

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING SERVICES

NOČNÍ CHLAZENÍ BUDOV V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLICKY

NIGHT COOLING IN CONDITION OF CZECH REPUBLIC

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DISSERTATION

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ING. JIŘÍ ŠÍMA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. ONDŘEJ ŠIKULA, PH.D.

BRNO 2016

Klíčová slova

noční chlazení, pasivní chlazení, alternativní chlazení, sálání proti noční obloze, software TRNSYS, software CalA, tepelná pohoda.

Keywords

Night cooling, passive cooling, alternative cooling, night sky cooling, software TRNSYS, software CalA, thermal comfort.

OBSAH

OBSAH	3
1 ÚVOD	4
1.1 VÝZNAM ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY.....	4
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
2.1 PASIVNÍ CHLAZENÍ	5
2.2 PŘEHLED SYSTÉMŮ NOČNÍHO CHLAZENÍ	5
2.2.1 <i>Klasifikace systémů pro noční chlazení</i>	5
2.2.2 <i>Noční větrání</i>	6
2.2.3 <i>Rozdělení systémů sálavého chlazení</i>	8
2.2.4 <i>Nepřímé adiabatické noční chlazení</i>	12
2.3 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU	13
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	14
4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	14
4.1 EXPERIMENTÁLNÍ ŘEŠENÍ	14
4.2 MATEMATICKÝ MODEL STŘEŠNÍHO ABSORBÉRU	14
4.3 ENERGETICKÉ SIMULACE	14
5 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE	15
5.1 OPTIMALIZACE VÝROBY CHLADU ZA POMOCI ADIABATICKÉHO CHLAZENÍ	15
5.2 OPTIMALIZACE PROVOZU ADIABATICKÉ PRAČKY VZDUCHU	15
5.3 VYUŽITÍ SOLÁRNÍHO ABSORBÉRU V PODMÍNKÁCH ČR	16
5.3.1 <i>Princip systému se solárním absorbérem</i>	16
5.4 POROVNÁNÍ VARIANT SYSTÉMŮ NOČNÍHO CHLAZENÍ.....	19
6 ZÁVĚR DISERTAČNÍ PRÁCE	25
6.1 VÝZNAM PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU	25
6.2 VÝZNAM PRO PRAXI	25
7 LITERATURA.....	26
8 SEZNAM AUTOROVÝCH PRACÍ.....	27
ŽIVOTOPIS.....	28

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Přírodní způsoby chlazení staveb využívající obnovitelné zdroje energie předcházely systémům strojního chlazení a byly jediným způsobem jak ochlazovat stavby. Postupem času byly tyto metody s rozvojem účinného strojního chlazení vytlačeny na okraj zájmu. Teprve až energetická krize v 70. letech vzbudila ve snaze snížit závislost na ropě větší zájem o využití alternativních zdrojů energie. Do středu pozornosti se tehdy dostala solární energie a její využití jako zdroje tepla.

Dalším impulzem pro rozvoj obnovitelných zdrojů energie a snižování energetické náročnosti byla rostoucí cena elektrické energie během odběrových špiček. Ty byly mimo jiné vyvolány i stále rostoucím využíváním klimatizací. Díky tomu se opět do popředí zájmu dostaly i systémy pasivního chlazení a začal systematictější výzkum využití pasivního a nízkoenergetického chlazení. V neposlední řadě byl zájem o obnovitelnou energii podpořen i snahou o snižování emisí tzv. skleníkových plynů, kterým je přičítáno globální oteplování země.

Prvním logickým krokem v řešení problematiky nízkoenergetického a nočního chlazení budov v podmínkách České republiky je tedy sestavení přehledu pasivních chladicích technik zkoumaných a využívaných ve světě.

2.1 PASIVNÍ CHLAZENÍ

Pasivní chlazení jsou jednoduché chladicí techniky, které k ochlazování interiéru budovy využívají přírodní obnovitelné zdroje. Není ovšem vyloučeno do systému pasivního chlazení instalovat ventilátor, nebo čerpadlo pokud to napomůže zvýšení efektivity dané chladicí techniky. I při použití mechanických zařízení se účinnost těchto systémů pohybuje nad účinností konvenčních systémů. Například ve studii [3] se výrobou chladu v kombinovaných fototermických panelech povedlo během měření dosáhnout účinnosti výroby chladu $COP\ 19 \div 59$.

2.2 PŘEHLED SYSTÉMŮ NOČNÍHO CHLAZENÍ

Systémy nočního chlazení spadají pod pasivní chlazení, protože využívají obnovitelnou energii při minimálních spotřebě primární energie nutné pro svůj provoz. V principu každý systém nočního chlazení využívá lepších teplotních podmínek v průběhu noci, aby odčerpával z budovy tepelnou energii, která se v ní naakumulovala během jejího denního provozu.

2.2.1 Klasifikace systémů pro noční chlazení

Jednotlivé systémy nočního chlazení pak lze rozdělit podle různých hledisek.

Podle zdroje z kterého je chladicí energie čerpaná:

- Okolní vzduch
- Vesmír
- Voda

Podle způsobu jakým je naakumulované teplo z konstrukce budovy odebíráno:

- Přestupem (konvekce) – např. noční větrání
- Vedením (kondukce) – např. tepelně aktivované konstrukce
- Sáláním (radiace)

Podle způsobu jakým je odpadní teplo předáváno vně budovy:

- Noční přirozené větrání
- Noční ventilační větrání
- Sálání proti noční obloze
- Nepřímé adiabatické chlazení
- Přímé adiabatické chlazení

2.2.2 Noční větrání

Noční větrání patří k základním a asi nejrozšířenějším systémům nočního chlazení budov. Tepelné zisky z vnitřního i venkovního prostředí, jsou během denního provozu akumulovány do konstrukcí a vybavení budovy. Během následující noci, je do budovy přiváděn chladný venkovní vzduch, který teplo naakumulované v budově odebírá a odvádí mimo budovu. Noční výměna vzduchu může probíhat přirozeně nebo nuceně. Oba způsoby mají své výhody i nevýhody.

Omezení pro noční větrání

Základním předpokladem pro úspěšné provozování systému nočního větrání, ať už přirozeného nebo nuceného, je vysoce hmotná konstrukce stavby. Akumulační hmota stavby nesmí být zakrytá, tak aby kolem ní mohl proudit chladný větrací vzduch a odebrat akumulované teplo.

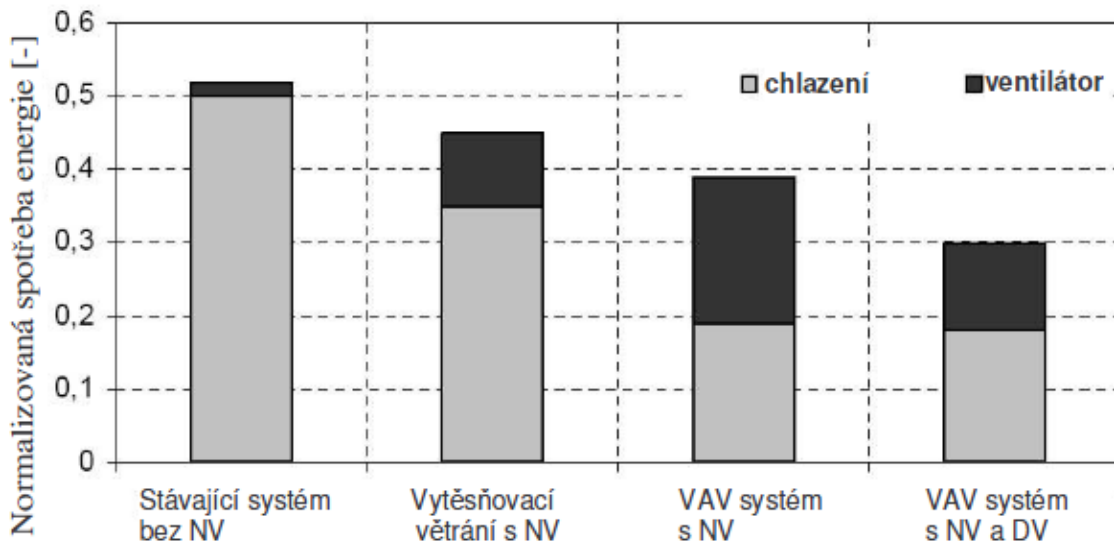
Pokud je v budově využíváno noční větrání, není žádoucí, aby byla budova během dne větrána přirozeně neupraveným venkovním vzduchem. Teplý venkovní vzduch by do budovy vnášel zbytečnou tepelnou zátěž. Je vhodné, aby byla budova během dne větrána nuceně vzduchotechnickou jednotkou s vysokou účinností zpětného získávání tepla.

Samozřejmě kromě splnění předpokladů pro správné fungování ze strany stavby, je nutné, aby pro provozování nočního větrání byly i vhodné klimatické podmínky. Jedná se především o denní průběh venkovních teplot. Vzhledem k principu nočního větrání je žádoucí co největší amplituda kolísání denní teploty. Jak uvádí Givoni v [4] u těžkých a dobře izolovaných staveb s dobře řešeným stíněním lze dosáhnout poklesu maximální vnitřní teploty o 35÷45% pod maximální teplotu exteriéru. Podobně se budova chová i z pohledu minimálních teplot, tedy opět minimální vnitřní teplota se obvykle pohybuje o 35÷45% nad minimální teplotou v exteriéru. Typicky se tedy amplituda kolísání vnitřní teploty pohybuje okolo 10÷20% amplitudy kolísání venkovní teploty.

Skvěle využitelné je noční chlazení zejména v pouštních oblastech, kde je extrémní amplituda kolísání denní teploty a to i o více jak 15 K a noční teploty zde klesají pod 20 °C. V klimatických podmínkách České republiky se podle [5] pohybuje amplituda kolísání teplot za jasných slunečných dnů mez 7÷9 K.

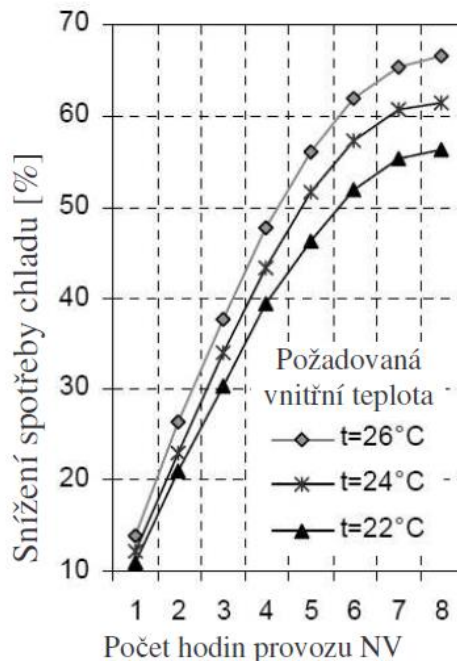
Studie nočního větrání

Nočním chlazením se zabývala řada prací. Olsen a Chen publikovali rozsáhlou studii [6] ve které zpracovali počítačové simulace pro 7 hodinové noční chlazení (od 23 do 6 hod) programem „Energy Plus“, vycházeli z klimatických dat pro Velkou Británii (Heathrow). Simulace byla provedena pro několik variant provozu. Jako referenční byl provoz stávajícího systému bez nočního větrání (NV). K tomu byly jako alternativy vytěšňovací větrání s nočním větráním. Systém větrání s variabilním průtokem vzduchu (VAV). Jako nejefektivnější větrání s variabilním průtokem, nočním větráním a denním větráním (DV). Výsledky a jejich srovnání pomocí spotřeby energie jsou vyhodnoceny v grafu, viz Obr. 2.



Obr. 2 – Vliv nočního větrání na spotřebu energie budovy

Todorovič se ve své disertační práci [7] také věnoval vyhodnocením možných úspor při použití nočního větrání. Simulaci prováděl ve vlastním simulačním programu s klimadaty pro oblast Bělehradu. Na Obr. 2 jsou vyobrazeny výsledky výpočtů pro různé požadované teploty interiéru a různou provozní dobu nočního větrání. Na obrázku je názorně vidět, že nestačí pouze „bezhlavě“ větrat, ale je potřeba volit optimální dobu provozu zařízení, protože zbytečně dlouhá doba provozu má za následek nárůst spotřeby energie na provoz při již malém efektu na snížení spotřeby chladu. Jako optimální by se dalo uvažovat s dobou větrání 5÷6 hodin.

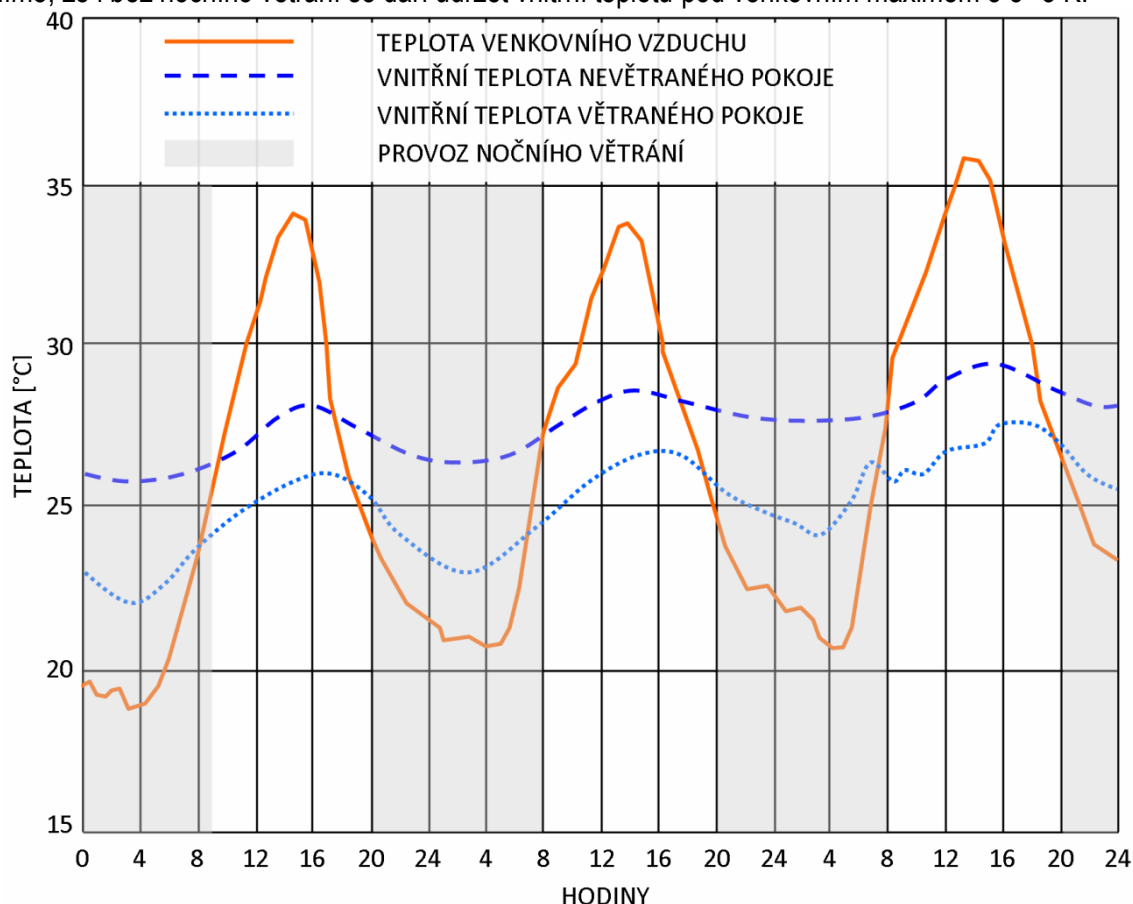


Obr. 3 – Vliv doby provozu nočního větrání na úsporu energie [7]

Další výzkum nočního větrání probíhal Givonim [4] v Izraeli v ústavu pro pouštní výzkum. Tam bylo provedeno experimentální měření na dvou identických testovacích místnostech. Tři stěny byly z betonu o tloušťce 20 cm, čtvrtá stěna byla řešená jako vyměnitelná a její konstrukce byla sendvičová z překližky a 5 cm tepelné izolace. Střecha byla betonová o tloušťce 15 cm. Izolace byla provedena z vnější strany obálky. Jedna z testovacích místností byla během dne i noci stále uzavřená. Oproti tomu u druhé testovací místnosti

bylo provozováno přirozené noční větrání otevřením dveří, během dne pak byla místnost uzavřena. Na Obr. 4 můžeme vidět průběh teplot v jednotlivých testovacích místnostech naměřených během experimentu.

Průběh teploty interiéru během dne ukazuje, že v klimatech s velkou amplitudou kolísání venkovní teploty, lze dosáhnout značného poklesu teploty interiéru pod teplotu venkovního prostředí. Z experimentu je vidět, že i testovací místnost, u které nebylo provozováno noční větrání, ale zároveň nebyla větrána ani během denních hodin, byla teplota interiéru citelně pod teplotou venkovního prostředí. Toho bylo dosaženo velkou tepelnou setrvačností konstrukcí testovací místnosti a důslednou eliminací venkovních tepelných zisků. Pokud by byla místnost nadměrně větrána během denních hodin, přiblížila by se teplota vnitřního prostředí venkovní teplotě. Je zřejmé, že snaha o „chlazení“ budovy pomocí denního nadměrného větrání by byla silně kontraproduktivní. Vidíme, že i bez nočního větrání se daří udržet vnitřní teplotu pod venkovním maximum o 5÷8 K.



Obr. 4 – Průběh teplot při experimentálním měření nočního chlazení [4]

Větrání v průběhu noci ještě více ochlazuje vnitřní hmotu stavby a ta během následujících denních hodin snižuje vnitřní teplotu. Pokles vnitřní teploty během dne pod venkovní maximum při nočním větrání je zhruba úměrný venkovnímu výkyvu teplot. V suchých pouštních oblastech s denním teplotním výkyvem 15÷20 K můžeme očekávat pokles vnitřní teploty během dne o 2÷3 K pod úroveň podobných budov, které nemají provozováno noční větrání. Vnitřní maximální teplota může být snížena asi o 7÷8 K pod venkovní maximum.

2.2.3 Rozdělení systémů sálavého chlazení

Systémy sálavého chlazení lze rozdělit do třech základních typů podle způsobu, jakým je tepelná energie nahromaděná v budově vyzařována proti obloze.

- Masivní střešní konstrukce s pohyblivou izolací

- Lehké radiátory
- Nezasklené solární kolektory pro noční sálání

Masivní střešní konstrukce s pohyblivou izolací

Jedná se o systémy, kdy je sálání proti noční obloze vystaveny přímo střešní konstrukce, ta pak v jednom prvku plní dvě funkce. Jednak je radiátorem vyzařujícím přes noc teplo a za druhé je zásobníkem chladu pro následující den. Přes den je střecha zakryta tepelnou izolací aby se její hmota neohřívala od slunečního záření, a ze strany interiéru do sebe absorbuje teplo produkované v budově. Během noci je izolace z povrchu střechy odstraněna a konstrukce střechy je tak vystavena sálání proti noční obloze a ztrátě konvekcí do okolního vzduchu.

Výhodou tohoto systému je, že nedochází ke zbytečným ztrátám chladicí energie při jejím transportu do budovy. Alternativně může být masivní konstrukce střechy nahrazena lehkou konstrukcí z trapézového plechu, nad kterou jsou vaky naplněné vodou. Tyto vaky pak přebírají funkci akumulace tepla.

Na základě tohoto principu byl Haroldem Hayem vyvinut a komercializován systém „Skytherm“. Teplota povrchu stropní konstrukce je po většinu noci vyšší než teplota okolního vzduchu a tak se na odvodu tepla kromě sálání podílí i konvekce. Výkon tohoto systému se díky tomu zvyšuje i s rostoucí rychlostí větru, kdy dochází k intenzivnější ztrátě tepla konvekcí. Průměrná tepelná ztráta z konstrukce střechy se pak může pohybovat kolem 120 W/m² v pouštních oblastech, při větrné noci. Při vhodné konstrukci lze ochladit hmotu stropní konstrukce na teplotu podstatně nižší než denní vnitřní průměrná teplota.

I přesto, že možný dosažitelný výkon vypadá lákavě, hlavní nevýhodou tohoto systému je systém odkrývání a zakrývání konstrukce střechy tepelnou izolací. Jak i praxe ukázala, jedná se o slabý článek systému, mechanismus pro zatahování izolace je náchylný k poruchám. Provoz takového systému by pak vyžadoval provozní údržbu, což by finančně vyrobenou chladicí energii znevýhodňovalo. Navíc je tento systém použitelný jen pro podstřešní prostory a ideálně geometricky jednoduchou stavbu.

Lehké radiátory

Systémy s lehkými radiátory jsou zpravidla tvořeny lehkým neizolovaným plechem, který tvoří plášť střechy, pod kterým je vytvořen kanál pro proudění vzduchu. Pod kanálem je tepelně izolovaná konstrukce střechy. V podstatě se jedná o rozšíření nočního větrání o odvod tepla sáláním proti noční obloze. Během dne je mezera mezi pláštěm střechy a izolací provětrávána do exteriéru. Během nočních hodin je pak tímto prostorem nasáván vzduch pro větrání budovy.

Plášť střechy se u tohoto systému chlazení podchlazuje pod teplotu okolního vzduchu. Vysálaná tepelná energie je tedy snižována tepelným ziskem konvekcí z okolního vzduchu. U tohoto systému je tedy nevýhodná vysoká rychlost větru, která díky zvýšené konvekcii přibližuje teplotu povrchu střechy okolnímu vzduchu. Získaná chladicí energie je do budovy transportována větracím vzduchem a je ukládána stejně jako u nočního větrání do hmoty budovy. Při použití tohoto systému a jeho napojení na rozvody vzduchotechniky by bylo teoreticky možné větrat i větší budovy.

Nevýhodou ovšem je nemožnost osadit na střechu technologie, hygiena provozu, kdy by v prostoru pod pláštěm střechy mohlo docházet ke kondenzaci vlhkosti a usazování prachu. Stejně jako u předchozího systému by pak bylo nutné hradit zvýšené náklady na provoz a údržbu systému.

Nezasklené solární absorbery pro noční sálání

Nezasklené solární absorbery slouží k ochlazování vody protékající absorberem a cirkulující přes budovu. Tyto absorbery mohou být umístěné na střeše budovy a pomocí sálání proti noční obloze ochlazují cirkulující vodu. Takto ochlazená voda pak může být v budově použita různými způsoby:

- V některých systémech voda cirkuluje přes vodní nádrž umístěnou pod střešními absorbery, tím tuto nádrž ochlazuje a akumuluje do ní chladicí energii.
- Voda může cirkulovat přes tepelně aktivovanou konstrukci a odebírat jí tak teplo. Získaný chlad je pak akumulovaný přímo do konstrukce budovy. Tento typ absorberu může během nočních hodin fungovat jako nízko účinný solární kolektor pro předeřevu teplé vody.

Z uvedených možností využití sálání proti noční obloze se právě solární absorbery jeví jako nejperspektivnější. Mají jednoduchou konstrukci, nevyžadují složité konstrukční řešení stavby. Stavba se tak nemusí výrazně podřizovat potřebám systému chlazení. Jejich provoz je relativně spolehlivý, není složitější než v případě solárních kolektorů. Bylo by možné je aplikovat i do stávajících budov a přenos energie do interiéru realizovat přes systémy sálavého chlazení například ve formě kapilárních rohoží v omítce. U nových staveb by bylo ideální jejich spojení se systémy temperování betonového jádra (TABS) případně systémy blízko povrchového TABS. U pasivních staveb založených na vrstvě pěnoskla je možné vyrobený chlad ukládat i do aktivované základové desky.

Výhodou pak je možnost jednoduchého dvojího využití těchto systémů a to jak ke chlazení, tak k předeřevu teplé vody.

Studie chlazení sáláním proti noční obloze

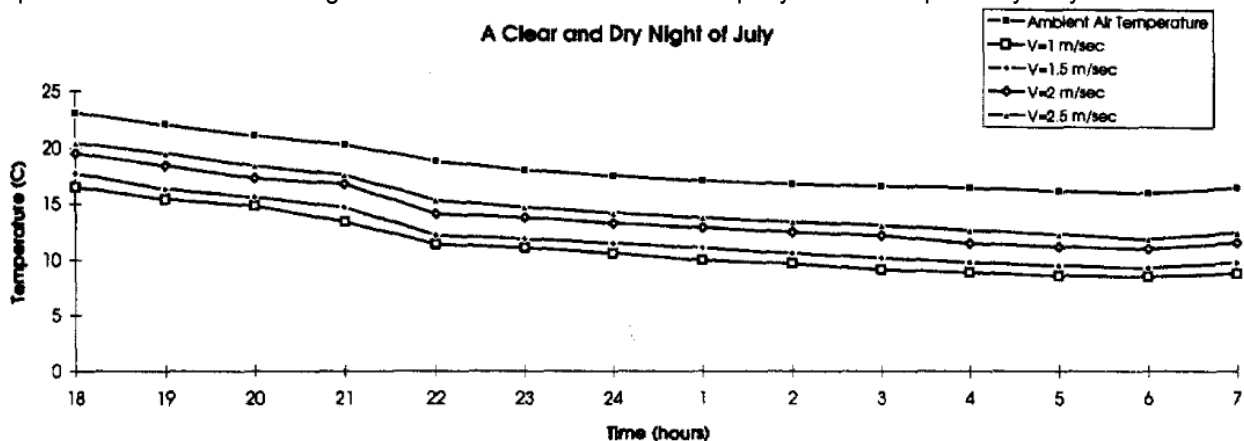
Stejně jako u nočního větrání i u odvodu teplené energie sáláním proti noční obloze byla provedena řada teoretických a v menší míře i praktických studií. Většina novodobých studií se zabývá právě lehkými radiátory ve formě nezasklených kolektorů. Například Treemorn Prommajak se ve studii [8] zabýval experimentálním ověřením odvodu tepla sáláním proti noční obloze v klimatických podmínkách Thajska v provincii Loei. Experiment probíhal v horkém a vlhkém klimatu během raného období dešťů. Sálavé plochy byly tvořeny hliníkovým plechem s černým nátěrem. Při experimentu došlo při jasné obloze k podchlazení plochy radiátoru o 5 K pod teplotu okolního vzduchu. Vzduch, který byl použit jako teponosné medium, se v tomto radiátoru podařilo ochladit o 1,5 °C pod teplotu okolního vzduchu.

Studie [9] prováděná v Solar Platform of Almeria na jihu Španělska se zabývala experimentálním ověřením dosažitelného sálavého výkonu panelů. Jako teponosné médium byla použita voda a testovány byly tři prototypy panelů. První panel byl z organických materiálů s emisivitou povrchu 0,9. Druhý prototyp byl z plechu, jehož povrch byl opatřen černou selektivní vrstvou s emisivitou 0,02. Třetí prototyp byl opět z plechu a jeho povrch byl opatřen bílou vrstvou s emisivitou 0,5. Měření probíhalo v červenci 2013 a trvalo pět dnů. Během tohoto měření se podařilo stanovit výkon jednotlivých prototypů. Nejlépe dopadl prototyp 1, který byl tvořen organickými materiály, u něj byl naměřen maximální výkon cca 65 W/m² jako druhý byl prototyp 3 s bílým nátěrem, u kterého bylo naměřeno cca 45 W/m². Prototyp 2 se selektivní vrstvou byl díky minimální emisivitě poslední s výkonem cca 8 W/m². Tento poslední vzorek díky nízké emisivitě ztrácel sáláním minimální množství energie a jeho ztráta tedy odpovídala ztrátám konvekcí a kondukcí.

Potenciálem sálání proti noční obloze nezasklených kolektorů a PV/T kolektorů se zabývala studie [3][3]. V rámci studie bylo provedeno měření dvou typů panelů nezaskleného kolektoru a termicko-fotovoltaických panelů. Během měření v roce 2014 se podařilo naměřit chladicí výkon pohybující se mezi 20 ÷ 75 W/m². Oba

typy panelů vykazovaly téměř shodné výsledky. Během noci tady byly panely schopny vyprodukovat $200 \div 900 \text{ kWh/m}^2$. Účinnost systému (COP) se pohybovala mezi $19 \div 59$, což je velmi vysoká hodnota ukazující potenciál této metody chlazení.

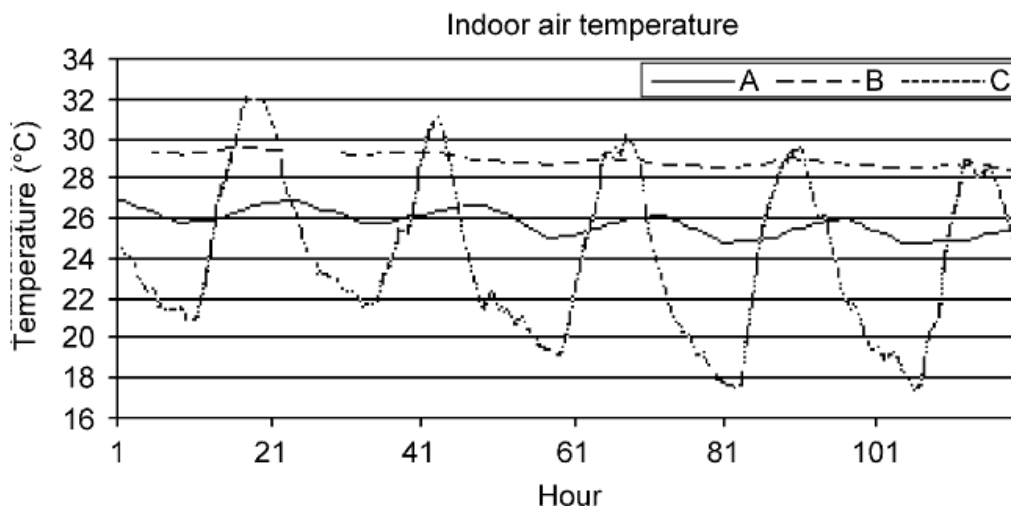
Mihalakakou se ve své práci [10] zaměřil na zakrytý solární absorbér. Pro zakrytí absorbéru použil polyetylenovou fólii, ta brání ofukování plochy absorbéru větrem. Díky tomu dojde při podchlazení absorbéru k omezení tepelných zisků konvekci z okolního vzduchu. Absorbér tak může snáze snížit svou teplotu pod teplotu okolního vzduchu. V grafu na Obr. 5 vidíme dosažené teploty absorbéru při různých rychlostech větru.



Obr. 5 – Teplota zakrytého absorbéru při jasné obloze

B. Orel se věnoval v práci [11] měření vlivu selektivních a neselektivních nátěrů sálavých ploch na jejich teplotu. Při měření bylo dosaženo podchlazení absorbéru o 10 K pod teplotu okolního vzduchu, speciální selektivní nátěry (s plnivem BaSO_4) sice zlepšili výkon, nicméně efekt byl malý.

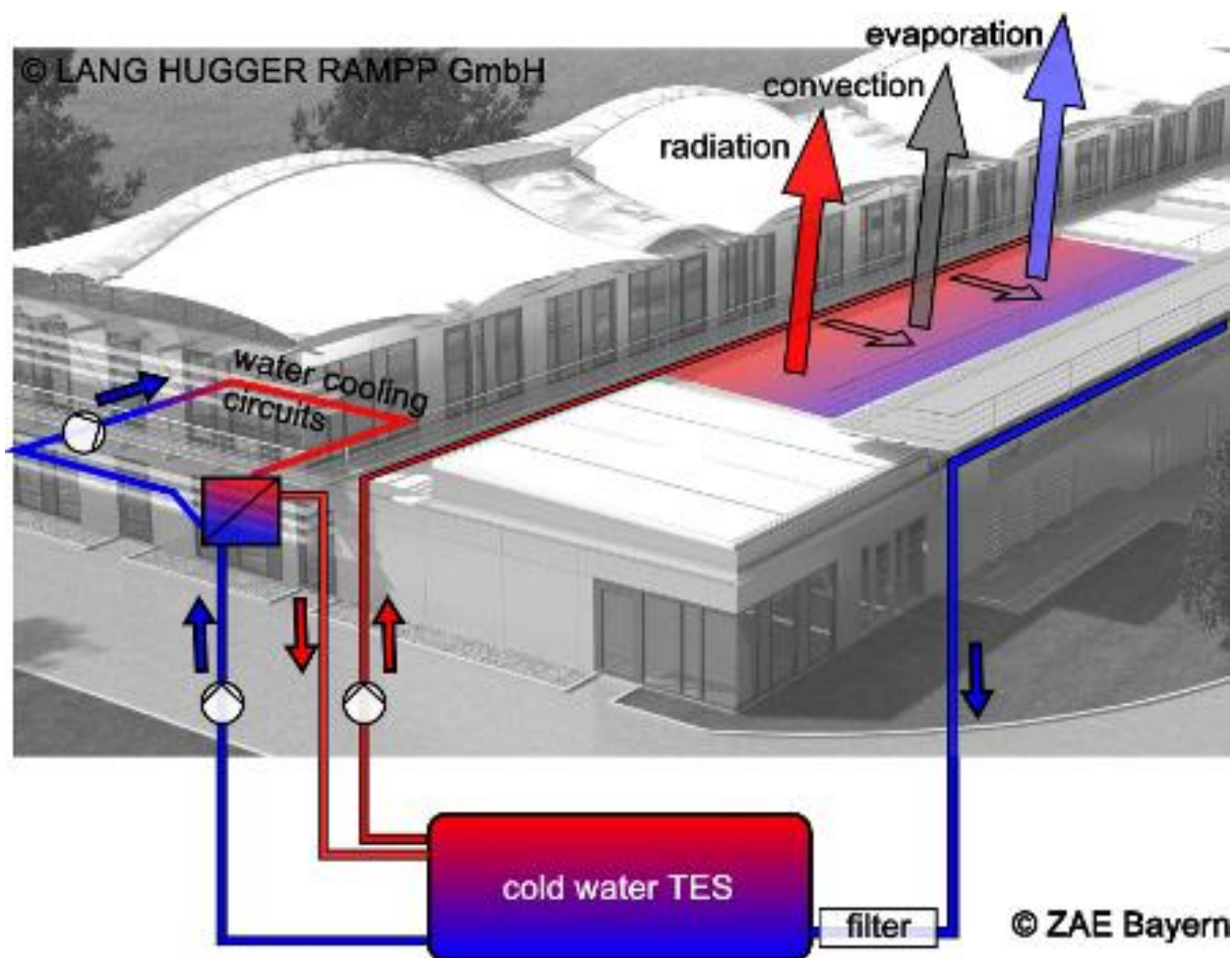
Bagiorgas se ve své práci [12] zabýval teoretickým a experimentálním ověřením lehkých kovových absorbérů, určených k podchlazování větracího vzduchu pod teplotu okolí. Měření prováděl na dvou podobných teplotních zónách, kdy jedna byla větrána se solárním absorbérem a druhá byla bez jakéhokoliv chladicího zařízení. Na Obr. 6 můžeme vidět měřené průběhy teplot, kde vidíme, že díky použití vzduchového solárního absorbéru se podařilo snížit teplotu v chlazené místnosti o $2,5 \div 4 \text{ K}$ oproti místnosti nechlazené.



Obr. 6 – Průběhy teplot v chlazené místnosti (A), nechlazené místnosti (B) a průběh okolní teploty (C)

2.2.4 Nepřímé adiabatické noční chlazení

V rámci nočního chlazení se jedná o systémy, které kombinují odvod tepla sáláním proti noční obloze s adiabatickým chlazením. Technicky je systém řešen tak, že během noci je na střešní plášť, který je vystaven sálání proti noční obloze rozstříkovaná voda. Část vody se ze střechy odpařuje a tím odebírá teplo a zbylá voda se ještě ochlazuje od povrchu střechy, který je ochlazován dlouhovlnným vyzařováním. Voda, která je na povrchu střechy ochlazená a steče, je jímána v nádrži, kde je uchována pro použití k chlazení budovy během následujícího dne. Jedná se o hydraulicky otevřený systém. Jako příklad může posloužit budova, centra pro aplikaci energetického výzkumu ve Würzburgu, schéma viz Obr. 7.



Obr. 7 – Nepřímé adiabatické chlazení [13]

2.3 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

Všechny výše uvedené způsoby vykazují na základě provedených teoretických i experimentálních studií potenciál pro jejich využití k snížení energetické náročnosti chlazení budov. Využití a účinnost každého ze systémů je samozřejmě závislá na klimatických podmínkách v místě instalace a na stavbě samotné, kde má být systém aplikován. Některé z metod, především masivní střešní radiátory s pohyblivou izolací jsou v praxi z konstrukčních důvodů obtížně využitelné a na moderní stavby spíše nevhodné. Ostatně i praxe jejich komplikované využití potvrdila. Oproti tomu systémy nočního větrání a systémy se lehkými střešními absorbéry skrývají velký potenciál. Obzvláště pak systém s fototermickými panely, které při měření dosáhly velmi vysokých hodnot účinnosti, které se během měření pohybovali mezi 19 ÷ 59. Systémy nočního chlazení jsou v dnešní době využívány a lze je bez větších problémů aplikovat i na moderní stavby. Stejně tak je to se systémy využívající střešní solární absorbéry, které během noci ochlazují přes vodní okruh konstrukce budovy. Tyto systémy v praxi tak často využívány nejsou, ale díky principu jejich funkce jsou také bez problémů aplikovatelné na moderní stavby, aniž by se jim musel výrazně podřizovat vzhled budovy.

Vzhledem k tomu, že se jedná o systémy, jejichž účinnost výrazně závisí na klimatických podmínkách a na energetickém chování budovy. Je nutné jejich návrh řešit podrobněji ideálně za pomoci počítačových simulací dynamického chování budovy. Jejich výsledky umožní zvolit pro dané klima a konkrétní budovu ten správný systém případě jejich kombinace. To je velký rozdíl oproti stávající praxi, kdy většina budov 100% spoléhá na strojní chlazení. K jeho návrhu se pak většina projektantů spokojí s výpočtem maximálních tepelných zátěží, bez přihlídnutí k dynamickému tepelnému chování budovy.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Předmětem předkládané disertační práce je aplikace alternativních chladicích technik v podmínkách České republiky, za účelem snížení energetické náročnosti chlazení budov. K dosažení vytyčeného cíle je zapotřebí splnit řadu dílčích úkolů:

1. Analýza současného stavu v oblasti nízkoenergetického a pasivního chlazení
2. Posouzení možné optimalizace konvenční strojní výroby chladu využitím alternativních chladicích technik
3. Vytvoření matematického modelu střešního absorbéru pro noční odvod tepelné zátěže budovy
4. Vytvoření matematického modelu střešního absorbéru pro denní přehřev teplé vody
5. Vytvoření modelu referenční budovy a jejího systému TZB za účelem dynamických simulací
6. Vyčíslení a vzájemní porovnání dosažitelných úspor na strojní výrobě chladu aplikací nočního chlazení

4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ ŘEŠENÍ

Pro řešení optimalizace strojní výroby chladu bylo pro ověření teoretických výpočtů zvoleno experimentální ověření vypočtených dat. Experimentální ověření bylo realizováno v laboratořích ústavu Technických zařízení budov, fakulty Stavební, VUT v Brně.

4.2 MATEMATICKÝ MODEL STŘEŠNÍHO ABSORBÉRU

Pro následné energetické simulace bylo potřeba matematicky popsat uvažovaný typ absorbéru. Za tímto účelem byla na 2D modelu absorbéru provedena řada simulací pomocí softwaru Ansys Fluent zkoumající chování absorbéru při odvodu tepelné zátěže sáláním proti noční obloze. Do těchto simulací vstupovaly materiálové charakteristiky a okrajové podmínky jako například rychlost větru, teplota střechy pod absorbérem, efektivní teplota oblohy, teplota a průtok teplotnosného média, atd. Z výsledků provedených simulací byly aproximovány vztahy pro sdílení tepla konvekcí a radiací.

Stejně tak byla provedena řada simulací i pro denní provoz, kdy absorbér přehřívá teplou vodu. Pro stanovení výkonnostní charakteristiky panelů bylo vytipováno 9 kombinací okrajových podmínek. Tepelná akumulace panelů byla zanedbána. Metodou CFD s využitím softwaru Fluent byly na 2D modelu jedné lamely panelu vypočteny tepelné výkony ve W/m. Složenou metodou nejmenších čtverců byla následně definovaná funkční závislost intenzity sluneční radiace I , rychlosti větru w a teplotního rozdílu Δt na tepelném výkonu 1 m lamely.

4.3 ENERGETICKÉ SIMULACE

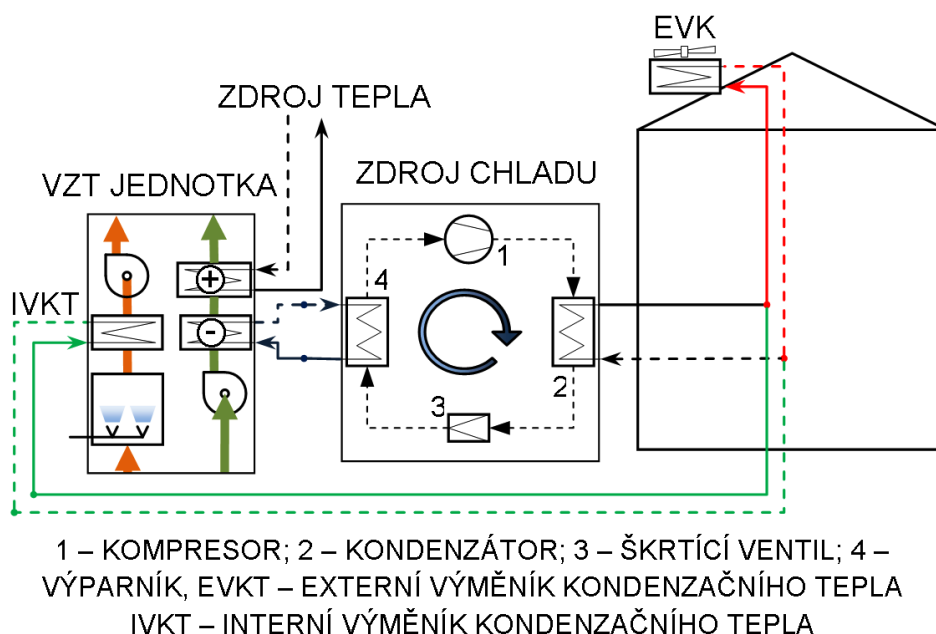
Aby bylo možné stanovit přínos modelovaného absorbéru, při provozu v dynamicky se měnících podmínkách. Bylo využito modulárního simulačního programu TRNSYS (TRaNsient System Simulation program), který je vhodný pro analýzu energetických systémů budov a jejich chování. Jako vzor pro model budovy byla vybrána jedna ze stávajících budov areálu VUT v Brně. Na této budově pak byl simulován přínos jednotlivých způsobů chlazení. Aby bylo možné do simulace zahrnout uvažované střešní absorbéry, byly v aplikaci Excel vytvořeny surogační modely absorbéru jak pro denní tak pro noční režim. Tento model byl vytvořen v Excelu pomocí makra zapsaného v jazyce Visual Basic for Applications (VBA) a následně propojen s TRNSYSem pomocí systémové komponenty umožňující komunikaci s aplikací Excel.

5 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

5.1 OPTIMALIZACE VÝROBY CHLADU ZA POMOCI ADIABATICKÉHO CHLAZENÍ

Navrhované řešení využívá jednoho ze základních principů nízkoenergetického chlazení, a to přímého vypařovacího chlazení (přímé adiabatické chlazení). Funkce systému spočívá ve vřazení kondenzátoru zdroje chladu do proudu odpadního vzduchu. Tento vzduch je sám o sobě chladnější než vzduch v exteriéru a k jeho dalšímu ochlazení je využíváno adiabatického vlhčení vzduchu. Odpadní vzduch je vlhčen téměř na mez nasycení a tím se sníží jeho teplota cca na 20 °C. Tato teplota nám dovolí snížit kondenzační teplotu zdroje chladu ze 46 °C při použití venkovního kondenzátoru až na 34 °C. Díky snížení kondenzační teploty o 12 K se zvyšuje chladicí faktor zdroje chladu a tím klesají náklady na výrobu chladu. Principiální schéma viz Obr. 8.

Podle prvních teoretických výpočtů bylo možné takto dosáhnout úspory na výrobě chladu, až 40 % viz [A9] Pro ověření těchto teoreticky dosažitelných úspor bylo provedeno několik laboratorních měření systému jako celku. Při prvním experimentálním měření, kdy bylo nutné dopočítávat hodnoty příkonu zdroje chladu, vycházela finanční úspora přibližně 20%, podrobněji viz [A10]. Nově byl v laboratoři instalován systém měření elektrického příkonu zdroje chladu a tímto byla provedena další měření, které daly ještě přesnější představu o změně příkonu kompresoru při změnách podmínek pro odvodu kondenzačního tepla a tím i o skutečné finanční úspoře na výrobu chladu, při tomto měření bylo dosaženo 19% úspory nákladů na výrobu chladu, podrobněji viz [A12].



Obr. 8 – Optimalizace odvodu kondenzačního tepla

5.2 OPTIMALIZACE PROVOZU ADIABATICKÉ PRAČKY VZDUCHU

Práce se zabývá hledáním optimálního nastavení tlaku vody přiváděné do trysek adiabatické pračky vzduchu. Adiabatická pračka vzduchu pracuje v proudu odpadního vzduchu a snižuje jeho teplotu. Takto upravený vzduch je poté využíván k odvodu kondenzačního tepla chladicího stroje. Zjednodušeně lze říct, že čím chladnější vzduch kondenzační teplo odvádí, tím nižší jsou náklady na provoz zdroje chladu. Optimalizace pračky vzduchu tedy spočívá v porovnání nákladů na vlhčení odpadního vzduchu s úsporou na výrobě chladu.

Měřením bylo stanoveno, jak závisí průtok, ochlazení a účinnost pračky vzduchu na tlaku vody přiváděné do trysek. Díky těmto naměřeným hodnotám bylo možné vyčíslit náklady na provoz pračky vzduchu a dopočítat úsporu na příkonu kompresoru zdroje chladu docílené snížením kondenzační teploty.

Výše uvedené porovnání bylo provedeno na třech možných zapojeních pračky vzduchu:

- Pračka vzduchu pracuje bez cirkulace (v současné době odpovídá zapojení v laboratoři).
- Pračka vzduchu s cirkulací.
- Pračky vzduchu s cirkulací a využitím dešťové vody.

Jak se dalo očekávat první varianta zapojení je velmi neekonomická. Sice dojde ke snížení teploty vzduchu a tím i k úspoře na příkonu kompresoru, ale při množství rozprášené vody cca 60 l/h a podílu odpařené vody kolem 7 % náklady na provoz pračky výrazně převyšují dosaženou úsporu již při minimální tlaku vody. Hodnocení nezlepšuje ani fakt, že u této varianty může pračka vzduchu pracovat s tlakem vody ve vodovodním řádu a nepotřebuje čerpadlo. Toto řešení tedy rozhodně nelze doporučit.

U varianty druhé došlo díky cirkulaci k výrazné úspoře nákladů za vodu, nicméně k provozu je zapotřebí čerpadlo, které navyšuje provozní náklady. I přesto je u této varianty dosaženo jisté, i když malé úspory. Výše ušetřených provozních nákladů je však tak nízká, že je nereálný návrat pořizovacích nákladů. Provozování tohoto systému tedy nelze doporučit při žádném tlaku v posuzovaném rozsahu.

Třetí varianta oproti předchozí využívá k vlhčení dešťovou vodu, což znamená nemalou úsporu na provozních nákladech pračky vzduchu. Takže na rozdíl od předchozích dvou variant má toto řešení potenciál k výraznějšímu snížení nákladů na výrobu chladu. Z měření je zřejmé, že je výhodné pračku vzduchu provozovat s nejvyšším provozním tlakem.

Vzhledem k tomu, že měření zkoumalo pouze jeden z mnoha faktorů ovlivňující efektivitu tohoto systému, nelze vyvodit přesné ekonomické hodnocení. Práce však dává dobrou představu o potenciálu jednotlivých variant a napovídá kam směřovat další navazující výzkum.

5.3 VYUŽITÍ SOLÁRNÍHO ABSORBÉRU V PODMÍNKÁCH ČR

Pro podrobnější zkoumání v rámci této disertační práce byl zvolen systém odvodu tepelné zátěže sáláním proti noční obloze pomocí nezakrytého lehkého absorbéru. Tento systém byl zvolen na základě rešeršní činnosti shrnuté v kapitole 2 zejména proto, že:

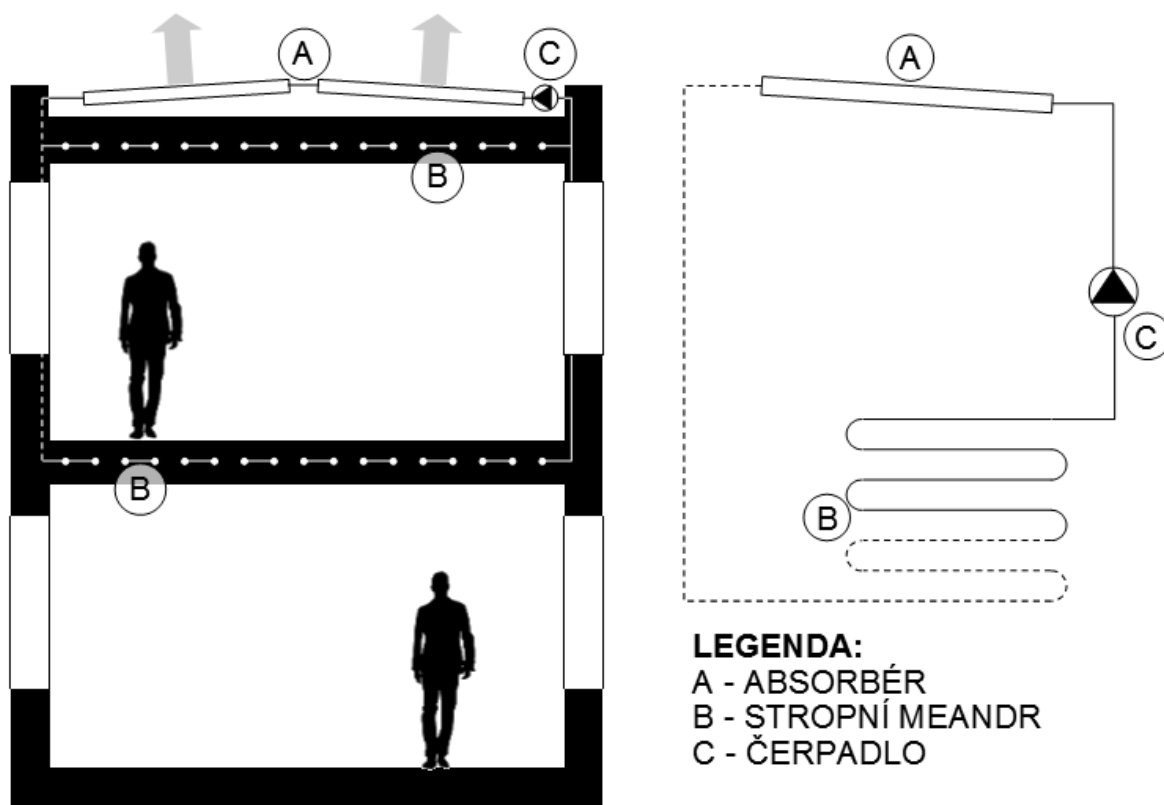
- dosahuje zajímavých výkonových výsledků
- je lehce aplikovatelný na moderní stavby, aniž by příliš omezoval jejich vzhled a konstrukci
- v ČR není na rozdíl od jiných způsobů nočního chlazení dosud používán
- nejsou dostupné výkonové parametry pro klimatické podmínky ČR

5.3.1 Princip systému se solárním absorbérem

Systém se solárními absorbéry využívá k transportu tepelné energie nahromaděné v budově během denního provozu vodní okruh. Na jedné straně voda jako teplotnosné médium odebírá teplo ze stavby a na druhé straně ho odevzdává absorbérům. Tyto absorbéry pak předané teplo vyzařují proti noční obloze. Vzhledem k tomu, že jsou absorbéry během noci v podstatě vysokoteplotním zdrojem chladu. Přímou nabídkou využít k odvodu tepelné zátěže z budovy tepelně aktivované masivní konstrukce. Jsou to právě masivní stavební konstrukce, které díky vlastní vysoké akumulaci schopnosti absorbují nemalou část denní tepelné zátěže. V praxi jsou nejrozšířenější systémy aktivace betonového jádra instalované do železobetonových stropních konstrukcí. Tento systém nachází uplatnění převážně u větších staveb občanského vybavení. V menší míře je pak aplikován u bytové výstavby.

Pro účely dalšího zkoumání potenciálu střešních absorbérů byl zvolen systém s aktivací betonového jádra stropních konstrukcí. Schéma zapojení systému je na Obr. 9, na střeše objektu je umístěna sestava absorbérů

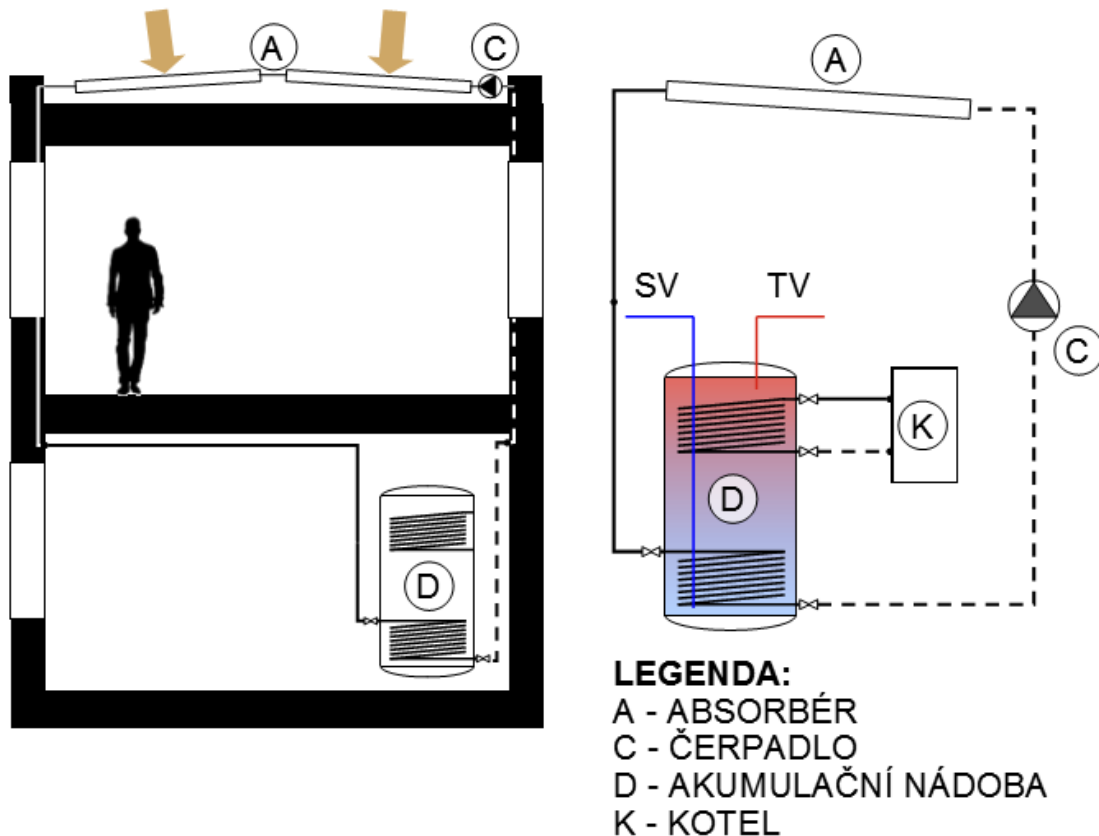
orientovaných vzhůru, tak aby mohly bez překážky vyzařovat proti noční obloze. Tyto absorbéry jsou potom potrubím propojeny se systémem aktivace betonového jádra umístěným ve stropní konstrukci. Jako teplotonosné médium slouží voda a oběh vody v celém systému zajišťuje oběhové čerpadlo. Chlad získaný během noci pomocí střešních absorbérů je ukládán do akumulační hmoty stropních konstrukcí. Tyto konstrukce pak během dne absorbují tepelné zisky. Množství tepla, které jsou tyto konstrukce schopny pojmout, závisí na míře podchlazení konstrukce během předešlé noci.



Obr. 9 – Schéma využití střešních absorbérů – noční provoz

Využití během denních hodin

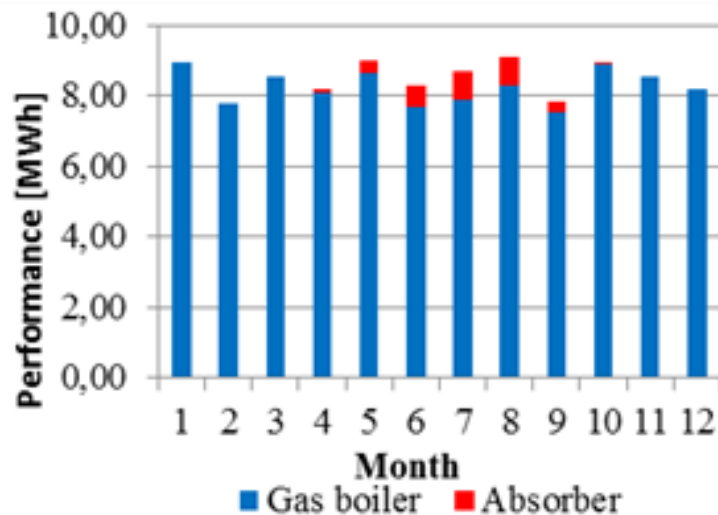
Protože primárním cílem absorbéru je odvod tepla během nočních hodin, není zařízení optimalizováno pro získávání tepelné energie. Oproti solárním kolektorům není bráněno ztrátám tepla konvekcí, které jsou během nočního provozu zařízením žádoucí. Systém tedy nemůže konkurovat moderním solárním kolektorům a ani si to neklade za cíl. Přesto se v době vysokých solárních zisků mohou absorbéry stát nezanedbatelným bivalentním zdrojem tepla např. pro ohřev teplé vody, viz Obr. 10. Konkrétní zapojení je závislé na velikosti odběru teplé vody a rozložení odběru během denního provozu. Vzhledem k velkým tepelným ztrátám neizolovaných absorbérů je žádoucí, aby do absorbéru proudila co nejchladnější voda. U aplikací s vysokým odběrem vody, jako například stravovací provozy by bylo možné zapojit střešní absorbéry na výměník, který by sloužil jako předehřev teplé vody. Nebo použít dvě nádrže jednu určenou pro předehřev pomocí střešních absorbérů a druhou určenou na dohřev vody



Obr. 10 – Schéma využití střešních absorbérů – denní provoz

Výpočet denního provozu byl proveden pro celý typický rok. Z výsledků simulace byly stanoveny tepelné výkony panelových polí, tepelného výměníku a plynového kotle. Z výsledků vyplývá, že za daných klimatických podmínek střední Evropy je možné tyto hybridní panely využívat pro předehřev teplé vody s průměrnou roční provozní účinností 55 %. Průměrná účinnost tepelného výměníku byla spočítána na 90.2 %.

Obr. 11 pojednává o kombinovaném pokrytí potřeby tepla solárním zdrojem, který sdílí teplo přes stěny výměníku do studené vody a plynovým kotlem, jenž dohřívá vodu v akumulacím zásobníku. Ukázalo se, že použití solárního systému v letním období - od začátku května do konce září – dodá do zásobníku 2.83 MWh, což činí 7.1 % celkové potřeby tepla a ohřev teplé vody. Nejvyšší tepelný výkon panelů byl zaznamenán v měsíci červenec, kdy solární zařízení pokrylo 10 % potřeby tepla na ohřev teplé vody a denně dodalo do zásobníku průměrně 0.026 MWh. Výsledky dále ukázaly, že mimo stanovené letní období jsou panely pro předehřev teplé vody nefunkční.



Obr. 11 - Pokrytí potřeby tepla

5.4 POROVNÁNÍ VARIANT SYSTÉMŮ NOČNÍHO CHLAZENÍ

Porovnání systémů nočního chlazení bylo provedeno na zmiňovaném modelu kancelářské budovy. Půdorys viz Obr. 12.

Multizónový model budovy byl vytvořen pomocí modulu TRNBuild, který umožňuje vytvoření matematického modelu stavby. Byly zde definovány parametry jednotlivých, skladeb konstrukcí a oken ohraničujících řešenou zónu.

Vnější vlivy na stavbu

K eliminaci tepelných zátěží z venkovního prostředí jsou okna osazena venkovními žaluziemi. Konstrukčně se jedná o železobetonový skelet, který je vyzdívaný plynosilikátovými tvárnici. Parametry vnějšího prostředí jsou dány souborem klimatických dat Meteonorm pro Brno a reprezentují typický meteorologický rok.

Vnitřní vlivy na stavbu

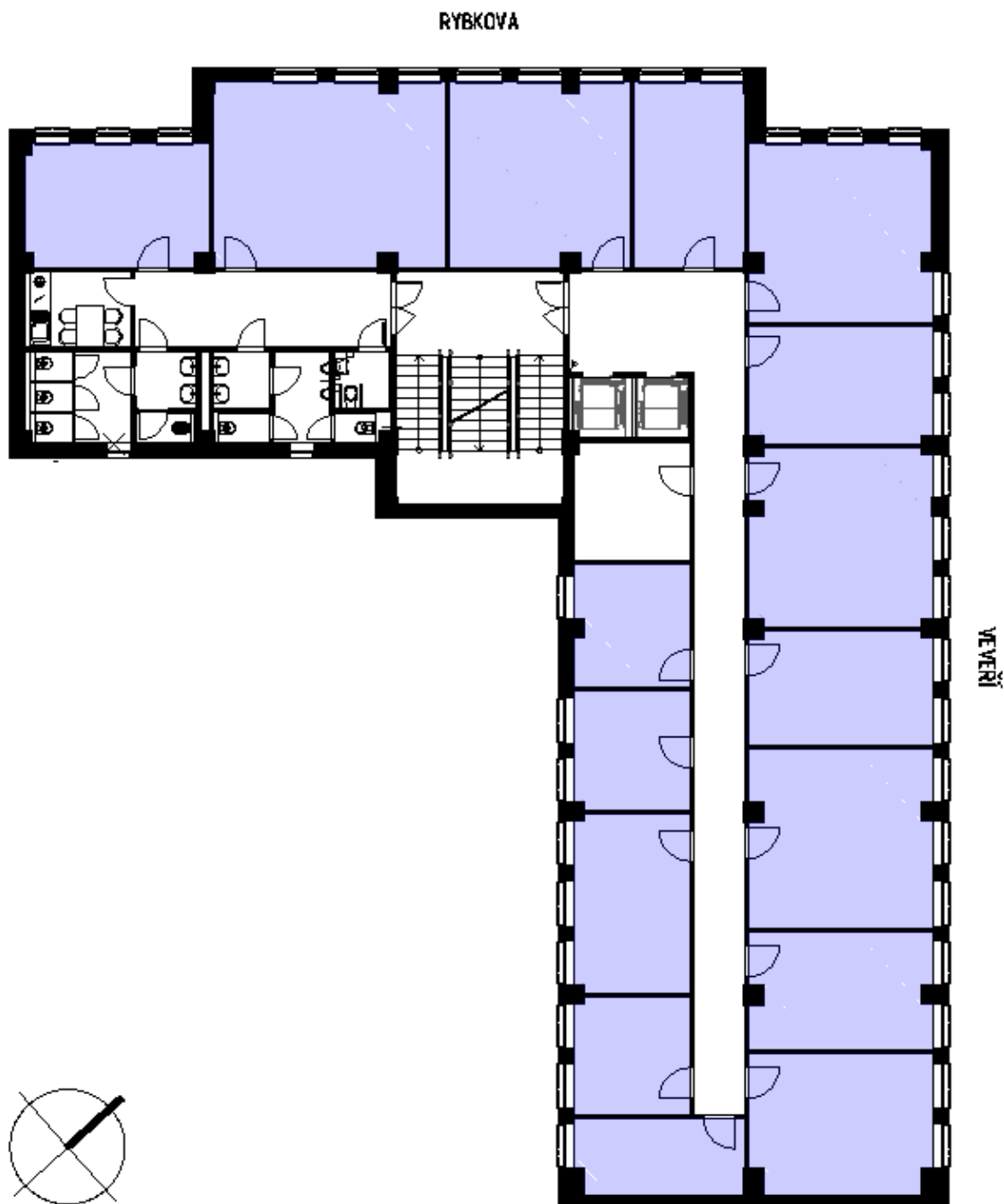
V celé administrativní části budovy, což je 6 pater, se při obsazenosti 8 m² na osobu uvažuje s 260 osobami. Systém vzduchotechniky tedy musí zajistit nominální průtok vzduchu pro budovu 13 000 m³/h. Systém bude mít účinnost zpětného získávání tepla 80 % a spotřebu elektrické energie 0,45 Wh/m³.

Systém aktivace betonového jádra monolitické stropní konstrukce

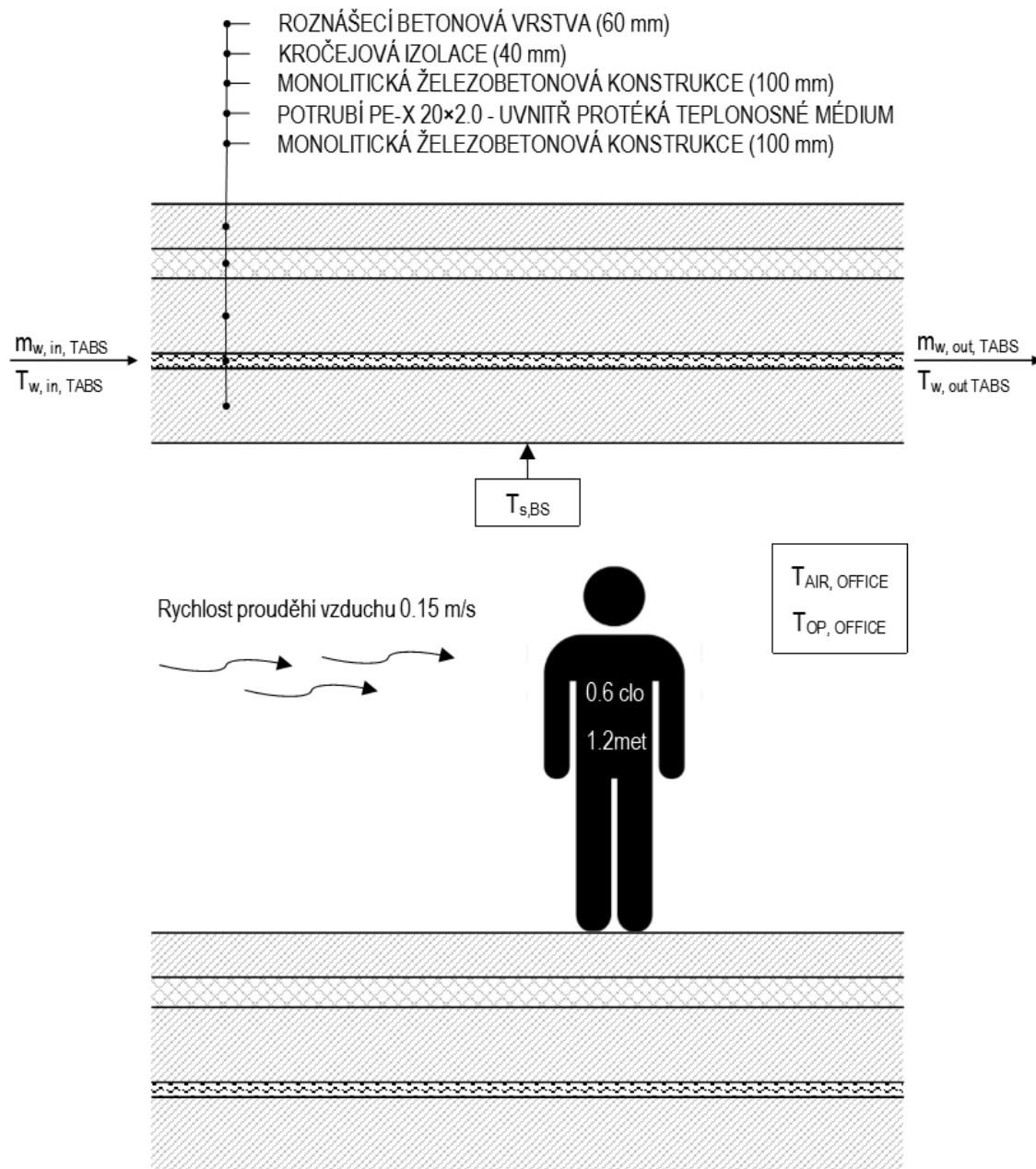
Pro odvod tepelné zátěže z uvažovaných prostor je uvažováno se systémem aktivace betonového jádra. Jedná o systém s výraznou akumulační schopností chladu v masivní stropní konstrukci. Teplo je z hmoty stropní konstrukce odebíráno pomocí vodního kruhu umístěného ve středu stropní konstrukce. Malé rozteče potrubí používané při aktivaci betonového jádra umožňují akumulovat do konstrukce větší množství energie získané při nočním chlazení. Vzhledem k tomu, že použitý simulační software TRNSYS implicitně neumožňuje simulovat vnitřně chlazenou stropní konstrukci s proměnnými vstupními hodnotami. Bylo nutné najít způsob jak tento prvek do simulace zahrnout. Na Obr. 13 je zjednodušený řez kanceláří s vyznačenými vstupními a výstupními veličinami uvažovanými v simulaci.

Potrubí, které ve středu stropní desky zajišťuje distribuci chladu do hmoty stropu, bylo nahrazeno fiktivní tepelnou zónou, tato zóna reprezentuje aktivní vrstvu chlazeného stropu. Objem a kapacita této zóny odpovídá

objemu a kapacitě vody, která by byla ve skutečnosti ve stropní konstrukci obsažena. Průtok vody touto vrstvou byl nahrazen průtokem větracího vzduchu, který má výstupní teplotu ze solárních absorbérů. Parametry jako rychlost proudění, tepelná kapacita a koeficient přestupu tepla z proudu vzduchu byly nastaveny tak, aby odpovídaly parametrům toku chladicí vody.



Obr. 12 – Typické podlaží referenční budovy – administrativní podlaží



Obr. 13 – Zjednodušený řez kanceláří

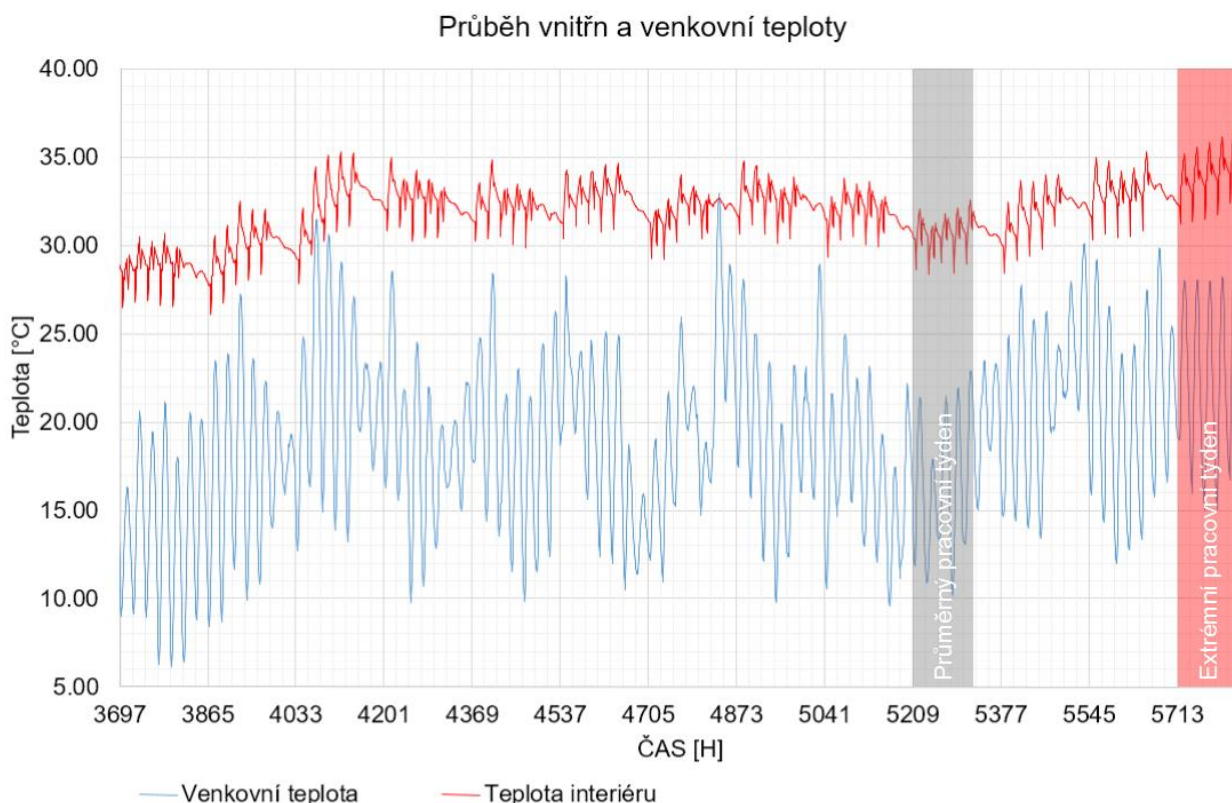
Hodnocené varianty systémů

Pro porovnání bylo provedeno celkem 6 simulací různých systémů. Simulace byly prováděny pro sledované období červen ÷ srpen.

Jednotlivé varianty systémů

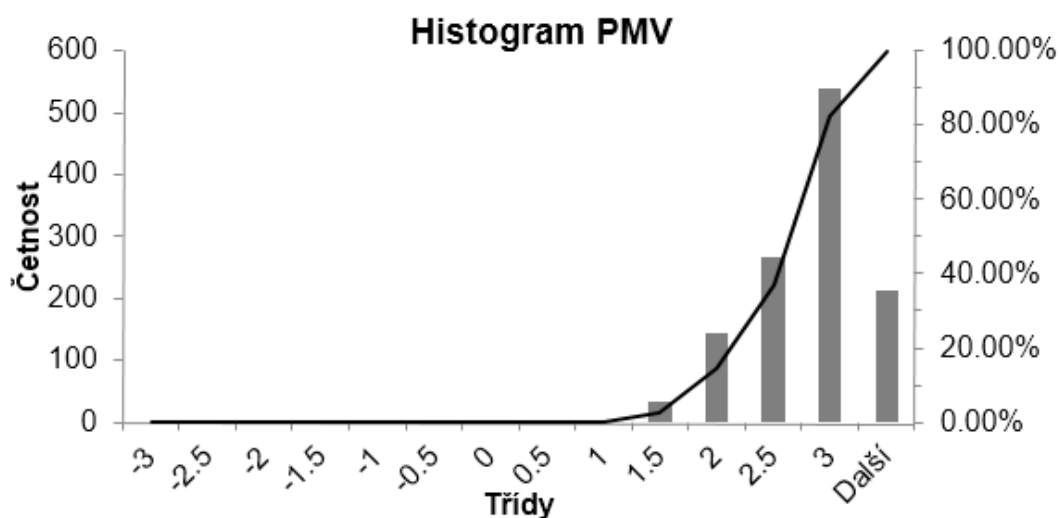
- I. Budova bez chlazení s řízeným větráním pouze v provozní době.
- II. Budova bez chlazení, s řízeným větráním v provozní i noční době.
- III. Budova se strojním chlazením a řízeným větráním v provozní době.
- IV. Budova se strojním chlazením a řízeným větráním v provozní i noční době.
- V. Budova se strojním chlazením, řízeným větráním v provozní době a nočním chlazením absorbéry.
- VI. Budova se strojním chlazením, řízeným větráním v provozní i noční době a nočním chlazením absorbéry.

Na Obr. 14 je vidět průběh venkovních a vnitřních teplot za celé sledované období (červen ÷ srpen). Jedná se o průběhy teplot u budovy, která nemá osazený systém klimatizace, a vidíme, že po celé sledované období se pohybujeme v pásmu nekomfortních vnitřních teplot.

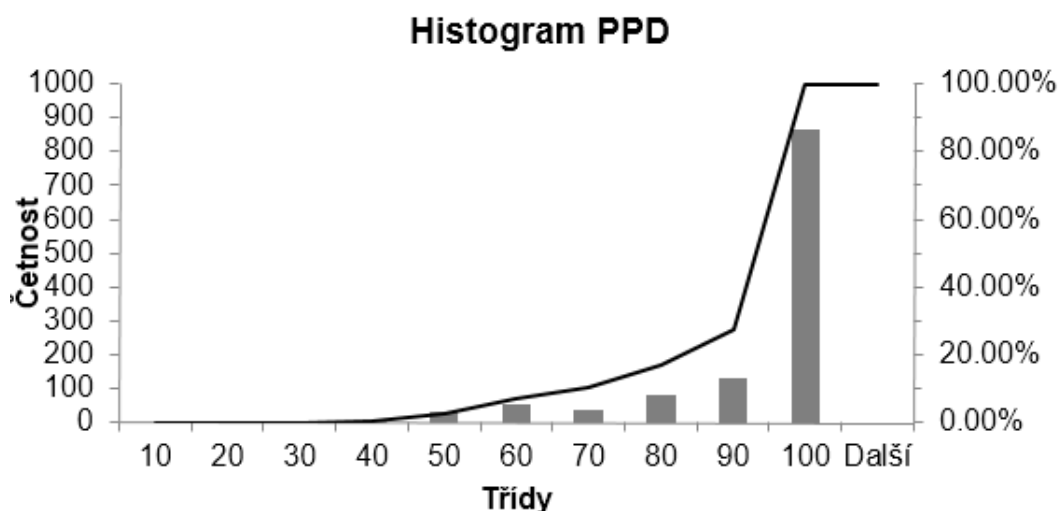


Obr. 14 – Průběh vnitřní a venkovní teploty

Neuspokojivý stav vnitřního prostředí dokládají i indexy PMV viz Obr. 15 a PPD viz Obr. 16. Hodnocení podle subjektivního tepelného pocitu (PMV) je většina pracovní doby v hodnoceném 3. měsíčním období nad hranicí 2 což vyjadřuje pocit tepla. Stejně tak hodnocení podle predikovaného procenta nespokojených (PPD) je vidět, že významná část pracovní doby ve sledovaném období je pro většinu uživatelů nevyhovující cca 70% pracovní doby generuje tepelná pohoda 100% nespokojených uživatelů.



Obr. 15 – Histogram PMV



Obr. 16 – Histogram PPD

Z výše uvedených výsledků simulace je patrné, že bez systému klimatizace nelze dosáhnout komfortního pracovního prostředí.

Další simulace měla ukázat, jaký vliv na denní klima v sledovaném prostoru bude mít provozování nočního chlazení. Došlo sice ke snížení maximálních vnitřních teplot o cca 2 ÷ 3 K, ale pro posun do pásma komfortní tepelné pohody tento způsob alternativního chlazení nestačí. Je však otázkou jaký bude mít přínos kombinace systémů nočního chlazení se strojním chlazením vzhledem k nákladům na výrobu chladu.

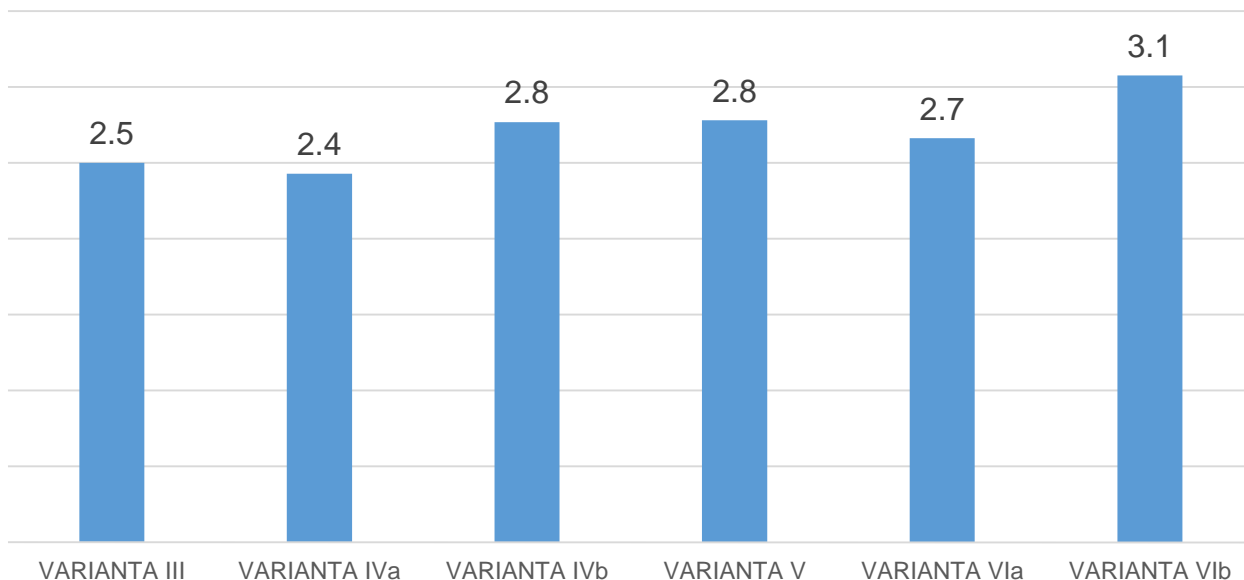
Jako referenční stav byla tedy provedena simulace, kdy byla budova plně chlazena na požadovanou teplotu 25 °C. Ze simulace můžeme vyčíst, že udržení požadované prostorové teploty v kancelářích v celé budově po dobu sledovaných 3. měsíců potřebujeme vyrobit cca 32 MWh chladu a špičkový odběr chladu je cca 74 kW. Pokud budeme uvažovat například s instalací VRV systému s celkovým chladicím faktorem EER 2,5 viz [14] vyjde nám spotřeba elektrické energie potřebné pro provoz klimatizace na cca 12,8 MWh. Je tedy potřeba počítat s nemalou investicí do instalace systému klimatizace i do jejího provozu, který se bude v závislosti na smluvní ceně elektřiny pohybovat kolem 55 000 Kč na sledované období červen ÷ srpen.

Byly tedy provedeny další simulace, které zkoumaly kombinace systémů nočního chlazení a jejich vliv na denní spotřebu chladu. Výsledky jednotlivých simulací souhrnně uvádí Tabulka 1 – Porovnání variant Tabulka 1. V tabulce jsou vyčísleny spotřeby energií jak pro systém strojní výroby chladu, tak pro systém nočního chlazení. Z těchto hodnot jsou pak stanoveny celkové účinnosti jednotlivých systémů a jejich kombinací.

Tabulka 1 – Porovnání variant

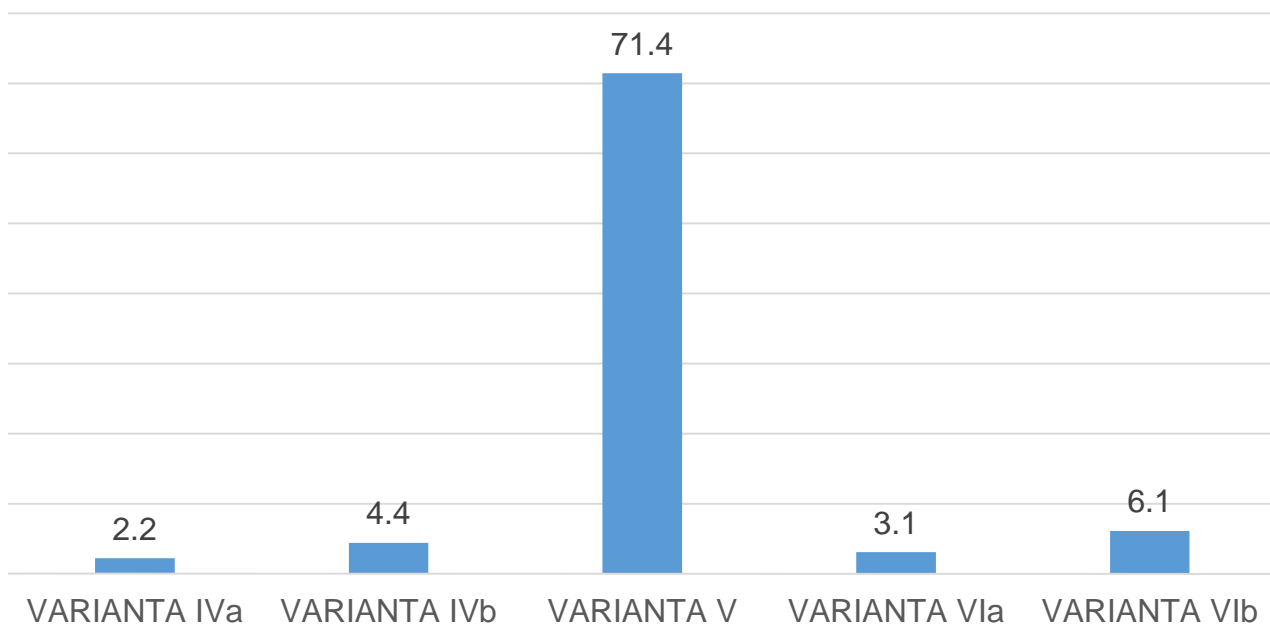
Varianta	Vyroběný chlad	Velikost zdroje chladu	Příkon zdroje chladu	Chlad vyrobený nočním chlazením	Provoz ventilátorů	Provoz čerpadla absorberů	Celková spotřeba systému	COP nočního chlazení	COP celého systému
III jen strojní chlazení	31 958 kWh	74 kWh	12 783 kWh	0 kWh	0 kWh	0 kWh	12 783 kWh	-	2.5
IVa strojní chlazení, rovnotlaké noční větrání	24 819 kWh	65 kWh	9 928 kWh	7 138 kWh	3 229 kWh	0 kWh	13 157 kWh	2.2	2.4
IVb strojní chlazení, podtlakové noční větrání	24 819 kWh	65 kWh	9 928 kWh	7 138 kWh	1 615 kWh	0 kWh	11 542 kWh	4.4	2.8
V Strojní chlazení, střešní absorberů	28 614 kWh	74 kWh	11 446 kWh	3 344 kWh	0 kWh	47 kWh	11 492 kWh	71.4	2.8
Via strojní chlazení, rovnotlaké noční větrání, střešní absorberů	21 849 kWh	65 kWh	8 740 kWh	10 108 kWh	3 229 kWh	39 kWh	12 008 kWh	3.1	2.7
Vib strojní chlazení, podtlakové noční větrání, střešní absorberů	21 849 kWh	65 kWh	8 740 kWh	10 108 kWh	1 615 kWh	39 kWh	10 393 kWh	6.1	3.1

Na Obr. 17 můžeme vidět porovnání jednotlivých variant z hlediska celkové účinnosti. Varianta rovnotlakého nočního větrání přesto, že odvede nejvíce tepla, díky vysoké spotřebě energie systém jen znevýhodňuje. Lze o ní uvažovat spíš jen jako o systému pro mírné zlepšení interiérového mikroklimatu v budovách, kde je systém řízeného větrání, ale nemají systém strojního chlazení. V podstatě srovnatelné jsou varianty podtlakového nočního větrání a odvodu tepla pomocí střešních absorbérů. Pokud by se ovšem využili absorbéry i pro denní ohřev vody zvrátila by se bilance ve prospěch absorbérů. Nejvýhodnější je pak varianta s nočním přirozeným větráním v kombinaci se střešními absorbéry, která přináší nejvyšší úsporu a tím pádem vykazuje i nejvyšší účinnost.



Obr. 17 – Účinnost celého systému

Pokud se zaměříme pouze na systém nočního chlazení a jeho účinnost Obr. 18. Vidíme, že systém se střešními absorbéry má vzhledem k malé spotřebě provozní energie jasnou převahu nad ostatními systémy.



Obr. 18 – Účinnost nočního chlazení

6 ZÁVĚR DISERTAČNÍ PRÁCE

Experimentální i teoretický výzkum byl zaměřen na systémy umožňující snížení energetické náročnosti chladicích systémů budov. Byla zkoumána jak možnost optimalizovat standardní zdroj chladu zlepšením jeho pracovních podmínek, tak snížením potřeby chladu pomocí nočního chlazení objektu. Oba dva způsoby využívají v maximální míře s obnovitelnými zdroji energie.

Jak teoretický tak experimentální výzkum jednotlivých způsobů ukázal na potenciál k úsporám na výrobě chladu. Systém odvodu kondenzačního tepla do adiabaticky navlhčeného vzduchu je, umožňuje úsporu provozních nákladů zdroje chladu snížením příkonu kompresoru, kterého je dosaženo snížením kondenzační teploty. Tato modifikace výroby chladu tedy umožňuje zvýšit účinnost zdroje chladu a tím i náklady na jeho provoz o cca 20 %. Tento způsob výroby chladu je ovšem aplikovatelný převážně u objektů s menšími nároky na chladicí výkon. Proto je ideální kombinovat takový zdroj s dalšími technikami pro snížení potřeby chladu.

Další část výzkumu tedy byla zaměřena na redukci tepelné zátěže pomocí systémů nočního chlazení. I zde byla snaha vybrat netradiční řešení s minimálními nároky na spotřebu energií. Po zhodnocení současného stavu poznání v oblasti nočního chlazení byl vybrán způsob nočního chlazení, který využívá vysávání tepelné zátěže budovy proti noční obloze. Z dostupných informací byl vyhodnocen jako potenciálně nevýhodnější systém s lehkými střešními absorbéry. Jedná se o systém, který není v podmínkách České republiky využíván a o to zajímavější bylo zaměřit se na jeho aplikovatelnost v našich klimatických podmínkách.

Pomocí simulací samotného absorbéru i dynamických simulací chování celé budovy včetně systémů TZB, byl zkoumán přínos této metody ke snížení tepelné zátěže administrativní budovy. Zkoumané řešení s absorbéry bylo následně konfrontováno s u nás nejrozšířenějším systémem nočního chlazení pomocí nočního větrání. Systém nočního větrání sice vykazuje vyšší množství odvedeného tepla, ale z provozního hlediska je extrémně energeticky náročné. V případě, že se k nočnímu větrání využije VZT jednotka, která během noci přivádí i odvádí vzduch je výsledná bilance systému horší. Účinnost systému nočního větrání COP 2,2 je tak nižší než účinnost samotného zdroje chladu. Naproti tomu systém odvodu tepelné zátěže pomocí střešních absorbérů umožňuje odvod přibližně polovičního množství tepla, ale náklady na provoz zařízení jsou minimální. Během nočního provozu pak systém vykazuje extrémně vysokou účinnost COP 71,4. Celý systém se střešními absorbéry pak vykazuje více jak 10 % úsporu potřebné chladicí energie. Nespornou výhodou je i možnost využití systému pro denní provoz, kdy je v absorbérech možné přehřívát teplou vodu.

Z hlediska celkového přínosu nočního chlazení jako podpůrného systému chlazení je systém se střešními absorbéry výhodnější volbou.

6.1 VÝZNAM PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU

Práce rozšiřuje poznání v oblasti optimalizace chlazení budov pomocí alternativních technik chlazení a nočního chlazení budov s využitím ekologických obnovitelných zdrojů. Práce je přínosná pro rozvoj počítačových simulací tepelného chování budov a jejich systémů. V rámci práce byly pomocí simulací vytvořeny surogační modely střešního absorbéru pro režim odvodu tepla a režim ohřevu vody, které je možné dále využít pro dynamické simulace chování systémů.

6.2 VÝZNAM PRO PRAXI

Výsledky předkládané v této práci mají přímý i nepřímý dopad na praxi spočívající ve vytvoření surogačních modelů střešních absorbérů, které umožní provádět již v přípravných fázích projektu bilance spotřeb energií se zahrnutím prezentovaného způsobu odvodu tepelné zátěže nočním chlazením. Práce prezentuje alternativní způsob nočního chlazení, který není v České republice používán. Tento způsob nočního chlazení je pak srovnán se systémem řízeného nočního větrání a je vyhodnocen potenciál nové metody.

7 LITERATURA

- [1] Key World Energy Statistics. In: International Energy Agency [online]. [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/keyworld2014.pdf>
- [2] United States Department of Energy, Buildings Energy Data Book, 2011, <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov>.
- [3] Thibault Péan; Luca Gennari; Bjarne W. Olesen; Ongun Berk Kazanci. Nighttime radiative cooling potential of unglazed and PV/T solar collectors: parametric and experimental analyses, In: CLIMAMED 2015 - The 8th Mediterranean Congress of Heating, Ventilation and Air-Conditioning, At Juan-les-Pins, France
- [4] GIVONI, Baruch. Passive and low energy cooling of buildings. New York: Wiley, 1994, s. 53 - 55. ISBN 978-0-471-28473-4.
- [5] CHYSKÝ, Jaroslav a Karel HEMZAL. Větrání a klimatizace: Technický průvodce. 3., zcela přeprac. vyd. Brno: BOLIT-B Press, 1993, s. 146. ISBN 80-901574-0-8.
- [6] Olsen E.L.; Chen, Q.Y. (2003) Energy consumption and comfort analysis for different low-energy cooling systems in a mild climate, Energy and Buildings, Volume 35, Issue 6, July 2003, Pages 560-571, Elsevier.
- [7] Todorovič M. (2007) Optimization of air-conditioning system energy consumption by applying night ventilation, PhD thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade.
- [8] PROMMAJAK, Treeamorn, Jindaporn PHONRUKSA a Surajitr PRAMUANG. *Passive Cooling of Air at Night by the Nocturnal Radiation in Loei, Thailand* [online]. School of Renewable Energy Technology, Naresuan University, 2008, 8 s. [cit. 2016-01-17]. Dostupné z: [http://www.sert.nu.ac.th/IIRE/V3N1\(4\).pdf](http://www.sert.nu.ac.th/IIRE/V3N1(4).pdf)
- [9] TEVAR, J.A.Ferrer, S. S. CASTAÑO, A. Garrido MARIJUÁN, M.R. HERAS a J. PISTONO. Modelling and experimental analysis of three radioconvective panels for night cooling. In: *Energy and Buildings: an international journal devoted to investigations of energy use and efficiency in buildings*. 2015. Amsterdam: Elsevier B.V., s. 37-48. ISBN 0378-7788. ISSN 0378-7788. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815301377>
- [10] Mihalakakou, G., Ferrante, A., Lewis, J. O. (1998), THE COOLING POTENTIAL OF A METALIC NOCTURNAL RADIATOR,
- [11] Orel, B., Klanjšek Gunde, M., Krainer, A. (1993), RADIATIVE COOLING EFFICIENCY OF WHITE PIGMENT PAINTS
- [12] Bagiogras, H. S., Mihalakakou, G. (2007), EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF A NOCTURNAL RADIATOR FOR SPACE COOLING.
- [13] Schéma nepřímého adiabatického chlazení. In: Energy efficiency center [online]. ZAE BAYERN [vid 17. 01. 2016]. Dostupné z <http://www.energy-efficiency-center.de/en/Innovations/Passive%20Infrared%20Cooling>
- [14] Tajzlarová, L., Lain, M., (vedoucí práce) Projekt klimatizace administrativní budovy, Diplomová práce ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2009

8 SEZNAM AUTOROVÝCH PRACÍ

- [A1] ŠÍMA, J. OPTIMALIZACE ADIABATICKÉ PRAČKY VZDUCHU. In *SBORNÍK ANOTACÍ KONFERENCE JUNIORSTAV 2009*. Purkyňova 95a, 612 00 Brno, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2009. p. 84 - 92. ISBN 978-80-214-3810-1.
- [A2] ŠÍMA, J.; ŠIKULA, O. Teoretický výpočet výkonu střešních absorbérů. In *Zborník prednášok z 18. medzinárodnej konferencie VYKUROVANIE 2010 na tému Energetická efektívnosť systémov výroby, distribúcie a odovzdávania tepla pri príležitosti roku Aurela Stodolu na STU*. 1014. Bratislava, SSTP Bratislava. 2010. p. 343 - 346. ISBN 978-80-89216-32-1.
- [A3] ŠÍMA, J. Teoretický výpočet výkonu střešních absorbérů. In *SBORNÍK ANOTACÍ KONFERENCE JUNIORSTAV 2010*. Veverí 331/95, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2010. (4 p.). ISBN 978-80-214-4042-5.
- [A4] ŠÍMA, J. ODVOD TEPELNÉ ZÁTĚŽE SÁLÁNÍM PROTI NOČNÍ OBLOZE. In *Budovy a prostředí 2010*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2010. p. 140 - 143. ISBN 978-80-214-4155-2.
- [A5] ŠIKULA, O.; ŠÍMA, J. Teoretické zhodnocení chlazení sáláním proti noční obloze v podmínkách ČR. *TZB-info*. 2010. 2010(12). p. 1 - 8. ISSN 1801-4399.
- [A6] ŠÍMA, J. Theoretic calculation exploit of nocturnal absorber. In *Solaris 2011*. Brno, CERM Brno. 2011. p. 278 - 278. ISBN 978-80-214-4311-2.
- [A7] ŠÍMA, J.; ŠIKULA, O.; KOŠÚTOVÁ, K.; PLÁŠEK, J. Theoretical evaluation of night sky cooling in the Czech Republic. In *2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013)*. Proceedings of a meeting held 23-25 September 2013, Freiburg, Germany., Energy Procedia. Amsterdam, Elsevier. 2014. p. 645 - 653. ISBN 9781632663665, ISSN 1876-6102.
- [A8] ŠIKULA, O.; VOJKŮVKOVÁ, P.; ŠÍMA, J.; PLÁŠEK, J.; GEBAUER, G. Hybrid Roof Panels for Night Cooling and Solar Energy Utilization in Buildings. In *The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability – TMREES15*, Energy Procedia. Amsterdam, Elsevier. 2015. p. 177 - 183. ISSN 1876-6102.
- [A9] ŠÍMA, J.; ŠIKULA, O. Využití pračky vzduchu pro zefektivnění výroby chladu. *Topenářství*. 2008. 2008(8). p. 24 - 26. ISSN 1211-0906.
- [A10] ŠÍMA, J. ZEFEKTIVNĚNÍ VÝROBY CHLADU. In *SBORNÍK ANOTACÍ KONFERENCE JUNIORSTAV 2009*. Purkyňova 95a, 612 00 Brno, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2009. p. 90 - 109. ISBN 978-80-214-3810-1.
- [A11] ŠIKULA, O.; ŠÍMA, J. ODVOD KONDENZAČNÍHO TEPLA PŘI VÝROBĚ CHLADU. In *Budovy a prostředí 2010*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2010. p. 144 - 146. ISBN 978-80-214-4155-2.
- [A12] ŠIKULA, O.; ŠÍMA, J. Experimentální ověření možností odvodu kondenzačního tepla zdroje chladu. *TZB-info*. 2011. 2011(3). p. 1 - 6. ISSN 1801-4399.
- [A13] ŠÍMA, J. SOFTWAREOVÉ HODNOCENÍ KRITICKÝCH STAVEBNÍCH DETAILŮ. In *SBORNÍK ANOTACÍ KONFERENCE JUNIORSTAV 2010*. Veverí 331/95, 602 00 Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2011. (13 p.). ISBN 978-80-214-4042-5.
- [A14] ŠIKULA, O.; ŠÍMA, J.; ADAM, P.; HÁJKOVÁ, L. Vývoj a ověření tepelného a akustického výkonu FC. Brno, VUT v Brně. 2012. p. 1 - 13.

ŽIVOTOPIS

OSOBNÍ INFORMACE

Jméno, titul	JIŘÍ ŠÍMA, ING.
Adresa - trvalé bydliště	Vodárenská 10, 360 10 Karlovy Vary
přechodné bydliště	Veveří 127, 616 00 Brno
Telefon	+420 605 830 439
E-mail	sima.jiri@email.cz
Národnost	česká
Datum narození	29. 03. 1983

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

Období (od – do)	1/2015 – dosud
Jméno a adresa zaměstnavatele	Evora CZ, s.r.o.
Oblast podnikání nebo název odvětví	Technická zařízení budov
Dosažená pozice	Vedoucí projektant
Hlavní pracovní náplň a odpovědnost	- vzduchotechnika - vytápění - chlazení - ZTI

Období (od – do)	1/2008 – 12/2014
Jméno a adresa zaměstnavatele	KLIMAKOM, SPOL. S R.O.
Oblast podnikání nebo název odvětví	Technická zařízení budov
Dosažená pozice	Samostatný projektant
Hlavní pracovní náplň a odpovědnost	- vzduchotechnika - vytápění - chlazení

VZDĚLÁNÍ A KURZY

Období (od – do)	9/2008 – dosud
Název a typ organizace poskytující vzdělání či kurzy	VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Hlavní předměty/praktické dovednosti	Postgraduální studium - technická zařízení budov

Období (od – do)	2012
Název a typ organizace poskytující vzdělání či kurzy	ČESKÁ KOMORA AUTORIZOVANÝCH INŽENÝRŮ A TECHNIKŮ ČINNÝCH VE VÝSTAVBĚ
Obor	Autorizovaný inženýr pro techniku prostředí staveb, technická zařízení (IE01)

Období (od – do)	2003 – 2008
Název a typ organizace poskytující vzdělání či kurzy	VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Hlavní předměty/praktické dovednosti	Technická zařízení budov
Získaný titul	Ing.

Období (od – do)	1998 – 2002
Název a typ organizace poskytující vzdělání či kurzy	STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA LOKET
Hlavní předměty/praktické dovednosti	Technická zařízení budov
Získaný titul	Maturitní zkouška

OSOBNÍ SCHOPNOSTI A DOVEDNOSTI

MATEŘSKÝ JAZYK	Český jazyk
OSTATNÍ JAZYKY	Německý jazyk – pokročilý, pasivně Anglický jazyk – začátečník
POČÍTAČOVÉ ZNALOSTI A DOVEDNOSTI	- MS Office, Open Office - AutoCAD (2D, 3D), Revit, Solidworks, CADvent, ArchiCAD, SketchUP, Photoshop - Stavební fyzika – Svoboda software, TRNSYS, PROTECH, TechCON, CalA

DOPLŇUJÍCÍ INFORMACE

- 2008 – 1. místo ve fakultním kole SVOČ
téma – odvod kondenzačního tepla zdroje chladu
- 2008 – 2. místo v mezinárodním kole SVOČ
téma – odvod kondenzačního tepla zdroje chladu

Abstract

The PhD thesis deals with the theoretical evaluation of the potential use of night cooling techniques in condition of the Czech Republic. Mainly aims to evaluate the potential of night cooling, which uses the physical phenomenon of radiation against the night sky. This technique is widely used mainly in the dry and hot regions where there are the most suitable climatic conditions for this cooling method. The work is based on the current state of knowledge in the area of passive and low-energy cooling systems. These knowledges are applied to the conditions of Czech Republic and by using simulations of the energy, behaviour of the buildings explores the benefits in terms of improving of the internal microclimate and from the perspective of economy operation of conventional cooling equipment. In order to establish the benefits of night cooling on the operation of the building in the dynamically changing conditions, the modular simulation program TRNSYS was used, which is suitable for the analysis of energy systems of buildings and their behaviour. The results of simulation results were converted to thermal comfort parameters of the PMV and the PPD.