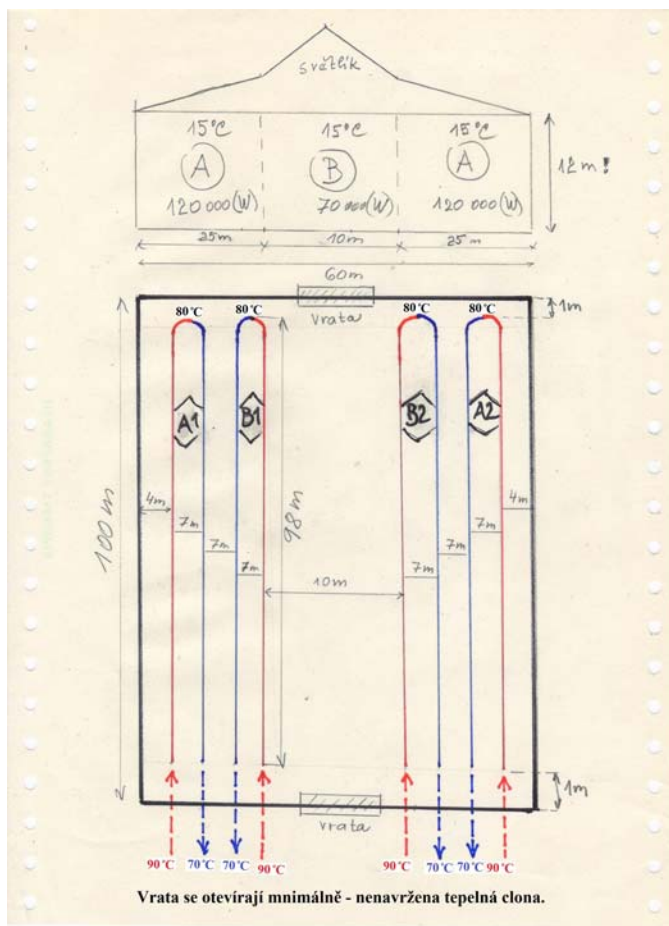
$\eta = 0,71$ pro střední teplotu panelů rovnou $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

$\eta = 0,71 - 0,75$ pro střední teplotu panelů větší jak $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

Toto kritérium ošetřuje případy, kdy by docházelo k přílišnému tepelnému sálání do oblasti hlavy lidí běžného vzrůstu, kteří se nacházejí (pracují) pod sálavými panely ("Horká hlava, studené nohy").

11. Statické posouzení stropu - návod viz kap .5.1.3(poslední krok).

5.2.2 První ukázková projekce TEPLOVODNÍCH sálavých panelů ($90/70\text{ }^{\circ}\text{C}$) do velké haly



Průmyslová hala (viz vedlejší obrázek) sestává ze 3 zón A, B, C. Rozměry haly jsou $60\text{m} \times 100\text{m} \times 12\text{m}$. Je předpokládána venkovní zimní teplota $t_e = -16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{ga} = t_{gb} = t_{gc} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou požadované pocitové teploty v zónách A, B, C. Do této haly navrhnete teplovodní pásové sálavé panely firmy Kotrbatý s.r.o. s **výškou zavěšení $h = 11$ metrů nad podlahou** (tj. 1 metr pod stropem).

1. Určení **teplotního spádu:**

K dispozici bude horká voda z místní kotelny $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplotu zpátečky předepíšeme v hodnotě $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vyšší teplota panelů zaručí posílení jejich sálavého výkonu ve srovnání s jejich konvekčním výkonem). Budeme tedy v projektu pracovat s teplotním spádem **$90\text{ }^{\circ}\text{C} / 70\text{ }^{\circ}\text{C}$** (viz vedlejší obrázek).

2. **Pocitová teplota** ve všech zónách haly je požadována v hodnotě **$15\text{ }^{\circ}\text{C}$** .

3. **Rozmístění panelů** v hale:

Kritické hodnoty vzdálenosti středů panelů mezi sebou $h = 11\text{m}$ volíme raději menší kvůli většímu tepelnému komfortu, tj. **7m** ; pouze zóna B bude mít rozteč panelů větší, a to rovných **10m** , což je šířka zóny B - tím nebude zastíněno denní světlo přicházející ze světliku.

Vzdálenost středů panelů od stěn by sice mohla být $h/2 = 5,5$ m, ale volíme **raději menší vzdálenost**, abychom lépe eliminovali chlad venkovních stěn - volíme **4m**. Situace rozmístění panelů je znázorněna na horním obrázku. Výsledkem jsou dva panely B1 a B2 pro zónu B a jeden panel pro zónu A - máme ale dvě zóny A, tudíž i dva panely A1 a A2.

4. Ztráty v jednotlivých zónách:

$Q_{zóna} = (\text{prostup} + \text{infiltrace} + \text{větrání}) \cdot f_1 \cdot f_2$ kde f_1 je oprava na výšku zavěšení panelů, f_2 je oprava na jejich snížené zavěšení (viz kapitola 5.2.1).

Základní ztráta: **(Prostup+ infiltrace+ větrání) v zóně A činí 120 000W, v zóně B 70 000W.**

Ztráty v zóně B:

Do zóny B přispívají oba panely B1 a B2 stejným dílem. Panely jsou zavěšeny 1m pod stropem, tj. $h = 11$ m, $H = 12$ m, $\frac{h}{H-1} = 1$, $\frac{L}{B} = \frac{100\text{m (délka haly)}}{60\text{m (šířka haly)}} = 1,67$. Korekce na výšku

zavěšení h (viz tabulka v kap. 5.2.1) $f_1 = 1,15$. Korekce na snížení závěsu $\frac{h}{H-1} = 1$ (viz

tabulka v kap. 5.2.1) činí $f_2 = 1,0$. Základní ztráta (prostup+ infiltrace+ větrání) v zóně B byla vypočítána a činí 70 000W. Na pokrytí základních ztrát potřebujeme výkon panelů alespoň v hodnotě $P = 70\,000 \cdot f_1 \cdot f_2 = 80\,500$ W, takže každý ze dvou panelů B1 a B2 by měl dodávat **40 250 W**.

Ztráty v zóně A:

Panely budou zavěšeny rovněž 1m pod stropem, takže můžeme opakovat výpočet jako v zóně B, tj. $h = 11$ m, $H = 12$ m, $\frac{h}{H-1} = 1$, $\frac{L}{B} = \frac{100\text{m (délka haly)}}{60\text{m (šířka haly)}} = 1,67$. Korekce na výšku

zavěšení panelů h (viz tabulka kap. 5.2.1) činí $f_1 = 1,15$. Korekce na snížení závěsu $\frac{h}{H-1} = 1$ (viz druhá tabulka v kap. 5.2.1) činí $f_2 = 1,0$. Základní ztráta

(prostup+ infiltrace+ větrání) v zóně B byla vypočítána a činí 120 000W. Na pokrytí základních ztrát potřebujeme výkon panelů alespoň v hodnotě $P = 120\,000 \cdot f_1 \cdot f_2 = 138\,000$ W, takže každý panel A1 a A2 ve dvou zónách A by měl mít výkon **138 000 W (obě zóny A dohromady budou tedy vyžadovat 276 000W).**

5. Určení šířek a typů panelů pro zónu B:

$w = \frac{40\,250 (W)}{196 (m)} = 205,4 \text{ W/m}$, $\bar{T} = \frac{90+70}{2} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\Theta = 80 - 15 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$. Z výkonové

tabulky uvedené v kap. 5.2.1 vybereme panel, jehož výkon $w_{skutečný}$ (W/m) při teplotním rozdílu $\Delta\Theta = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ dosahuje nejbližší vyšší hodnotu k hodnotě vypočítané (205,4 W/m). Tento požadavek splňuje panel šířky **300mm**, a proto je vhodným pro osazení do pozic panelů B1 a B2. Tento typ panelu má výkon **226 W/m** a obsahuje 2 trubky DN 20.

6. Skutečný výkon panelů B1 a B2 v zóně B:

Panely B1 a B2 jsou totožné, výpočet výkonu bude dvojnásobkem výkonu jednoho z nich, tj.

$$P = 2 \cdot 196(m) \cdot 226 (W/m) = 88592W.$$

Kontrola výkonu: $\frac{88592 - 80500}{80500} \cdot 100\% = 10,05\% \approx 10\%$ přebytek do 10% **vyhovuje**.

7. Určení hmotnostního průtoku, objemového průtoku a rychlosti proudění v panelech B:

Průměrná teplota vody v otopném systému je $\bar{T} = \frac{90 + 70}{2} = 80^\circ\text{C}$. Pro vodu této teploty zjistíme z tabulek na portálu TZB její hustotu $\rho = 971,8 \text{ kg/m}^3$ a tepelnou kapacitu $c = 4194 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Rozdíl teplot na vstupu a výstupu otopného systému je $\Delta\tau = 90 - 70 = 20^\circ\text{C}$.

Hmotnostní průtok: $\dot{M} = \frac{P}{c \cdot \Delta\tau} = \frac{88592}{4194 \cdot 20} = 1,05617 \text{ kg/s}$

Objemový průtok: $\dot{V} = \frac{\dot{M}}{\rho} = \frac{1,05617}{971,8} = 1,0868 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 3,912 \text{ m}^3/\text{hod.} \sim 4 \text{ m}^3/\text{hod.}$

Rychlost proudění v metrech za sekundu:

$$S \cdot v = \dot{V} \Rightarrow v = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot r^2} = \frac{1,0868 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0,0114)^2} = 2,6619 \text{ m/s} \dots\dots \text{Byl použit poloměr trubky DN 20}$$

(poloměr trubky DN 20 viz tabulka trubek na portálu TZB). **Vypočtený objemový tok \dot{V} ale musí protékat v součtu oběma panely, z nichž každý má 2 takové trubky, takže výsledná rychlost bude 4 krát menší, tj. $2,6619 / 4 = 0,665 \text{ m/s}$.**

Kritérium vhodnosti: $0,665 \text{ m/s} > 0,150 \text{ m/s}$ vyhovuje (k zavzdušnění vodorovných panelů nebude docházet).

8. Určení šířek a typů panelů pro zónu A:

Ztráty v zóně A byly již stanoveny v bodě 4 a požadovaný výkon k jejich pokrytí vyšel v hodnotě **138000 W** na jeden panel. Určení šířky a typu panelu vhodného pro zónu A bude probíhat podobně jako tomu bylo v zóně B.

$$w = \frac{138000 (W)}{196 (m)} = 704,08 \text{ W/m}, \quad \bar{T} = \frac{90 + 70}{2} = 80^\circ\text{C}, \quad \Delta\Theta = 80 - 15 = 65^\circ\text{C}. \text{ Z firemní}$$

tabulky vybereme panel, jehož výkon $w_{skutečný}$ (W/m) při teplotním rozdílu $\Delta\Theta = 65^\circ\text{C}$ dosahuje nejbližší vyšší hodnoty k hodnotě vypočítané (704,08 W/m). Tento požadavek splňuje panel šířky **1200mm**, a proto je vhodným pro osazení do pozic panelů A1 a A2. Tento typ panelu má skutečný výkon **790 W/m** a obsahuje **8 trubek DN 20**.

9. Skutečný výkon panelů A1 a A2 v zónách A:

Panely A1 a A2 jsou totožné, výpočet výkonu bude dvojnásobkem výkonu jednoho z nich, tj.

$$P = 2 \cdot 196(m) \cdot 760 (W/m) = 309680 W.$$

Kontrola výkonu: $\frac{309680 - 276000}{276000} \cdot 100\% = 12,2\%$ **nevyhovuje**, přebytek je větší jak

10%! **Hledejme vhodnější řešení.**

Vhodnějším řešením by mohla být **kombinace jednoho širšího a jednoho užšího pásu** v rámci jednoho panelu. Zkusíme proto vyměnit polovinu panelu, tj. jeden pás za pás o šířce, která je nejbližší užší k původní šířce **1 200mm**, a tím je pás o šířce **1050mm** (viz výkonová tabulka panelů v kap. 5.2.1).

V rámci jednoho panelu budou kombinovány dva pásy, a to pás **1200mm (790 W/m)** s pásem šířky **1050mm (696 W/m)**. Dva pásy dvou panelů A1 a A2 dohromady dávají následující výkon (při teplotním rozdílu $\Delta\Theta = 65^\circ\text{C}$):

$$P = 2 \cdot 98 \cdot (790 + 696) = 291\,256 \text{ W}$$

Kontrola výkonu: $\frac{291\,256 - 276\,000}{276\,000} \cdot 100\% = 5,5\% < 10\%$ **vyhovuje**

10. **Určení hmotnostního průtoku, objemového průtoku a rychlosti proudění v panelech A kombinovaných z různých šířek pásů:**

Hmotnostní resp. objemový průtok kombinovaným panelem, který sestává z různě širokých pásů, musí být ve všech jeho pásech stejný (požadavek proudové kontinuity). Následující rovnice je proto založena na rovnosti hmotnostních průtoků v obou pásech šířky 1200mm a šířky 1050mm a jejím účelem je zjistit správnou teplotu vody t na spojnici obou pásů (nebude to již teplota 80°C):

$$\frac{98 \cdot 5,1741 \cdot \left[\frac{90+t}{2} - 15 \right]^{1,2046}}{4194 \cdot (90-t)} = \frac{98 \cdot 4,5743 \cdot \left[\frac{70+t}{2} - 15 \right]^{1,2038}}{4194 \cdot (t-70)} \quad (1)$$

Tuto transcendentní rovnici řešíme iterativně. **Lze k tomu s výhodou použít EXCEL**, pokud si ke zkoušce přinesete notebook (praktická ukázka na přednášce). Přibližný výsledek je **$t \approx 78,4405^\circ\text{C}$** . Hmotnostní průtok zjistíme tak, že teplotu $t \approx 78,4405^\circ\text{C}$ **dosadíme do libovolné ze dvou stran rovnice (1)** a obdržíme hmotnostní tok \dot{M} , který prochází panelem složeným ze dvou nestejně širokých pásů, jejichž délka je 98m, tj. celková délka jednoho panelu je $2 \times 98 = 196\text{m}$.

11. Hmotnostní průtok, objemový průtok a rychlost proudění v panelech A:

Hmotnostní průtok:

Dosažením teploty $t \approx 78,4405^\circ\text{C}$ např. do pravé strany rovnice (1) dostáváme

$$\dot{M} = \frac{98 \cdot 4,5743 \cdot \left[\frac{70 + 78,4405}{2} - 15 \right]^{1,2038}}{4194 \cdot (78,4405 - 70)} \approx 1,7229 \text{ kg/s} = 6\,202,44 \text{ kg/hod.}$$

Objemový průtok:

$$\dot{V} = \frac{\dot{M}}{\rho} = \frac{1,7229}{971,8} = 1,7729 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 6,383 \text{ m}^3/\text{hod.} \sim 6,4 \text{ m}^3/\text{hod.}$$

Rychlost proudění v metrech za sekundu:

Máme zapojené dva pásy o nestejně šířce.

Pás šířky 1200mm obsahuje **8** trubek DN 20, takže rychlost vody těmito 8 trubkami bude

$$v_{1200mm} = \frac{1}{8} \cdot \frac{1,7729 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0,0114)^2} = \mathbf{0,543 \text{ m/s}} > 0,15 \text{ m/s} \dots\dots \mathbf{\text{vyhovuje}}$$
 (k zavzdušnění

vodorovných panelů nebude docházet). Poloměr trubky DN 20 viz tabulka trubek na konci brožury nebo na internetové adrese tam uvedené.

Pás šířky 1050mm obsahuje **7** trubek DN 20, takže rychlost vody těmito 7 trubkami bude

$$v_{1050mm} = \frac{1}{7} \cdot \frac{1,7729 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0,0114)^2} = \mathbf{0,621 \text{ m/s}} > 0,15 \text{ m/s} \dots\dots \mathbf{\text{vyhovuje}}$$
 (k zavzdušnění

vodorovných panelů nebude docházet). Poloměr trubky DN 20 viz tabulka trubek na konci brožury nebo na internetové adrese tam uvedené.

Širší pás v zónách A bude umístěn vždy jako první u stěny kvůli eliminaci chladu z venkovní zdi, užší pás pak na vnitřní straně (viz úvodní nákres).

Shrnutí průtoků:

(B1 + B2) 4 m³/hod.

(A1 + A2)..... 12,8 m³/hod.

12. Určení ztrátového tlaku Δp :

$$\Delta p = R \cdot l + Z = \left[\sum_{(i)} k_i \frac{\rho v_i^2}{2} \cdot \frac{l_i}{d_i} \right] + \sum_{(i)} \xi_i \frac{\rho v_i^2}{2}$$

(Lze použít *internetovou kalkulačku na internetové adrese uvedené v kap. 5.2.1 nebo na konci této brožury. Internetová kalkulačka je rychlejší a pohodlnější alternativa ve srovnání s numerickým výpočtem na kalkulačce dle nápořady v kapitole 5.2.1 v bodě č. 8 - to je ale pracnější a časově náročnější varianta. Tabulky jsou k dispozici na konci brožury.*

R je tlaková ztráta třením proudící vody o stěny trubek (Pa/m)

l resp. l_i je délka trubek určitého úseku otopného systému (m)

Z je tlaková ztráta vlivem místních odporů (Pa)

k_i součinitel tření [-]

ρ hustota vody při dané teplotě (kg/m³)

v_i rychlosti vody v různých místech i otopného systému (m/s)

d_i průměr trubek (m)

ξ_i součinitel místních odporů [-]

Popis rozvodů:

A1 + A2 mají společný přívod, společný odvod a jedno společné čerpadlo.

B1 + B2 mají společný přívod, společný odvod a jedno společné čerpadlo.

Okruhy (A1+A2) a (B1+B2) jsou vzájemně nezávislé, mají vzájemně nezávislé řízení, svůj vlastní termostat a svá oběhová čerpadla.

Přívody a odvody těchto otopných okruhů jsou konstruovány z trubek větších průměrů **DN80**.

Délky úseků:

Kotel - stupačka k panelům 2 x 30 m = 60 m

Stupačka 2 x 11 m = 22 m

Rozteč teplé a studené pro panely:

A1 + A2 52 m + 38 m = 90 m

B1 + B2 10 m + 24 m = 34 m

Panely B1 + B2, DN20, 2 panely každý má 2 trubky.....2 x 196 x 2 = 784 m (0,665 m/s)**Panely A1 + A2, DN20:**

dva užší pásy 7 trubek 2 x 7 x 98 = 1372 m (0,621 m/s)

dva širší pásy 8 trubek 2 x 8 x 98 = 1568 m (0,543 m/s)

Tlaková ztráta třením R:Voda teplota 80 °C, hustota 971,8 kg/m³, kinematická viskozita 0,364.10⁻⁶ m²/s.Voda teplota 70 °C, hustota 977,7 kg/m³, kinematická viskozita 0,415.10⁻⁶ m²/s.**A1 + A2:**

DN80 (vnitřní průměr 0,0818m, ≈ 80 °C)	}	délka potrubí (rozteč tep.+stud.) 90 m, 6,4 m ³ /hod., 1 449,9 Pa
		délka potrubí (kotel ke stup.+stup.) 82 m, 12,8 m ³ /hod., 4 997,2 Pa

DN20 (vnitřní průměr 0,0228m)	}	panel(≈ 70 °C) 1050 mm, délka potrubí 1372 m, 0,621m/s, 362 450,4 Pa
		panel(≈ 80 °C) 1200 mm, délka potrubí 1568 m, 0,543 m/s, 314 806,2 Pa

Celkem ztráty třením v trubkách okruhu A1 + A2 683703,7 Pa**B1 + B2:**

DN80 (vnitřní průměr 0,0818m, ≈ 80 °C)	}	délka potrubí (rozteč tep.+stud.) 34 m, 2,0 m ³ /hod., 66,8 Pa
		délka potrubí (kotel ke stup.+stup.) 82 m, 4,0 m ³ /hod., 532,5 Pa

DN20 (vnitřní průměr 0,0228m, ≈ 80 °C)	{	panel 300 mm, délka potrubí 784 m, 0,665m/s, 232 668,4 Pa
--	---	---

Celkem ztráty třením v trubkách okruhu B1 + B2 233 267,7 Pa**Tlaková ztráta vlivem místních odporů Z:****Okruh A1 + A2**

Výsledný součinitel místních odporů pro DN80 (ventily, šoupátka, redukce, kotel atd.)

$$\xi = \sum_{(i)} \xi_i = 6 .$$

Trubkami DN80 prochází objemový tok odpovídající součtu průtoků oběma panely A1+A2 :

$$2 \times 1,7729 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 3,5458 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = S.v$$

$$v = \frac{3,5458 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0,0409)^2} = 0,6747 \text{ m/s}$$

Internetová kalkulačka na portálu TZB (971,8 kg/m³, $\xi = 6$, $v = 0,6747 \text{ m/s}$): **Z = 1 327 Pa**

$$\text{Trubkami DN20} \left\{ \begin{array}{l} \text{užší pás (977,7 kg/m}^3\text{), } \xi=2,5, \text{ 0,621 m/s, } Z = 471 \text{ Pa} \\ \text{širší pás (971,8 kg/m}^3\text{), } \xi=2,5, \text{ 0,543 m/s, } Z = 358 \text{ Pa} \end{array} \right\}$$

Celkové Z pro okruh A1 + A2 **Z = 2 156 Pa**

Okruh B1 + B2

Trubkami DN80 prochází objemový tok odpovídající součtu průtoků oběma panely B1+B2 :

$$v = \frac{1,0868 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0,0409)^2} = 0,2068 \text{ m/s}$$

Internetová kalkulačka na portálu TZB (971,8 kg/m³, $\xi = 6$, $v = 0,2068 \text{ m/s}$): $Z = 125 \text{ Pa}$

Trubkami DN20 (971,8 kg/m³, $\xi = 5$, $v = 0,665 \text{ m/s}$): $Z = 1074 \text{ Pa}$

Celkové Z pro okruh B1 + B2 **Z = 1 199 Pa**

Shrnutí celkových ztrátových tlaků a objemových průtoků v okruzích:

$$\text{A1 + A2} \left\{ \begin{array}{l} 683\,703,7 \text{ Pa} + 2\,156 \text{ Pa} = 685\,859,7 \text{ Pa} \sim \mathbf{686 \text{ kPa}} \\ \mathbf{12,8 \text{ m}^3 / \text{hod.}} \end{array} \right\}$$

$$\text{B1 + B2} \left\{ \begin{array}{l} 233\,267,7 \text{ Pa} + 1\,199 \text{ Pa} = 234\,466,7 \text{ Pa} \sim \mathbf{235 \text{ kPa}} \\ \mathbf{4,0 \text{ m}^3 / \text{hod.}} \end{array} \right\}$$

13. Výběr čerpadel pro okruhy A1 + A2 a B1 + B2:

Vybíráme např. z výrobků firmy Grundfos (typ čerpadel "CR") pomocí výsledných hodnot *ztrátových tlaků a objemových průtoků*. Firma Grundfos má na svém internetovém portálu konfigurátor, který usnadní výběr vhodného oběhového čerpadla:

<https://product-selection.grundfos.com/catalogue.product%20families.q%26h%20cr.html?custid=GMA1&familycode=CRFAM&flow=0&head=0&lang=ENU&qcid=444467637&time=1539764628760>

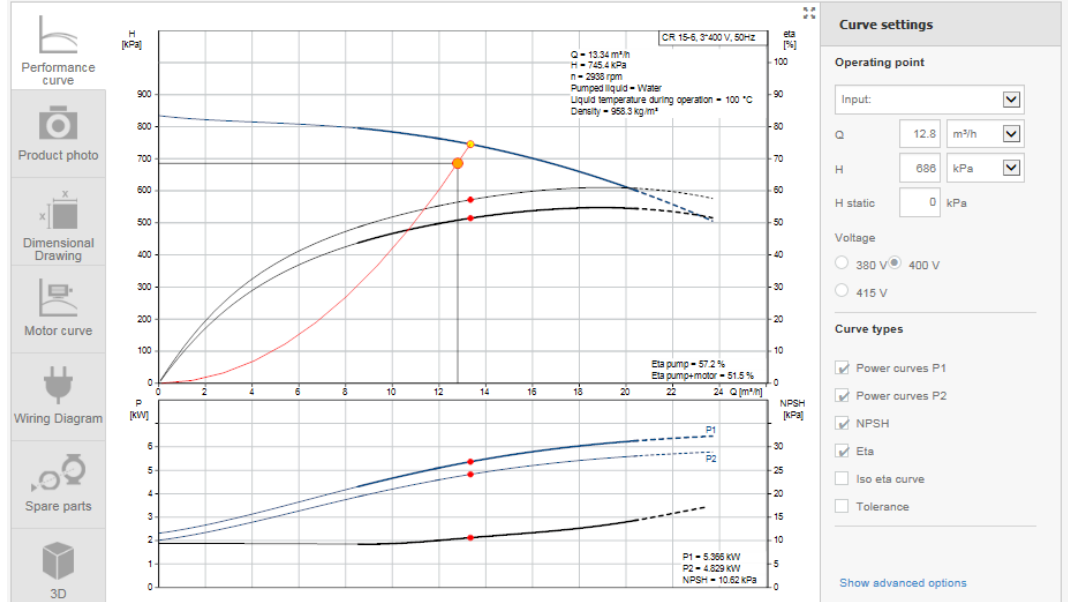
Snažíme se nalézt čerpadlo, jehož pracovní bod bude co nejbližší středu charakteristické křivky a pracovní bod našeho systému bude ležet pod pracovním bodem čerpadla s rezervou nejméně 3% nebo i více, aby byl k dispozici záložní výkon čerpadla.

Např. **pro okruh A1 + A2** by bylo možno použít následující čerpadlo:

[CR 15-6 K-F-A-E-HQQE](#)

CR 15-6 K-F-A-E-HQQE - 96579678

[ADD TO SHOPPING CART](#) [EXPORT TO](#) [ADD TO COMPARISON](#) [PRINT / PDF](#)



Curve settings

Operating point

Input:

Q: m³/h

H: kPa

H static: kPa

Voltage

380 V 400 V 415 V

Curve types

Power curves P1

Power curves P2

NPSH

Eta

Iso eta curve

Tolerance

[Show advanced options](#)

Specifications [Quotation Text](#) [Videos \(1\)](#) [Documents \(63\)](#) [CAD drawings](#) [System parts](#) [Sizing result](#)

Specifications

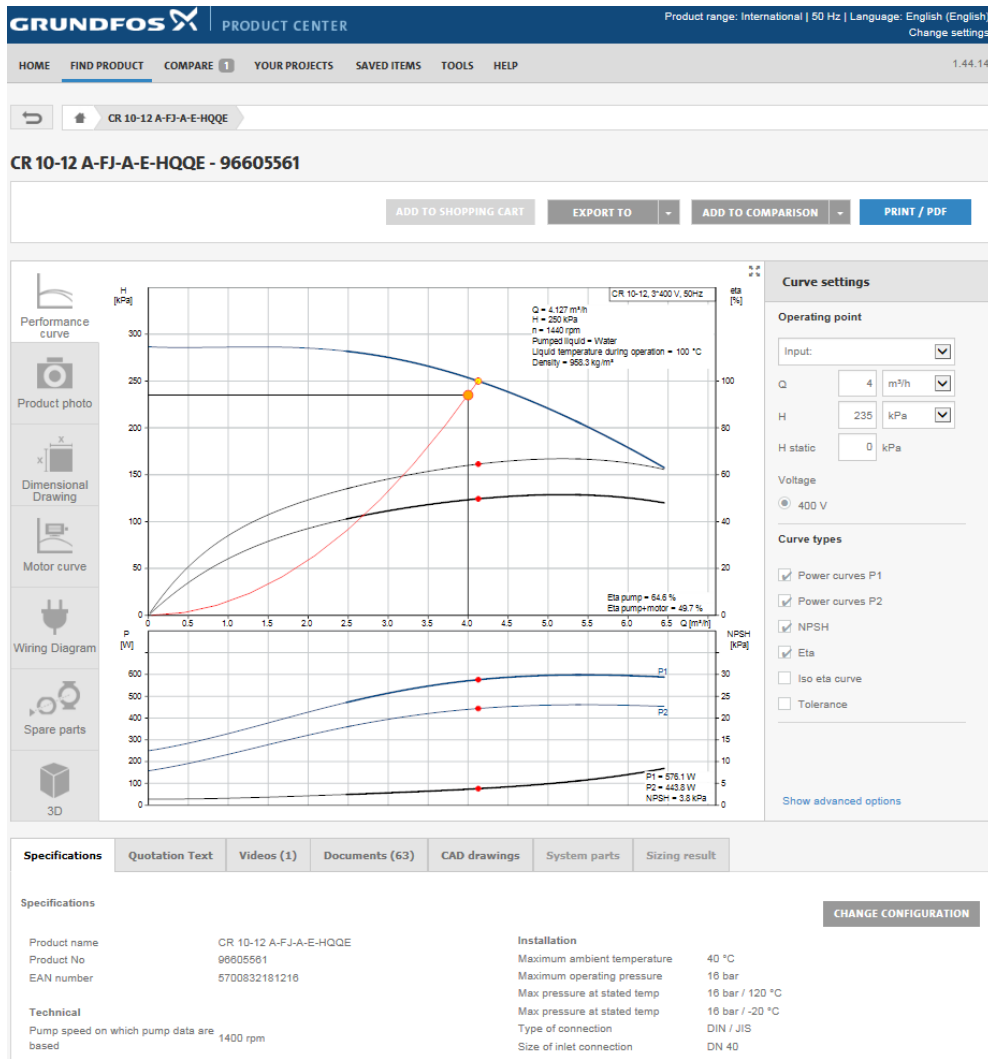
Product name: CR 15-6 K-F-A-E-HQQE
 Product No: 96579678
 EAN number: 5700831339304

Technical
 Pump speed on which pump data are based: 2919 rpm

Installation
 Maximum ambient temperature: 60 °C
 Maximum operating pressure: 16 bar
 Max pressure at stated temp: 16 bar / 120 °C
 Max pressure at stated temp: 16 bar / -20 °C
 Type of connection: DIN
 Size of inlet connection: DN 50

[CHANGE CONFIGURATION](#)

Pro okruh B1 + B2 následující čerpadlo:



14. Ověření hygienického hlediska (kritické osálení podlahy):

Intenzita osálení (I) podlahy musí být maximálně 200 W/m^2 .

Ověření:

Plocha podlahy $100 \times 60 = 6000 \text{ m}^2$,

Celkový výkon všech panelů dohromady $P = 88\,592 + 291\,256 = 379\,848 \text{ W}$.

Sálavá účinnost $\eta = 0,71$ pro teplotu vody do 80 °C dle kapitoly 5.2.1 bodu 11.

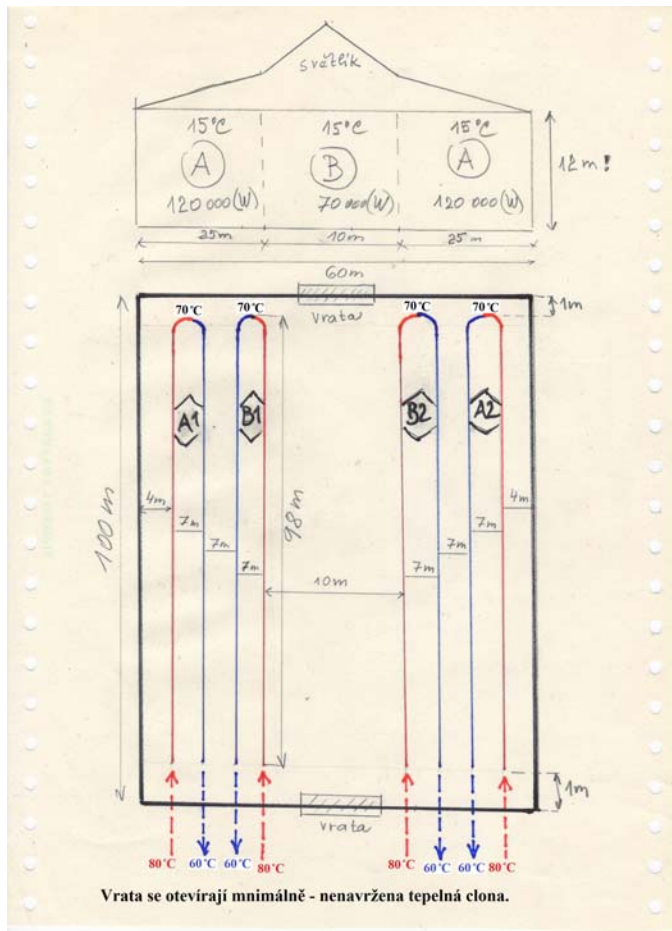
Intenzita osálení podlahy:

$$I = \frac{379848 \cdot 0,71}{6000} = 44,95 \text{ W/m}^2 < 200 \text{ W/m}^2 \dots\dots\dots \text{vyhovuje}$$

Toto kritérium ošetřuje případy, kdy by docházelo k přílišnému tepelnému sálení do oblasti hlavy lidí běžného věku, kteří se nacházejí (pracují) pod sálavými panely ("Horká hlava, studené nohy").

15. Statické ověření stropu - samostatný úkol (návod viz poslední krok v kap. 5.1.3).

5.2.3 Druhá ukázková projekce TEPLOVODNÍCH sálavých panelů (80/60 °C) do velké haly



Průmyslová hala (viz vedlejší obrázek) sestává ze 3 zón A, B, C. Rozměry haly jsou 60m x 100m x 12m. Je předpokládána venkovní zimní teplota $t_e = -16\text{ °C}$, $t_{ga} = t_{gb} = t_{gc} = 15\text{ °C}$ jsou požadované vnitřní pocitové teploty v zónách A, B, C. Do této haly projektujte teplovodní pásové sálavé panely firmy Kotrbatý s.r.o. s **výškou zavěšení $h = 9$ metrů nad podlahou** (tj. 3 metry pod stropem).

1. Určení **teplotního spádu**:

K dispozici bude horká voda z místní kotelny 80 °C , teplotu zpátečky předepíšeme v hodnotě 60 °C (vyšší teplota zpátečky zaručí posílení sálavé složky oproti konvekční). Budeme tedy v projektu pracovat s teplotním spádem **$80\text{ °C} / 60\text{ °C}$** (viz vedlejší obrázek).

2. **Pocitová teplota** ve všech zónách haly je požadována v hodnotě **15 °C** .

3. **Rozmístění panelů** v hale:

Kritické hodnoty vzdálenosti středů panelů mezi sebou $l \leq h = 9\text{ m}$ volíme raději menší kvůli většímu tepelnému komfortu, tj. **7m**; pouze zóna B bude mít rozteč panelů větší, a to rovných **10m** (tím mírně překračujeme limit pro rozmístění), avšak na druhé straně tímto opatřením nebude zastíněno denní světlo přicházející ze světlíku. Vzdálenost středů panelů od stěn by sice mohla být $l \leq h / 2 = 4,5\text{ m}$, ale volíme raději menší vzdálenost, abychom lépe eliminovali chlad venkovních stěn - volíme **4m**. Situace rozmístění panelů je znázorněna na horním obrázku. Výsledkem jsou dva panely B1 a B2 pro zónu B a jeden panel pro zónu A - máme ale dvě zóny A, tudíž i dva panely A1 a A2.

4. **Ztráty v jednotlivých zónách:**

$Q_{zóna} = (\text{prostup} + \text{infiltrace} + \text{větrání}) \cdot f_1 \cdot f_2$ kde f_1 je **oprava na výšku zavěšení** panelů, f_2 je **oprava na jejich snížené zavěšení** (viz kapitola 5.2.1).

Základní ztráta: **(Prostup+ infiltrace+ větrání) v zóně A činí 120 000W, v zóně B 70 000W.**

Ztráty v zóně B:

Do zóny B přispívají oba panely B1 a B2 stejným dílem. *Panely jsou zavěšeny 3m pod stropem, tj. $h = 9\text{ m}$, $H = 12\text{ m}$, $\frac{h}{H-1} = 0,818$, $\frac{L}{B} = \frac{100\text{m (délka haly)}}{60\text{m (šířka haly)}} = 1,67$.* Korekce na

výšku zavěšení panelů h (viz první tabulka v kap.5.2.1) $f_1 = 1,10$. Korekce na snížení závěsu $\frac{h}{H-1} = 0,818$ (viz druhá tabulka v kapitole 5.2.1) a interpolace v ní mezi tabulkovými

hodnotami 0,85 a 0,80 $\Rightarrow f_2 = 0,874 + \frac{0,904 - 0,874}{0,85 - 0,8} (0,818 - 0,8) = 0,8848$.

Základní ztráta (prostup+infiltrace+větrání) v zóně B byla vypočítána projektantem a činí 65 255 W. Na pokrytí této základní ztráty potřebujeme výkon panelů alespoň v hodnotě $P = 70\,000 \cdot f_1 \cdot f_2 = 68\,130\text{ W}$, takže každý ze dvou panelů B1 a B2 by měl dodávat **34065 W**.

Ztráty v zóně A:

Panely budou zavěšeny rovněž 3m pod stropem, takže můžeme opakovat výpočet jako v zóně B, tj. $h = 9\text{ m}$, $H = 12\text{ m}$, $\frac{h}{H-1} = 0,818$, $\frac{L}{B} = \frac{100\text{m (délka haly)}}{60\text{m (šířka haly)}} = 1,67$. Korekce na výšku

zavěšení panelů h (viz první tabulka v kap. 5.2.1) $f_1 = 1,10$. Korekce na snížení závěsu $\frac{h}{H-1} = 0,818$ (viz druhá tabulka v kap. 5.2.1) a interpolace v ní mezi tabulkovými hodnotami

0,85 a 0,80 $\Rightarrow f_2 = 0,874 + \frac{0,904 - 0,874}{0,85 - 0,8} (0,818 - 0,8) = 0,8848$. Základní ztráta

(prostup+infiltrace+větrání) v zóně B byla vypočítána projektantem a činí 120 000 W. Na pokrytí této základní ztráty potřebujeme výkon panelů alespoň v hodnotě $P = 120\,000 \cdot f_1 \cdot f_2 = 116\,794\text{ W}$, takže každý panel A1 a A2 ve dvou zónách A by měl mít výkon **116 794 W** (obě zóny A dohromady budou tedy vyžadovat **233 588 W**).

5. Určení šířek a typů panelů pro zónu B:

$w = \frac{34\,065\text{ (W)}}{196\text{ (m)}} = 173,8\text{ W/m}$, $\bar{T} = \frac{80 + 60}{2} = 70\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\Theta = 70 - 15 = 55\text{ }^\circ\text{C}$. Z firemních

výrobků vybereme panel, jehož výkon $w_{skutečný}$ (W/m) při teplotním rozdílu $\Delta\Theta = 55\text{ }^\circ\text{C}$ dosahuje nejbližší vyšší hodnoty k hodnotě vypočítané (173,8 W/m). Tento požadavek splňuje panel of šířce **300mm** (viz další tabulka v kapitole 5.2.1), a proto je vhodným pro osazení do pozic panelů B1 a B2. Tento typ panelu má výkon **185 W/m** a obsahuje **2 trubky DN 20**.

6. Skutečný výkon panelů B1 a B2 v zóně B:

Panely B1 a B2 jsou totožné, výpočet výkonu bude dvojnásobkem výkonu jednoho z nich, tj.

$$P = 2 \cdot 196\text{ (m)} \cdot 185\text{ (W/m)} = 72\,520\text{ W}. \text{ Výkon jednoho panelu B je } 36\,260\text{ W}.$$

Kontrola výkonu: $\frac{72\,520 - 68\,130}{68\,130} \cdot 100\% = 6,44\% < 10\%$ přebytek do 10% **vyhovuje**.

7. Určení hmotnostního průtoku, objemového průtoku a rychlosti proudění v panelech B:

Průměrná teplota vody v otopném systému je $\bar{T} = \frac{80+60}{2} = 70^\circ\text{C}$. Pro vodu této teploty zjistíme z tabulek na konci této brožury nebo v internetové tabulce - její adresa viz kap. 5.2.1 jednak hustotu $\rho = 977,7 \text{ kg/m}^3$ a také tepelnou kapacitu $c = 4187 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Rozdíl teplot na vstupu a výstupu otopného systému je $\Delta\tau = 80 - 60 = 20^\circ\text{C}$.

Hmotnostní průtok jedním panelem B: $\dot{M} = \frac{P}{c \cdot \Delta\tau} = \frac{36260}{4187 \cdot 20} = \mathbf{0,433 \text{ kg/s}}$ (dvěma trubkami!) Hmotnostní průtok jednou trubkou: $0,433 / 2 = 0,2165 \text{ kg/s}$.

Objemový průtok panelem B: $\dot{V} = \frac{\dot{M}}{\rho} = \frac{0,433}{977,7} = \mathbf{0,44288 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}} = \mathbf{1,594 \text{ m}^3/\text{h}} \sim \mathbf{1,60 \text{ m}^3/\text{h}}$.
Objemový průtok jednou trubkou: $1,594 / 2 = 0,797 \text{ m}^3/\text{h} = 0,2214 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Rychlost proudění v metrech za sekundu jednou trubkou:

$S \cdot v = \dot{V} \Rightarrow v = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot r^2} = \frac{0,2214 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0,0114)^2} = \mathbf{0,542 \text{ m/s}}$ rychlost proudu jednou trubkou

DN 20 (poloměr trubky DN 20 viz tabulka trubek na konci této brožury nebo v internetové tabulce - její adresa viz kap. 5.2.1).

Kritérium vhodnosti dosažené rychlost proudu: $0,542 \text{ m/s} > 0,150 \text{ m/s}$ **vyhovuje** (k zavzdušnění vodorovných panelů B nebude docházet nebo jen minimálně).

8. Určení šířek a typů panelů pro zónu A:

Ztráty v zóně A byly již stanoveny v bodě 4 a požadovaný výkon k jejich pokrytí vyšel v hodnotě **116794 W** na jeden panel. Určení šířky a typu panelu vhodného pro zónu A bude probíhat podobně jako tomu bylo v zóně B.

$w = \frac{116794 \text{ (W)}}{196 \text{ (m)}} = \mathbf{595,89 \text{ W/m}}$, $\bar{T} = \frac{80+60}{2} = 70^\circ\text{C}$, $\Delta\Theta = 70 - 15 = \mathbf{55^\circ\text{C}}$. Z tabulky

uvedené v kapitole 5.2.1 vybereme panel, jehož výkon $w_{\text{skutečný}}$ (W/m) při teplotním rozdílu $\Delta\Theta = 55^\circ\text{C}$ dosahuje nejbližší vyšší hodnotu k hodnotě požadované výpočtem (595,89 W/m). Tento požadavek splňuje panel šířky **1200mm** (viz tabulka v kap. 5.2.1), a proto je vhodným pro osazení do pozic panelů A1 a A2. Tento typ panelu má dle tabulky v kap. 5.2.1 skutečný výkon **646 W/m** a obsahuje **8 trubek DN 20**.

9. Skutečný výkon panelů A1 a A2 v zónách A:

Panely A1 a A2 jsou totožné, výpočet výkonu bude dvojnásobkem výkonu jednoho z nich, tj.

$$P = 2 \cdot 196 \text{ (m)} \cdot 646 \text{ (W/m)} = \mathbf{253232 \text{ W}}. \text{ Jeden panel A má výkon } \mathbf{126616 \text{ W}}.$$

Kontrola výkonu: $\frac{253232 - 233588}{233588} \cdot 100\% = \mathbf{8,4\%} < 10\%$ přebytek do 10% **vyhovuje**.

11. Určení hmotnostního průtoku, objemového průtoku a rychlosti proudění v panelech

A:

Průměrná teplota vody v otopném systému je $\bar{T} = \frac{80+60}{2} = 70^\circ\text{C}$. Pro vodu této teploty

zjistíme z tabulky na konci této brožury nebo v internetové tabulce, jejíž adresa je uvedena v kap. 5.2.1 následující hodnoty: hustota $\rho = 977,7 \text{ kg/m}^3$ a tepelná kapacita $c = 4187 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Rozdíl teplot na vstupu a výstupu otopných panelů je $\Delta\tau = 80 - 60 = 20^\circ\text{C}$.

Hmotnostní průtok jedním panelem A: $\dot{M} = \frac{P}{c \cdot \Delta\tau} = \frac{126616}{4187 \cdot 20} = \mathbf{1,512 \text{ kg/s}}$ (osmi trubkami!)

Hmotnostní průtok jednou trubkou: $1,512 / 8 = 0,189 \text{ kg/s}$.

Objemový průtok panelem A: $\dot{V} = \frac{\dot{M}}{\rho} = \frac{1,512}{977,7} = 1,546 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 5,566 \text{ m}^3/\text{h} \sim \mathbf{5,60 \text{ m}^3/\text{h}}$.

Objemový průtok jednou trubkou: $5,566 / 8 = 0,696 \text{ m}^3/\text{h} = 0,1933 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Rychlost proudění v metrech za sekundu jednou trubkou:

$S \cdot v = \dot{V} \Rightarrow v = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot r^2} = \frac{0,1933 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0,0114)^2} = \mathbf{0,473 \text{ m/s}}$ rychlost proudu **jednou trubkou**.

DN 20 (poloměr trubky DN 20 viz tabulka trubek na portálu TZB).

Kritérium vhodnosti dosažené rychlost proudu: $0,473 \text{ m/s} > 0,150 \text{ m/s}$ **vyhovuje** (k zavzdušnění vodorovných panelů A nebude docházet nebo jen minimálně).

Shrnutí průtoků:

(B1 + B2) $3,2 \text{ m}^3/\text{hod}$.
(A1 + A2) $11,2 \text{ m}^3/\text{hod}$.

12. Určení ztrátového tlaku Δp :

$$\Delta p = R \cdot l + Z = \left[\sum_{(i)} k_i \frac{\rho v_i^2}{2} \cdot \frac{l_i}{d_i} \right] + \sum_{(i)} \xi_i \frac{\rho v_i^2}{2}$$

(Lze použít *internetovou kalkulačku na internetové adrese uvedené v kap. 5.2.1 nebo na konci této brožury. Internetová kalkulačka je rychlejší a pohodlnější alternativa ve srovnání s numerickým výpočtem na kalkulačce dle návodů v kapitole 5.2.1 v bodě č. 8 - to je ale pracnější a časově náročnější varianta. Tabulky jsou k dispozici na konci brožury*).

R je tlaková ztráta třením proudící vody o stěny trubek (Pa/m)

l resp. l_i je délka trubek určitého úseku otopného systému (m)

Z je tlaková ztráta vlivem místních odporů (Pa)

k_i součinitel tření [-]

ρ hustota vody při dané teplotě (kg/m^3)

v_i rychlosti vody v různých místech i otopného systému (m/s)

d_i průměr trubek (m)

ξ_i součinitel místních odporů [-]

Popis rozvodů:

A1 + A2 mají společný přívod, společný odvod a jedno společné čerpadlo.

B1 + B2 mají společný přívod, společný odvod a jedno společné čerpadlo.

Okruhy (A1+A2) a (B1+B2) jsou vzájemně nezávislé, mají vzájemně nezávislé řízení, svůj vlastní termostat a svá oběhová čerpadla.

Přívody a odvody těchto dvou otopných okruhů jsou konstruovány z trubek větších průměrů **DN80**.

Délky úseků:

Kotel - ke stupačkám k panelům 2 x 30 m = 60 m

Stupačka 2 x 9 m = 18 m

Rozteč teplé a studené pro panely:

A1 + A2 52 m + 38 m = 90 m

B1 + B2 10 m + 24 m = 34 m

Panely B1 + B2, DN20, 2 panely každý má 2 trubky.....2 x 196 x 2 = 784 m (0,542 m/s)

Panely A1 + A2, DN20, 2 panely každý má 8 trubek 2 x 196 x 8 = 3 136 m (0,473 m/s)

Tlaková ztráta třením R:

Voda teplota 80 °C, hustota 971,8 kg/m³, kinematická viskozita 0,364 · 10⁻⁶ m²/s.

Voda teplota 70 °C, hustota 977,7 kg/m³, kinematická viskozita 0,415 · 10⁻⁶ m²/s.

Okruh A1 + A2:

DN80 (vnitřní průměr 0,0818m, 70 °C) { délka potrubí (rozteč tep.+stud.) 90 m, 5,6 m³/hod., 1167,3 Pa }
{ délka potrubí (kotel ke stup.+stup.) 78 m, 11,2 m³/hod., 3669 Pa }

DN20 (vnitřní průměr 0,0228m) { panel(70 °C) 1200 mm, délka potrubí 3136 m, 0,473 m/s, 491 778,7 Pa }

Celkem ztráty třením v trubkách okruhu A1 + A2 496 615 Pa

B1 + B2:

DN80 (vnitřní průměr 0,0818m, 70 °C) { délka potrubí (rozteč tep.+stud.) 34 m, 1,6 m³/hod., 38,6 Pa }
{ délka potrubí (kotel ke stup.+stup.) 78 m, 3,2 m³/hod., 350,4 Pa }

DN20 (vnitřní průměr 0,0228m) { panel(70 °C) 300 mm, délka potrubí 784 m, 0,542m/s, 159485,6 Pa }

Celkem ztráty třením v trubkách okruhu B1 + B2 159 874,6 Pa

Tlaková ztráta vlivem místních odporů Z:

Okruh A1 + A2

Výsledný součinitel místních odporů pro DN80 (ventily, šoupátka, redukce, kotel atd.)

$$\xi = \sum_{(i)} \xi_i = 6 .$$

Trubkami DN80

prochází součet průtoků oběma panely A1+A2 : $\sim 11,2 \text{ m}^3/\text{h}$, $\sim 3,10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = S.v$

$$v = \frac{3,10 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0,0409)^2} = 0,590 \text{ m/s}$$

Internetová kalkulačka na portálu TZB ($70 \text{ }^\circ\text{C}$, $977,7 \text{ kg/m}^3$, $\xi = 6$, $v = 0,590 \text{ m/s}$): $Z =$

1021 Pa

Trubkami

DN20.....

{ 70°C , $977,7 \text{ kg/m}^3$, $\xi=5$, $0,473 \text{ m/s}$, $Z = 547 \text{ Pa}$ }

Celkové Z pro okruh A1 + A2 **Z =**

1568 Pa

Okruh B1 + B2

Trubkami DN80:

prochází součet průtoků oběma panely B1+B2 : $\sim 3,2 \text{ m}^3/\text{h}$, $\sim 0,886 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = S.v$

$$v = \frac{0,886 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot (0,0409)^2} = 0,1686 \text{ m/s}$$

Internetová kalkulačka na portálu TZB ($70 \text{ }^\circ\text{C}$, $977,7 \text{ kg/m}^3$, $\xi = 6$, $v = 0,1686 \text{ m/s}$): **Z = 83**

Pa

Trubkami DN20 ($70 \text{ }^\circ\text{C}$, $977,7 \text{ kg/m}^3$, $\xi = 5$, $v = 0,542 \text{ m/s}$): $Z = 718$

Pa

Celkové Z pro okruh B1 + B2 **Z = 801**

Pa

Shrnutí celkových ztrátových tlaků a objemových průtoků v okruzích:

$$\text{A1 + A2} \left\{ \begin{array}{l} 496\,615 \text{ Pa} + 1568 \text{ Pa} = 498\,183 \text{ Pa} \sim \mathbf{499 \text{ kPa}} \\ \mathbf{11,2 \text{ m}^3 / \text{hod.}} \end{array} \right\}$$

$$\text{B1 + B2} \left\{ \begin{array}{l} 159\,874,6 \text{ Pa} + 801 \text{ Pa} = 160\,675,6 \text{ Pa} \sim \mathbf{161 \text{ kPa}} \\ \mathbf{3,2 \text{ m}^3 / \text{hod.}} \end{array} \right\}$$

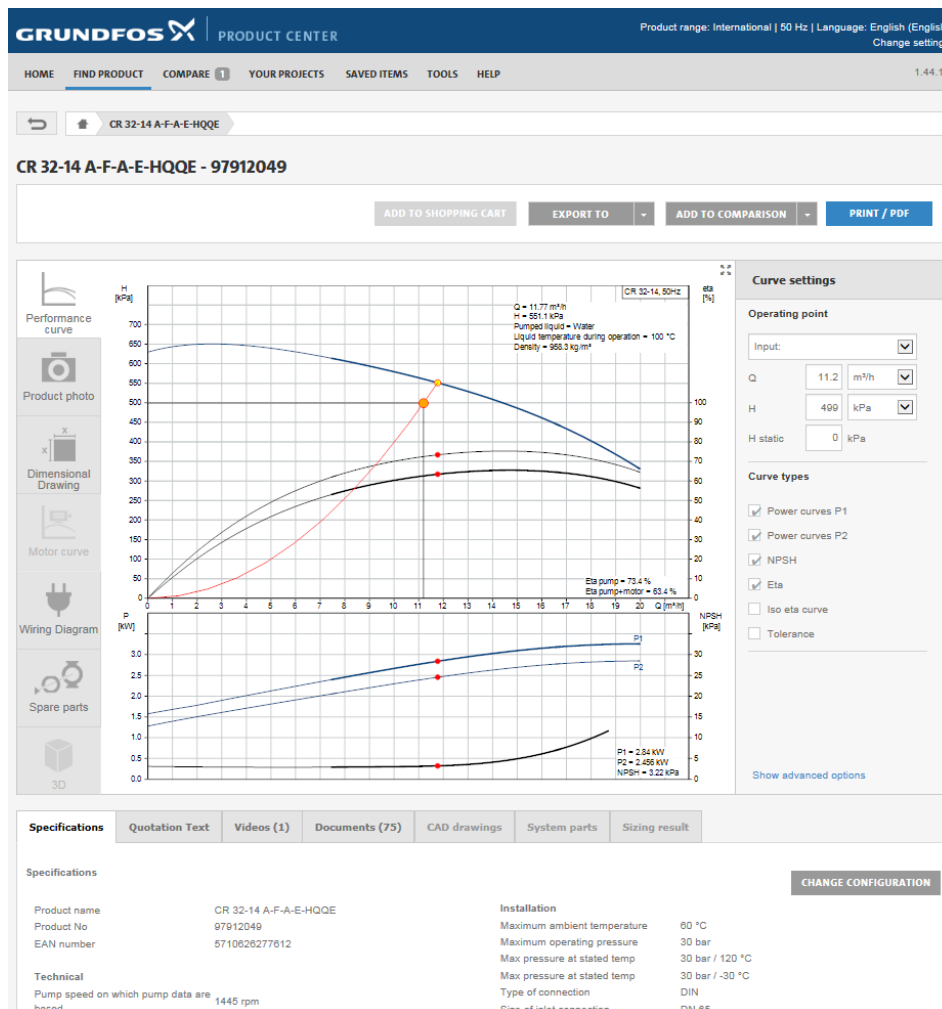
13. Výběr čerpadel pro okruhy A1 + A2 a B1 + B2:

Vybíráme např. z výrobků firmy Grundfos (typ čerpadel "CR") pomocí výsledných hodnot **ztrátových tlaků a objemových průtoků**. Firma Grundfos má na svém internetovém portálu konfigurátor, který usnadní výběr vhodného oběhového čerpadla:

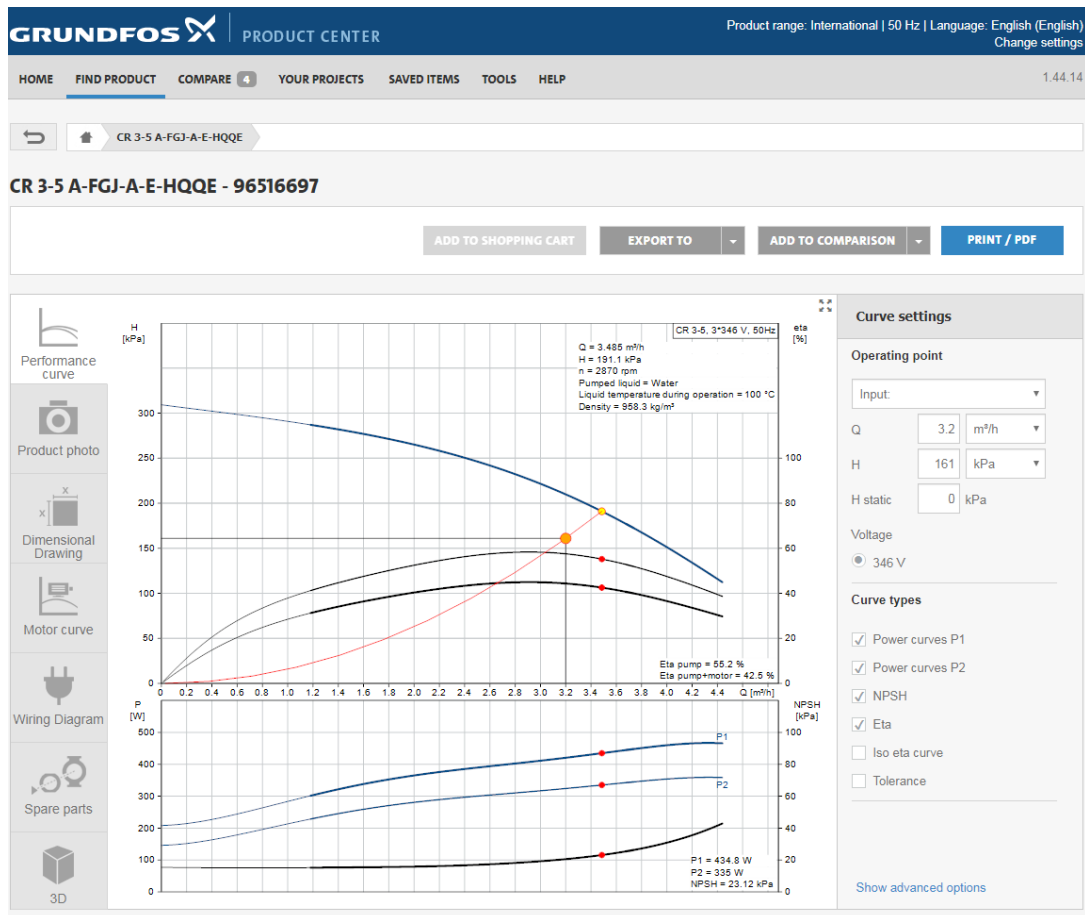
<https://product-selection.grundfos.com/catalogue/product%20families.q%26h%20cr.html?custid=GMA1&familycode=CRFAM&flow=0&head=0&lang=ENU&qcid=444467637&time=1539764628760>

Snažíme se nalézt čerpadlo, jehož pracovní bod bude co nejbližě středu charakteristické křivky čerpadla a pracovní bod našeho systému bude ležet pod pracovním bodem čerpadla s rezervou nejméně 3% nebo i více, aby byl k dispozici záložní výkon čerpadla.

Např. pro okruh A1 + A2 by bylo možno použít následující čerpadlo:



Pro okruh B1 + B2 následující čerpadlo:



14. Ověření **hygienického hlediska** (kritké osálení podlahy):

Intenzita osálení (I) podlahy musí být maximálně 200 W/m^2 .

Ověření:

Plocha podlahy $100 \times 60 = 6\,000 \text{ m}^2$,

Celkový výkon všech panelů dohromady $P = 72\,520 + 253\,232 = 325\,752 \text{ W}$.

Sálavá účinnost $\eta = 0,71$ pro teplotu vody do $80 \text{ }^\circ\text{C}$ - viz kapitola 5.2.1., bod 11.

Intenzita osálení podlahy:

$$I = \frac{325\,752 \cdot 0,71}{6000} = 38,5 \text{ W/m}^2 < 200 \text{ W/m}^2 \text{ vyhovuje}$$

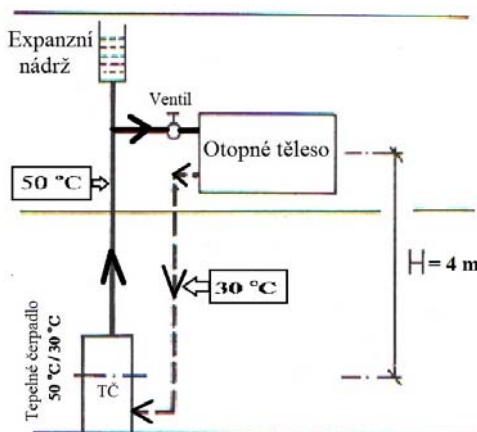
Toto kritérium ošetřuje případy, kdy by docházelo k přílišnému tepelnému sálení do oblasti hlavy lidí běžného věku, kteří se nacházejí (pracují) pod sálavými panely ("**Horká hlava, studené nohy**").

15. **Statické ověření stropu** - samostatný úkol (návod viz poslední krok v kap. 5.1.3).

5.2.4 Přírozená cirkulace u teplovodního vytápění

Především dva ukázkové projekty teplovodního sálavého vytápění využívaly nucené cirkulace vody. Cirkulace byla vyvolána oběhovým čerpadlem. **Teplovodní otopný systém je ale možno navrhnout bez oběhového čerpadla** tak, aby voda cirkulovala na základě přirozeného oběhu, vyvolaného Archimédovou vztlakovou silou. To je užitečné zejména u bytového vytápění podsklepených rodinných domků, kde délka rozvodů mezi kotelnou ve sklepním prostoru a otopnými tělesy v bytových prostorách není velká a tudíž tlakové ztráty v rozvodech jsou velmi malé. **Pak je možno dimenzovat průměr rozvodných trubek tak, aby Archimédova síla byla dostatečná pro překonání tlakových ztrát a tím i pro zabezpečení nutné cirkulace vody.**

Působení Archimédovy vztlakové síly v otopném systému je založeno na rozdílu hustot teplé ρ_t a studené vody ρ_s v otopném systému. Teplá voda má menší hustotu než studená voda ($\rho_t < \rho_s$) a tudíž sloupec studené vody vyvine větší hydrostatický tlak $p_s = H\rho_s g$ než stejně vysoký sloupec teplé vody $p_t = H\rho_t g$. **Rozdíl těchto hydrostatických tlaků $\Delta P = p_s - p_t = Hg(\rho_s - \rho_t)$ vytlačuje teplou vodu nahoru,** zatímco studená klesá dolů, a tak se udržuje cirkulace – viz náčrt:



Dle náčrtu: $\Delta P = p_s - p_t = Hg(\rho_s - \rho_t)$

$$\rho_s(30^\circ\text{C}) = 995,6 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_t(50^\circ\text{C}) = 988,0 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta P = Hg(\rho_s - \rho_t) = 4 \cdot 9,81 \cdot (995,6 - 988,0) = 298,2 \text{ Pa}$$

Aby cirkulace fungovala, musí být přirozený výtlač ΔP větší, nežli je celkový ztrátový tlak Δp v rozvodech, tj.

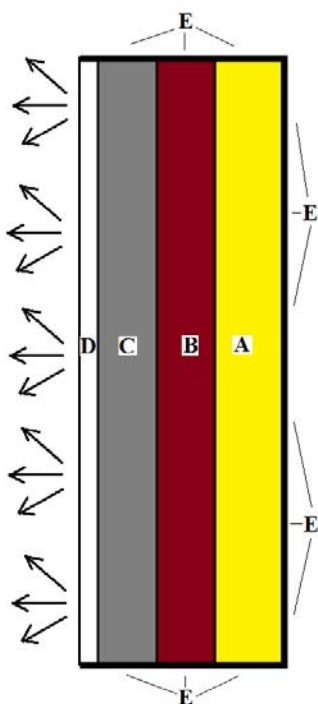
$$\Delta P > \Delta p$$

Celkový ztrátový tlak Δp , tj. ztráty třením a místními odpory, se počítá stejně, jako tomu bylo v kapitolách 5.2.2 a 5.2.3.

5.3 Elektrické sálavé panely do bytových prostor

Jak již bylo řečeno v kapitole 1.2, v České republice není v současné době **žádná stavební norma**, podle které by se projektanti mohli řídit při **projekci sálavých otopných systémů**. Je proto jediná možnost, a to vybrat výrobní firmu, od které budou zakoupeny otopné sálavé panely, a řídit se při projekci její **firemní dokumentací**. V České republice je předním výrobcem teplovodních sálavých panelů určených do menších prostor bytového nebo kancelářského charakteru **firma Ecosun/Fenix**. Budeme proto vycházet při projekci těchto systémů do malých prostor z jejich firemních dokumentů. Z těchto dokumentů bylo vše potřebné shrnuto a uloženo do této brožury, takže při přípravě na zkoušku není nutné vyhledávat firemní literaturu, ale stačí se omezit pouze na tento výukový text.

Stropní a nástěnné sálavé otopné panely firmy Ecosun/Fenix jsou v principu tvořeny **několika vrstvami materiálů**, jak ukazuje následující obrázek 21:



Obr. 21 El. sálavý panel.

E) **Karosáž** - ocelový pozinkovaný plech v barevné úpravě (vodou ředitelný Balakryl, bílá, hnědá, ostatní na objednávku).

A) **Izolační vrstva** - nehořlavá minerální vlna (čedičová vata) zabraňuje tepelným únikům za záda panelu.

B) **Topné prvky** - 3 možnosti podle el. výkonu P :

(i) $P \leq 600W \Rightarrow$ Grafitová topná folie (do $150^\circ C$).

(ii) $P = 700W \Rightarrow$ Výplet z izolovaného odporového vodiče (do $180^\circ C$).

(iii) $P > 700W \Rightarrow$ Hliníkové lamely se zalisovanou topnou tyčí. Povrch lamel má galvanickou úpravu SILICATING kvůli zvýšení emisivity (do $500^\circ C$).

C) **Dielektrická izolační vrstva** - elektrická izolace.

D) **Sálavé čelo panelu** - Několik možností:

(i) **Pokračování karosáže** = plech, jeho vnitřní povrch potažen Thermoquartzem (vede dobře teplo), venkovní povrch potažen Thermocrystalem (krystalky křemíku zvětšují povrch, zvýšená emisivita). Karosáž obsahuje fixační otvory pro upevnění panelu ke stavební konstrukci.

(ii) **Pokračování karosáže** = plech s venkovním nástřikem práškového plastu (dobře omyvatelný).

(iii) **Barevné nebo zrcadlové sklo** $8mm-10mm$ bez nanášených vrstev. Sklo připevněno ke karosáži rámečkem z eloxovaného hliníku.

(iv) **Mramorová deska nebo imitace přírodního kamene** - svislé upevnění, velká tepelná setrvačnost.

Rozdělení panelů podle elektrického výkonu P :

a) **Nízkovýkonové** $P \leq 700W$ obsahují grafitové topné folie nebo výplet z izolovaného odporového vodiče. Zavěšení $2,5 - 3,5 - 5$ metrů nad podlahou. Teplota do $150 - 170^\circ C$.

b) **Vysokovýkonové** $P > 700W$ obsahují 1 nebo 2 nebo 3 topné lamely dle výkonu. Zavěšení $5 - 6$ metrů nad podlahou. Teplota do $500^\circ C$.

Následující obrázky č. 22 a 23 ilustrují estetické možnosti sálavých panelů Ecosun/Fenix.



ECOSUN G
Image 6 of 9



ECOSUN G s potiskem
Image 8 of 9

Obr. 22 Stropní skleněné panely. **Obr. 23** Nástěnné skleněné panely s vnitřním potiskem (lze dodat vlastní foto).

Nebude na závadu zopakovat si **přednosti sálavého vytápění:**

- Z povrchu sálavého panelu je vyzařován tepelný tok, jehož převážná část spektra leží v pásmu vlnových délek větších než **5 mikrometrů**, a který je ve značné míře **povrchem lidského těla pohlcován**; dochází tedy k obdobnému principu ohřevu jako u předmětů.
- V případě ohřevu předmětů a osob sálavým tokem na 20-22°C, je možné zajistit tepelnou pohodu již **při teplotách vzduchu 18-19 °C** a dochází tak k **úspoře** energie minimálně o 18 - 24%.
- V určitých aplikacích lze sálavé topné panely využít k **cílenému ohřívání** přítomných osob – velké haly, dílny, prodejní sklady, nebo třeba lavice v církevních objektech (kostely) – a proti klasickému vytápění těchto prostor dosáhnout více než 50% úspory nákladů na vytápění – tzv. **zónové vytápění**.
- Je možné docílit podstatně **rovnoměrnějšího rozložení teplot ve svislém profilu** – rozdíl 1-2°C mezi podlahou a stropem (u konvekčního vytápění je udáván rozdíl 1°C na 30-50 cm výšky).
- V důsledku sníženého proudění - víření vzduchu v místnosti - je **omezeno i víření** prachových částic a tím je také sníženo nebezpečí případného vzniku různých onemocnění - astma, záněty sliznic apod.
- Díky zvýšené teplotě stěn je **zmenšena** možnost vzniku **povrchových kondenzací**, vzdušná vlhkost není výrazně snižována.
- Pro sálavý tok resp. pro záření o vlnových délkách **větších jak 3μm**, není sklo transparentní (průteplivé) a nedochází tak ke ztrátám sálavého toku skleněnými výplněmi oken.
- Sálavé topné panely ECOSUN **nevyžadují žádnou údržbu**.

Hlavní zásady regulace elektrických sálavých panelů:

Vytápěný prostor se dle velikosti a způsobu využívání může regulovat jako jeden celek nebo může být rozdělen do zón, ve kterých lze sálavé panely dle potřeby postupně zapínat. Nejběžnější je regulace topných panelů prostorovými termostaty (analogové, digitální, nebo bezdrátové), které měří teplotu a jsou nainstalovány přímo v místnosti s topnými panely. Regulaci je možné řešit i komplexně, s využitím centrální regulace.

Regulátory by měly být umístěny tak, aby pokud možno nebyly v sálavém poli topného panelu, neovlivňovalo je přímé sluneční záření, nebo jiný přímý zdroj tepla či chladu. Obvykle se umísťují na vnitřní stěnu do výšky cca 1,2 m nad podlahou.

Pro regulaci nízkoteplotních i vysokoteplotních panelů platí v zásadě stejná pravidla. Z hlediska elektroinstalace musí být topné obvody v rozvaděči samostatně jištěny a musí být zajištěno jejich dvoupólové vypínání. Použitý regulační prvek musí odpovídat bezpečnostnímu stupni krytí výrobku.

Umístění topných prvků:

Sálavé topné panely se **přednostně umísťují na stropní (případně do stropní) konstrukce** a to vždy tak, aby jejich výkon vyrovnával bilanci jednotlivých ploch – čím větší podlahová plocha, tím větší plocha sálavých panelů – **je výhodnější použít více panelů o menším výkonu a rovnoměrněji tak pokrýt vytápěný prostor**, než soustředit výkon do menšího počtu výkonnějších topných panelů. **Vzdálenost od vertikálních konstrukcí by neměla být menší než 0,6 - 1 m a je nutné dodržet minimální instalační výšku závislou na výkonu sálavého panelu.**

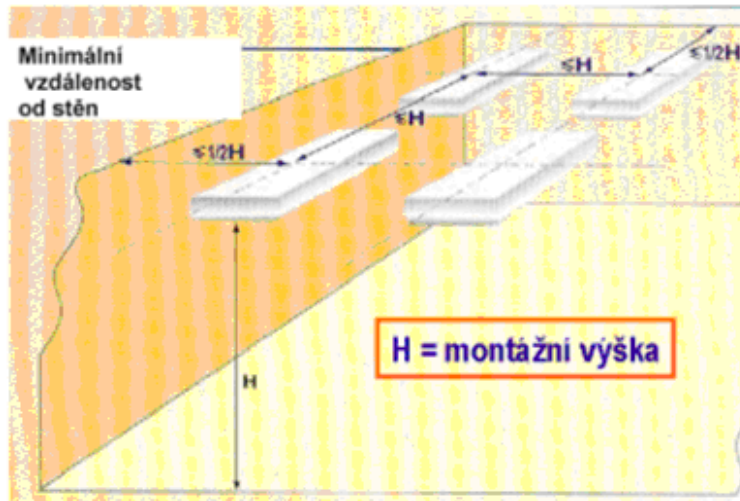
Topné panely lze umísťovat také pod náklonem (směřovat tok sálání), nebo do svislé polohy na obvodovou stěnu. **Ve svislé poloze se ale zvyšuje konvekční složka** – množství předané energie nebo účinnost panelu se nemění, pouze se procentuálně snižuje předávání tepla formou sálání ve prospěch konvekce. Zvýšení konvekční složky se příznivě projeví v dynamice náběhu, nevýhodou je však zvýšení rozdílu teploty vzduchu u podlahy a pod stropem. **Při instalaci do svislé polohy se nízkoteplotní sálavé panely umísťují podobně jako běžné radiátory, tj. spodní hrana cca 20 cm nad podlahou.**

Celkové shrnutí panelů Ecosun/Fenix a jejich vlastností naleznete také na tomto videu:

<https://www.youtube.com/watch?v=-2xOzYWvB5A>

5.3.1 Obecný postup projekce elektrických sálavých panelů do bytového prostoru

- 1) Výpočet ztrát Q (Watt) obytné místnosti.
- 2) Předběžná kontrola osálání podlahy o ploše S (**hygienický limit: $< 150 \text{ W/m}^2$**):
 $Q/S < 150 \text{ W/m}^2$
- 3) Korekce na zátap (vyšší výkon o 20%):
 $P = 1,2 \times Q$
- 4) Stanovení počtu panelů n při výšce zavěšení H (dovolené H - viz dokumentace k výrobku):
Rychlý odhad: $n = S/H^2$ (n zaokrouhlíme nahoru na **sudý počet panelů**). Rozhodující pro rozmístění a tudíž i počet panelů je stejné pravidlo, jako u teplovodních panelů v předešlých kapitolách 5.2.1 - 5.2.3. Rozmísťovací pravidlo připomíná následující obrázek:



- 5) Výkon jednoho panelu p :
 $p = P / n$ pokud je výkon jednoho panelu p tak velký, že v nabídce není, zvýšíme počet vybraných panelů o nižším výkonu tak, aby se pokryly ztráty a počet byl, pokud možno, opět sudý.
- 6) Rozmístění panelů a kótování:
 Pravidla pro rozmístění - středy panelů mají být maximálně $h/2$ od stěn (blíže mohou být), středy panelů mezi sebou mají být maximálně h (blíže mohou být). Snažíme se panely přiblížit ke chladným venkovním stěnám, abychom kompenzovali chlad. Pořídít nákres a okótovat rozmístění.
- 7) Závěrečná kontrola hygienické limity sálání na podlahu s vybranými panely o celkovém výkonu P : $P/S < 150 \text{ W/m}^2$
- 8) Závěrečná kontrola výšky zavěšení panelů:
 Výška zavěšení H musí vyhovovat doporučení výrobce pro vybraný typ panelů.

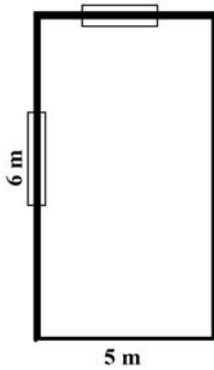
5.3.2 Ukázková projekce ELEKTRICKÝCH sálavých panelů do bytových prostor

Zadání:

Obytná místnost má rozměry $6\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$. Dvě stěny jsou venkovní ($U=1,3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), dvě vnitřní ($U=2,2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), podlaha a strop mají $U=2,0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Venkovní teplota je $-15 \text{ }^\circ\text{C}$, nad stropem a pod podlahou je $5 \text{ }^\circ\text{C}$ a za vnitřními stěnami je $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Venkovní stěny mají 2 okna o rozměrech $2,5\text{m} \times 1,5\text{m}$ ($U=1,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Požadujeme, aby pokojová teplota uvnitř místnosti byla $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Navrhnete vhodné stropní elektrické sálavé panely firmy ECOSUN pro tuto místnost, okótuje jejich rozmístění, určete výšku zavěšení a zkontrolujte hygienickou sálavou limitu. Na výběr máte z těchto panelových typů:

E 300 U	rozměry (mm): 592x592x30	5kg	300W	Instalační výška (m): 2,5-3
E 600 U	rozměry (mm): 1192x592x30	10,1kg	600W	Instalační výška (m): 2,7-3,8
E 700 U	rozměry (mm): 1192x592x30	10,5kg	700W	Instalační výška (m): 2,7-3,8



Řešení:

1) **Tepelné ztráty**

Okna.....	$2 \times (2,5 \times 1,5) \times 1,1 \times 35 = 288,75 \text{ W}$
Venkovní stěny....	$[(6+5) \times 3 - 2 \times (2,5 \times 1,5)] \times 1,3 \times 35 = 1\ 160,25 \text{ W}$
Vnitřní stěny	$(6+5) \times 3 \times 2,2 \times 0 = 0 \text{ W}$
Podlaha	$5 \times 6 \times 2,0 \times 15 = 900 \text{ W}$
Strop	$5 \times 6 \times 2,0 \times 15 = 900 \text{ W}$

Celkem	$Q = 3\ 249 \text{ W}$

2) **Předběžná kontrola sálavé limity** ($< 150 \text{ W/m}^2$)

$3\ 249 / (5 \times 6) = 108,3 < 150 \text{ W/m}^2$ předběžně vyhovuje

3) **Korekce na zátáp** (vyšší náběh, přidáváme 20%)

$P = 1,2 \times Q = 1,2 \times 3\ 249 = 3\ 898,8 \text{ W} \sim \underline{3\ 899 \text{ W}}$

4) **Stanovení počtu panelů**

$S = 5 \times 6 = 30 \text{ m}^2$, výška zavěšení $H = 2,8 \text{ m}$ (leží v rozmezí dané tabulkou)
 $n = S / H^2 = 30 / 2,8^2 \approx 3,8 \sim \underline{4 \text{ panely}}$ (snažíme se, pokud možno, o sudý počet)

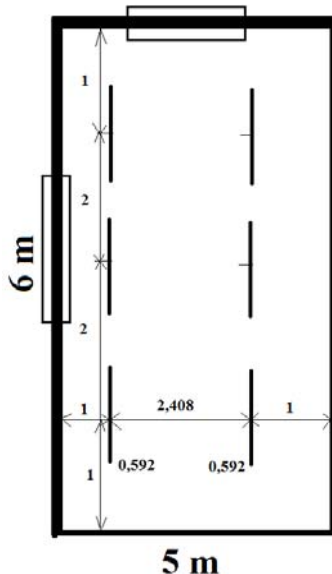
5) **Výkon jednoho panelu**

$p = P / n = 3\ 899 / 4 = 974,75 \text{ W}$ takový panel v nabídce není, a proto zvýšíme počet na **n = 6 (sudý počet)**.

$p = P / n = 3\ 899 / 6 = 649,83 \text{ W}$ výkonově nejbližší vyšší je panel **E 700 U (700W)**. Jeho rozměry v milimetrech jsou 1192x592x30.

6) **Rozmístění panelů a kótování**

Pravidla pro rozmístění - středy panelů od stěn mají být maximálně $H/2$ (blíže mohou být), středy panelů mezi sebou mají být maximálně H (blíže mohou být). Pokud možno, snažíme se přiblížit panely ke chladným venkovním stěnám, abychom kompenzovali chlad. Jedno z možných rozmístění je na následujícím obrázku.



7) **Závěrečná kontrola limity pro hygienické osálení podlahy:**

$6 \times 700 / 30 = 140 \text{ W/m}^2 < 150 \text{ W/m}^2$ vyhovuje

8) **Kontrola výšky zavěšení panelů**

Výška zavěšení $H = 2,8 \text{ m}$ vyhovuje výškovému rozmezí danému pro typ panelu E 700 U (viz tabulka v zadání).

Závěr: V místnosti bude 6 stropních panelů zavěšených 20cm pod nehořlavým stropem. Rozmístění ukazují kóty na vedlejším nákresu. Intenzita sálání na podlahu splňuje hygienickou podmínku pro elektrické sálavé panely ($< 150 \text{ W/m}^2$). Udržování pokojové teploty bude kontrolovat termostat.

Otázky ke kapitolám: 5.1.3, 5.1.4, 5.1.5, 5.2, 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3, 5.3, 5.3.1 a 5.3.2 .

5.12 Spodní prostor pobytu lidí je prostor nad podlahou do výšky

- a) 1,2 m
- b) 1,5 m
- c) 2,0m
- d) 2,5m

5.13 Horní neutrální prostor je prostorem od

- a) 2,5m výšky nad podlahou po střešní plášť
- b) 2,0m výšky nad podlahou po střešní plášť
- c) 1,5m výšky nad podlahou po střešní plášť
- d) 1,2m výšky nad podlahou po střešní plášť

5.14 Základní tepelná ztráta zóny se při použití plynových zářičů koriguje těmito opravami:

- a) f_1 na výšku zavěšení, f_2 na sníženou výšku zavěšení, f_3 na sklon zářiče
- b) f_1 na výšku zavěšení, f_2 na zátop, f_3 dle typu zářiče
- c) f_1 na výšku zavěšení, f_2 na zátop, f_3 dle typu zářiče, f_4 dle osazení
- d) f_1 na výšku zavěšení, f_2 na zátop, f_3 dle typu zářiče, f_4 dle sklonu

5.15 Pravidla pro rozmístění plynových zářičů jsou založena na:

- a) výšce zavěšení h zářičů - vzdálenost L jejich středů musí být $L \leq h$
- b) výšce zavěšení h zářičů - vzdálenost L jejich středů musí být $L \leq h$ a od stěn $L \leq h / 2$
- c) na výšce zavěšení h zářičů a na úhlu jejich jádrového sálání
- d) na výšce zavěšení h zářičů a na úhlech jejich jádrového sálání v obou směrech

5.16 U plynových zářičů je hygienický limit pro osálení podlahy

- a) 100 W/m²
- b) 150 W/m²
- c) 200 W/m²
- d) 250 W/m²

5.17 Při projektování plynových zářičů do průmyslové haly se zohledňují tyto teploty:

- a) teplota vzduchu uvnitř a výsledná pocitová teplota uvnitř
- b) teplota vzduchu uvnitř a venku
- c) teplota stěn a teplota zářičů
- d) teplota stěn a vnitřní teplota vzduchu

5.18 Základní tepelná ztráta zóny se při použití teplovodních panelů koriguje těmito opravami:

- a) f_1 na výšce zavěšení, f_2 na sníženou výšce zavěšení, f_3 na sklon panelu
- b) f_1 na výšce zavěšení, f_2 na zátop, f_3 dle typu panelu
- c) f_1 na výšce zavěšení, f_2 na zátop, f_3 dle typu panelu, f_4 dle osazení
- d) f_1 na výšce zavěšení, f_2 na zátop, f_3 dle typu panelu, f_4 dle sklonu

5.19 Pravidla pro rozmístění teplovodních panelů jsou založena na:

- a) výšce zavěšení h panelů - vzdálenost L jejich středů musí být $L \leq h$
- b) výšce zavěšení h panelů - vzdálenost L jejich středů musí být $L \leq h$ a od stěn $L \leq h/2$
- c) na výšce zavěšení h panelů a na úhlu jejich jádrového sálání
- d) na výšce zavěšení h panelů a na úhlech jejich jádrového sálání v obou směrech

5.20 U teplovodních panelů je hygienický limit pro osálání podlahy

- a) 100 W/m^2
- b) 150 W/m^2
- c) 200 W/m^2
- d) 250 W/m^2

5.21 Při projektování teplovodních panelů do průmyslové haly se zohledňují tyto teploty:

- a) teplota vzduchu uvnitř a výsledná pocitová teplota uvnitř
- b) teplota vzduchu uvnitř a venku
- c) teplota stěn a teplota zářičů
- d) teplota stěn a vnitřní teplota vzduchu

5.22 Stropní sálavé vytápění v průmyslové hale se z hlediska ekonomického se dá považovat za přijatelné, pokud celkový tepelný výkon topidel nepřesahuje o více jak $x\%$ celkové tepelné ztráty, kde $x\%$ má následující hodnotu:

- a) 5 %
- b) 10 %
- c) 15 %
- d) 20 %

5.23 Na spojnici dvou stejně širokých a stejně dlouhých teplovodních stropních panelů je teplota T . Jestliže jeden z pásů vyměníme za **užší**, ale v původní délce, pak na spojnici bude následující teplota t :

- a) $t > T$, pokud teplá voda bude vstupovat do užšího pásu
- b) $t > T$, pokud teplá voda bude vstupovat do širšího pásu
- c) $t = T$
- d) Nelze rozhodnout, když neznáme šířku pásů

5.24 Tlakové ztráty u teplovodního topení jsou dány:

- a) pouze výkonem oběhového čerpadla
- b) pouze výškovými rozdíly mezi kotlem a topidly
- c) pouze počtem armatur
- d) pouze třením vody o stěny vedení a místními odpory v armaturách

- 5.25 K výběru oběhového čerpadla je třeba určit minimálně tyto parametry:
- jen délku rozvodného vedení
 - jen objemový průtok
 - jen celkový ztrátový tlak a výškový rozdíl mezi kotlem a topidly
 - jen celkový ztrátový tlak a objemový průtok
- 5.26 Elektrické sálavé panely do obytných prostor se skládají ze:
- tří vrstev: sálavá, topná a izolační vrstva
 - čtyř vrstev: sálavá, dielektrická, topná a izolační vrstva
 - pěti vrstev: sálavá, dielektrická, topná, izolační vrstva a plechová karosáž
 - šesti vrstev: sálavá, dielektrická, topná, přídatná topná, izolační vrstva a plechová karosáž
- 5.27 Nízko-výkonové elektrické sálavé panely do obytných prostor mají výkon **maximálně** do hodnoty:
- 900 W
 - 800 W
 - 700 W
 - 600 W
- 5.28 Vysoko-výkonové elektrické sálavé panely do obytných prostor mají výkony **minimálně** do hodnoty:
- 600 W
 - 700 W
 - 800 W
 - 900 W
- 5.29 Termostatický regulátor pro elektrické sálavé panely v interiéru by měl být umístěn:
- mimo sálavé pole elektrických panelů do výše ~1,2m nad podlahou
 - poblíž oken do výše ~1,5 m nad podlahou
 - mimo sálavé pole panelů do výše 2,5 m nad podlahou
 - poblíž oken do výše ~0,5 m nad podlahou
- 5.30 Při instalaci elektrických sálavých panelů do svislé polohy na stěny má být spodní hrana panelů nad podlahou ve výšce:
- 30 cm
 - 25 cm
 - 20 cm
 - 15 cm
- 5.31 Pravidla pro rozmístění stropních elektrických sálavých panelů jsou založena na:
- výšce zavěšení h zářičů - vzdálenost L jejich středů musí být $L \leq h$
 - výšce zavěšení h zářičů - vzdálenost L jejich středů musí být $L \leq h$ a od stěn $L \leq h / 2$
 - na výšce zavěšení h zářičů a na úhlu jejich jádrového sálání
 - na výšce zavěšení h zářičů a na úhlech jejich jádrového sálání v obou směrech

5.32 U stropních elektrických sálavých panelů je hygienický limit pro osálení podlahy

- a) 100 W/m²
- b) 150 W/m²
- c) 200 W/m²
- d) 250 W/m²

6. Výpočty tepelných výkonů sálavých panelů

Doposud jsme v projekčních výpočtech pro stanovení nutného počtu panelů pro daný prostor využívali tepelné výkony panelů dané v dokumentech výrobce. Tyto hodnoty jsou určovány experimentálně v akreditačních zkušebnách, které pak k výrobku vydávají úřední certifikáty s uvedením vlastností tohoto výrobku včetně jeho způsobilosti pro komerční užití. Takto prováděná měření jsou dělána ve standardních podmínkách, které udávají normy. Na příklad teplovodní panely firmy Kotrbatý s.r.o. byly certifikovány akreditační zkušebnou HKL Stuttgart (v Německu) pro danou střední teplotu panelů $(t_1 + t_2)/2$ a pro danou výslednou (pocitovou) teplotu t_g ve zkušebním prostoru. Jakmile se některá z těchto teplot změní, změní se tím i výkon p panelu. Proto se u teplovodních sálavých panelů firmy Kotrbatý s.r.o. uvádí cejchovní vzorec na výpočet nové hodnoty výkonu

$$p = k \cdot \Delta\Theta^n \quad (\text{Watt /m}), \quad \Delta\Theta = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_g$$

kde t_1 a t_2 jsou vstupní a výstupní teploty vody, t_g je výsledná (pocitová) teplota ve vytápěném prostoru a koeficienty k , n jsou dány certifikační zkušebnou pro daný typ panelu. Na základě cejchovního vztahu lze vytvořit tabulku výkonů pro různé typy panelů a pro různé hodnoty $\Delta\Theta$ a tuto tabulku používat při projekčních výpočtech tak, jak jsme to prováděli v ukázkových projektech v kapitolách 5.2.1, 5.2.2 a 5.2.3.

Tento způsob výpočtu ovšem není zcela přesný, poněvadž sálavý panel si vždy vyměňuje sálavé teplo s okolními plochami, ať již jde o povrchy místností nebo o povrchy předmětů či nábytku nebo jiného zařízení a tato tepelná interakce s okolím pochopitelně výkon ovlivňuje. Dostane-li se certifikovaný panel do jiného prostředí, než je prostor akreditované zkušebny, je vystaven jiným tepelným interakcím a uvedený cejchovní vzorec se stává ještě více přibližným. V praxi se to řeší tak, že se výkon otopného systém nadhodnotí pomocí různých opravných koeficientů, a tím se výkonová nepřesnost cejchovního vztahu většinou kompenzuje.

Výpočet výkonu panelů lze ovšem provádět bez cejchovního přibližného vzorce, a to přímým výpočtem a to tak, že uvážíme konkrétní podmínky prostoru, ve kterém bude sálavý panel fungovat. Výkon sálavého panelu se skládá ze dvou hlavních výkonových složek. Jsou to sálavý a konvekční (občas nazývaný konvektivní) výkon. Panel totiž předává teplo to svého okolí v interiérech budov především sáláním a konvekcí. Vedení je oproti sálání a konvekcii zanedbatelné. V kapitolách 6.1 a 6.2 si vysvětlíme, jak lze početně dospět k sálavému výkonu a ke konvekčnímu výkonu, jejichž součet tvoří úhrnný tepelný výkon panelu.

6.1 Sálavý výkon panelů

Existují čtyři základní fyzikální zákony popisující tepelné záření. Jsou to Planckův zákon vyzařování, Wienův posunovací zákon, Stefan-Boltzmannův zákon a Kirchoffův zákon. Všechny čtyři zákony jsou vysvětleny ve třetím díle elektronických skript [9] nebo v příručce tepelné techniky [10]. První tři zákony se týkají absolutně černého tělesa (modelové těleso, které ze všech těles nejvíce září a absolutně vše pohlcuje, co na jeho povrch dopadá), poslední čtvrtý zákon se týká šedých těles (většina těles, které nás obklopují). Kirchoffův zákon ve spojení se Stefan-Boltzmannovým zákonem nám dovoluje počítat výkon P zářivého tepla šedých difúzních těles těmito třemi alternativními způsoby:

$$P = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = S \cdot \varepsilon \cdot C_b \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = S \cdot \varepsilon \cdot E_b \quad (\text{Watt})$$

kde S je povrch tělesa, $\varepsilon \in \langle 0;1 \rangle$ je emisivita povrchu tělesa (materiálová konstanta),

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ (Watt m⁻² K⁻⁴) je Stefan-Boltzmannova konstanta, T je teplota v kelvinech, $C_b = 5,67$ (Watt m⁻² K⁻⁴) je součinitel sálání černého tělesa a

$E_b = \sigma \cdot T^4 = C_b \left(\frac{T}{100}\right)^4$ (Watt/m²) je intenzita sálání černého tělesa.

Výkon P , který je dán výše uvedenou rovnicí, by mělo těleso v absolutně prázdném prostoru bez dalších těles, takže by si nemohlo vyměňovat teplo s jinými tělesy, které by byly za normálních podmínek v sousedství a které by ovlivňovaly jeho výkon. Takový výkon nám ovšem v projekčních výpočtech moc neposlouží. Musíme zohlednit to, že těleso (sálavý panel) bude v reálném prostoru a bude si vyměňovat teplo se sousedními povrchy těles (stěn, stropu, podlahy ap.). To, kolik tepla si vymění, bude ovlivňovat jeho skutečný, reálný výkon v daném prostoru. Nejbližším naším cílem tedy bude najít způsob, jak počítat tento skutečný výkon a k tomu musíme zohlednit výměnu tepla mezi sousedy. Kolik tepla pošle jeden povrch na druhý, záleží nejen na jejich teplotě, emisivitě a velikosti povrchu, ale také na jejich geometrické rozestavenosti, čili na jejich geometrické konfiguraci v prostoru. Tuto vlastnost zohledňují tzv. **pohledové, často nazývané tvarové, faktory**. Je o nich pojednáno v následující kapitole.

6.1.1 Pohledový faktor uzavřených obálek (místností)

Pohledový (tvarový) faktor F redukuje celkovou tepelnou energii vyzářenou jedním povrchem na tu část, která zasáhne sousední povrch. Výsledkem je ta část energie, která dopadá na sousední povrch, zatímco zbývající energie mívá sousední povrch. Pohledový faktor je kladné bezrozměrné číslo menší nebo maximálně rovno jedničce $F \in \langle 0,1 \rangle$.

Ve třetím díle skript [9] byl pohledový faktor F zaveden jako dvojrozměrný plošný integrál. Pohledový faktor se vztahuje k dvojici určitých ploch i a j , tj. F_{ij} . Pohledový faktor, zapsán jako F_{ij} , znamená, že jde o desetinné číslo, které redukuje celkovou energii vyzářenou povrchem i na tu část energie, která dopadá na povrch j . Pro lepší pochopení podstaty pohledového faktoru si můžeme představit, že jde o procentuální redukci. Např. $F_{12} = 0.45$ znamená, že povrch 1 posílá na povrch 2 pouze 45 % ze své celkové vyzařované energie. Povrch 1 emituje svou celkovou energii do všech směrů, ale pouze 45 % z ní dopadá na povrch 2. Protože uvažované povrchy 1 a 2 mají konečné rozměry, jisté množství energie (55 %) vyzářené povrchem 1 mívá nenávratně povrch 2. Podobně bychom mohli uvažovat o

obráceném transportu zářivé energie jdoucí z povrchu 2 na povrch 1, čemuž by odpovídal pohledový faktor F_{21} .

Vnitřní prostory budov sestávají z jistého počtu (n) povrchů. Tyto vnitřní povrchy vymezují interiéry a vytvářejí **uzavřené obálky** těchto prostor. Teplo vyzařované určitým povrchem i , který je součástí uzavřené obálky, je konzervováno uvnitř této obálky a je rozdělováno mezi ostatní povrchy obálky. To znamená, že součet všech porcí energie vyzařené povrchem i , se právě rovná celkové energii vyzařené tímto povrchem a žádná jeho porce se tedy nemůže ztratit (minout souseda). Důsledkem toho je, že **v uzavřené obálce** musí být součet pohledových faktorů náležejících k jednomu povrchu (např. k povrchu i) roven jedné (součet procentuálních vyzařených podílů se rovná 100 %):

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1, \quad (\text{SOUČTOVÉ PRAVIDLO - platí pouze v uzavřené obálce !})$$

Uvedená suma obsahuje také speciální pohledový faktor F_{ii} . Tento pohledový faktor se vztahuje na vyzařování povrchu i zpět na ten sám povrch i (tj. z i na i). Ne všechny povrchy ale dokážou ozářit zpětně samy sebe. K tomu musí mít prohnutý tvar tak, aby část jejich povrchu "viděla" jinou část jejich povrchu. Např. protilehlé části *vnitřního* povrchu duté koule se vzájemně "vidí", tudíž vnitřní povrch koule dokáže sám sebe tepelně ozářit. Rovinné povrchy ale tuto vlastnost nemají, a proto žádný rovný povrch nedokáže sám sebe ozářit. Hodnota pohledového faktoru F_{ii} je v takových případech nulová, neboť se vrací zpět nulová porce vyzařené energie. Jiný případ nulového faktoru $F_{ii} = 0$ mohou představovat speciálně vypuklé povrchy, např. *vnější* povrch duté koule, který nedokáže ozářit sám sebe na rozdíl od *vnitřního* povrchu, který to dokáže. Je třeba pozorně posuzovat tvary povrchů tak, abychom uměli tuto vlastnost správně odhalit:

$$F_{ii} = 0, \quad (\text{NULOVÉ PRAVIDLO - pouze když povrch sám sebe neozáří})$$

Třetí důležitou vlastností pohledových faktorů je jejich symetrie. Symetrická vlastnost pohledových faktorů byla odvozena ve třetím díle skript [9]. Jde o vlastnost, která platí **zcela obecně** bez ohledu na tvar povrchů nebo uzavřenost či otevřenost obálky interiéru:

$$S_i \cdot F_{ij} = S_j \cdot F_{ji} \quad (\text{PRAVIDLO SYMETRIE platí obecně})$$

kde S_i a S_j jsou plochy povrchů i a j .

Předešlé tři vlastnosti jsou důležité při oceňování tepelného záření ve vnitřních prostorech budov (a nejen tam). Při výpočtu přeneseného tepelného záření je prvním výpočtovým krokem právě určení pohledových faktorů pro všechny dvojice zúčastněných povrchů. Zmíněná tři pravidla (součtové, nulové a symetrie) jsou proto vítanou pomůckou při stanovování hodnot pohledových faktorů. Pro přehlednost proto ještě jednou sumarizujeme tyto tři vlastnosti společně s podmínkou numerické restrikce pohledových faktorů:

(i) Sumační pravidlo:

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1, \quad \text{Pouze pro uzavřené obálky !}$$

(ii) Nulové pravidlo:

$$F_{ii} = 0, \quad \text{Pouze pro povrchy, které nemohou ozářit samy sebe !}$$

(iii) Symetrické pravidlo:

$$S_i \cdot F_{ij} = S_j \cdot F_{ji}, \quad \text{Platí zcela obecně !}$$

(iv) Numerická restrikce:

$$F \in \langle 0, 1 \rangle \quad \text{Platí pro všechny pohledové faktory}$$

Pohledové faktory zářivých n -povrchů se obvykle zapisují jako **matice pohledových faktorů**:

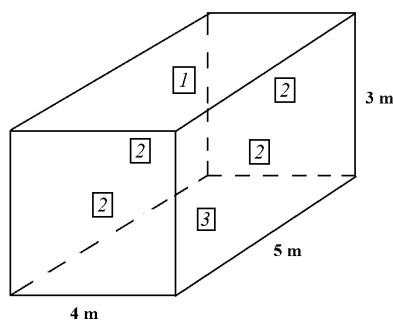
$$\begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & \dots & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & \dots & F_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{n1} & F_{n2} & \dots & F_{nn} \end{pmatrix}$$

Protože členy této matice musí splňovat zmíněné čtyři vlastnosti (i) - (iv), jsou tím dány i vlastnosti samotné matice. Např. podle sumačního pravidla (i), musí být součet členů matice v každém jejím řádku roven jedné, pokud systém n -rovin tvoří uzavřenou obálku(!). Podle nulového pravidla (ii), mohou být některé členy hlavní diagonály nulovou hodnotu - jsou to pohledové faktory patřící k povrchům, které samy sebe nemohou ozářit. Výše uvedená matice je kvazi-symetrická, neboť musí vždy splňovat pravidlo symetrie (iii). Navíc podle čtvrtého numerického pravidla (iv) každý element pohledové matice musí být nezáporný a nesmí být větší jak 1.

Následkem vlastností (i) - (iv) má každý vnitřní prostor budovy svoji vlastní pohledovou matici. Je to čtvercová matice n -tého řádu, tj. má n^2 členů. Pomocí uvedených pravidel si můžeme dopočítat hodnoty pohledových faktorů uzavřených obálek, pokud známe jistý minimální počet vstupních faktorů. Nezbytné vstupní hodnoty lze určovat pomocí publikovaných grafů [11] nebo vzorců [11], není třeba vyčíslovat dvojné plošné integrály. Existuje také databáze vypočítaných pohledových faktorů pro časté geometrické konfigurace různě tvarovaných povrchů a lze ji nalézt na adrese:

<http://www.thermalradiation.net/indexCat.html>

Abychom ilustrovali sestavování pohledových matic, vezměme si konkrétní případ tří-plošné obálky s povrchy 1, 2 a 3 tak, jak je znázorněno na následujícím obrázku 24. Jde o místnost se stropem č. 1, podlahou č. 3 a bočními stěnami č. 2, které jsou uvažovány jako jedna lomená plocha.



Obr. 24 Prototyp jednoduché místnosti. Očíslování stěn slouží pro sestavení matice pohledových faktorů.

Rozměry místnosti jsou 5m x 4m x 3m (Obr. 18.1) a plochy očíslovaných stěn jsou $S_1 = 20\text{m}^2$, $S_2 = 54\text{m}^2$ a $S_3 = 20\text{m}^2$. Jsou dva rovinné povrchy (strop, podlaha), tj. dva nulové pohledové faktory. Bude třeba znát jeden vstupní faktor, který odečteme z publikovaných grafů [11]. Např. z grafu odečteme hodnotu $F_{12} = 0.67$ a ostatní hodnoty určíme pomocí pravidel (i) - (iii). První hodnota 0.67 dosazena do následující matice:

$$\begin{pmatrix} F_{11} & 0.67 & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{pmatrix}$$

Určení nulových členů hlavní diagonály $F_{ii} = 0$. Tyto členy jsou určeny rovnými povrchy, tj. strop $F_{11} = 0$ a podlaha $F_{33} = 0$, zalomená plocha č. 2 "vidí" sama na sebe, takže $F_{22} \neq 0$:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.67 & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & 0 \end{pmatrix}$$

Dále aplikujeme součtové pravidlo na první řádek pohledové matice $\sum_{j=1}^3 F_{1j} = 1$:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.67 & 0.33 \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & 0 \end{pmatrix}$$

Nyní aplikujeme pravidlo symetrie na členy F_{21} a F_{31} , tj. $S_2 \cdot F_{21} = S_1 \cdot F_{12} \Rightarrow F_{21} = (S_1 / S_2) \cdot F_{12}$ a podobně pro $F_{31} = (S_1 / S_3) \cdot F_{13}$:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0.248 & F_{22} & F_{23} \\ 0.33 & F_{32} & 0 \end{pmatrix}$$

Pomocí aplikace sumačního pravidla v posledním řádku matice dostáváme:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0.248 & F_{22} & F_{23} \\ 0.33 & 0.67 & 0 \end{pmatrix}$$

Pravidlo symetrie určí další chybějící člen F_{23} takto $S_2 \cdot F_{23} = S_3 \cdot F_{32} \Rightarrow F_{23} = (S_3 / S_2) \cdot F_{32}$:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0.248 & F_{22} & 0.248 \\ 0.33 & 0.67 & 0 \end{pmatrix}$$

Konečně poslední neznámý člen uprostřed hlavní diagonály je dán sumačním pravidlem:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0.248 & 0.504 & 0.248 \\ 0.33 & 0.67 & 0 \end{pmatrix}$$

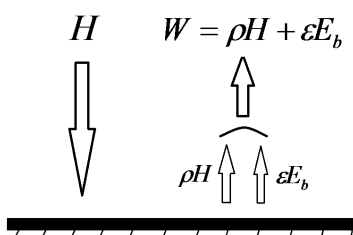
A to je konečný tvar matice pohledových faktorů naší troj-plošné místnosti o rozměrech 5m x 4m x 3m. Matice podobných typů slouží pro výpočty přenosu tepelného záření v místnostech. Způsoby těchto výpočtů budou vysvětleny v dalších kapitolách tohoto textu.

Závěrem je třeba zdůraznit, že matice pohledových faktorů se také sestavuje pro otevřené "obálky", kdy část vyzářené energie mizí nenávratně v prostoru mimo povrchy konečných rozměrů. V takových otevřených systémech již nelze aplikovat součtové pravidlo (i). Ostatní pravidla (ii) - (iv) platí nadále i v těchto případech.

6.1.2 Přenos tepla zářením mezi povrchy v místnosti

Většina stavebních materiálů mají tzv. šedý difúzní povrch - označení "šedý" v teorii tepelného záření má málo společného se skutečnou viditelnou barvou povrchu. Je to symbolické označení, které znamená, že odrazivost a pohltivost takových povrchů nezávisí na vlnové délce tepelného záření. U povrchů budeme předpokládat tyto dvě vlastnosti.:

- (i) Propustnost tepelného záření je nulová $\tau = 0$.
- (ii) Součet **koeficientů odrazivosti a pohltivosti (emisivity)** se rovná jedničce: $\rho + \varepsilon = 1$.



Obr. 25 Výměna energie mezi šedými povrchy.

Dále uvádíme bez odvození tři základní vztahy, podle kterých lze určovat výkony povrchů v místnosti (uzavřené obálce). Obr. 25 znázorňuje situaci u jednoho ze šedých povrchů. Symbol

H představuje hustotu celkového zářivého toku (Watt / m²) přicházející od všech sousedních povrchů, kdežto symbol W zastupuje **radiozitu**, což je **celková hustota zářivého toku odcházející** z tohoto povrchu (Watt / m²). Radiozitou je nazýván součet emitované Stefan-Boltzmannovy hustoty energie (εE_b) a odražené hustoty energie (ρH).

Krok 1

Výpočet radiozit všech zúčastněných ploch -každá plocha má svou radiozitu. Počet radiozit W_i je proto roven počtu povrchů n . Bude třeba řešit soustavu n -rovníc o n -neznámých. Jde o soustavu lineárních algebraických rovnic určených předpisem:

$$W_i = \varepsilon_i E_{b_i} + \rho_i \sum_{j=1}^n F_{ij} W_j \quad i, j = 1, 2, 3 \dots n \quad (\text{Watt / m}^2)$$

Krok 2

Jakmile jsou vypočítány radiozity W_i všech zúčastněných povrchů, můžeme počítat hustoty tepelných zářivých toků q_i všech povrchů:

$$q_i = \frac{\varepsilon_i}{\rho_i} (E_{b_i} - W_i) \quad (\text{Watt / m}^2)$$

Hustoty zářivých tepelných toků mohou být kladná i záporná čísla.

Krok 3

Vynásobením tepelných zářivých toků q_i plochami S_i jednotlivých povrchů lze okamžitě dostat **celkové výkony** Φ_i (celkové zářivé tepelné toky), které mohou být opět kladnými nebo zápornými čísly. ***Je-li některý výkon kladný, pak příslušný povrch do místnosti dodává (emituje) celý svůj tepelný výkon, v případě záporného výkonu si povrch z místnosti tento výkon odebírá (absorbuje jej)***:

$$\Phi_i = S_i q_i \quad (\text{Watt})$$

Všimněte si, že neříkáme, na které konkrétní povrchy vyšetřovaný povrch teplo Φ_i dodává, ani ze kterých sousedů si teplo bere, mluvíme o uzavřené obálce (tj. místnosti) jako celku, tj. do místnosti vyšetřovaný povrch teplo Φ_i dodává nebo si z ní teplo Φ_i bere. Výše uvedené tři rovnice jsou základními rovnicemi, které určují zářivý tepelný přenos z povrchů do místnosti a z místnosti do povrchů. ***Jestliže si některý povrch z místnosti tepelný výkon bere (má záporný tepelný tok ($\Phi_i < 0$), pak jej povrch absorbuje do "svého" objemu a tam se event. může dál šířit k protilehlému povrchu - tak např. vznikají ztráty stavebními konstrukcemi.*** Protože jsou v praxi šedé povrchy zastoupené dominantně, budou i uvedené rovnice v praxi často používané.

V uzavřené obálce musí být součet všech tepelných **zářivých** toků $\sum_{i=1}^n \Phi_i$ roven nule (tzv. **kompenzační teorém** - *jedná se o podmínku nutnou, ale ne postačující*). Mírné odchylky od nuly jsou obvykle způsobeny zaokrouhlovacími chybami:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0$$

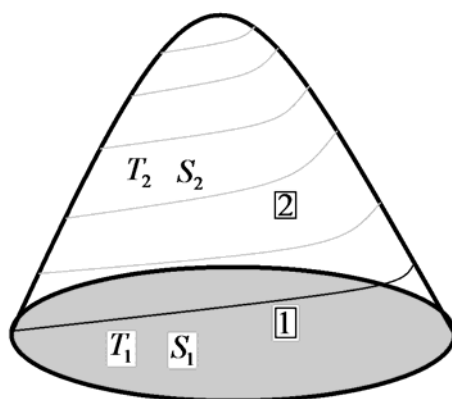
Tuto vlastnost lze využít jako kritérium správnosti výpočtu - pokud je součet velmi blízký k nule, výpočet bude pravděpodobně správný.

V této kapitole jsme velmi stručně (až drakonicky úsporně) vyložili podstatu *radiozitní metody* přenosu zářivého tepla. Pokud by někdo chtěl proniknout do této metody hlouběji, má k dispozici volně přístupné podrobné pojednání na adrese:

<https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/5375/5029>

6.1.3 Ukázkový příklad přenosu zářivého tepla ve dvou-plošné místnosti

V této kapitole bude analyzován zářivý přenos tepla v interiéru, jehož obálka sestává ze dvou povrchů - vyhřívané podlahy a chladné kopule. Budou použity rovnice pro šedé povrchy odvozené v předešlé kapitole. Oba povrchy (podlaha a kopule) mohou mít zcela obecný tvar. Jedná se o obecný prototyp dvou-plošné uzavřené obálky.



Obr. 26 Dvou-plošná obálka místnosti (podlaha 1 a kopule 2).

Situace je znázorněna na obrázku 26. Kruhová rovinná podlaha ($m=1$) má číslo 1 a kupole číslo 2. Vstupní data jsou uvedena v následující tabulce:

Vstupní data pro dvou-plošnou obálku.

Parametr	Povrch 1	Povrch 2
S (m ²)	80	240
T (K)	300 (Vyhřívaná podlaha)	290 (Chladná kopule)
ε	0.9	0.25
ρ	0.1	0.75
$\varepsilon \cdot E_b$ (Watt/ m ²)	413.34	100.257

Matice pohledových faktorů (viz pravidla (i) - (iv) v kapitole 6.1.1):

$(n^2 - n) / 2 - m = (2^2 - 2) / 2 - 1 = 0$ - nebudeme potřebovat žádný pohledový faktor z grafu, vše lze určit ze tří základních pravidel pro pohledové faktory, tj.

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1/3 & 2/3 \end{pmatrix}$$

Radiozity W_1 a W_2 (systém dvou rovnic o dvou neznámých W_1 a W_2):

$$\begin{aligned} W_1 &= \varepsilon_1 E_{b1} + \rho_1 [F_{11} W_1 + F_{12} W_2] \\ W_2 &= \varepsilon_2 E_{b2} + \rho_2 [F_{21} W_1 + F_{22} W_2] \end{aligned}$$

$$W_1 = 413.34 + 0.1 W_2$$

$$W_2 = 100.257 + 0.75 \left(\frac{1}{3} W_1 + \frac{2}{3} W_2 \right)$$

$$W_1 = 456.2015 \text{ (Watt/ m}^2\text{)}$$

$$W_2 = 428.615 \text{ (Watt/ m}^2\text{)}$$

Hustoty tepelných toků q_1 and q_2 :

$$q_i = \frac{\varepsilon_i}{\rho_i} (E_{bi} - W_i) = \frac{1}{\rho_i} (\varepsilon_i E_{bi} - \varepsilon_i W_i)$$

$$q_1 = \frac{1}{0.1} (413.34 - 0.9 \cdot 456.2015) = +\mathbf{27.5865} \text{ (Watt/ m}^2\text{)}$$

$$q_2 = \frac{1}{0.75} (100.257 - 0.25 \cdot 428.615) = -\mathbf{9.1957} \text{ (Watt/ m}^2\text{)}$$

Tepelné toky Φ_1 a Φ_2 :

$$\Phi_i = S_i \cdot q_i$$

$$\Phi_1 = S_1 \cdot q_1 = 80 \cdot 27.5865 = +\mathbf{2206.9} \text{ (Watt)}$$

$$\Phi_2 = S_2 \cdot q_2 = 240 \cdot (-9.1957) = -\mathbf{2206.9} \text{ (Watt)}$$

Podlaha emituje teplo (+2206.9 Watt) a kupole přijímá (absorbuje) tu samou porci tepla (-2206.9 Watt). Je to v souladu se skutečností, že podlaha je vytápěna. V uzavřené obálce je příjem a výdej zářivého tepla v rovnováze, tj. $\Phi_1 + \Phi_2 = 0$.

Je užitečné se zmínit také o tom, že zářivý přenos tepla ve dvou-plošných (a to pouze ve dvou-plošných!) soustavách může být počítán jednodušeji pomocí součinitelů vzájemného sálání C_{12} a C_{21} , které byly definovány ve třetím díle skript. Spočítejme tento přenos ještě jednou pomocí těchto koeficientů:

$$\Phi_{12} = S_1 C_{12} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = S_1 \frac{C_b}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] =$$

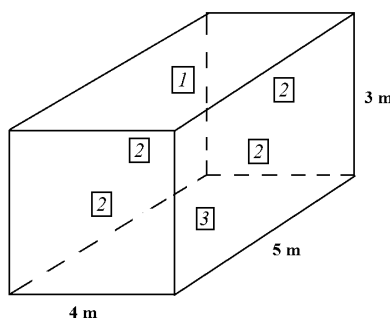
$$= 80 \frac{5.67}{\frac{1}{0.9} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{0.25} - 1 \right)} [3^4 - 2.9^4] = +2207.05 \text{ (Watt)}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{21} &= S_2 C_{21} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] = S_2 \frac{C_b}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \left(\frac{S_2}{S_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon_1} \right) - 1} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] = \\ &= 240 \frac{5.67}{\frac{1}{0.25} + \left(3 \cdot \frac{1}{0.9} \right) - 1} [2.9^4 - 3^4] = -2207.05 \text{ (Watt)} \end{aligned}$$

Srovnáme-li výsledky pro tepelné toky (výkony) Φ u obou řešení, tj. pomocí radiozit W a pomocí součinitelů vzájemného sálání C , je zřejmé, že oba výsledky (2206.9 Watt versus 2207.05 Watt) jsou téměř totožné. Malá diference (0.15 Watt) je způsobena zaokrouhlovacími chybami, ke kterým dochází během výpočtů.

6.1.4 Ukázkový příklad přenosu zářivého tepla ve tří-plošné místnosti

Vypočítáme nyní zářivé tepelné toky (výkony) Φ_1 , Φ_2 a Φ_3 uvnitř troj-plošné místnosti o rozměrech 5m x 4m x 3m. Tato místnost byla diskutována z hlediska pohledových faktorů v kapitole 6.1.1. Tvar místnosti je připomenut na obrázku 27. Obálka místnosti sestává pouze ze tří šedých povrchů: strop má číslo 1, boční stěny tvoří jednotný lomený povrch číslo 2, a podlaha má číslo 3. Podlaha je vytápěná. Vstupní data pro místnost jsou uvedena v následující tabulce.



Obr. 27 Náčrt vyšetřované místnosti.
Tabulka vstupních dat vyšetřované místnosti.

Parametr	Povrch 1	Povrch 2	Povrch 3
S (m ²)	20	54	20
T (K)	287	293	303 (vytápěná podlaha)
ε	0.7 (šedý povrch)	0.75 (šedý povrch)	0.9 (šedý povrch)
ρ	0.3	0.25	0.1
$\varepsilon \cdot E_b$ (Watt / m ²)	269.28	313.41	430.13

Řešení:

1) Matice pohledových faktorů:

$$\{F_{ij}\}_{i=1,j=1}^N$$

Pro tuto místnost byla v kapitole 6.1.1 sestavena matice pohledových faktorů takto:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0.248 & 0.504 & 0.248 \\ 0.33 & 0.67 & 0 \end{pmatrix}$$

2) Radiozity W_i šedých povrchů:

$$W_i = \varepsilon_i E_{b_i} + \rho_i \sum_{j=1}^N F_{ij} W_j \quad (\text{Systém 3 rovnic o třech neznámých } W_i.)$$

$$W_1 = \varepsilon_1 E_{b_1} + \rho_1 \sum_{j=1}^3 F_{1j} W_j$$

$$W_2 = \varepsilon_2 E_{b_2} + \rho_2 \sum_{j=1}^3 F_{2j} W_j$$

$$W_3 = \varepsilon_3 E_{b_3} + \rho_3 \sum_{j=1}^3 F_{3j} W_j$$

$$\begin{aligned} W_1 &= 269.28 + 0.3 \cdot (0 \cdot W_1 + 0.67 \cdot W_2 + 0.33 \cdot W_3) \\ W_2 &= 313.41 + 0.25 \cdot (0.248 \cdot W_1 + 0.504 \cdot W_2 + 0.248 \cdot W_3) \\ W_3 &= 430.13 + 0.1 \cdot (0.33 \cdot W_1 + 0.67 \cdot W_2 + 0 \cdot W_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_1 &= 269.28 + 0.3 \cdot (0 \cdot W_1 + 0.67 \cdot W_2 + 0.33 \cdot W_3) \\ W_2 &= 313.41 + 0.25 \cdot (0.248 \cdot W_1 + 0.504 \cdot W_2 + 0.248 \cdot W_3) \\ W_3 &= 430.13 + 0.1 \cdot (0.33 \cdot W_1 + 0.67 \cdot W_2 + 0 \cdot W_3) \end{aligned}$$

Soustavu jsme převedli do tzv. normálního tvaru:

$$\begin{aligned} 1 \cdot W_1 - 0.201 \cdot W_2 - 0.099 \cdot W_3 &= 269.28 \\ -0.062 \cdot W_1 + 0.874 \cdot W_2 - 0.062 \cdot W_3 &= 313.41 \\ -0.033 \cdot W_1 - 0.067 \cdot W_2 + 1 \cdot W_3 &= 430.13 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_1 &= 400.4705 \text{ (Watt / m}^2\text{)} \\ W_2 &= 420.4500 \text{ (Watt / m}^2\text{)} \\ W_3 &= 471.5157 \text{ (Watt / m}^2\text{)} \end{aligned}$$

Systém algebraických rovnic může být řešen různými způsoby např. postupným vyjadřováním neznámých, Gaussovou eliminační metodou, metodou determinantů nebo pomocí inverzní matice soustavy (existuje v Excelu). Pro ruční zpracování na kalkulačce jsou vhodné první dvě metody, ostatní jsou vhodné spíše pro počítačové zpracování. V tomto výpočtu jsme použili pohodlnou internetovou kalkulačku na adrese:

<http://wims.unice.fr/wims/wims.cgi?session=0P947DD90B.2&+lang=en&+module=tool%2Flinear%2Finsolver.en&+method=matrix&+cmd=resume>

3) Zářivé hustoty tepelných toků q_i a tepelné toky Φ_i šedých povrchů místnosti:

$$q_i = \frac{\varepsilon_i}{\rho_i} (E_{b_i} - W_i), \quad \Phi_i = S_i q_i$$

$$q_1 = \frac{1}{\rho_1} (\varepsilon_1 E_{b_1} - \varepsilon_1 W_1), \quad \Phi_1 = S_1 q_1$$

$$q_2 = \frac{1}{\rho_2} (\varepsilon_2 E_{b_2} - \varepsilon_2 W_2), \quad \Phi_2 = S_2 q_2$$

$$q_3 = \frac{1}{\rho_3} (\varepsilon_3 E_{b_3} - \varepsilon_3 W_3), \quad \Phi_3 = S_3 q_3$$

Strop 1:

$$q_1 = \frac{1}{0.3} (269.28 - 0.7 \cdot 400.4705) = -\mathbf{36.8312} \quad (\text{Watt} / \text{m}^2)$$

$$\Phi_1 = 20 \cdot (-36.8312) = -\mathbf{736.6233} \quad (\text{Watt})$$

Zalomené boční stěny 2:

$$q_2 = \frac{1}{0.25} (313.41 - 0.75 \cdot 420.4500) = -\mathbf{7.7100} \quad (\text{Watt} / \text{m}^2)$$

$$\Phi_2 = 54 \cdot (-7.7100) = -\mathbf{416.3400} \quad (\text{Watt})$$

Vyhřívání podlaha 3:

$$q_3 = \frac{1}{0.1} (430.13 - 0.9 \cdot 471.5157) = +\mathbf{57.6587} \quad (\text{Watt} / \text{m}^2)$$

$$\Phi_3 = 20 \cdot 57.6587 = \mathbf{1153.1740} \quad (\text{Watt})$$

Strop a boční stěny přijímají tepelnou energii ($\Phi_1 + \Phi_2 \approx -1153$ Watt), kdežto vytápěná podlaha dodává teplo ($\Phi_3 \approx +1153$ Watt). Součet všech tří zářivých tepelných toků (výkonů) je

nulový $\Phi = \sum_{i=1}^N \Phi_i = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$, čímž je ověřena správnost provedeného výpočtu (podmínka nutná, ale ne postačující).

V předešlých případech jsme vyšetřovali výkony jednotlivých ploch místnosti. Vyhřívání podlaha tvořila velkoplošný sálavý panel. Pokud by v místnosti byly malo-plošné sálavé panely umístěné např. na stropě nebo na bočních stěnách, výpočet by probíhal zcela analogicky jako s vyhříváním podlahou (matice pohledových faktorů, radiozity, hustoty tepelných toků a celkové tepelné toky jednotlivých ploch, čili jejich výkony). Rozdíl by byl pouze v tom, že by soustava řešených rovnic byla rozměrnější a měla tolik rovnic, kolik ploch by se bralo do úvahy.

6.1.5 Příklad k samostatnému řešení

Vyčíslete přenos tepla zářením v místnosti, která sestává z podlahy č. 1 a kupole ve tvaru duté polokoule č. 2. Podlaha má poloměr $R = 5\text{ m}$. Použijte oba typy výpočtů vysvětlené v kapitole 6.1.2 tj. pomocí radiozit nebo pomocí součinitelů vzájemného sálání. Vstupní data naleznete v následující tabulce :

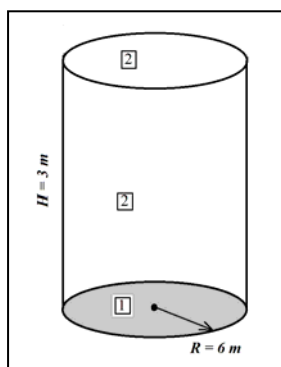
Vstupní data pro vyšetřovanou místnost.

Parametr	Povrch 1	Povrch 2
T (K)	303.15	291.15
ε	0.75 (šedý povrch)	0.3 (šedý povrch)
ρ	0.25	0.7

6.1.6 Příklad k samostatnému řešení

Vyčíslete přenos tepla zářením v místnosti sestávající z podlahy č. 1 a kupole ve tvaru dutého válce č. 2. Podlaha má poloměr $R = 6\text{ m}$ a válcová kupole má výšku $H = 3\text{ m}$ (viz obrázek). Použijte oba typy výpočtů vysvětlené v kapitole 6.1.2, tj. pomocí radiozit nebo pomocí součinitelů vzájemného sálání. Vstupní data naleznete v následující tabulce:

Vyšetřovaná místnost.



Vstupní data pro vyšetřovanou místnost.

Parametr	Povrch 1	Povrch 2
T (K)	303.15	291.15
ε	0.75 (šedý povrch)	0.3 (šedý povrch)
ρ	0.25	0.7

6.2 Konvektivní výkon panelů

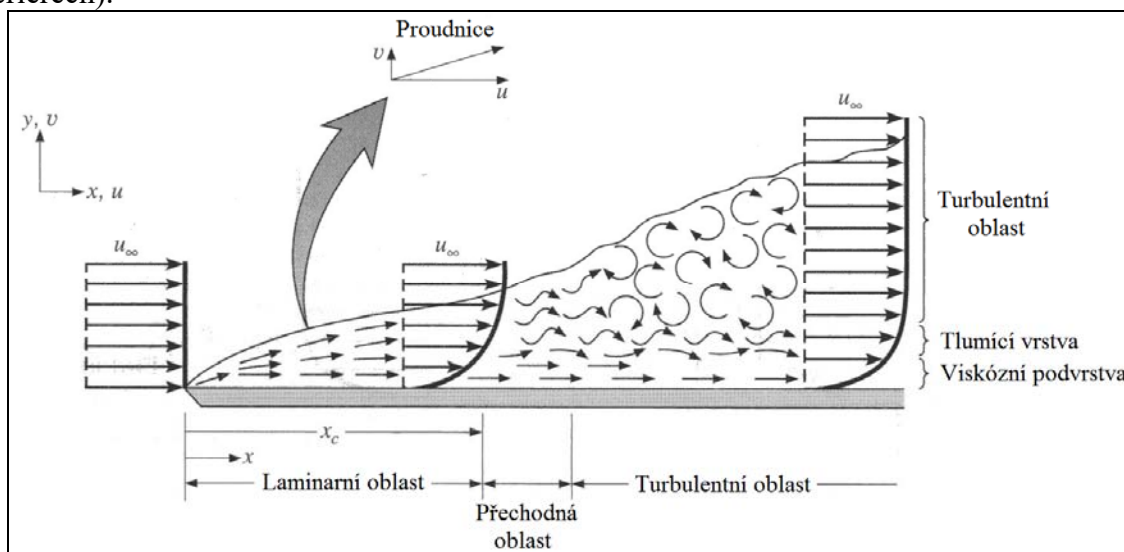
Neexistuje stoprocentně sálavý panel. Vždy má jisté procento výkonu v konvektivní složce. A naopak, neexistuje stoprocentně konvektivní topné těleso, protože vždy jde u něj jisté procento výkonu do sálavé složky. **Za sálavý panel je považováno takové topné těleso, jehož sálavá složka výkonu obnáší VÍCE JAK 50%**. To znamená, že konvektivní složka výkonu u takového sálavého panelu může klidně činit i 49%, a to je docela velký podíl konvektivnosti takového sálavého panelu.

Zajímáme-li se o celkový tepelný výkon panelu, pak musíme znát nejen jeho sálavý výkon, který můžeme počítat pomocí metody radiozít (viz kapitola 6.1.2), ale také konvektivní výkon, o kterém jsme zatím nehovořili. Výpočet konvektivního výkonu bude založen na přenosu tepla konvekcí ze sálavé plochy panelu do okolního vzduchu. V následující kapitole bude vysvětlena podstata konvekce, výpočet přenosu tepla konvekcí a aplikace směřující ke konvektivnímu výkonu otopných panelů.

Konvektivní přenos tepla vzniká všude tam, kde fluidum (kapalina nebo plyn) dané teploty obtéká povrch látky s teplotou odlišnou od fluida. Přenos tepla se děje vždy ve směru od vyšší teploty k nižší teplotě, takže pokud je fluidum teplejší, pak teplo předává látce, je-li látka teplejší, pak fluidum odebírá teplo z povrchu látky a tím, že proudí, odnáší přijaté teplo na další místa prostoru. Takto např. funguje konvekce u radiátorů ústředního topení - vzduch přijímá teplo od radiátoru a prouděním roznáší teplo po místnosti.

Proud fluida může být uspořádaný, tj. proudové čáry se nekříží, probíhá laminární proudění. Proudění ale může být také neuspořádané, chaotické, tj. vírové, kdy se proudové čáry stáčí do vírů, a pak mluvíme o turbulentním proudění. Přechod od laminárního k turbulentnímu proudění nastává vždy po dosažení laminárního proudu jisté kritické vzdálenosti x_c . Ve schématu konvektivního proudění na obrázku 28 je tato vzdálenost x_c vyznačena.

Konvektivní proud může být hnán externí silou ventilátoru (v interiéru) nebo větrem (v exteriéru), pak mluvíme o nucené konvekci (typicky v exteriérech). Vzniká-li konvektivní proud samovolně, tj. Archimédovou vztlakovou silou (ohřátý vzduch zmenší svou hustotu, je lehčí a stoupá nahoru proti gravitační tíhové síle), jedná se o přirozenou konvekci (zejména v interiérech).



Obr. 28 Schéma konvektivního proudu podél povrchu tělesa.

Výpočetní vztahy pro přenos tepla se liší podle toho, jestli se jedná o přirozenou nebo nucenou konvekci a liší se navíc i tím, jestli jde o laminární nebo turbulentní proudění. Na počátku výpočtu tedy musíme rozhodnout, o jaký typ konvekce a jaký typ proudění vlastně jde.

Rozdělení konvektivního jevu:

	<i>La minární</i>
<i>Přirozená</i>	<i>Smíšená</i>
	<i>Turbulentní</i>
<i>Konvekce</i>	
	<i>La minární</i>
<i>Nucená</i>	<i>Smíšená</i>
	<i>Turbulentní</i>

6.2.1 Nucená konvekce

Jde o typický případ, kdy v exteriéru vítr ofukuje fasádu. Je-li to v zimním období, fasáda je teplejší, vzduch studenější, teplo si proto odnáší větrem hnaný vzduch a tak vznikají konvektivní ztráty venkovních konstrukcí.

Pro výpočet přenosu tepla během nucené konvekce musíme zavést tři tzv. podobnostní čísla (nemají jednotku). Jsou definována takto:

Reynoldsovo číslo Re_L $Re_L = \frac{u_\infty \cdot L}{\nu}$, u_∞ je rychlost volného fluidního proudu
 L charakteristická délka povrchu
 ν kinematická viskozita fluida

Prandtlovo číslo Pr $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ ν je kinematická viskozita fluida
 $\alpha = \frac{\lambda_f}{\rho \cdot c}$ teplotní vodivost
 λ_f tepelná vodivost
 ρ hustota fluida, c tepelná kapacita fluida

Nusseltovo číslo Nu $Nu_L = \frac{h \cdot L}{\lambda_f}$ h součinitel tepelného přestupu
 L charakteristická délka povrchu
 λ_f tepelná vodivost

Pro výpočet přenosu tepla napříč konvektivním proudem fluida je nutné získat hodnotu součinitele tepelného přestupu h . Tento koeficient je obsažen v definici Nusseltova čísla. Samotné Nusseltovo číslo lze získat z tzv. korelačních funkcí $f(Re_L, Pr)$, které jsou závislé na hodnotách Reynoldsova a Prandtlova čísla. Z Nusseltova čísla a korelační funkce dostáváme součinitele tepelného přestupu h

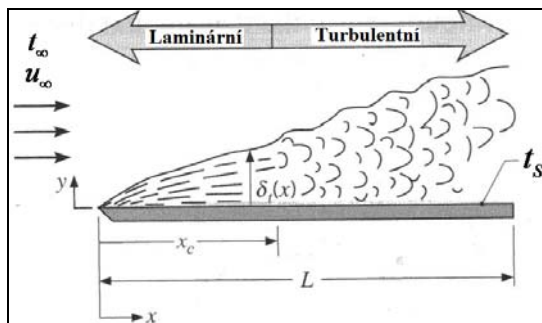
$$Nu_L = f(Re_L, Pr) \Rightarrow h = \frac{\lambda_f}{L} f(Re_L, Pr)$$

a na základě hodnoty h můžeme počítat výkonový přenos tepla Φ :

$$\Phi = S \cdot h \cdot (t_\infty - t_s) \quad (\text{Watt})$$

kde S je plocha povrchu, kolem kterého obtéká fluidní proud, t_∞ je teplota volného fluidního proudu a t_s je teplota povrchu.

Korelační funkce $f(Re_L, Pr)$ mají odlišné tvary pro různé tvarované povrchy těles, kolem kterých obtéká fluidní proud, a proto se také vzorce pro součinitele tepelného přenosu h budou měnit pro různé tvary povrchů. Pro naše účely bude postačující, když se omezíme na rovinné povrchy, což může být např. stěna nebo plochý sálavý panel s charakteristickým rozměrem L .



Obr. 29 Nucená konvekce kolem rovinného povrchu.

Pro libovolně orientovanou rovinnou plochu (svislá, nakloněná, vodorovná - viz obr. 29) můžeme použít tyto vztahy pro součinitel tepelného přestupu h a pro kritickou vzdálenost x_c přechodu laminarity do turbulence:

$$x_c = 5 \cdot 10^5 \cdot \frac{\nu}{u_\infty} \quad (\text{metry})$$

a) Nucená laminární konvekce podél roviny o délce L

$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot 0,664 \cdot (Re_L)^{1/2} \cdot (Pr)^{1/3} \quad Pr \geq 0,6, \quad x_c > L$$

b) Nucená smíšená (laminární +turbulentní) konvekce podél roviny o délce L

$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot \left[0,037 \cdot (\text{Re}_L)^{4/5} - 871 \right] \cdot (\text{Pr})^{1/3} \quad 0,6 < \text{Pr} < 60, 0 \ll x_c < L$$

$$5 \cdot 10^5 < \text{Re} \leq 10^8$$

c) Nucená turbulentní konvekce podél roviny o délce L

$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot 0,037 \cdot (\text{Re}_L)^{4/5} \cdot (\text{Pr})^{1/3} \quad 0,6 < \text{Pr} < 60, x_c \ll L$$

$$5 \cdot 10^5 < \text{Re} \leq 10^8$$

6.2.1.1 Postup pro výpočet přenosu tepla při nucené konvekci

Krok 1

Určit průměrnou teplotu konvektivní vrstvy $T_f = \frac{t_\infty + t_s}{2}$ v kelvinech a pro tuto teplotu z tabulek (viz příloha na konci této brožury) určit hodnoty ν , λ_f , Pr a Re_L . Reynoldsovo číslo Re_L dopočítáme podle jeho definičního vztahu (viz předešlá kapitola 6.2.1.1).

Krok 2

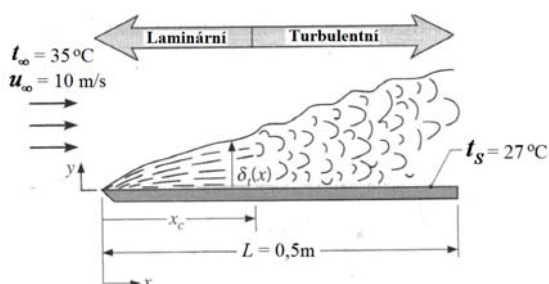
Určit, zda jde o laminární, smíšené nebo turbulentní proudění na základě porovnání kritické vzdálenosti $x_c = 5 \cdot 10^5 \cdot \frac{\nu}{u_\infty}$ a délky povrchu L :

a) Laminární $\frac{x_c}{L} \geq 0,95$, b) Smíšené $0 < \frac{x_c}{L} < 0,95$, c) Turbulentní $1 \gg \frac{x_c}{L} \rightarrow 0$

Podle toho, o který typ proudění jde, zvolit příslušný vztah a), b) nebo c) z předešlé kapitoly 6.2.1.1.

6.2.1.2 Ukázkový příklad výpočtu nuceně konvektivního přenosu tepla na rovinné ploše

Kolem rovinného povrchu délky $L=0,5\text{m}$, šířky $b=1\text{m}$ a teploty $t_s = 27^\circ\text{C}$ proudí vzduch podél rozměru L . Okolní vzduch má teplotu $t_\infty = 35^\circ\text{C}$ a rychlost $u_\infty = 10\text{ m/s}$ při normálním atmosférickém tlaku $101,325\text{ kPa}$. Vypočítejte tepelné zisky povrchu ve wattech.



Řešení:

Je zadána rychlost proudění, takže jde o nucenou konvekci. Je třeba ještě rozhodnout, jestli tato nucená konvekce je laminární, smíšená nebo turbulentní a podle toho zvolit správný vzorec pro výpočet součinitele tepelného přestupu h .

Krok 1: Nejdříve si opatříme termodynamická

data proudícího vzduchu pro jeho průměrnou teplotu T_f (v kelvinech, protože naše tabulka v příloze je rovněž v kelvinech) $T_f = \frac{35+27}{2} + 273,15 \approx 304\text{K}$. Z tabulky na konci brožury najdeme interpolaci mezi teplotami 300K a 350K tyto hodnoty:

$$\lambda_f(304\text{K}) = \left[26,3 + \frac{30-26,3}{50} \cdot 4 \right] \cdot 10^{-3} = 26,596 \cdot 10^{-3} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \quad (\text{podobná interpolace u dalších})$$

$$\nu(304\text{K}) = 16,2924 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \text{Pr}(304\text{K}) = 0,70644$$

$$\text{Re}_L = \frac{u_\infty \cdot L}{\nu} = \frac{10 \cdot 0,5}{16,2924 \cdot 10^{-6}} = 3,0689 \cdot 10^5$$

Krok 2: Ověření typu proudění.

$\text{Re}_L = 3,0689 \cdot 10^5 < 5 \cdot 10^5$ Reynoldsovo číslo je menší jak kritická hodnota $5 \cdot 10^5 \Rightarrow$ půjde asi o laminární proudění. Další důkaz laminarity poskytne porovnání kritického úseku x_c s délkou $L=0,5$ m:

$$x_c = 5 \cdot 10^5 \cdot \frac{\nu}{u_\infty} = 5 \cdot 10^5 \cdot \frac{16,2924 \cdot 10^{-6}}{10} = 0,8146\text{m} > 0,5\text{m} \Rightarrow x_c > L \text{ to znamená, že}$$

turbulence se může rozvinout až ve vzdálenosti 0,8146m, což je již mimo rozměr desky L , takže podél celé délky L je proudění **laminární**.

Krok 3: Výpočet přenosu tepla. Jde čistě o laminární proudění, vybíráme proto vztah uvedený pod bodem a) v kap. 6.2.1.1:

$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot 0,664 \cdot (\text{Re}_L)^{1/2} \cdot (\text{Pr})^{1/3} = \frac{26,596 \cdot 10^{-3}}{0,5} \cdot 0,664 \cdot (3,0689 \cdot 10^5)^{1/2} \cdot (0,70644)^{1/3} = 17,426 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

$$\Phi = S \cdot h \cdot (t_\infty - t_s) = (0,5 \cdot 1) \cdot 17,426 \cdot (35 - 27) = 69,7 \text{ Watt.}$$

Teplesší vzduch předává chladnějšímu povrchu 69,7 wattů.

6.2.2 Přirozená konvekce

V předešlých kapitolách byla diskutována nucená konvekce, tj. takové fluidní proudění, které je vyvoláno např. v exteriéru větrem a v interiéru např. teplovzdušným ventilátorem nebo elektrickou pumpou apod. Nucená konvekce se vyznačuje vyšší rychlostí proudění a vyšší rychlostí tepelného přenosu, tedy efektivnějším transportem tepla. To je vítané u chladících zařízení, ale nežádoucí u izolujících systémů například u obvodových plášťů budov.

Naproti tomu přirozená konvekce nemá externí hnací sílu, která by vedla k větším rychlostem proudění a tudíž její tepelný přenos je podstatně menší ve srovnání s nucenou konvekcí, což je zejména vítané u izolujících systémů v opláštění budov.

Ve stavební technice se přirozená konvekce v atmosférickém vzduchu vyskytuje především v interiérech, které jsou vytápěné přirozeným způsobem bez hnacího ventilátoru (radiátory

ústředního topení, klasická kamna na tuhá paliva nebo akumulací kamna na elektřinu apod.). Proudění vzduchu v interiéru je v takovém případě založeno na Archimédově vztlakové síle. Zahřátý vzduch má menší hustotu ve srovnání s chladným vzduchem a vztlaková síle jej proto nadnáší a nutí k pohybu, čímž vzniká interiérová cirkulace a obtékání vzduchu kolem stěn. Přibližně je možno říci, že přirozená konvekce je typická pro interiérové prostory, zatímco nucená konvekce pro venkovní exteriéry.

Ve světle těchto skutečností a dále vzhledem k tomu, že sálavé panely jsou umístovány ve většině případů uvnitř budov a jejich součástí nejsou žádné ventilátory, uplatňuje se u nich především přirozená konvekce. Jejich konvektivní výkon je tudíž dán přenosem tepla v rámci PŘIROZENÉ KONVEKCE a nikoliv nucené konvekce. Je proto žádoucí shromáždit potřebné výpočetní vztahy pro přirozenou konvekci podobně, jako tomu bylo v předešlé kapitole 6.2.2 pro nucenou konvekci.

Pro výpočet přenosu tepla během přirozené konvekce musíme zavést tři tzv. podobnostní čísla (nemají jednotku). Jsou definována takto:

Rayleighovo číslo Ra_L
$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_s - t_\infty) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

g je tíhové zrychlení, t_s teplota povrchu, t_∞ teplota vzduchu mimo konvektivní proud,

$\beta = 1/T_f$ je součinitel objemové roztažnosti ideálního plynu (vzduchu),

$T_f = (t_s + t_\infty)/2 + 273,15$ je průměrná teplota v kelvinech konvektivního proudu, L je

charakteristická délka povrchu, ν kinematická viskozita konvektivního vzduchu, $\alpha = \frac{\lambda_f}{\rho \cdot c}$

teplotní vodivost, ρ hustota konvektivního vzduchu, c tepelná kapacita konvektivního vzduchu.

Prandtlovo číslo Pr
$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$
 ν je kinematická viskozita konvektivního vzduchu,

$\alpha = \frac{\lambda_f}{\rho \cdot c}$ teplotní vodivost konvektivního vzduchu, λ_f tepelná vodivost konvektivního

vzduchu, ρ hustota konvektivního vzduchu, c tepelná kapacita konvektivního vzduchu

Nusseltovo číslo Nu
$$Nu_L = \frac{h \cdot L}{\lambda_f}$$
 h součinitel tepelného přestupu,

L charakteristická délka povrchu, λ_f tepelná vodivost konvektivního vzduchu

Pro výpočet přenosu tepla napříč konvektivním proudem fluida je nutné získat hodnotu součinitele tepelného přestupu h . Tento koeficient je obsažen v definici Nusseltova čísla. Samotné Nusseltovo číslo lze získat z tzv. korelačních funkcí $f(Ra_L, Pr)$, které jsou závislé na hodnotách Rayleighova a Prandtlava čísla. Z Nusseltova čísla a korelační funkce dostáváme součinitele tepelného přestupu h

$$Nu_L = f(Ra_L, Pr) \Rightarrow \boxed{h = \frac{\lambda_f}{L} f(Ra_L, Pr)}$$

a na základě hodnoty h můžeme počítat výkonový přenos tepla Φ :

$$\boxed{\Phi = S \cdot h \cdot (t_\infty - t_s)} \quad (\text{Watt})$$

kde S je plocha povrchu, kolem kterého obtéká konvektivní proud, t_∞ je teplota volného fluidního proudu a t_s je teplota povrchu.

Korelační funkce $f(Ra_L, Pr)$ mají odlišné tvary pro různě tvarované povrchy těles, kolem kterých obtéká konvektivní proud, a proto se také vzorce pro součinitele tepleného přestupu h budou měnit pro různé tvary povrchů. Pro naše účely bude postačující, když se omezíme na rovinné povrchy, což může být např. plochý sálavý panel s charakteristickým rozměrem L nebo stěna délky L .

U přirozené konvekce je přenos tepla ovlivňován orientací roviny, např. je-li rovina ložena svisle (svisle umístěný panel na boční stěně) bude konvektivní přenos tepla intenzivnější než při jejím vodorovném ložení (stropní panel umístěný na stropě). U vodorovného ložení navíc záleží na tom, jestli je sálavá plocha panelu „dole“ (stropní panel sálá na podlahu) nebo „nahore“ (panel by sálal do stropu, ale taková instalace se ovšem nedělá, neměla by smysl, avšak u vytápěné podlahy jde právě o tento případ, kdy sálání jde „nahoru“, ke stropu. Přirozená konvekce kolem vodorovné roviny s orientací „nahoru“ poskytuje větší přenos tepla než při orientaci „dolů“, a proto také stropní panely (orientace „dolů“) mají potlačený konvektivní přenos ve prospěch sálavého přenosu.

Kritická hodnota Rayleighova čísla pro přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním:

$$Ra_L \begin{cases} < 10^9 & \text{– Laminární} \\ > 10^9 & \text{– Turbulentní} \end{cases}$$

Kritická vzdálenost x_c pro přechod mezi laminárním smíšeným a turbulentním prouděním:

$$x_c = \sqrt[3]{10^9 \cdot \frac{\nu \cdot \alpha}{g \cdot \beta \cdot (t_s - t_\infty)}}, \quad \begin{array}{ll} x_c > L & \text{Laminární} \\ 0 < x_c < L & \text{Smíšené} \\ L \gg x_c \rightarrow 0 & \text{Turbulentní} \end{array}$$

Uvedme nyní výpočetní vztahy pro přenos tepla přirozenou konvekcí pro různé orientace rovinného povrchu:

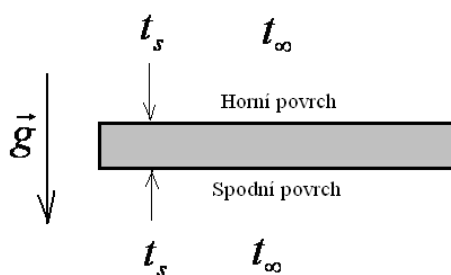
A) Přirozená konvekce - SVISLÝ POVRCH o délce L

Turbulentní a smíšené proudění
$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (Ra_L)^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

Laminární proudění
$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot \left\{ 0,68 + \frac{0,67 \cdot (Ra_L)^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} \right\}$$

B) Přirozená konvekce - VODOROVNÝ POVRCH o ploše S a obvodu O

Charakteristický rozměr $L = \frac{S}{O}$ (plocha dělená obvodem)



$t_s > t_\infty$ Teplá plocha
 $t_s < t_\infty$ Studená plocha

Horní teplý povrch nebo Spodní studený povrch:

$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot 0,54 \cdot (Ra_L)^{1/4}, \quad 10^5 < Ra_L < 10^7$$

$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot 0,15 \cdot (Ra_L)^{1/3}, \quad 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{10}$$

Horní studený povrch nebo Spodní teplý povrch:

$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot 0,27 \cdot (Ra_L)^{1/4}, \quad 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}$$

U vodorovných povrchů nemusíme zkoumat laminárnost nebo turbulenci, ale řídíme se rozsahem Rayleighova čísla.

6.2.2.1 Postup pro výpočet přenosu tepla při přirozené konvekci

Krok 1

Určit průměrnou teplotu konvektivní vrstvy $T_f = \frac{t_\infty + t_s}{2}$ v kelvinech a pro tuto teplotu z tabulek (viz příloha na konci této brožury) určit hodnoty termodynamických parametrů ν , λ_f , α , Pr. Rayleighovo číslo Ra_L dopočítáme podle jeho definičního vztahu (viz předešlá kapitola 6.2.2). Součinitel objemové roztažnosti vzduchu $\beta = 1/T_f$.

Krok 2

Pro **svisle instalovaný panel** (na bočních stěnách) určit, zda jde o laminární, smíšené nebo turbulentní proudění na základě porovnání kritické vzdálenosti $x_c = \sqrt[3]{10^9 \cdot \frac{\nu \cdot \alpha}{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}}$ a délky L panelu v jeho svislém směru:

a) Laminární $\frac{x_c}{L} \geq 0,95$, b) Smíšené $0 < \frac{x_c}{L} < 0,95$, c) Turbulentní $1 \gg \frac{x_c}{L} \rightarrow 0$

Podle toho, o který typ proudění jde, zvolit jeden ze dvou vztahů v odstavci A) předešlé kapitoly 6.2.2.

U **vodorovně instalovaných panelů** (u stropu) se neurčuje typ proudění, ale při výběru vztahů se řídíme velikostí Rayleighova čísla Ra_L a vybíráme jeden ze tří vztahů v odstavci B) předešlé kapitoly 6.2.2. ***Charakteristický rozměr vodorovných panelů L se vypočítá jako podíl topné plochy a obvodu této plochy $L = S / O$.***

6.2.2.2 Ukázkový příklad výpočtu konvektivního výkonu svislého panelu

Topný panel je instalován na boční stěně ve svislém směru a má šířku 2m a výšku $L=1m$. Jeho spodní strana je 25 cm nad podlahou a jeho zadní strana je izolována, takže hřeje pouze přední strana, která má plochu $S=2m^2$ a teplotu $T_s = 36^\circ C$. V místnosti je vzduch s normálním atmosférickým tlakem a teplotou $T_\infty = 18^\circ C$.

Průměrná teplota konvektivního proudu: $T_f = \frac{36+18}{2} + 273 = 300K$, $\beta = \frac{1}{300}K$.

Z tabulky v příloze zjistíme hodnoty termodynamických parametrů:

$$\nu = 15,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\lambda_f = 26,3 \cdot 10^{-3} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

$$\alpha = 22,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,707$$

$$\text{Rayleighovo číslo: } Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} = \frac{9,81 \cdot \frac{1}{300} \cdot (36 - 18) \cdot 1^3}{15,89 \cdot 10^{-6} \cdot 22,5 \cdot 10^{-6}} = \mathbf{1,6463 \cdot 10^9}$$

$$\text{Kritická vzdálenost: } x_c = \sqrt[3]{10^9 \cdot \frac{\nu \cdot \alpha}{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}} = \sqrt[3]{10^9 \cdot \frac{15,89 \cdot 10^{-6} \cdot 22,5 \cdot 10^{-6}}{9,81 \cdot \frac{1}{300} \cdot (36 - 18)}} = \mathbf{0,847 \text{ m}}$$

$$x_c = \mathbf{0,847 \text{ m}} < L = \mathbf{1 \text{ m}} \Rightarrow \text{\underline{smíšené konvektivní proudění}}$$

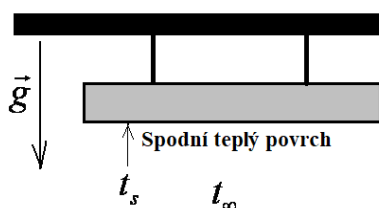
Vztah pro h u smíšeného konvektivního proudění – viz kap. 6.2.2 odstavec A):

$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (Ra_L)^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = \frac{26,3 \cdot 10^{-3}}{1} \cdot \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (1,6463 \cdot 10^9)^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{0,707} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = \mathbf{3,768 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}}$$

$$\text{Konvektivní výkon: } \Phi = S \cdot h \cdot (t_\infty - t_s) = 2 \cdot 3,768 \cdot (36 - 18) = \mathbf{135,6 \text{ Watt}}$$

6.2.2.3 Ukázkový příklad výpočtu konvektivního výkonu vodorovného panelu

Panel je instalován na stropě ve vodorovné poloze, ostatní zadání je stejné jako v předešlém případě 6.2.2.2. Pozor na charakteristický rozměr L u vodorovných panelů !



$$\text{Charakteristický rozměr } L = \frac{S}{O} = \frac{2}{6} = 0,333 \text{ m}$$

Termodynamické parametry viz předešlý příklad 6.2.2.2.

$$\text{Rayleighovo číslo: } Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} = \frac{9,81 \cdot \frac{1}{300} \cdot (36 - 18) \cdot 0,333^3}{15,89 \cdot 10^{-6} \cdot 22,5 \cdot 10^{-6}} = \mathbf{6,0792 \cdot 10^7}$$

U vodorovných panelů se nevyšetřuje typ proudění, ale při výběru výpočetního vzorce pro h se řídíme hodnotou Rayleighova čísla Ra_L – viz kap. 6.2.2 odstavec B):

Spodní teplý povrch:

$$h = \frac{\lambda_f}{L} \cdot 0,27 \cdot (Ra_L)^{1/4} = \frac{26,3 \cdot 10^{-3}}{0,333} \cdot 0,27 \cdot (6,0792 \cdot 10^7)^{1/4} = 1,883 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Konvektivní výkon: $\Phi = S \cdot h \cdot (t_\infty - t_s) = 2 \cdot 1,883 \cdot (36 - 18) = 67,8 \text{ Watt}$

Porovnáme-li výsledky výkonů pro svislý panel (kap. 6.2.2.2) a vodorovný panel (6.2.2.3), vidíme, že při vodorovné poloze panelu se podstatně zmenšila konvektivní složka výkonu, což je žádoucí, protože pak jde do sálavého výkonu větší podíl tepla. Proto je stropní umístění panelů výhodnější.

Otázky k celé kapitole č. 6:

6.1 Celkový výkon sálavého panelu je tvořen z následujících komponent:

- a) pouze sálavá komponenta, ostatní jsou zanedbatelné
- b) pouze konvektivní komponenta, ostatní jsou zanedbatelné
- c) pouze vodivostní komponenta, ostatní jsou zanedbatelné
- d) pouze sálavá a konvektivní komponenta, ostatní jsou zanedbatelné

6.2 Pohledový faktor F_{ij} mezi povrchy i a j umožňuje vypočítat tu část energie, která je

- a) vysílána povrchem i a mívá povrch j
- b) vysílána povrchem j a mívá povrch i
- c) vysílána povrchem i a dopadá na povrch j
- d) vysílána povrchem j a dopadá na povrch i

6.3 V uzavřené obálce (místnosti) musí být součet všech pohledových faktorů $\sum_{j=1}^n F_{ij}$,

které se vztahují k jednomu povrchu i

- a) roven jedné
- b) menší jak jedna, ale větší jak nula
- c) roven nule
- d) větší jak jedna

6.4 Místnost má 6 vnitřních povrchů (podlaha, strop, 4 stěny). Matice pohledových faktorů této místnosti bude mít

- a) 6 členů
- b) 12 členů
- c) 24 členů
- d) 36 členů

6.5 Radiozita povrchu je

- a) součet jeho vlastní vyzářené energie a odražené energie
- b) jeho vlastní vyzářená energie
- c) jeho pohlcená energie
- d) součet jeho odražené a pohlcené energie

6.6 Pokud v radiozitivní výpočetní metodě vyjde pro daný povrch místnosti záporná hodnota výkonu ve watttech, znamená to, že povrch

- a) do místnosti tuto energii vysílá
- b) z místnosti tuto energii odebírá
- c) polovinu této energie odráží a polovinu pohlcuje
- d) má špatně vypočítaný výkon, pouze kladné hodnoty mají smysl

6.7 V uzavřené obálce (místnosti) musí být součet všech zářivých tepelných výkonů $\sum_{i=1}^n \Phi_i$

- a) větší jak nula, záporná hodnota energie je nepřijatelná
- b) menší jak nula, kladná hodnota je nepřijatelná
- c) roven jedné
- d) roven nule

6.8 Studený vzduch je hnán větrem kolem teplé fasády rychlostí 10m/s. Jedná se o:

- a) přirozenou konvekci s tepelnými ztrátami fasády
- b) nucenou konvekci s tepelnými ztrátami fasády
- c) přirozenou konvekci, neboť Archimédova síla překoná sílu větru
- d) žádná konvekce nevznikne, rychlost větru není dostatečná

6.9 Radiátor ústředního topení s teplotou 40°C se nachází v místnosti s teplotou vzduchu 22°C. Kolem otopného tělesa vzniká:

- a) nucená konvekce
- b) přirozená konvekce
- c) konvekce nevzniká
- d) radiátory ústředního topení vykazují pouze přenos zářením

6.10 Radiátor ústředního topení s teplotou 25°C se nachází v místnosti s teplotou vzduchu 25°C. Kolem otopného tělesa vzniká:

- a) nucená konvekce
- b) přirozená konvekce
- c) konvekce nevzniká
- d) radiátory ústředního topení vykazují pouze přenos zářením

6.11 K přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním může dojít

- a) pouze u nucené konvekce
- b) pouze u přirozené konvekce
- c) u přirozené i nucené konvekce
- d) nemůže dojít u žádné konvekce

6.12 Reynoldsovo číslo Re_L má fyzikální jednotku:

- a) W/m
- b) W/m^2
- c) W/m^3
- d) nemá jednotku

6.13 Rayleighovo číslo Ra_L má fyzikální jednotku:

- a) nemá jednotku
- b) W/m
- c) W/m^2
- d) W/m^3

6.14 Jeden a tentýž sálavý panel umístíme ve stejné místnosti za stejných fyzikálních podmínek jednou svisle na stěnu a podruhé vodorovně na strop. Menší konvektivní výkon bude mít panel umístěný:

- a) u stěny
- b) u stropu
- c) nebude rozdíl mezi umístěním
- d) nelze rozhodnout, pokud neznáme velikost panelu, jeho teplotu a teplotu vzduchu

7. Literatura

- [1] J. Cihelka, *Sálavé vytápění* (SNTL, Praha 1961, druhé vydání).
- [2] J. Bašta, *Otopné plochy - otopná tělesa* - (ČVUT, Praha, 2016).
- [3] J. Bašta, *Velkoplošné sálavé vytápění* (Grada, Praha, 2010).
- [4] M. Kotrbatý, O. Hojer, Z. Kovářová, *Hospodaření teplem v průmyslu* (Agentura ČSTZ, Praha, 2009).
- [5] Dokumentace firmy Kotrbatý s.r.o.: <http://www.kotrbaty.cz/> (dostupné v r. 2019).
- [6] E. Janotková, *Technika prostředí* (VUT, Brno, 1991). ISBN 80-214-0258-X.
- [7] J. Bašta, F. Drkal, M. Kotrbatý, *Vytápění - Sálavé a teplovzdušné vytápění průmyslových a občanských staveb*. (Společnost pro techniku prostředí, Energetické poradenské středisko ČEZ, a.s., České Budějovice, 1998). ISBN 80-02-01240-2.
- [8] J. Bližňák, *Vytápění a větrání výrobní a skladové haly* (VUT, Brno, 2005) - diplomní práce, Energetický ústav FSI VUT.
- [9] T. Ficker, *Aplikovaná fyzika (S)-Tepelné záření ve stavebních konstrukcích*, Modul 03 (CERM, Brno, 2004)
- [10] T. Ficker, *Příručka stavební tepelné techniky, akustiky a denního osvětlení* (CERM, Brno, 2004).
- [11] F. P. Incopera, D. P. Dewitt, Th. L. Bergman, A. S. Lavine, *Incropera's Principles of Heat and Mass Transfer* (John Wiley & Sons, Singapore, 2017) - grafy pohledových faktorů na str. 804 - 805.

8. Pomocné internetové adresy a tabulky

Kalkulačka ztrátových tlaků vyvolaných třením:

<https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/87-vypocet-tlakove-ztraty-trenim-v-potrubi>

Kalkulačka ztrátových tlaků vyvolaných místními odpory:

<https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/46-tlakova-ztrata-mistnimi-odpory>

Tabulka pro vodu v závislosti na teplotě:

<https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/7-tepelne-vlastnosti-vody-pri-tlaku-nasyceni>

Tabulka pro trubky ocelové bezešvé:

<https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/16-ocelove-trubky-zavitove-bezne-a-bezesve>

Hledání oběhových čerpadel Grundfos:

<https://product-selection.grundfos.com/catalogue.product%20families.q%26h%20cr.html?custid=GMA1&familycode=CRFAM&flow=0&head=0&lang=ENU&qcid=444467637&time=1539764628760>

Internetová kalkulačka na řešení soustavy lineárních algebraických rovnic:

<http://wims.unice.fr/wims/wims.cgi?session=0P947DD90B.2&+lang=en&+module=tool%2Flinear%2Finsolver.en&+method=matrix&+cmd=resume>

9. Tabulky pro vodu, ocelové trubky, součinitelé místních odporů a tepelné vlastnosti vzduchu (*následující stránky*):

Tepelné vlastnosti vody při tlaku nasycení

Teplota	Hustota	Teplotní obje- mová roztá- žnost	Měrná tepelná kapacita	Měrná tepelná vodivost	Měrná teplotní vodivost	Dynamic- ká vizkozita	Kinema- tická vizkozita	Prandt- lovo číslo	
t	T	ρ	$\beta \cdot 10^4$	c	λ	$\alpha \cdot 10^8$	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	Pr
[° C]	[K]	[kg/m ³]	[1/K]	[kJ/kg.K]	[W/m.K]	[m ² /s]	[Pa.s]	[m ² /s]	-
0	273,15	999,8	-0,7	4,226	0,558	0,131	1793,636	1,789	13,66
5	278,15	999,9	-	4,206	0,568	0,135	1534,741	1,535	11,37
10	283,15	999,7	1,0	4,195	0,577	0,137	1296,439	1,300	9,47
15	288,15	999,1	-	4,187	0,587	0,141	1135,610	1,146	8,13
20	293,15	998,2	2,1	4,182	0,597	0,143	993,414	1,006	7,03
25	298,15	997,0	-	4,178	0,606	0,146	880,637	0,884	6,05
30	303,15	995,6	3,0	4,176	0,615	0,149	792,377	0,805	5,40
35	308,15	994,0	-	4,175	0,624	0,150	719,808	0,725	4,83
40	313,15	992,2	3,9	4,175	0,633	0,151	658,026	0,658	4,36
45	318,15	990,2	-	4,176	0,640	0,155	605,070	0,611	3,94
50	323,15	988,0	4,6	4,178	0,647	0,157	555,056	0,556	3,54
55	328,15	985,7	-	4,179	0,652	0,158	509,946	0,517	3,27
60	333,15	983,2	5,3	4,181	0,658	0,159	471,670	0,478	3,01
65	338,15	980,5	-	4,184	0,663	0,161	435,415	0,444	2,76
70	343,15	977,7	5,8	4,187	0,668	0,163	404,034	0,415	2,55
75	348,15	974,8	-	4,190	0,671	0,164	376,575	0,366	2,23
80	353,15	971,8	6,3	4,194	0,673	0,165	352,059	0,364	2,21
85	358,15	968,6	-	4,198	0,676	0,166	328,523	0,339	2,04
90	363,15	965,3	7,0	4,202	0,678	0,167	308,909	0,326	1,95
95	368,15	961,9	-	4,206	0,680	0,168	292,238	0,310	1,85
100	373,15	958,3	7,5	4,211	0,682	0,169	277,528	0,294	1,74
110	383,15	950,9	8,0	4,224	0,684	0,170	254,973	0,268	1,58
120	393,15	943,1	8,5	4,232	0,685	0,171	235,360	0,244	1,43
130	403,15	934,8	9,1	4,250	0,686	0,172	211,824	0,226	1,31
140	413,15	926,1	9,7	4,257	0,684	0,172	201,036	0,212	1,23
150	423,15	916,5	10,3	4,270	0,684	0,173	185,346	0,201	1,16
160	433,15	907,4	10,8	4,285	0,680	0,173	171,616	0,191	1,10
170	443,15	897,4	11,5	4,396	0,679	0,172	162,290	0,181	1,05
180	453,15	886,6	12,1	4,396	0,673	0,172	152,003	0,173	1,01
190	463,15	876,1	12,8	4,480	0,670	0,171	145,138	0,166	0,97

OCELOVÉ TRUBKY BEZEŠVÉ									
Vnější pr./tl. stěny v mm		Jmen. světlost v mm	Vnější průměr trubky	Tloušťka stěny trubky	Vnitřní průměr trubky	Objem 1,0m trubky	Světlý průřez trubky	Povrch 1,0m trubky	Hmotnost 1,0m trubky
D/tl. stěny		DN	D	t	d _i	V	A	S	M
[mm/mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[dm ³ /m]	[m ² ·10 ⁻⁴]	[m ² /m]	[kg/m]
22,0/2,6	x	15	22,00	2,60	16,80	0,2217	2,2176	0,0691	1,244
28,0/2,6	x	20	28,00	2,60	22,80	0,4083	4,0828	0,0880	1,629
31,8/2,6	x	25	31,80	2,60	26,60	0,5557	5,5572	0,0999	1,872
38,0/2,6	x	32	38,00	2,60	32,80	0,8450	8,4496	0,1194	2,270
44,5/2,6	x	40	44,50	2,60	39,30	1,2130	12,1304	0,1398	2,687
51,0/2,6		40	51,00	2,60	45,80	1,6475	16,4748	0,1602	3,103
57,0/2,9	x	50	57,00	2,90	51,20	2,0589	20,5887	0,1791	3,869
60,3/2,9		50	60,30	2,90	54,50	2,3328	23,3283	0,1894	4,105
70,0/3,2		50	70,00	3,20	63,60	3,1769	31,7690	0,2199	5,272
76,0/3,2	x	65	76,00	3,20	69,60	3,8046	38,0459	0,2388	5,745
89,0/3,6	x	80	89,00	3,60	81,80	5,2553	52,5529	0,2796	7,582
108,0/4,0	x	100	108,00	4,00	100,00	7,8540	78,5398	0,3393	10,259
133,0/4,5	x	125	133,00	4,50	124,00	12,076	12,763	0,4178	14,261
159,0/4,5	x	150	159,00	4,50	150,00	17,671	176,715	0,4995	17,146
219,0/6,3	x	200	219,00	6,30	206,40	33,459	334,587	0,6880	33,047
273,0/7,0	x	250	273,00	7,00	259,00	52,685	526,853	0,8577	45,920
324,0/8,0	x	300	324,00	8,00	308,00	74,506	745,060	1,0179	62,344
377,0/9,0	x	350	377,00	9,00	359,00	101,223	1012,229	1,1844	81,679
457,0/14,0		400	457,00	14,00	429,00	144,545	1445,455	1,4357	152,951
508,0/14,0		450	508,00	14,00	480,00	180,956	1809,557	1,5959	170,559

Součinitelé místních odporů ξ

Armatura	Součinitel místního odporu ξ
Koleno	1,5
Ventil	0,7
Redukce	1
Kotel	3
T-kus	2,0
Rozšíření	1,0
Šoupátko	0,5
Radiátor ÚT	2,5

Termodynamické vlastnosti vzduchu při
normálním atmosférickém tlaku.

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$\lambda_f \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Vzduch, $M = 28.97$ kg/kmol							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	257	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536